



**HAL**  
open science

**Comportements alimentaires et mobilité au Néolithique :  
Analyses biogéochimiques multi-proxies de restes  
bioarchéologiques de la vallée de l'Yonne (Ve millénaire  
av. J.-C., France)**

Léonie Rey

► **To cite this version:**

Léonie Rey. Comportements alimentaires et mobilité au Néolithique : Analyses biogéochimiques multi-proxies de restes bioarchéologiques de la vallée de l'Yonne (Ve millénaire av. J.-C., France). *Anthropologie biologique*. Université de Bordeaux, 2022. Français. NNT : 2022BORD0148 . tel-03909183

**HAL Id: tel-03909183**

**<https://theses.hal.science/tel-03909183v1>**

Submitted on 21 Dec 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE PRÉSENTÉE  
POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR DE  
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE Sciences et environnements  
SPÉCIALITÉ Anthropologie biologique

Par Léonie REY

---

**COMPORTEMENTS ALIMENTAIRES ET MOBILITÉ  
AU NÉOLITHIQUE**

**Analyses biogéochimiques multi-proxies de restes bioarchéologiques de la  
vallée de l'Yonne (Ve millénaire av. J.-C., France)**

**Volume 1 (Texte)**

---

Sous la direction de : Stéphane ROTTIER  
co-directrice : Gwenaëlle GOUDE

Soutenue le 14 avril 2022

Après avis de :

Mme BESSE Marie, Professeure, Université de Genève, Suisse  
Mme HERRSCHER Estelle, Directrice de recherche, CNRS Aix-en-Provence

Rapporteure  
Rapporteure

Membres du jury :

Mme CASTEX Dominique, Directrice de recherche, CNRS Bordeaux  
Mme BESSE Marie, Professeure, Université de Genève, Suisse  
Mme GOUDE Gwenaëlle, Chargée de recherche, CNRS Aix-en-Provence  
M. ROTTIER Stéphane, Maître de conférences, Université de Bordeaux  
M. BALTER Vincent, Directeur de recherche, CNRS Lyon  
M. CHAMBON Philippe, Directeur de recherche, CNRS Paris  
M. DEIESE Thibaut, Maître de conférences, Aix-Marseille Université  
Mme JAOUEN Klervia, Chargée de recherche, CNRS Toulouse

Présidente  
Rapporteure  
Directrice  
Directeur  
Examinateur  
Examinateur  
Examinateur  
Examinatrice



À mes parents

À Alex

*« Nous n'avons pas partagé notre vie entre le travail et la terre,  
notre travail c'est la terre, notre vie c'est la terre »*

Jean Giono

*Lettre aux paysans sur la pauvreté et la paix*



## Remerciements

Un immense merci va en tout premier lieu à mes directeurs de thèse, **Stéphane Rottier** et **Gwenaëlle Goude**, ainsi qu'à **Dominique Castex** que je compte également parmi eux compte tenu de son engagement administratif et personnel honoré jusqu'à la toute fin de cette thèse.

**Stéphane**, merci tout d'abord d'avoir permis la réalisation de ce travail, dont tu es à l'initiative par le biais du site archéologique de Gurgy. Je te remercie non seulement d'avoir dirigé ma thèse et mon mémoire, mais également avant cela de m'avoir encadrée en stage de Licence, où j'ai participé au recollage des crânes et à la DAO des squelettes de la collection de... Gurgy, déjà ! Long chemin parcouru donc, sur lequel je te suis sincèrement reconnaissante de m'avoir entraînée, toujours bien orientée, éclairée et inspirée. Merci pour toutes nos discussions passionnantes dans le but de comprendre le fonctionnement de ces sociétés et de Gurgy en particulier.

**Gwenaëlle**, merci pour ton soutien indéfectible et ta réactivité, ta disponibilité à toute épreuve et nos riches échanges, scientifiques ou non. Tu m'as formée et encadrée dès le mémoire de M2 « aux isotopes », tu as toujours répondu avec grande bienveillance à mes questions, tu m'as guidée, encouragée et secondée dans tous les pans de cette thèse, tu m'as accompagnée du premier flacon jusqu'au Japon (en passant par Lyon), physiquement, moralement et financièrement grâce à tes projets, ton dynamisme et ta générosité. Pour tout cela, merci !

**Dominique**, merci d'avoir été là, toi aussi bien avant le début de cette thèse puisque tu m'as offert moult opportunités de terrain et richesses scientifiques, j'y reviendrai, tu m'as inculqué les fondements de l'anthropologie et as su m'épauler même dans les situations personnelles les plus compliquées que j'ai traversées au cours de cette thèse.

Merci donc à tous les trois pour votre encadrement précieux, pour m'avoir soutenue et accompagnée durant toutes ces années, pour avoir cru en moi et m'avoir fait confiance.

Je souhaite également remercier sincèrement mes deux rapporteuses **Marie Besse** – merci d'avoir évalué en avant-première le manuscrit, permettant ainsi de relancer le processus administratif – et **Estelle Herrscher** – merci pour cet engagement de dernière minute –, ainsi que les membres du jury **Vincent Balter**, **Philippe Chambon**, **Thibaut Deviese** et **Klervia Jaouen** d'avoir accepté d'examiner ce travail et de l'améliorer. C'est un plaisir et un honneur que de bénéficier de votre expertise scientifique.

Puis, dans le désordre :

Je tiens à remercier **Philippe Chambon** pour son apport incontestable à ce travail. Merci de m'avoir confié l'étude biochimique d'une grande partie de ces collections, merci pour nos riches discussions et tes précieuses recommandations concernant les sites de la microrégion. Merci à **Nicolas Garmond** et **Jean-Gabriel Pariat** pour leur aide indispensable quant à la sélection des sujets de Beaumont, à la compréhension et à l'interprétation du site. Merci à **Katia Meunier** pour la documentation du Nouzeau. Merci au **SRA de Bourgogne** et à l'équipe du **dépôt de Passy** qui m'ont donné accès au matériel archéologique. Je remercie **Jean-Baptiste Mallye** et **Pierre Magniez** pour leur grande disponibilité et leur appui incontournable à la détermination des restes fauniques.

Un grand merci à **Vincent Balter** de m'avoir ouvert les portes de la plateforme technique de Lyon pour expérimenter l'ablation laser et le royaume merveilleux du big data et de la programmation. Merci Vincent pour tout le suivi, pour ta patience et les réponses à mes nombreuses questions. Merci également à **Théo Tacail** pour sa contribution majeure au traitement des données laser, il a développé le programme informatique adapté aux fichiers de sortie et m'a accompagnée dans son utilisation, en m'initiant notamment au langage python. Je remercie également **Philippe Télouk** pour son accueil à l'ENS de Lyon et toute l'équipe.

Je remercie sincèrement **Yuichi Naito** et **Naohiko Ohkouchi** pour leur accueil et la formation à l'analyse des acides aminés du collagène, thank you very much for your collaboration. Thank you for making me discover Japan from another perspective than the tourism one, thank you for the typical karaoke and the tuna cheek. Thanks to all the JAMSTEC team.

Je remercie évidemment toute l'équipe du LAMPEA et les chercheurs que j'ai pu croiser à Aix : en particulier **Estelle Herrscher** pour ses suggestions avisées et son accueil chaleureux, **Guy André** pour toute l'aide technique et pratique, les bons plans et astuces « bricolage », **Vincent Olivier** pour sa sympathie et son accueil, **Domingo Salazar-Garcia** pour nos échanges franco-ingo-spanish, sa formation « tartre » puis son investissement à l'analyse des collagènes depuis Cap Town, **Ivan Armenteros Martinez** pour sa bonne humeur permanente et les cours particuliers d'espagnol.

Un grand merci à tous mes collaborateurs, formateurs, gestionnaires, collègues et amis de PACEA. Notamment, merci à **Eric Pubert** pour les expérimentations diverses (microscopie confocale, fabrication de lames minces, histologie, photos...), le soutien technique et informatique, merci enfin pour ta sympathie inconditionnelle. Merci à **Alain Queffelec** pour la réalisation d'analyses complémentaires et l'assistance analytique. Merci à **Gauthier Devilder** pour le DAO. Merci à **Régine Wortmann**, **Catherine Morel-Chevillet**, **Nathalie Kellay** et **Maryelle Bessou** pour leur grande disponibilité, efficacité et leur amical professionnalisme.

Merci infiniment à **Frédéric Santos**, pour tout le support statistique et à la programmation. Ton aide fut plus que précieuse et tu as toujours été d'une efficacité redoutable et d'un secours survivaliste !

Un remerciement très spécial à **Sylvain Ducasse**, **Priscilla Bayle**, **Sacha Kacki** et **Sébastien Villotte** pour nos échanges passionnés et passionnants, nos soirées endiablées et tous ces moments partagés.

Merci à **Brigitte Bordes** et **Frédéric Garabétian** qui ont permis l'accomplissement administratif de ce travail en dépit des conditions particulières.

Il est de coutume d'indiquer que ce travail a été financé durant trois ans grâce à une allocation au mérite acquise sur concours par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et je remercie donc le contribuable pour son aimable participation.

Je tiens également à présenter toute ma gratitude aux chercheurs avec qui j'ai collaboré, de près ou de loin : notamment **Fabien Convertini** qui a gentiment accepté de réaliser l'analyse pétrographique des récipients céramiques de Gurgy et de nous en livrer les résultats, **Pierre Petrequin** qui a offert son expertise sur les haches en roche tenace de Gurgy, **Christine Oberlin** qui a bien voulu répondre à mes questions concernant les datations, **Aline Thomas**, pour tous nos échanges sur le Cerny et pas seulement – merci Aline pour tes conseils, ta bienveillance et tes encouragements –, merci également à **Lamys Hachem** et **Lisandre Bedaut** d'avoir répondu à mes interrogations, merci à **Emmy Bocaege** et **Antoine Souron** pour leur aide dentistique.

Merci évidemment à la team Gurgy : **Mona Le Luyer**, **Mélie Le Roy**, **Maïté Rivollat** (désolée les filles d'avoir glissé dans l'alphabet !) pour tous nos échanges et partages autour de ce site si...

prenant ! Merci pour nos enrichissantes collaborations, passées et futures, et pour le plaisir de passer du bon temps avec vous, tout simplement.

Merci aux isotopistes d'Aix et ailleurs, **Kevin Salesse**, **Alessandra Varalli** (un ringraziamento speciale a te, che hai condiviso un pezzo di vita con me, un quotidiano che mi è sembrato piu leggero...), **Léia Mion**, **Valentin Miclon**, **Camille De Becdelièvre** pour vos conseils, avis, échanges...

Merci finalement à tous les chercheurs que j'ai pu rencontrer lors de colloques et missions diverses au cours de cette thèse, en France et à l'étranger, qui ont participé au développement de ma pensée.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui, issues d'autres domaines, m'ont posé de nombreuses questions, originales et parfois si simples, ayant suscitées en moi des modèles de réflexion plus ouverts et ancrés dans la réalité « de terrain ». Je remercie en particulier tous les acteurs du monde paysan, artisan et de la « débrouille » qui m'ont transmis tant de savoirs et savoir-faire indispensables à la recherche d'une meilleure compréhension et interprétation des usages néolithiques. Merci spécialement à **Rachel Léobet** pour tous tes savoirs sur l'élevage paysan, ovicaprin notamment, et la transformation fromagère, que tu as toujours partagés avec passion, **Zoé Laval** pour l'utilisation des plantes comestibles et médicinales entre autres, **Sylvain Puyau** pour tes innombrables talents qui m'ont tant appris (charpente traditionnelle, cuisine sauvage, préparations culinaires ancestrales, fabrications en tous genres), **Cédric Modolo** pour tes savoir-faire dans la construction en terre et pierre traditionnelle, **Jean-Philippe Bouix** pour tes connaissances sur la culture céréalière et le monde paysan plus généralement, mais aussi **Jérôme Dunié**, **Lucie Sennac**, **Vincent Aimé**, **Thibaut Grollier**, **Floten van Garbay**, **Thibaut Nègre** et tant d'autres.

Je souhaite de façon inhabituelle remonter plus loin dans les remerciements, à ceux qui pour moi, ont tout autant permis l'accomplissement de ce travail de thèse en m'offrant les prérequis nécessaires à une réflexion scientifique. Mes remerciements vont à **Roland Irribaria**, qui m'a fait découvrir l'archéologie lors d'un stage à Muides-sur-Loire alors que je n'avais pas 14 ans. Je me suis rendue compte bien plus tard que le site du stage en question, daté du Néolithique moyen, annonçait en toute coïncidence les prémices de ma thèse de doctorat.

Un très grand merci également à **Luc Wozny** qui a accepté de m'accueillir parmi ses fouilleurs dès mes 18 ans sur son chantier à Biganos. C'est grâce à lui que j'ai mis les pieds (et les mains !) pour la première fois dans des sépultures humaines, aux côtés de **Géraldine Sachau-Carcel** (le monde est petit...) que je remercie également de m'avoir initiée à la pratique de l'anthropologie.

Plus tard, c'est dans les catacombes de Rome que je me vois catapultée pour servir d'interprète et stagiaire à **Dominique Castex**, qui a définitivement assis ma passion pour l'anthropologie au cours d'un séjour riche en découvertes, en apprentissages, en bonne humeur et partage humain dont je lui suis d'une infinie reconnaissance et gratitude. Dominique, merci pour ta confiance ensuite sur le chantier pluriannuel de Bruch, dans l'agenais. Enfin, merci également de m'avoir permis d'accompagner **Caroline Leforest** en Turquie, pour la seconder dans la fouille d'une tombe collective de la nécropole de la grandiose cité romaine de Hierapolis, bordant les somptueuses terrasses de Pammukale, site classé au patrimoine mondial de l'Unesco. Merci Caroline pour cette opportunité, pour m'avoir pris sous ton aile et pour ta bonne humeur malgré des conditions parfois difficiles, une chaleur étouffante, des bestioles mortelles surgissant parmi les ossements, une administration « compliquée », les grandes russes en bikini plutôt intrusives... mais quelle aventure, quelles découvertes et combien de souvenirs !

Merci également à **Marie-France Deguilloux, Pierre Guyomar'ch, Pascal Murail, Paola Catalano, Olga Rickards, Flavio De Angelis** et aux équipes du laboratoire de Tor Vergata et de la Surintendance de Rome d'avoir participé à ma formation archéoanthropologique lors de différents stages. Grazie di cuore per le varie discussioni, la scoperta di altri ambienti di lavoro e altre tematiche di ricerca.

Merci également à **Patrice Courtaud**, notamment pour le chantier post-fouilles à Saint Laurent du Medoc, superbe ambiance, franches rigolades et bons petits plats (bien arrosés), tout y était ! Merci Patrice pour les bons moments passés à cette occasion et plus tard, autour de l'anthropologie bien sûr, mais pas que.

Merci à nos enseignants du Master, qui m'ont appris énormément et ont su transmettre leur passion.

Merci bien sûr à **Alizé Lacoste-Jeanson**, pour tous nos échanges, pour tes relectures et surtout, merci d'être à mes côtés, toujours. Merci **Suzon Provost** et **Mathilde Samsel** pour ces bouts de vie partagés.

Merci à mes amis : la troupe de jeansottais, les Magendiciennes (et Julien), vous êtes toujours là et que c'est bon de le savoir !

Merci à mon ami Alec, qui n'est plus là pour m'entendre mais m'a toujours soutenue et garde indéfiniment une place au chaud dans tous mes souvenirs.

Merci au gang de Labescau libre, qui m'a donné la force, l'alternative, l'envie de renaitre autrement, dans un monde plus sincère, plus tolérant et équitable, loin de tout productivisme, recherche de concurrence et nivelage intellectuel... Merci ma deuxième famille ! (Kiki, tu peux effacer la sauvegarde, elle n'est plus à jour !) Et merci à tous les Piments !

Merci aux autres du réseau, merci les Moustous (vous m'avez bien abreuvée pendant tout ce temps !) et en particulier merci à toi mon p'tit (Camille Laulhère), je m'inquiète pas... Merci mon Chouiky d'avoir attendu « patiemment » la fin de cette thèse (heuheum)... et merci aux copains de la Papet'.

Merci à ceux qui ont relu parties de manuscrit et articles, corrigé (même parfois sans comprendre ^^), en français et en anglais : Alizé, Maritoh, Emilie (et merci pour les cookies), Môman, Totu, Carol, Maïté, Mona.

Et merci à toi, qui liras cette thèse, de t'y intéresser...

Merci aux auteurs qui ont bien voulu partager leur recherche via les plateformes libres comme ResearchGate et Academia, sans quoi l'accès aux publications scientifiques en dehors de toute institution est un véritable combat... Et merci à SciHub d'exister...

Merci évidemment à toi, **Alex Causse**. Tu le sais, cette thèse n'aurait probablement jamais vu le jour si tu n'avais pas été là pour me soutenir, invariablement, croire en moi et me stimuler, me supporter, me décharger et m'encourager au quotidien. MERCI ! Cette thèse est finie grâce à toi, finalement aussi pour toi.

Je ne saurais clôturer cette partie sans les plus profonds remerciements à **mes parents**, qui m'ont toujours soutenue, quoi qu'il arrive, et encouragée, en toutes circonstances. Je n'en serais pas là sans vous (d'abord physiquement, de fait), mais avant tout dans mon développement personnel et mon épanouissement général, ma soif de connaissances, ma sensibilité et aussi mes tares, avouons-le (quelle entêtée !). Je vous remercie de m'avoir ouvert la voie à la vie. Vous m'avez littéralement tout donné, j'espère le mériter. Je vous dédie cette thèse.





## Sommaire

<b>Remerciements.....</b>	<b>V</b>
<b>Sommaire.....</b>	<b>XI</b>
<b>Abréviations .....</b>	<b>XXIII</b>

<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
---------------------------	----------

## **PARTIE 1 CADRE THEORIQUE ET PREPARATION DES ANALYSES**

### **Chapitre 1 Contexte général de l'étude et problématique**

<b>I. Le Néolithique, une transition alimentaire, culturelle et sociale .....</b>	<b>5</b>
I.1. Qu'est-ce que la « révolution néolithique » ? .....	5
I.2. Naissance et diffusion du Néolithique européen.....	6
I.2.a. Le foyer proche-oriental.....	6
I.2.b. Processus et rythmes de diffusion en Europe.....	8
I.3. La domestication des espèces et l'anthropisation du milieu .....	9
I.3.a. Les débuts de l'agriculture .....	9
I.3.b. Les débuts de l'élevage .....	11
I.3.c. Évolution de l'agropastoralisme et transformation du milieu .....	15
I.4. Des cultures et des hommes – la difficile définition de culture .....	16
I.5. Le Néolithique ancien et moyen en France et dans les régions limitrophes .....	19
I.5.a. Le courant méditerranéen et ses dérivés.....	19
I.5.b. Le courant danubien et ses dérivés.....	23
I.6. La matérialisation de la complexification sociale et des inégalités.....	29
I.6.a. Structuration de l'habitat .....	29
I.6.b. Implantation et marquage du territoire.....	30
I.6.c. Affichage du pouvoir et des inégalités sociales dans la mort.....	30
I.6.d. De la différenciation hommes - femmes .....	33
I.6.e. Intensification de l'économie de production .....	35
I.6.f. Réseaux d'échange à longue distance et objets de prestige.....	35
I.6.g. Amplification des conflits et de la violence.....	37
<b>II. Au sud-est du Bassin parisien : la Vallée de l'Yonne à la loupe .....</b>	<b>38</b>
II.1. Contexte des découvertes archéologiques .....	38
II.2. Un carrefour culturel.....	42

II.2.a. Au croisement des deux voies de néolithisation : le Néolithique ancien .....	43
II.2.b. Les multiples influences culturelles du Néolithique moyen : une composante locale.....	43
II.2.c. Questions de chronologie.....	44
II.3. Les pratiques funéraires.....	45
II.4. L'environnement et l'implantation du territoire dans la vallée de l'Yonne.....	49
II.4.a. Une organisation le long de la rivière .....	49
II.4.b. Un environnement changeant mais encore peu marqué .....	51
II.5. Économie et stratégies de subsistance .....	52
II.5.a. Agriculture et cueillette.....	53
II.5.b. L'élevage et la chasse .....	58
II.5.c. Rupture ou continuité de la pêche ? .....	65
II.6. Éléments de conclusion .....	67
<b>III. Étudier l'alimentation comme marqueur identitaire et social .....</b>	<b>68</b>
III.1. Tour d'horizon des différentes disciplines visant à reconstituer les régimes alimentaires au Néolithique .....	68
III.2. Zoom sur l'analyse directe et individuelle par la biogéochimie.....	70
III.2.a. Introduction à la méthode : le principe en bref.....	70
III.2.b. Du régime alimentaire à l'identité d'un groupe.....	71
III.2.c. Identifier des statuts sociaux en lien avec les comportements alimentaires .....	72
III.2.d. Une combinaison de marqueurs pour une meilleure définition.....	72
III.2.e. L'approche biogéochimique en anthropologie : état de l'art au Néolithique en Europe et en France .....	73
<b>IV. Problématique et objectifs.....</b>	<b>77</b>
<b>Chapitre 2 L'analyse biogéochimique des restes humains et animaux : principes méthodologiques</b>	
<b>I. Bref historique .....</b>	<b>79</b>
I.1. La mesure des ratios isotopiques (C, N, S, Sr).....	79
I.2. Les éléments traces (Sr/Ca et Ba/Ca).....	80
I.3. Les récents développements techniques (micro-échantillonnage, acides aminés spécifiques, ablation laser) .....	81
<b>II. Définitions des notions de base et principe général de l'enregistrement élémentaire et isotopique .....</b>	<b>82</b>
II.1. Sur les rapports isotopiques .....	82
II.2. Sur les concentrations élémentaires et les éléments traces en particulier .....	84
II.3. Sur les acides aminés (AA).....	87
II.4. Sur les fractions biochimiques ou macronutriments .....	87
<b>III. Les différents tissus et leurs fractions organiques et minérales .....</b>	<b>89</b>
III.1. Structure et composition de l'os .....	89
III.2. Ossification et remodelage osseux .....	91

III.3. Structure et composition des dents .....	93
III.4. Odontogénèse et calendrier de développement dentaire .....	93
III.4.a. Calendrier de croissance dentaire chez les humains .....	96
III.4.b. Le développement dentaire des mammifères non-humains.....	98
III.4.c. Vitesse de minéralisation et d'incorporation des éléments.....	100
III.5. Les différentes fractions .....	100
III.5.a. Le collagène.....	100
III.5.b. L'apatite.....	101
III.6. Synthèse.....	103
<b>IV. Les isotopes « traditionnels » (C, N et S) dans le collagène.....</b>	<b>104</b>
IV.1. Principe de l'enregistrement dans la chaîne alimentaire .....	104
IV.2. Le cas du carbone (C) .....	104
IV.2.a. Le carbone chez les végétaux .....	104
IV.2.b. Transfert isotopique du carbone : de l'environnement au consommateur .....	107
IV.2.c. Le traçage du $\delta^{13}\text{C}$ dans le collagène.....	110
IV.2.d. Autres facteurs de modifications des valeurs isotopiques.....	110
IV.2.e. Impact de la consommation de poisson sur les datations radiocarbone : l'effet réservoir .....	111
IV.2.f. Résumé.....	113
IV.3. Le cas de l'azote (N) .....	114
IV.3.a. L'azote chez les végétaux.....	114
IV.3.b. Transfert isotopique de l'azote : de l'environnement au consommateur .....	115
IV.3.c. Le traçage du $\delta^{15}\text{N}$ dans le collagène.....	118
IV.3.d. Autres facteurs de modifications des valeurs isotopiques.....	119
IV.3.e. Résumé .....	122
IV.4. Le cas du soufre (S).....	123
IV.4.a. Le soufre chez les végétaux.....	123
IV.4.b. Transfert isotopique du soufre : de l'environnement au consommateur .....	124
IV.4.c. Le traçage du $\delta^{34}\text{S}$ dans le collagène .....	125
IV.4.d. Facteurs de modifications des valeurs isotopiques.....	127
IV.4.e. Résumé .....	129
IV.5. Limites méthodologiques et fiabilité des résultats .....	129
IV.5.a. Variabilité méthodologique des valeurs isotopiques .....	130
IV.5.b. Critères de conservation du collagène et validité des valeurs isotopiques.....	131
IV.5.c. Référentiel local et croisement des données.....	132
<b>V. L'azote des acides aminés (AA) spécifiques .....</b>	<b>133</b>
V.1. Principe.....	133
V.1.a. Généralités, notations et appellations .....	133
V.1.b. Les voies métaboliques des AA.....	134
V.1.c. Estimation du niveau trophique (TP).....	136

V.2. Sources de variabilité de l'estimation.....	138
V.2.a. Variabilité du $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ chez les végétaux (variabilité du facteur $\beta$ ) .....	139
V.2.b. Variabilité du TDF ( $\text{TEF}_{\text{Glu}}-\text{TEF}_{\text{Phe}}$ ).....	142
V.2.c. Autres facteurs de modification du $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ .....	144
V.3. Intérêt et limites.....	144
V.4. Fiabilité des résultats .....	147
V.5. Résumé .....	148
<b>VI. Les éléments traces (Sr/Ca et Ba/Ca).....</b>	<b>149</b>
VI.1. Principe .....	149
VI.1.a. Métabolisme et biopurification du Ca .....	149
VI.1.b. Rapport observé (OR) entre l'os et l'alimentation .....	150
VI.1.c. Différence entre les tissus et cas particulier de l'émail .....	151
VI.1.d. Influence de l'âge sur le rapport Sr/Ca.....	154
VI.1.e. La lactation.....	154
VI.1.f. Influence de l'alimentation et teneurs en Ca.....	156
VI.2. Retracer les niveaux trophiques .....	157
VI.2.a. Dans un système simple... sous certaines conditions .....	157
VI.2.b. Le cas des régimes alimentaires complexes .....	157
VI.3. Autres sources de variation des rapports Sr/Ca et Ba/Ca.....	158
VI.3.a. Variabilité régionale avec la géologie et autres facteurs environnementaux.....	158
VI.3.b. Variabilité chez les plantes.....	158
VI.3.c. Variabilité chez les herbivores .....	159
VI.3.d. Le cas du poisson .....	160
VI.3.e. Influence de la physiologie.....	162
VI.4. Fiabilité des résultats.....	162
VI.4.a. Le problème de la diagénèse .....	162
VI.4.b. L'utilisation des standards.....	165
VI.4.c. La nécessité d'un référentiel local.....	166
VI.5. Résumé.....	167
<b>VII. Le strontium isotopique (<math>^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}</math>) comme marqueur de mobilité .....</b>	<b>168</b>
VII.1. Principe .....	168
VII.1.a. Le $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans les roches .....	168
VII.1.b. Le Sr biodisponible et le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans le sol et les plantes .....	168
VII.1.c. Transfert du $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ le long de la chaîne alimentaire.....	170
VII.2. Facteurs de variation des ratios isotopiques du Sr.....	171
VII.3. Traçage de la mobilité et identification de sujets non locaux.....	173
VII.3.a. Estimation de la gamme locale de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .....	173
VII.3.b. Comparaisons inter- et intra-individuelles.....	175
VII.4. Fiabilité des résultats : identifier et minimiser l'impact de la diagénèse .....	177

VII.5. Résumé.....	179
<b>VIII. Mesure des échantillons : échelles et techniques.....</b>	<b>180</b>
VIII.1. Introduction : nature des échantillons et échelles de suivi.....	180
VIII.2. La spectrométrie de masse (MS) .....	182
VIII.3. La spectrométrie de masse à rapport isotopique (IRMS) .....	184
VIII.4. Le couplage de la chromatographie en phase gazeuse (GC-IRMS).....	184
VIII.5. L'ablation laser LA-ICP-MS .....	185
VIII.5.a. Principe instrumental.....	185
VIII.5.b. Intérêt et limites de la méthode.....	187

## **Chapitre 3 Le matériel : présentation des sites et sélection des échantillons**

<b>I. Prérequis sur l'identification biologique et l'enregistrement des données anthropologiques .....</b>	<b>191</b>
I.1. Estimation et codage de l'âge au décès.....	191
I.1.a. Estimation de l'âge des moins de 20 ans.....	192
I.1.b. Estimation de l'âge des adultes .....	193
I.1.c. Distinction « sociale » entre adultes et non-adultes : une limite à 15 ans .....	193
I.2. Sélection des échantillons de plus de 2 ans pour limiter le signal de l'allaitement .....	194
I.3. Détermination et codage du sexe .....	195
I.3.a. Diagnose sexuelle primaire à partir de l'os coxal .....	195
I.3.b. Diagnose sexuelle secondaire : une approche intra-populationnelle.....	196
I.3.c. La détermination génétique .....	196
I.3.d. Homogénéisation du codage .....	197
I.4. Observation des autres caractéristiques anthropologiques.....	197
<b>II. Gurgy « Les Noisats » (GLN).....</b>	<b>198</b>
II.1. Le site .....	198
II.1.a. Découverte et caractéristiques générales .....	199
II.1.b. Les dispositifs funéraires et le mobilier : comparaisons chronoculturelles .....	200
II.1.c. Les datations radiocarbone.....	203
II.1.d. Les restes humains.....	205
II.1.e. Recrutement des individus inhumés, répartition spatiale, organisation sociale .....	206
II.2. Le matériel sélectionné .....	209
II.2.a. État de la collection.....	209
II.2.b. Sélection des individus et type d'échantillonnage .....	210
II.2.c. Des analyses complémentaires sur le matériel archéologique .....	216
II.3. Synthèse et questionnements spécifiques au site .....	218
<b>III. Monéteau « Macherin » (Mon).....</b>	<b>219</b>
III.1. Le site .....	219
III.1.a. Découverte et caractéristiques générales .....	219

III.1.b. Les dispositifs funéraires et le mobilier de la nécropole du Néolithique moyen : comparaisons chronoculturelles .....	226
III.1.c. Les datations radiocarbone .....	230
III.1.d. L'étude des restes humains.....	232
III.1.e. Recrutement des individus inhumés, répartition spatiale, organisation sociale.....	235
III.2. Le matériel sélectionné.....	239
III.2.a. État de la collection .....	239
III.2.b. Sélection des individus et type d'échantillonnage.....	239
III.3. Synthèse et questionnements spécifiques au site.....	244
<b>IV. Chichery « Sur les Pâturaux » (CHI-Pat).....</b>	<b>245</b>
IV.1. Le site.....	245
IV.1.a. Découverte et caractéristiques générales.....	245
IV.1.b. Les dispositifs funéraires et le mobilier : comparaisons chronoculturelles.....	246
IV.1.c. Les datations radiocarbone .....	248
IV.1.d. L'analyse des restes humains : identification et caractérisation de la population.....	249
IV.1.e. Recrutement des individus inhumés, répartition spatiale, organisation sociale .....	250
IV.2. Le matériel sélectionné .....	252
IV.2.a. État de la collection .....	252
IV.2.b. Sélection des individus et type d'échantillonnage .....	252
IV.3. Synthèse et questionnements spécifiques au site .....	254
<b>V. Beaumont « Le Crot aux Moines » (BMT).....</b>	<b>255</b>
V.1. Le site .....	255
V.1.a. Le mobilier : comparaisons chronoculturelles et organisation spatiale .....	257
V.1.b. Les datations radiocarbone .....	261
V.1.c. L'étude des restes humains : état des lieux.....	262
V.1.d. La faune.....	264
V.2. Le matériel sélectionné.....	266
V.2.a. État de la collection .....	266
V.2.b. Sélection des individus et type d'échantillonnage.....	266
V.3. Synthèse et questionnements spécifiques au site.....	271
<b>VI. Bonnard « Le Poirier » (Bon) .....</b>	<b>272</b>
VI.1. Le site.....	272
VI.1.a. Découverte et contexte d'étude .....	272
VI.1.b. Les sépultures de Bonnard .....	273
VI.1.c. Le mobilier et les comparaisons chronoculturelles .....	275
VI.1.d. Les datations radiocarbone.....	276
VI.1.e. L'identité des humains : une révision.....	277
VI.2. Le matériel sélectionné .....	277
VI.2.a. État de la collection .....	277
VI.2.b. Sélection des individus et type d'échantillonnage .....	277

VI.3. Synthèse et questionnements spécifiques au site .....	278
<b>VII. Chichery « L'Étang David » (Chi-ED).....</b>	<b>279</b>
VII.1. Le site.....	279
VII.1.a. Découverte et contexte d'étude.....	279
VII.1.b. Les dispositifs funéraires et le mobilier : comparaisons chronoculturelles .....	279
VII.1.c. Les datations radiocarbone.....	281
VII.1.d. L'analyse individuelle des humains, une relecture .....	282
VII.1.e. Répartition spatiale et ampleur du site .....	282
VII.2. Le matériel sélectionné .....	283
VII.2.a. État de la collection.....	283
VII.2.b. Sélection des individus et type d'échantillonnage .....	283
VII.3. Synthèse et questionnements spécifiques au site .....	284
<b>VIII. Gurgy « Le Nouzeau » (NZ).....</b>	<b>284</b>
VIII.1. Le site .....	284
VIII.1.a. Découverte et caractéristiques générales .....	284
VIII.1.b. Le mobilier : comparaisons chronoculturelles.....	286
VIII.1.c. La faune .....	287
VIII.1.d. Les restes humains.....	287
VIII.1.e. Les datations radiocarbone .....	289
VIII.2. Le matériel sélectionné.....	291
VIII.2.a. État de la collection .....	291
VIII.2.b. Sélection des individus et type d'échantillonnage.....	292
VIII.3. Synthèse et questionnements spécifiques au site.....	293
<b>IX. Construction du référentiel local (végétal, faunique terrestre et aquatique).....</b>	<b>293</b>
IX.1. Le référentiel alimentaire .....	293
IX.2. Contexte géologique et détermination de la gamme locale de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .....	296

## **Chapitre 4 Analyses et traitement des données**

<b>I. Analyse des isotopes stables dans le collagène osseux .....</b>	<b>301</b>
I.1. Préparation des échantillons.....	301
I.2. Analyse du collagène global .....	302
I.3. Analyse des acides aminés spécifiques du collagène.....	303
<b>II. Analyse des isotopes stables dans la dentine.....</b>	<b>303</b>
II.1. Préparation des échantillons .....	303
II.2. Analyses isotopiques du collagène .....	306
<b>III. L'ablation laser (analyse des éléments traces et du Sr isotopique).....</b>	<b>306</b>
III.1. Préparation des échantillons .....	306
III.2. Ablation laser et acquisition des mesures.....	307

III.1. Traitement des données brutes .....	310
III.1.a. Création des fichiers de données brutes.....	311
III.1.b. Obtention des fichiers corrigés par les standards .....	311
III.1.c. Obtention d'un unique fichier pour tous les profils.....	312
III.1.d. Nettoyage de la diagénèse .....	313
III.1.e. Calcul des moyennes individuelles.....	313
III.2. Exactitude et précision des mesures .....	313
<b>IV. Récapitulatif des analyses et du matériel.....</b>	<b>314</b>
<b>V. Catalogue et gestion des données brutes .....</b>	<b>316</b>
V.1. Le catalogue.....	316
V.2. Gestion des données brutes.....	320
<b>VI. L'analyse statistique .....</b>	<b>320</b>
<b>VII. De l'utilisation des modèles : une gageure ? .....</b>	<b>320</b>

## **PARTIE 2 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

### **Chapitre 5 Analyses des isotopes stables (C, N, S) dans le collagène osseux global**

<b>I. Article 1.....</b>	<b>325</b>
<b>II. Article 2 .....</b>	<b>342</b>
<b>III. Informations complémentaires relatives aux résultats .....</b>	<b>369</b>
III.1. Différences inter-laboratoires.....	369
III.2. Conservation du collagène et datations .....	370
III.2.a. État des données .....	370
III.2.b. Résultats des croisements .....	372
III.2.a. Conclusions .....	377
<b>IV. Comparaison avec les sites Cerny au-delà de la micro-région .....</b>	<b>378</b>
IV.1. Schéma général .....	379
IV.2. Variabilité inter-groupes chez les humains .....	382

### **Chapitre 6 Analyses des isotopes stables (C, N, S) dans la dentine**

<b>I. Article 3.....</b>	<b>385</b>
--------------------------	------------

### **Chapitre 7 Analyses isotopiques de l'azote dans les acides aminés ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ )**

<b>I. Article 4.....</b>	<b>397</b>
--------------------------	------------

## Chapitre 8 Analyses du strontium isotopique ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) et des éléments traces (Sr/Ca, Ba/Ca) par ablation laser

<b>I. Article 5.....</b>	<b>420</b>
<b>II. Information complémentaires relatives aux résultats .....</b>	<b>431</b>
II.1. Description des données présentées en Annexe.....	431
II.2. Le croisement des profils TE et Sr : nécessité d'un nettoyage supplémentaire ? .....	436
II.3. La difficile interprétation des données $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .....	437
II.4. Nouvelles analyses du Sr isotopique .....	438
II.4.a. Comparaison des anciennes et nouvelles valeurs de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 7 échantillons.....	439
II.4.b. À propos des valeurs de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans l'os .....	439
II.4.c. Conclusions sur les précédentes analyses du Sr isotopique .....	440
II.5. Discussion autour des régimes alimentaires à partir des éléments traces (TE) .....	442
II.5.a. Le traitement de la diagénèse.....	442
II.5.b. Schéma général.....	457
II.5.c. De l'alimentation des cochons et de la fertilisation des plantes.....	467
II.5.d. Des chèvres ou des moutons ? .....	469
II.5.e. Variabilité inter-individuelle chez les humains.....	469
II.6. Variabilité intra-individuelle : quelles perspectives ?.....	476
II.6.a. Chèvres et moutons : une piste à suivre ? .....	479
II.6.b. Des profils d'allaitement chez les herbivores ? .....	481
II.6.c. ... et les cochons ? .....	483
II.6.d. Quelles variations chez les humains ? .....	484
II.6.e. Quantifier et caractériser statistiquement les variations.....	488
II.7. L'apport de notre étude au développement de la méthode : synthèse et perspectives .....	488

## Chapitre 9 Analyses complémentaires

<b>I. Analyse texturale des micro-usures dentaires (DMTA) – collaboration A. Souron et M. Le Luyer .....</b>	<b>492</b>
I.1. Réalisation des empreintes occlusales et analyses .....	493
I.2. Le principe en bref.....	494
I.3. Les paramètres fractals des textures dentaires mesurés .....	494
I.4. Chez l'homme moderne, des textures variables pour des pratiques alimentaires différentes... ..	496
I.5. Résultats et interprétations .....	498
I.5.a. Variabilité générale .....	498
I.5.b. Croisement avec les données biochimiques .....	500
I.5.c. Variabilité individuelle.....	502
I.5.d. Comparaison avec la population Cerny .....	503
I.6. Synthèse et perspectives.....	506

<b>II. Analyse préliminaire des haches – collaboration A. Queffelec et P. Pétrequin.....</b>	<b>506</b>
II.1. L'origine des haches .....	507
II.2. Contexte chronoculturel.....	508
II.3. Objet pratique, symbolique ou de prestige ?.....	509
II.4. Croisement avec les indicateurs biochimiques .....	510
II.5. Synthèse et perspectives .....	512
<b>III. Analyse pétrographique des récipients céramiques – collaboration F. Convertini. 513</b>	<b>513</b>
III.1. Résultats de l'analyse pétrographique (F. Convertini) .....	514
III.1.a. Le vase Cerny de la sépulture 249 .....	514
III.1.b. Tesson n°14 de la structure 60.....	515
III.1.c. Tesson n°23 de la structure 60.....	515
III.1.d. Tesson n°44 de la structure 60.....	516
III.1.e. Synthèse de l'analyse pétrographique des vases.....	516
III.2. Éléments de conclusion au regard de l'analyse biochimique .....	517

## **Chapitre 10 Études intrasites : synthèses et éléments complémentaires**

<b>I. Gurgy « Les Noisats » (GLN) .....</b>	<b>520</b>
I.1. Retour en bref sur l'ensemble des résultats.....	521
I.1.a. Schéma général et économie de subsistance .....	521
I.1.b. Variabilité intra-populationnelle et intra-individuelle des humains.....	523
I.2. Nouveaux résultats prenant en compte le sexe génétique à GLN .....	525
I.3. Précisions sur le croisement des indicateurs biochimiques avec les paramètres funéraires.....	528
I.3.a. Des valeurs isotopiques dans l'os similaires pour des positions atypiques.....	528
I.3.b. Des proximités isotopiques dans la dentine ? .....	529
I.3.c. Les éléments trace dans l'émail.....	529
I.3.d. Variabilité isotopique en fonction du dispositif funéraire pour chaque sexe.....	529
I.3.e. Croisements avec le mobilier « remarquable » .....	532
I.3.f. Conclusions.....	534
I.4. Répartition spatiale des valeurs isotopiques .....	534
I.5. Synthèse et perspectives.....	542
<b>II. Monéteau « Macherin » (Mon) .....</b>	<b>543</b>
II.1. Retour en bref sur l'ensemble des résultats .....	543
II.1.a. Variabilité globale des groupes.....	543
II.1.b. Variabilité intra-groupes selon le sexe et l'âge au décès .....	546
II.2. À propos du sexe des sujets moins bien conservés.....	548
II.3. La question de la chronologie.....	549
II.4. Croisement des indicateurs biochimiques avec les paramètres funéraires .....	551
II.4.a. Les coffres de Monéteau.....	551
II.4.b. Positions atypiques, sépultures de type Balloy.....	553

II.4.c. Des orientations variables .....	553
II.4.d. Le mobilier « remarquable ».....	553
II.4.e. Comparaisons culturelles particulières .....	554
II.4.f. Conclusions .....	556
II.5. Répartition spatiale des valeurs isotopiques .....	556
II.5.a. Répartition spatiale des valeurs isotopiques entre les groupes .....	556
II.5.b. Caractérisation biologique et données biochimiques.....	559
II.5.c. Répartition des valeurs isotopiques dans le groupe C.....	563
II.6. Synthèse et perspectives .....	566
<b>III. Chichery « Sur les Pâtureaux » (CHI-Pat).....</b>	<b>567</b>
III.1. Retour en bref sur l'ensemble des résultats .....	567
III.1.a. Variabilité globale .....	567
III.1.b. Variabilité intra-populationnelle .....	567
III.1.c. Indicateurs de stress.....	570
III.2. Répartition spatiale des indicateurs biochimiques, biologiques et microscopiques .....	570
III.3. Synthèse et perspectives .....	574
<b>IV. Beaumont « Le Crot aux Moines » (BMT) .....</b>	<b>575</b>
IV.1. Article 6 (participation à la monographie) .....	575
IV.2. Retour en bref sur les autres résultats.....	586
IV.3. Synthèse et perspectives.....	587
<b>V. Bonnard « Le Poirier » (Bon).....</b>	<b>588</b>
V.1. Article 7 (participation à la monographie) .....	588
V.2. Synthèse et perspectives .....	599
<b>VI. Chichery « L'Étang David » (CHI-ED) .....</b>	<b>600</b>
VI.1. Article 8 (participation à la monographie) .....	600
VI.2. Synthèse et perspectives.....	607
<b>VII. Gurgy « Le Nouzeau » (NZ) .....</b>	<b>608</b>
VII.1. Retour en bref sur les résultats.....	608
VII.2. Synthèse et perspectives .....	611
<b>Chapitre 11 Synthèse générale et perspectives</b>	
<b>I. L'alimentation générale des humains et la gestion des ressources.....</b>	<b>612</b>
<b>II. Variabilité micro-régionale, identité(s) et spécificités locales .....</b>	<b>617</b>
<b>III. Synthèse méthodologique sur l'apport et les limites des différents marqueurs et de leur utilisation combinée.....</b>	<b>620</b>
<b>IV. Perspectives .....</b>	<b>623</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>625</b>

<b>Bibliographie.....</b>	<b>627</b>
<b>Table des figures.....</b>	<b>683</b>
<b>Table des tableaux.....</b>	<b>699</b>
<b>Table des annexes.....</b>	<b>703</b>
<b>Table des annexes numériques.....</b>	<b>713</b>
<b>Annexes (Volume 2).....</b>	<b>715</b>

## Abréviations

AA : acide aminé

Glu : acide glutamique

Phe : phenylalanine

CSIA-AA : Analyse isotopique spécifique des acides aminés (*Compound specific isotope analysis of amino acids*)

TE : éléments trace (*trace elements*), notamment pour se référer aux ratios Sr/Ca, Ba/Ca, Mg/Ca, Mn/Ca et U/Ca

LA : ablation laser (*laser ablation*)

Col : collagène, si en indice après la mention  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  ou  $\delta^{34}\text{S}$

Col : collet

Ocl : extrémité occlusale

M : milieu (dans un profil laser) ou mésial (pour désigner une face dentaire) selon le contexte

L : lingual

V : vestibulaire

Liste des principaux éléments – et leur symbole – mentionnés (seuls les éléments en gras sont analysés et discutés dans ce travail) :

élément	symbole
Hydrogène	H
<b>Carbone</b>	<b>C</b>
<b>Azote</b>	<b>N</b>
Oxygène	O
<b>Magnésium</b>	<b>Mg</b>
Silicium	Si
<b>Soufre</b>	<b>S</b>
<b>Calcium</b>	<b>Ca</b>
<b>Manganèse</b>	<b>Mn</b>
Fer	Fe
Cuivre	Cu
Zinc	Zn
Krypton	Kr
Rubidium	Rb
<b>Strontium</b>	<b>Sr</b>
<b>Barium</b>	<b>Ba</b>
Plomb	Pb
<b>Uranium</b>	<b>U</b>

Les sites archéologiques étudiés :

GLN : Gurgy « Les Noisats »

Mon : Monéteau « Macherin »

BMT : Beaumont « Le Crot aux Moines »

CHI-Pat : Chichery « Sur les Pâtureaux »

Bon : Bonard « Le Poirier »

CHI-ED : Chichery « L'Etang-David »

NZ : Gurgy « Le Nouveau »



## Introduction

L'étude des populations du passé permet de comprendre d'où nous venons, quels sont les mécanismes qui ont sous-tendu aux diverses évolutions et à l'accomplissement de nos sociétés actuelles, dans toute leur diversité. Forte de ces interrogations, la période Néolithique constitue une aire charnière dans l'histoire de l'humanité et de la planète. Passage d'une économie de prédation (chasseurs-cueilleurs) à une économie de production (agriculteurs éleveurs), elle met en place de nombreux fondements de ce qui compose aujourd'hui encore les bases du système économique et social dominant. L'humain commence à maîtriser la nature – la sédentarisation et la domestication des espèces ont des conséquences fortes sur l'environnement – et il affiche de plus en plus de disparités au sein de structures sociales qui apparaissent plus complexes, voire parfois plus hiérarchisées.

L'étude des pratiques funéraires renseigne sur la façon dont les vivants ont enterré leurs morts et reflète en cela la façon dont les groupes étaient organisés. Les restes humains eux-mêmes, au sein d'un contexte particulier, renferment grand nombre d'informations quant à leur vécu et à leur identité. En particulier, ils enregistrent dans leurs tissus la composition chimique de leur alimentation et de leur environnement. Or, si l'alimentation est un besoin vital à tous les organismes vivants, elle reflète aussi des choix personnels et culturels dans les populations humaines et s'inscrit dans les sociétés comme un facteur de structuration sociale, faisant parfois intervenir des différences de régimes alimentaires entre les membres d'une communauté, en fonction de leur statut, de leurs habitudes, ou de leur état de santé.

Notre regard se porte ici dans la vallée de l'Yonne, au sud-est du Bassin parisien, région carrefour entre les deux grands courants de néolithisation dont la complexité culturelle est visible à travers les dispositifs funéraires et le mobilier. D'une richesse archéologique exceptionnelle, notamment en termes de sépultures du Néolithique moyen, le secteur offre une source de données privilégiée pour l'étude des premiers agropasteurs. Sept sites ayant livré des restes humains, répartis sur une distance de 10 km le long de la rivière Yonne, sont considérés dans ce travail. Ils sont de formes variées allant de la vaste nécropole à l'enceinte palissadée en passant par le petit ensemble funéraire et peuvent être attribués à différentes cultures. Tous entrent dans la fourchette chronologique comprise entre 4800 et 4000 cal BC. Dans ce contexte bien documenté, diverses problématiques font l'objet de questionnements scientifiques auxquels notre étude tentera d'apporter des éléments de réponse complémentaires. Parmi celles-ci, l'identité chronoculturelle microrégionale et son origine, les relations avec l'extérieur et notamment le lien avec les différentes cultures issues des courants méditerranéen et danubien sont particulièrement interrogées, ainsi que le type d'organisation sociale ayant cours dans et entre ces groupes.

## Introduction

---

De ces sites sont sélectionnés 180 humains et 74 animaux qui seront analysés dans le cadre d'une approche multi-proxy afin d'aborder ces questions et tenter de mieux caractériser ces populations par le biais de l'alimentation et de la mobilité individuelle et collective au regard des paramètres biologiques et socioculturels. Différents marqueurs isotopiques – du carbone (C), de l'azote (N), du soufre (S) et du strontium (Sr) – seront investigués aux côtés d'éléments traces – du strontium (Sr) et du baryum (Ba) notamment, relativement au calcium (Ca) – dans différents tissus (os et dents) et à différentes échelles. De récents développements méthodologiques seront expérimentés dans le but d'obtenir une image de plus en plus fine et précise de ces indicateurs et leur application sera discutée. Des analyses complémentaires issues d'autres disciplines (étude des textures des micro-usures dentaires, analyse d'objets associés – haches et céramiques) seront également proposées en parallèle à l'approche biogéochimique afin de répondre à des questions d'intérêt connexe. Cette démarche combinant une telle diversité de méthodes, certaines déjà utilisées en routine et d'autres plus innovantes, sur un si grand nombre d'échantillons, constitue une première pour l'ensemble du Néolithique européen et fournira un corpus exceptionnel de comparaison.

Le manuscrit se divise en deux parties. La première expose le cadre théorique et technique dans lequel s'inscrit cette recherche. Le chapitre 1 pose les jalons de l'étude par un aperçu du contexte général, chronoculturel et méthodologique, et définit les problématiques. Le chapitre 2 développe les principes méthodologiques de l'analyse biogéochimique appliquée dans ce travail. Si certains sont bien connus depuis plusieurs décennies, d'autres sont moins utilisés en archéologie voire décrits pour la première fois en français ici. Le chapitre 3 présente le matériel archéologique étudié, les sites et la stratégie d'échantillonnage adoptée pour répondre aux différents questionnements scientifiques. Enfin, le chapitre 4 décrit les analyses effectuées et les protocoles de traitement des données.

La seconde partie présente et discute les résultats. Les chapitres 5 à 8 traite les résultats biochimiques – isotopiques et élémentaires – par type d'analyses pour l'ensemble des sites, sous la forme d'articles publiés ou en cours d'expertise dans des revues à comité de lecture, pour certains agrémentés d'informations additionnelles relatives à ces résultats. Le chapitre 9 présente les résultats d'analyses complémentaires non biochimiques menées en collaboration avec des spécialistes d'autres disciplines (texture de la micro-usure dentaire, analyse des haches et pétrographie des récipients céramiques) et les discute en contexte au regard des données biochimiques. Au-delà des seuls résultats discutés, ce chapitre intègre les notions théoriques et caractéristiques analytiques requises à la compréhension de ces données, celles-ci n'étant volontairement pas présentées dans la première partie du fait de leur place particulière – collaborative – dans ce travail. Ensuite, le chapitre 10 propose une synthèse des résultats et interprétations à l'échelle intra-site et développe certains aspects spécifiques à chaque site. Ce dernier chapitre inclut, pour trois sites, notre participation aux monographies en cours de publication. Enfin, le chapitre 11 livre une synthèse générale de l'ensemble des résultats discutés dans ce travail et présente les perspectives de recherches proposées par notre étude.

## PARTIE 1

### **CADRE THEORIQUE ET PREPARATION DES ANALYSES**



## Chapitre 1. Contexte général de l'étude et problématique

Ce chapitre introduit les concepts clés de la transition néolithique, les changements que ces nouveaux modes de vie impliquent ainsi que les connaissances que nous avons à ce jour dans la région d'intérêt à la période considérée. Il énonce ensuite brièvement en quoi l'étude de l'alimentation et de la mobilité permet de reconstruire les traits d'histoire de vie de ces populations néolithiques et d'aborder les questions de structuration et d'organisation sociale, en particulier via l'analyse biochimique individuelle des restes humains (et animaux). La dernière section résume la problématique et les objectifs de ce travail.

### I. Le Néolithique, une transition alimentaire, culturelle et sociale

---

#### I.1. Qu'est-ce que la « révolution néolithique » ?

Jusqu'à la révolution industrielle, la **révolution néolithique**, selon le terme de V. Gordon Childe, constitue sans doute l'évènement le plus important de l'histoire de l'humanité en cela qu'elle va modifier **profondément les modes de vie** des populations et **l'environnement**, et marquer durablement, jusqu'à nos jours, presque toute la surface du globe. L'homme se **sédentarise**, crée les **premiers villages**, commence à domestiquer les espèces végétales comme les céréales et les légumineuses – il invente **l'agriculture** – puis les espèces animales – il invente **l'élevage** (e.g. Mazurié de Keroualin 2003 ; Vigne 2006). Des développements techniques apparaissent, comme, pour les plus significatifs, la **poterie** et le **polissage de la pierre** qui a donné son nom à la période (e.g. Le Mière et Picon 1998). Le taux de **population augmente** (Bocquet-Appel 2006, 2011) et **l'état sanitaire en est impacté**, avec la transmission de nouvelles maladies notamment due à la promiscuité des animaux d'élevage et le changement alimentaire introduisant une grande quantité de glucides dans les céréales (Baker *et al.* 2017 ; Chamel 2014 ; Guerrero *et al.* 2008 ; Larsen 2006 ; Le Mort *et al.* 2015 ; Thomas 2019). Si cette nouvelle économie de production et de stockage apporte certainement plus de sécurité alimentaire à l'agriculteur, la charge de travail s'en voit indéniablement multipliée, situation qui impactera à long terme les modes de vie des populations qui se sont rendues finalement dépendantes de leurs récoltes et de leurs stocks.

Avec ces modifications viennent des changements structurels forts des groupes humains qui livrent désormais des témoignages tangibles de hiérarchisation sociale et d'**inégalités**, visibles à travers les pratiques funéraires et l'habitat (e.g. Chambon et Thomas 2010 ; Guilaine 1987, 2005 ; Jeunesse 2016c, 2018). En Europe occidentale, les territoires sont marqués par des **constructions imposantes** telles que des maisons de plusieurs dizaines de mètres de long à usage collectif, puis des tombes monumentales réservées à une élite ou des enceintes palissadées protégeant les villages ; les **paysages se modifient**, d'abord localement, par l'apport de nouvelles espèces, l'agropastoralisme et les coupes de forêts pour l'implantation des sites et l'utilisation du bois. En parallèle, des **réseaux d'échange à longue distance** sont mis en place avec la circulation d'objets de prestige (grandes haches alpines) ou de matière première (obsidienne, sel, silex ; e.g. Binder *et al.* 1990 ; Courtin et Binder 1994 ; Pétrequin *et al.* 2012c ; Thirault 2005). Ces objets sont déposés dans les tombes de certains individus, dont parfois des enfants, reflétant la notion de **transmission du statut par hérédité** (e.g. Jeunesse 1996 ; Thomas *et al.* 2011), et témoignent du nouveau système de symboles néolithique (Cauvin 2010).

Bien sûr, cette « révolution » ne s'est pas faite en un jour – elle s'étend plutôt sur des millénaires – et **s'exprime différemment selon les milieux**.

### I.2. Naissance et diffusion du Néolithique européen

Si le Néolithique, caractérisé par la sédentarisation et l'apparition de l'agriculture et de l'élevage principalement, apparaît en différents points du globe (Chine, Amérique centrale, Afrique du Nord, de l'Ouest, Nouvelle-Guinée, etc.) à des périodes distinctes, le **foyer de néolithisation européen** se trouve au **Proche-Orient aux environs de 11000 cal BC** (Aurenche et Kozlowski 2015 ; Mazurié de Keroualin 2003).

#### I.2.a. Le foyer proche-oriental

Vers 11000 cal BC, les **premiers villages** voient le jour dans le croissant fertile (Levant, Anatolie et Mésopotamie) : les chasseurs-cueilleurs épipaléolithiques se sédentarisent et construisent des maisons en pierre et terre crue, qui passeront rapidement d'une architecture circulaire à un format quadrangulaire (permettant des agrandissements successifs et des séparations de l'espace ; Aurenche et Kozlowski 2015). Ce schéma d'habitation reflète une nouvelle organisation sociale, basée sur des structures de maisonnées ou noyaux familiaux, à côté desquels existent des bâtiments collectifs (Mazurié de Keroualin 2003).

Les **pratiques funéraires se complexifient** également, témoignant d'une plus grande structuration sociale. Les crânes surmodelés par exemple sont certainement le témoin le plus caractéristique de cette

complexification matérialisée dans les pratiques funéraires (Figure C1. 1 ; e.g. Bocquentin 2013 ; Stordeur et Khawam 2007).



Figure C1. 1 : Crânes surmodelés du site de Tell Aswad (PPNB, Syrie) agencés autour d'un crâne d'enfant non surmodelé dont on aperçoit le sommet, au centre. Photographie L. Dugué. D'après Stordeur et Khawam, 2007.

Les **plantes sauvages** régulièrement récoltées (blé, orge, pois, lentilles) deviennent **peu à peu cultivées** et sélectionnées (e.g. Willcox 2005 ; cf. I.3.a). Les premières traces d'agriculture remontent à environ 9500 cal BC. Puis les **animaux** couramment chassés (chèvre sauvage, mouflon, sanglier, aurochs) sont apprivoisés et enfin **domestiqués** aux alentours de 8500 cal BC (e.g. Vigne 2006 ; cf. I.3.b).

La **poterie** apparaît plus tard, vers 6500 cal BC – la période précédant l'apparition de la céramique est nommée Néolithique pré-céramique ou PPNA et PPNB (pour *Pre-Pottery Neolithic*). Le Néolithique proche-oriental est considéré comme abouti au terme de ces quatre millénaires de changements économiques, techniques et socioculturels (Mazurié de Keroualin 2003).

Les **facteurs de déclenchement** de ce(s) processus sont multiples et largement discutés, parmi lesquels : le redoux du **climat** après une période difficile (refroidissement de la fin du Tardiglaciaire) aurait favorisé les mises en cultures et les installations permanentes (e.g. Roffet-Salque *et al.* 2018 ; Sherratt 1997) ; la sédentarisation et **l'accroissement démographique** auraient créé le besoin de produire sa nourriture et générer des stocks accessibles toute l'année ; l'évolution de la **pensée symbolique** et de la conception du monde, notamment en plaçant désormais l'homme au-dessus des autres ressources selon le concept de J. Cauvin qui parle de « révolution des symboles » (Cauvin 2010). Si d'aucuns parlent également d'une possible évolution cognitive (e.g. Guilaine 2005), cette théorie ne semble pas prendre en compte la résistance de certains groupes de chasseurs-cueilleurs non moins évolués que leurs contemporains néolithisés et suppose que les populations nomades n'aient pas suivi la même évolution cognitive.

Les **raisons de la diffusion en Europe** de l'agriculture et de l'élevage, avec tout le *package* technique et culturel associé aux nouveaux modes de vie néolithiques, ne sont pas connues et peuvent être plurielles : pression démographique, recherche de nouveaux territoires ou à caractère social, passant

par exemple par la réalisation de grands banquets et l'étalage de denrées préférant peut-être un pouvoir social à qui a su produire plus de stock (e.g. Jeunesse 2010 ; Mazurié de Keroualin 2003).

### I.2.b. Processus et rythmes de diffusion en Europe

À partir du Proche-Orient, le Néolithique désormais bien établi se développe ensuite en Europe d'est en ouest **jusqu'à la façade atlantique**. Les nouveaux modes de vie se diffusent peu à peu (« *le paquet d'innovations diffuse ensemble* » ; Mazurié de Keroualin 2003, p. 80) par remplacement et/ou acculturation des sociétés mésolithiques de chasseurs-cueilleurs, en suivant **deux routes d'expansion** : l'une au sud, **méditerranéenne**, passe par la mer et l'autre au nord, **danubienne**, par les terres en suivant l'axe du Danube (Figure C1. 2). Le processus de néolithisation de l'Europe se déroule globalement entre 6800 et 5000/4900 cal BC (Guilaine 2005 ; Mazurié de Keroualin 2003 ; Zvelebil 2001).

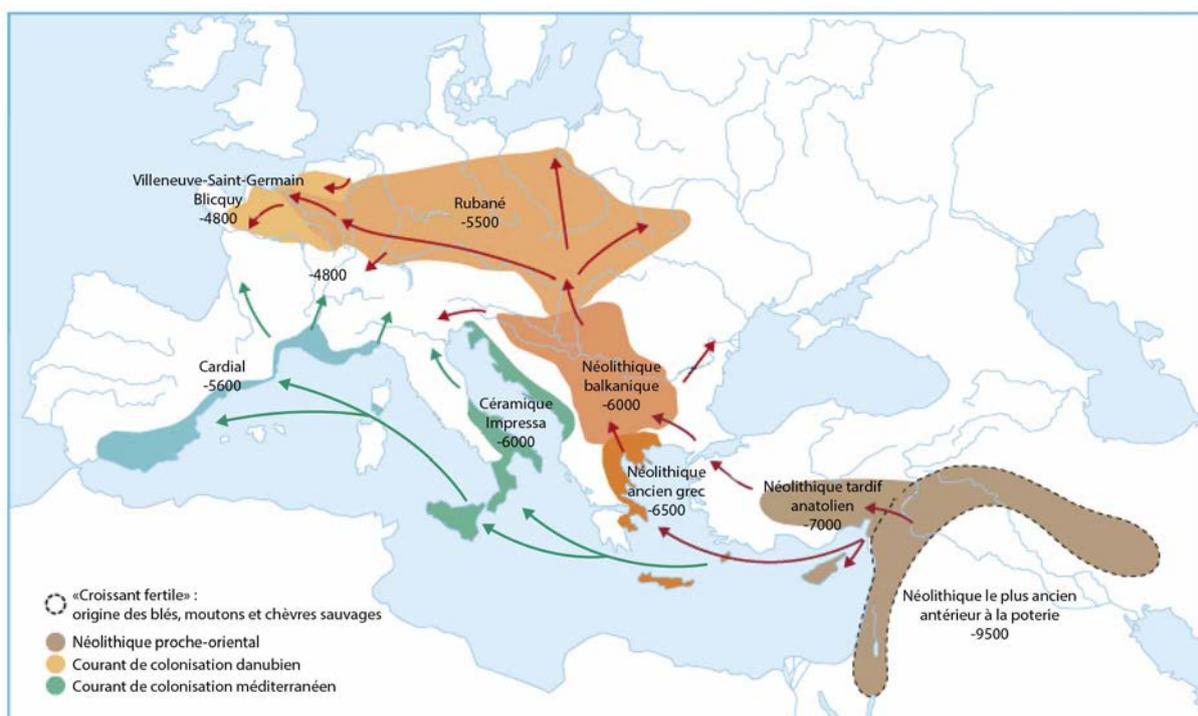


Figure C1. 2 : Carte de diffusion du Néolithique en Europe à partir du Proche-Orient selon les deux grands courants d'expansion, danubien et méditerranéen, par voie terrestre et maritime. D'après Demoule, 2007.

Différents modèles ont été proposés pour expliquer le processus, complexe, de néolithisation, que K. Mazurié de Keroualin (2003) regroupe, dans sa synthèse sur la genèse et la diffusion du Néolithique en Europe, en deux catégories principales :

- un modèle de **colonisation** et **d'expansion démographique**, notamment par « vague d'avancée » régulière, comme le développent A.J. Ammerman et L.L. Cavalli-Sforza sur la base des données génétiques (Ammerman et Cavalli-Sforza 1971 ; Ammerman et Cavalli-Sforza 1979) : avec l'augmentation démographique, les nouveaux agriculteurs néolithiques en

quête de terres nouvelles se déplacent et remplacent les populations mésolithiques de chasseurs-cueilleurs, de plus faibles effectifs.

- un modèle de **diffusion des techniques et des objets** et **d'acculturation**, volontaire ou forcée, défendu par différents chercheurs (dont J. Alexandrer, A. Gally, M. Zvelebil et P. Rowley-Conwy) proposant les concepts de frontières puis de continuité (e.g. Gally 1995 ; Zvelebil et Rowley-Conwy 1984) : le nouveau mode de vie et les innovations se transmettent de proche en proche, par contact et échanges entre les populations.

Ces modèles sont aujourd'hui considérés comme simplistes, ne prenant pas en compte la complexité des données archéologiques, topographiques, ni même génétiques. Finalement, les processus ont sans doute été **variables selon les régions** et **complémentaires** (Hamon et Manen 2021 ; Manen et Hamon 2018 ; Mazurié de Keroualin 2003). Différentes phases ont dû se succéder et s'imbriquer différemment selon les régions : des migrations ou des expansions démographiques des premiers néolithiques ont ensuite suscité des phases d'acculturation et de diffusion des savoir-faire de proche en proche, précédées d'autres expansions démographiques avec remplacement de populations par les anciens chasseurs-cueilleurs récemment néolithisés et ainsi de suite. La diffusion du Néolithique doit être envisagée sous ses différents aspects : **économiques, techniques et socioculturels**, ainsi que **génétiques**, nécessitant dans leur mise en place mobilité, phases d'adaptation et de stabilisation.

J. Guilaine propose une progression lente et « **arythmique** », un phénomène saltatoire connaissant des pauses permettant la mise en place de nouvelles cultures au contact des populations mésolithiques (Figure C1. 2 ; Guilaine 2000-2001, 2005). Certaines zones sont d'ailleurs restées longtemps mésolithiques, alors même que les nouvelles pratiques néolithiques circonscrivaient leur territoire (Jeunesse 2016b). Par endroits, le **substrat mésolithique local** est absorbé et intégré aux nouvelles cultures néolithiques. L'héritage mésolithique est en effet visible dans certains objets et techniques néolithiques et *a contrario*, l'influence de l'industrie néolithique est également perceptible dans les productions mésolithiques (Guilaine 2005 ; Rigaud *et al.* 2015). Les interactions entre groupes d'agriculteurs et de chasseurs-cueilleurs autochtones ont certainement eu un impact majeur dans la mise en place des cultures (cf. 1.4) et ce jusqu'au Néolithique moyen dans le Nord de la France à travers notamment les pratiques funéraires (Jeunesse 1996).

### **I.3. La domestication des espèces et l'anthropisation du milieu**

#### **I.3.a. Les débuts de l'agriculture**

Dans le contexte proche-oriental du début du Xe millénaire, fournissant vraisemblablement d'abondantes ressources, les espèces végétales aujourd'hui domestiquées (céréales et légumineuses) étaient présentes à l'état sauvage et récoltées depuis des millénaires (Willcox 2013 ; Willcox et

Stordeur 2012). C'est cette sélection, d'abord involontaire puis volontaire, qui a conduit à terme à une modification morphologique et génétique des espèces (Willcox 2005, 2007, 2013).

Ainsi pour les céréales, trois espèces sauvages se transforment peu à peu en espèces domestiques telles que nous les connaissons (presque) actuellement : **l'orge** (*Hordeum vulgare*) et deux variétés de **blé vêtu** que sont **l'engrain** (*Triticum monococcum*) et **l'amidonier** (*Triticum dicoccum*). Plus tard naîtra le **blé nu** (*Triticum aestivum/durum*), tendre (froment) ou dur. La sélection a induit une augmentation de la taille des grains et une attache plus résistante aux épis notamment, caractères permettant de distinguer les formes sauvages des formes cultivées à partir des restes retrouvés en contexte archéologique (graines carbonisées ou autres parties végétales conservées en contextes particuliers ; e.g. Willcox 2004).

Du côté des légumineuses, sont cultivés à peu près à la même période le **pois** (*Pisum sativum*) et les **lentilles** (*Lens culinaris* ; e.g. Abbo *et al.* 2009 ; Zohary et Hopf 1973).

Ces espèces domestiquées sont ensuite exportées dans les régions où elles ne poussent pas naturellement. On les retrouve en Europe en différentes proportions selon les régions et les cultures (Mazurié de Keroualin 2003).

D'autres espèces seront rapidement domestiquées ensuite, comme les **pois-chiche** (*Cicer arietinum*) et les **fèves** (*Vicia faba*) pour les légumineuses ou encore le **lin** (*Linum usitatissimum*), présents dès le début du IX<sup>e</sup> millénaire (au moins) au Proche-Orient (Fuller *et al.* 2012). Le **pavot à opium** (*Papaver somniferum*) fut également domestiqué et diffusé très tôt (jusque dans le Nord de la France, probablement à partir de l'espèce sauvage naturellement présente en région méditerranéenne (ainsi qu'au Proche-Orient ; Figure C1. 3 ; Salavert *et al.* 2018b ; Salavert *et al.* 2020).

Outre l'aspect morphologique ou la quantité importante des carporestes<sup>1</sup> retrouvés sur un site, la présence **d'outils agricoles** (faucilles, meules associées à du matériel néolithique) atteste également de la culture de ces végétaux (Hamon 2003 ; Ibáñez *et al.* 2015). Des preuves de la pratique de l'agriculture sont également fournies par l'observation de la modification des **assemblages en espèces rudérales**<sup>2</sup> au cours du temps, indiquant un prélèvement involontaire de plantes indésirables accompagnant les cultures et une amélioration du **travail du sol** (e.g. Bouby 2000 ; Bouby *et al.* 2020). Lorsque les végétaux ne sont pas conservés, ou en contexte funéraire, l'étude des **microrestes botaniques** (grains d'amidon et phytolithes) piégés dans le **tartre dentaire** permet de détecter le type de plantes consommées et tracer la diffusion des espèces cultivées avec l'arrivée du Néolithique (e.g. Goude *et al.* 2020b ; Jovanović *et al.* 2021). Quelques siècles plus tard, l'identification de la **traction animale** repérable sur les restes osseux de bovinés notamment témoigneront du travail du sol sur des

---

<sup>1</sup> La **carpologie** est l'étude des paléo-semences (carporestes) au sens large (graines et fruits) conservées en contexte archéologique (généralement carbonisées).

<sup>2</sup> Les **plantes rudérales** sont les plantes qui poussent en milieu anthropisé, à proximité des occupations, sur des sols modifiés par l'activité humaine.

surfaces plus étendues (e.g. Jacomet et Schibler 2006). **L'évolution des techniques agricoles** peut être tracée par diverses disciplines sur lesquelles nous reviendrons (cf. I.3.c et III.1).

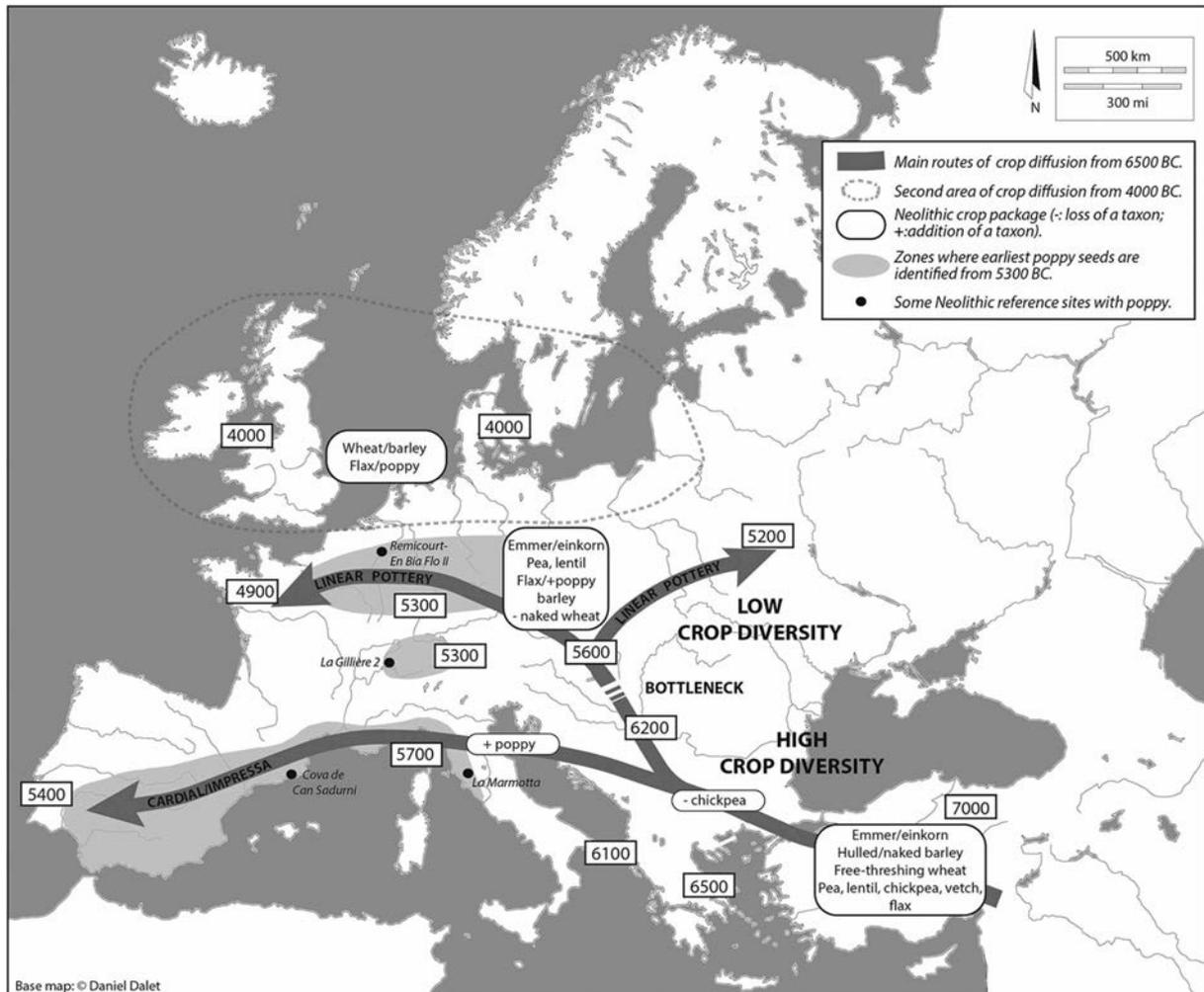


Figure C1. 3 : Carte et chronologie de la diffusion des plantes cultivées au Néolithique en Europe et premières preuves de la présence du pavot à opium en Europe occidentale. D'après Salavert *et al.*, 2018.

### I.3.b. Les débuts de l'élevage

Selon un processus similaire à la domestication des plantes et près d'un millénaire plus tard, plusieurs espèces animales parmi les plus chassées sont petit à petit domestiquées. La sélection des bêtes et la captivité (passant vraisemblablement par une phase d'apprivoisement) aboutiront à des modifications morphologiques (notamment une diminution de la taille et du dimorphisme sexuel) et génétiques des espèces qui permettront de les différencier de leurs ancêtres sauvages (Helmer 1992 ; Vigne 2011, 2012).

Après le chien (*Canis lupus familiaris*) déjà domestiqué par les chasseurs paléolithiques à partir du loup (*Canis lupus* ; e.g. Bergström *et al.* 2020 ; Boudadi-Maligne *et al.* 2020), les premières espèces animales domestiquées au Proche-Orient furent le **mouton** (*Ovis aries*) et la **chèvre** (*Capra hircus*), à partir du mouflon oriental (*Ovis orientalis*) et du bézoar (*Capra aegagrus*) respectivement, puis le

**porc** (*Sus scrofa domesticus*) à partir du sanglier (*Sus scrofa*) et enfin le **bœuf** (*Bos taurus*) à partir de l'aurochs (*Bos primigenus*). Les plus petites espèces ont été domestiquées en premier lieu, probablement parce qu'elles étaient plus simples à maîtriser (Vigne 2012). Ces animaux étaient élevés pour leur **viande** principalement, puis (excepté le porc) pour le **lait** (cf. *infra*).

Du Proche-Orient, ces espèces ont ensuite été **exportées (transportées) en Europe** avec les premiers colons éleveurs (Figure C1. 4 ; Arbogast et Jeunesse 2013 ; Tresset et Vigne 2007, 2011 ; Vigne 2012). Si les ancêtres sauvages du mouton et de la chèvre sont absents d'Europe et leurs descendants domestiques ont donc été clairement importés du Proche-Orient, l'image est plus complexe pour le bœuf et le porc. L'aurochs et le sanglier étaient déjà présents et chassés en Europe. Néanmoins, les études paléogénétiques indiquent que les bovins néolithiques d'Europe étaient génétiquement plus proches des lignées sauvages proche-orientales que des aurochs européens (e.g. Edwards *et al.* 2007). Le bœuf européen provient donc des lignées domestiquées au Proche-Orient. Il en est de même pour les premiers porcs néolithiques européens, bien que, dès le VI<sup>e</sup> millénaire cal BC, des laies (femelles du sanglier) aient été domestiquées (en Italie et Europe centrale notamment), remplaçant même les lignées proche-orientales quelques millénaires plus tard (Vigne 2012).

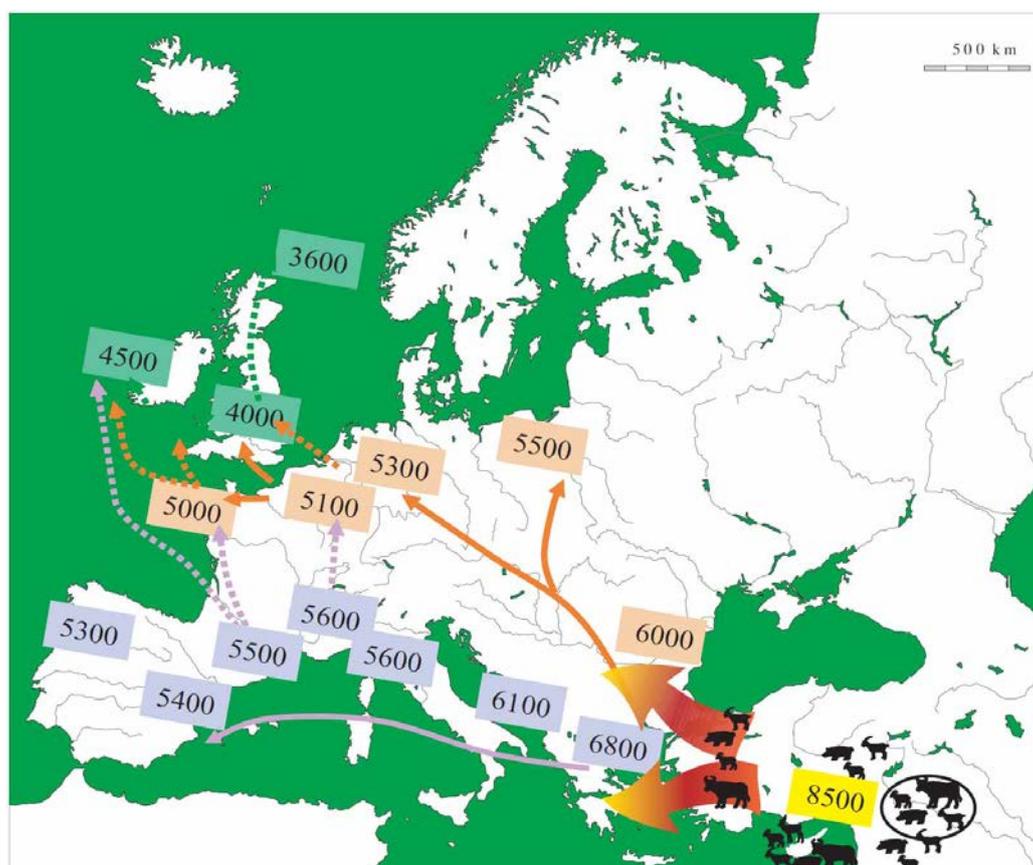
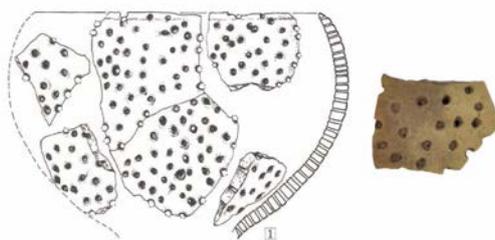


Figure C1. 4 : Chronologie et principales route de diffusion des animaux domestiques en Europe au Néolithique. D'après Tresset et Vigne, 2011.

- *De la viande ou du lait et autres « produits secondaires »*

D'abord considéré comme un **produit secondaire**, de récentes études suggèrent que le lait ait en réalité joué un **rôle prédominant** dans les premières domestications et la diffusion de l'élevage (Casanova *et al.* 2021 ; Cubas *et al.* 2020 ; Debono Spiteri *et al.* 2016 ; Ethier *et al.* 2017 ; Gillis *et al.* 2017 ; Vigne et Helmer 2007). Un projet ERC intitulé « *NeoMilk : the Milking Revolution in Temperate Neolithic Europe* » dirigé par R.P. Evershed explore spécifiquement cette thématique à travers différentes approches. En particulier, l'analyse des lipides piégés dans les poteries a permis de démontrer que du lait avait été contenu dans ces récipients dès les premières phases de néolithisation de l'Europe en diverses régions (Arbogast *et al.* 2018 ; Craig *et al.* 2005 ; Debono Spiteri *et al.* 2016 ; Evershed *et al.* 2008 ; Salque *et al.* 2013).

Alors que les premiers éleveurs étaient intolérants au lactose en raison de l'inactivation à l'âge adulte d'une enzyme, la lactase, servant à digérer le lactose, une mutation génétique responsable de la **persistance de la lactase** s'est ensuite répandue conjointement au développement de l'exploitation laitière (Burger *et al.* 2007 ; Burger *et al.* 2020). Le suivi de cette mutation permet de mieux comprendre la coévolution de ces processus (Leonardi *et al.* 2012 ; Ségurel et Bon 2017). Néanmoins, certaines transformations laitières telles que le fromage permettent de réduire la teneur en lactose, séparant le caillé riche en matières grasses et le petit lait contenant le lactose. La découverte de faisselles en Europe du Nord au VI<sup>e</sup> millénaire (Figure C1. 5) suggère que les **transformations laitières** de type fromagères ont dû advenir très tôt au Néolithique, rendant ainsi le produit laitier digeste aux premiers éleveurs intolérants au lactose (Salque *et al.* 2013). D'ailleurs, d'autres matériaux ont très tôt pu être utilisés pour la fabrication du caillé (vannerie, tissus). D'autre part, si le lait, probablement recherché pour sa richesse en calories (voir Johnson *et al.* 2018), ne pouvait être consommé que de façon saisonnière (les cycles de reproductions ont aujourd'hui évolué pour produire du lait toute l'année), la fabrication du **fromage** a permis de transformer le lait en un **produit stable également disponible hors saison** (Balasse *et al.* 2021). Les **profils d'abattage** d'animaux jeunes fournissent un argument supplémentaire pour identifier l'exploitation laitière et peuvent être évalués à partir de l'âge au décès estimé dans les assemblages fauniques des premiers sites néolithiques (cf. II.5.b ; e.g. Balasse et Tresset 2002 ; Balasse *et al.* 2017).



**Figure C1. 5 : Dessin représentatif de récipient percé (type faisselle) reconstitué et photographie de fragment spécifiques provenant de la région de Kuyavia (Pologne) soumis à des analyses de résidus lipidiques et ayant contenu du lait. D'après Salque *et al.*, 2013.**

En plus d'être élevé pour leur viande ou leur lait, les bovins étaient utilisés pour leur **leur force**, en Europe et au Proche-Orient, dès leur domestication (Helmer *et al.* 2018). Lorsque les instruments de traction ne sont pas retrouvés, c'est l'observation de pathologies et déformations osseuses liées au travail qui permettent d'identifier l'utilisation du bœuf pour sa force (*ibid.*). La traction animale sera un avantage majeur dans le développement de l'agriculture et dans les échanges et déplacements. D'autre part, chèvres, moutons et porcs étaient aussi utilisés pour leur **matière première** : **os** pour la fabrication d'outils, **peau** et **toison** (poils/laine ; Vigne 2012 ; Vigne *et al.* 2012).

- *Point de terminologie*

La sous-famille des **bovinés** comprend l'aurochs, sauvage, et la vache, domestique. Le terme « **bovin** » se rapporte généralement à l'espèce domestique et sera utilisé comme tel dans cette thèse si aucune mention n'est précisée. Si le **bœuf** en tant qu'animal-individu correspond au taureau castré, le terme peut être employé dans le langage courant – et culinaire notamment – pour se référer à l'espèce consommée, quel que soit le sexe de la bête. On parle de viande de bœuf ou viande bovine pour désigner les produits de boucherie, bien que ceux-ci puissent provenir de la vache également. Le lait de vache en revanche peut être inclus dans l'expression « exploitation bovine » ou « produits bovins » (sous-entendus viande et produits laitiers). Récemment domestiqué et de morphologie encore assez proche de son cousin sauvage (présent et chassé en Europe, d'ailleurs à forte valeur symbolique), la différenciation entre bovins domestiques et aurochs peut être délicate, à plus forte raison sur la base de quelques fragments d'os uniquement (e.g. Méniel 1984 ; Schmölcke et Groß 2021). En cas de doute, l'appellation boviné ou *Bos sp.* est préférée.

La sous-famille des **caprinés** regroupe **moutons** et **chèvres** (auxquels les adjectifs « ovin » et « caprin » se rapportent respectivement). Ces derniers sont les termes génériques employés pour désigner les espèces domestiques. Si l'utilisation du nom « caprin » regroupe l'ensemble des espèces sauvages et domestiques, il ne concerne que les animaux domestiques dans ce travail, lorsqu'aucune mention « sauvage » n'est expressément ajoutée (aucune espèce sauvage de caprinés n'est répertoriée dans les assemblages cynégétiques de la région considérée). D'autre part, si le **mouton** est en principe le mâle castré de la brebis, le terme est employé ici sans distinction de sexe pour faire référence à l'animal exploité pour sa viande, son lait ou sa laine. De façon similaire, la **chèvre** est la femelle du bouc mais définit également l'espèce domestique indistinctement de son sexe, utilisée pour l'exploitation laitière et bouchère (ainsi que pour sa laine ou sa peau). Les deux espèces étant difficilement différenciables sur la base de leur squelette (infra-crânien notamment ; e.g. Salvagno et Albarella 2017), chèvres et moutons peuvent être regroupés sous le terme d'« **ovicaprins** » (rassemblant ovins et caprins domestiques).

La famille des **suidés** ou **porcins** englobe le **porc** (domestique) et le **sanglier** (sauvage), entre autres. L'adjectif **porcin** se réfère généralement à l'**élevage** et donc aux animaux domestiques. C'est en ce

sens qu'il pourra être employé dans ce travail. À l'inverse, nous emploierons le terme de « **suidés** » lorsque la détermination du caractère **sauvage ou domestique** n'a pas été possible ou pour désigner l'ensemble des espèces. Le terme suinés représente la sous-famille et, étant peu employé, nous ne le retenons pas ici. Le **porc**, sans distinction de sexe, est exploité pour la viande. Le **cochon** caractérise généralement l'animal vivant lorsque le porc définit plutôt l'animal élevé et tué pour être consommé. Les deux termes seront employés indistinctement dans ce travail pour désigner l'espèce domestique.

### I.3.c. Évolution de l'agropastoralisme et transformation du milieu

Assez rapidement, en l'espace de quelques siècles, les pratiques agropastorales vont évoluer. Les **premières transhumances** sont visibles à la fin du PPNB et en Turquie notamment (Vigne 2011). Le pastoralisme (à l'échelle des communautés) et l'élevage (à l'échelle des maisonnées) se développent, avec l'utilisation des produits secondaires (traction animale, laine, etc.) et une augmentation de la part des ressources d'élevage par rapport à la faune chassée.

On observe en parallèle une **meilleure gestion des cultures**. Ces améliorations sont détectables par l'étude conjointe des données carpologiques, typo-fonctionnelle et tracéologiques des outils de récolte et de mouture (e.g. Gassin *et al.* 2008 ; Hamon *et al.* 2019) ainsi que par l'observation de l'évolution des assemblages végétaux (e.g. Bouby 2000) ou l'augmentation des pathologies liées au travail du bétail (e.g. Arbogast *et al.* 2018 ; Helmer *et al.* 2018 ; Vigne 2006). Elles sont également repérables par le traçage isotopique et autres techniques biochimiques permettant d'observer des phénomènes d'irrigation (vs sécheresse) ou encore de fertilisation (e.g. Bogaard *et al.* 2013 ; Ferrio *et al.* 2005 ; Maxwell *et al.* 2014 ; Riehl *et al.* 2014 ; Wallace *et al.* 2013 ; cf. Chap2.IV.3.a).

**L'utilisation du fumier** comme fertilisant des sols pour la culture céréalière montre bien l'interconnexion entre élevage et agriculture. D'autre part, les diagrammes anthracologiques (charbons de bois) et les restes retrouvés dans les fumiers exceptionnellement bien conservés des sites lacustres de Suisse et d'Allemagne montrent que les **arbres sont utilisés pour le fourrage** (branchettes et feuilles) comme **compléments alimentaires** ou pendant la mauvaise période (froid hivernal et sécheresse estivale ; Arbogast *et al.* 2018 ; Thiébault 2005). L'analyse isotopique séquentielle dans les dents de bovins du site néolithique de Bercy dans la vallée de la Seine confirme cette stratégie de supplémentation alimentaire pendant l'hiver et met en évidence la **saisonnalité des naissances** en lien avec celle-ci. Une mise-bas pendant une période plus longue a comme conséquence directe une disponibilité quasi annuelle du lait dont la consommation a par ailleurs été attestée par la gestion démographique du troupeau (Balasse *et al.* 2012).

Avec ces innovations, **l'environnement** commence à être **profondément modifié** (Leroyer *et al.* 2008). D'une part la construction des villages et structures de plus en plus imposantes (palissades, tombes) engendre des coupes importantes de forêt pour l'utilisation du bois, ce dernier étant également

prélevé pour se chauffer et fabriquer les outils (e.g. Bocquet et Noël 1985 ; López-Bultó et Piqué Huerta 2018 ; Salavert *et al.* 2018a). L'ouverture du milieu se poursuit par la mise en place de cultures et la pratique du pastoralisme, principalement à proximité des villages. D'autre part, l'importation des nouvelles espèces va influencer sur le milieu d'accueil, modifiant les équilibres écosystémiques et la biodiversité (Dudley et Alexander 2017 ; Vigne 2012). De façon directe ou indirecte, l'homme va peu à peu modifier sa niche écologique (O'Brien et Bentley 2015 ; O'Brien et Laland 2012).

En parallèle, les **ressources sauvages** ne sont toutefois pas abandonnées. La part de la chasse, de la pêche et de la cueillette est **variable d'une région à l'autre** bien qu'elle semble **globalement diminuer** au cours du Néolithique au profit de la nouvelle économie de production (e.g. Antolín et Jacomet 2015 ; Bouby *et al.* 2018 ; Treasure *et al.* 2019 ; Vigne 2011, 2012). La proportion de **plantes sauvages** au menu des premiers fermiers est compliquée à évaluer tant les restes se conservent mal et sont difficilement détectables même par les nouvelles méthodes biogéochimiques. Néanmoins, elles ont dû faire partie de l'alimentation et de la pharmacopée de façon non négligeable (Antolín et Jacomet 2015 ; Bouby *et al.* 2018 ; Couplan 2020 ; Treasure *et al.* 2019). La **chasse** devient plutôt symbolique en ce qui concerne les grands mammifères tels que le cerf, l'aurochs ou le sanglier, mais il subsiste une méconnaissance des pratiques concernant le petit gibier, la collecte de mollusques et de coquillages par exemple, ou encore des œufs (Jeunesse 2010 ; Jeunesse et Arbogast 1997 ; Schibler *et al.* 1997 ; Sidéra 2003 ; Sidéra *et al.* 2006 ; Tresset 1993). D'autre part, si la **pêche** semble être en grande partie abandonnée sur les côtes atlantiques et méditerranéennes au profit de l'agriculture et de l'élevage (e.g. Richards et Schulting 2006 ; Richards *et al.* 2003b ; Schulting 2018), elle est clairement maintenue dans d'autres régions, notamment dans certaines zones des Gorges du Danube et les Balkans, bien que les pratiques puissent évoluer (Cramp *et al.* 2018 ; de Becdelièvre *et al.* 2020 ; Jovanović *et al.* 2019).

### 1.4. Des cultures et des hommes – la difficile définition de culture

Les cultures sont généralement définies sur la base des **productions matérielles**, essentiellement céramiques, parfois lithiques, et notamment sur leur typologie, indépendamment – le plus souvent – de l'approche technique et fonctionnelle des objets ou encore des pratiques funéraires (e.g. Moinat et Chambon 2007).

En effet, les pièces lithiques et céramiques sont les plus couramment retrouvées sur les sites néolithiques et l'identification de **styles communs** et de leur **répartition** permet généralement de circonscrire des espaces bien définis sur un temps donné. Les groupes humains sont ainsi généralement associés à ces unités matérielles à partir desquelles l'on définit les cultures. Néanmoins, celles-ci ne reflètent peut-être pas les structures identitaires sociales et idéologiques, voire économiques de ces groupes (Demoule 2007 ; Gallay 2016). D'autre part, des **influences extérieures**

sont souvent visibles dans les assemblages mobiliers en raison des échanges, parfois à très longue distance, existant au Néolithique. Ainsi, les **frontières culturelles** se floutent et les entités culturelles sont parfois **difficiles à définir nettement**.

C'est le cas par exemple du **Chasséen** (ou des Chasséens ?) : principalement défini sur la céramique, initialement celle du Camp-de-Chassey en Bourgogne (site éponyme), son origine est probablement méditerranéenne mais il voit des extensions et variantes jusque dans le Nord de la France avec le Chasséen septentrional (Perrin *et al.* 2016 ; cf. I.5). Dans les pratiques funéraires comme dans l'habitat, le Chasséen ne constitue pas une entité homogène et la définition de ses contours culturels et de son identité reste encore à établir (*ibid.*). Le **phénomène Chamblandes**, basé sur les pratiques funéraires, est un autre exemple de la difficile définition des cultures préhistoriques : les cistes de Chamblandes sont des coffres de bois ou de pierre accueillant un certain type d'inhumation (cf. I.5.b) qui se retrouvent dans une aire de répartition partant de Suisse occidentale et s'étalant de la Catalogne au Bassin parisien en passant par le nord de l'Italie (Moinat et Chambon 2007). Le phénomène, transculturel, « *illustre de manière éclatante l'absence de concordance entre les constructions archéologiques que nous appelons cultures et les pratiques funéraires* » (*ibid.*, p. 11). Comme nous le verrons dans ce travail (cf. Chap3), il est parfois **difficile d'attribuer une culture à un ensemble archéologique** (indigence du mobilier et/ou diversité renvoyant à plusieurs cultures) et l'imbrication de celles-ci au sein d'un territoire, qu'il soit vaste ou localisé, pose souvent la question de l'identité et de l'interaction des groupes humains.

Pour comprendre la **structuration d'un territoire** à l'échelle socioculturelle et économique – et ses relations avec l'extérieur –, il est donc primordial de considérer aussi les groupes humains au-delà des entités culturelles et par comparaison de proche en proche, de la gestion des ressources à l'organisation sociale en passant par les échanges inter-groupes de biens et de personnes. La multiplicité et la concordance des observations, alliant approches typologiques, techniques et fonctionnelles du mobilier, définition des types d'habitat, récurrences et « normes » dans les pratiques funéraires (cf. Bocquentin *et al.* 2010), caractérisation biologique et génétique des populations, facteurs environnementaux, économies de production et approche socioculturelle des comportements de subsistance offrent une stratégie de choix pour aborder les questions d'identité et de modes de vie des populations du passé. Si tous les critères ne peuvent être réunis dans divers contextes et ne sont bien souvent pas observables simultanément en archéologie, l'intégration d'un maximum de données est incontournable à la définition des groupes humains et de leurs relations internes et interrégionales. Ainsi le **Néolithique** (pour ne citer que cette période) apparaît souvent **complexe et diversifié** dans ses pratiques, domestiques et funéraires, économiques, sociales et idéologiques, même au sein d'une même « entité culturelle » (e.g. Bentley 2013 ; Bickle 2016 ; Bickle *et al.* 2016 ; Bickle et Whittle 2013 ; Binder et Maggi 2001 ; Gally et Nicod 2000 ; Goude *et al.* 2021 ; Jeunesse 1996).

Néanmoins, les « **cultures** » **matérielles** permettent de proposer des espaces d'évolution commune des groupes humains, partageant des objets pouvant porter un symbolisme identitaire, et de mettre en évidence certains processus de diffusion, comme celui au sens large des premiers fermiers d'Europe. Ainsi les décors de la céramique ont notamment permis de caractériser les deux grands courants de néolithisation et leurs cultures dérivées.

- *Les deux grands courants de néolithisation identifiés sur la poterie : une dichotomie nord-sud*

Dès les premières phases de néolithisation, on distingue en Grèce puis dans la péninsule balkanique différents groupes à **Céramique Peinte** (blanc ou rouge) parmi lesquels la Céramique Monochrome et le groupe de Starčevo (Figure C1. 6). Ce type de décor évolue à l'ouest vers la **Céramique Linéaire** ou culture **Rubanée**, dénommée ainsi pour les bandes linéaires qui la décorent (lignes verticales, chevrons, motifs parfois curvilignes), réalisées à l'aide d'un peigne ou d'un poinçon (Mazurié de Keroualin 2003). Également nommée **LBK** pour LinearBandKeramic, cette culture du Néolithique ancien danubien – devrait-on dire complexe culturel puisqu'il est polymorphe – s'étend en Europe depuis les Balkans jusqu'au Bassin parisien en passant par la Transdanubie et le Bassin rhénan (cf. I.5.b). Bien qu'une certaine diversité existe localement, avec des variantes matérielles, symboliques et socio-économiques, des éléments récurrents (forme des maisons, pratiques funéraires, modes alimentaires) permettent de définir une certaine unité de ce complexe culturel en comparaison de celui qui se développe au sud en parallèle.

Pour le **courant méditerranéen**, les décors céramiques imprimés à l'aide d'outils, de coquillages ou de doigts donneront son nom à la culture **Impressa** sur tout le pourtour de l'Adriatique (Figure C1. 6), puis au **Cardial**, sur les côtes méditerranéennes occidentales, pour ses décorations réalisées par impression du coquillage *Cardium edule*. Le complexe Impresso-Cardial rassemble en réalité une grande diversité culturelle (Mazurié de Keroualin 2003).

NB : À la confluence de la Hollande, de l'Allemagne, de la Belgique et de la France, deux catégories de poteries se détachent du style de la Céramique Linéaire : la céramique de « **La Hoguette** » et du « **Limbourg** » (Figure C1. 6), qui semblent trouver leur origine dans la Céramique Imprimée méditerranéenne. Il est possible que des groupes de chasseurs-cueilleurs mésolithiques aient réalisé ces poteries au contact des premiers colons méditerranéens, avant même que ne soit apporté l'agropastoralisme (Manen et Mazurié de Keroualin 2003). Si l'identité des groupes porteurs de ces styles céramiques particuliers n'est pas connue (différentes interprétations sont proposées), la découverte de ces assemblages documente particulièrement la relation avec les chasseurs-cueilleurs mésolithiques et les relations entre le nord et le sud (*ibid.*).

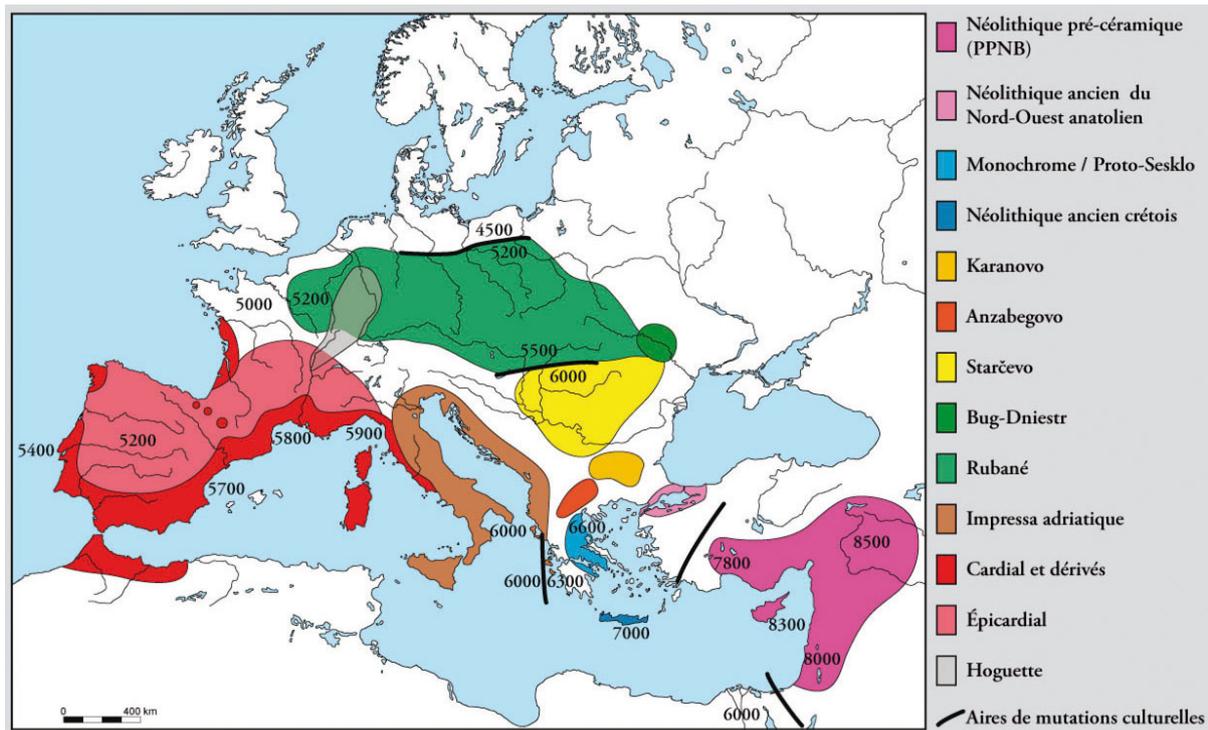


Figure C1. 6 : Répartition et propagation chronologique des cultures néolithiques « primaires » en Europe à partir du Proche-Orient. Les barres noires marquent les pauses créant des aires de mutation culturelles au contact des chasseurs-cueilleurs autochtones. D'après Guilaine 2003.

### I.5. Le Néolithique ancien et moyen en France et dans les régions limitrophes

L'Impresso-Cardial arrive dans le Sud de la France vers 5800 cal BC et le Rubané franchi le Rhin vers 5200 cal BC. Les deux courants se rejoignent aux alentours de 4800 cal BC dans le Centre de la France, période qui marque approximativement le début du Néolithique moyen sur le territoire (cf. Figure C1. 2 ; Demoule 2007). La France occupe donc une position particulière, de *finisterre*, selon l'expression de J.-P. Demoule (*ibid.*, p20), à partir de laquelle l'arrêt de l'avancée néolithique et la rencontre entre les grands ensembles culturels permettront la mise en place de nouvelles formes d'organisation sociale et de gestion du territoire.

#### I.5.a. Le courant méditerranéen et ses dérivés

- *Le Néolithique ancien méditerranéen*

Dans le Midi de la France, la première vague de colonisation des agropasteurs néolithiques arrive avec le complexe culturel **Impressa** (entre 5800 et 5600 cal BC) depuis l'Italie, en passant par les Appenins ou par voie maritime (les techniques de navigation sont maîtrisées depuis le Mésolithique ; Demoule 2007). Les côtes sont d'abord colonisées, puis les implantations se font dans l'arrière-pays dans un second temps. Un hiatus de plusieurs centaines d'années (près d'un millénaire par endroits) sépare les derniers sites mésolithiques découverts (castelnoviens) des premières occupations néolithiques,

compliquant la compréhension des modalités d'arrivée du Néolithique dans le Sud de la France (*ibid.*). Faisant suite à l'Impressa, le **Cardial** arrive également d'Italie, vers 5400 cal BC dans les Alpes-Maritimes, puis s'étend de la Provence orientale à l'Espagne. L'**Épicardial** se développe en parallèle (ou successivement selon les séquences considérées, la filiation culturelle avec le Cardial étant discutée) en Languedoc et dans l'arrière-pays (Figure C1. 6) : sa céramique est caractérisée par des cannelures et des coups de poinçon, les impressions au Cardium disparaissent (Manen et Guilaine 2007 ; van Willigen 1999, 2004).

Considérant globalement le complexe Impresso-Cardial (et Épicardial) au-delà de sa diversité culturelle, autrement dit le Néolithique ancien méditerranéen dans son ensemble, plusieurs éléments renvoient à la sphère italienne et à la Ligurie en particulier. Notamment la présence d'**obsidienne**, roche volcanique des îles tyrrhéniennes, qui témoigne de réseaux d'échanges à longue distance (Vaquer 2015). Plus tard, les objets en **roche verte** provenant des Alpes et du Piémont italien feront leur apparition dans les assemblages mobiliers, reflétant les circulations d'objets et le lien entre ces régions. Dans l'industrie lithique, le **silex blond bédoulien** est représentatif de cette sphère culturelle. Les objets en pierre polie sont toutefois peu nombreux. La **céramique** porte les décors caractéristiques énoncés précédemment (cf. I.4), la fabrication des poteries est soignée et plutôt homogène selon les faciès culturels (Van Willigen 2004). D'autre part, les **outils en os d'animaux domestiques** (poinçons, lissoirs pour la céramique, cuillères) constituent une particularité des agropasteurs du Midi de la France et marquent la frontière récemment établie entre la sphère sauvage et domestique (Demoule 2007).

Les **maisons** sont de formes variées (ovales, rectangulaires, à absides), probablement en terre, torchis et bois, parfois avec des aménagements complexes (Beeching et Sénépart 2009). Les sites sont principalement en grotte et en abris sous roche mais aussi en plein air. Le **blé amidonnier** constitue la culture majoritaire à l'Impressa, puis au Cardial les **blés dur et tendre** ainsi que l'**orge** sont cultivés (cf. II.5.a). Les **ovicaprins** prédominent le cheptel domestique, suivi du bœuf et du porc. La chasse, la pêche et la cueillette sont également pratiquées, dans des proportions moindres et variables (cf. II.5.b).

Les pratiques funéraires du **Cardial** du Sud de la France sont peu documentées (une augmentation du niveau de la mer a notamment englouti une partie des gisements, ne laissant aux archéologues qu'un accès lacunaire au corpus, vraisemblablement pas représentatif de l'ensemble des vestiges), mais les sociétés paraissent peu hiérarchisées et les inhumations sont principalement retrouvées en grotte ou en abri. Pour Ph. Chambon, les inhumations du Sud de la France apparaissent comme « marginales » (peu nombreuses et peu codifiées) alors que dans le nord, elles seraient représentatives d'une « élite sociale » (codifiées et valorisées ; Chambon 2006 ; cf. I.5.b).

Le Néolithique ancien méditerranéen se développe ensuite dans le **Bassin rhodanien** (on parle de Néolithique ancien rhodanien) et sur la **façade atlantique** (Néolithique ancien centre-atlantique ou

NACA) où il est toutefois moins connu, avec des particularités régionales que nous ne développerons pas ici (Figure C1. 7 ; voir par exemple Manen *et al.* 2016). Le Néolithique ancien rhodanien documente particulièrement les relations nord-sud des phases les plus précoces du Néolithique, thématique générale qui retiendra particulièrement notre attention dans ce travail – pour les périodes ultérieures cependant – en raison de la position intermédiaire, de façon analogue, de notre région d'intérêt au sein du Néolithique moyen français (cf. II.2).

- *Le Néolithique moyen méditerranéen*

Faisant transition entre le Néolithique ancien et moyen, la culture des « Vases à Bouche Carrée » ou **VBQ** débute aux alentours de 5200-5000 cal BC dans l'aire liguro-provençale (Binder *et al.* 2008). Elle se développe concomitamment aux phases les plus anciennes du Chasséen (pré-, proto- et Chasséen ancien ; *ibid.*). Le groupe de **Saint-Uze** voit le jour dans la moyenne vallée du Rhône en parallèle du Proto-Chasséen et le groupe de **Montbolo** apparaît à peu près au même moment en région est-pyrénéenne.

Le **Pré-Chasséen**, le **Proto-Chasséen** puis le **Chasséen ancien** correspondent aux phases anciennes du Chasséen entre 4500 et 4000 cal BC approximativement, voire plus tôt. Puis le **Chasséen méridional** succède aux phases précédentes aux environs de 4000 à 3500 cal BC. Il présente notamment des affinités avec le Montbolo et avec les groupes apparentés des *Sepulcres de fossa* en Catalogne, du Cortaillod en Suisse et de la culture de Lagozza dans le Nord de l'Italie (Perrin *et al.* 2016). Le Chasséen diffuse ensuite vers le nord (l'antériorité des différentes séquences chasséennes est cependant discutée) pour constituer le **Chasséen de Chassey** (du site éponyme de Chassey-le-Camp en Bourgogne) puis le **Chasséen septentrional** à la toute fin du Ve millénaire (cf. I.5.b).

Encore mal connu, le **Chasséen** regroupe dans le Sud de la France des inhumations très diverses, individuelles et collectives, en grotte et en plein air, dans des dispositifs variés : en fosses simples, dans les fossés d'enceinte et en silos, mais également en cistes de pierre ou en alcôves (Beyneix 2007 ; Vaquer 1998).

La **céramique** est composée notamment de vases globuleux puis d'**écuelles carénées** typiques de cette culture, généralement équipées d'anses pour la préhension (Vaquer 1991).

Les **sites d'habitat** en plein air sont plus nombreux qu'à la période précédente, la taille des villages semble augmenter (peut-être en lien avec la démographie) et certains comportent des structures défensives (Vaquer 1991). Depuis le Néolithique ancien, la dualité entre sites **de grotte et d'abri** et sites de **plein air** fait penser à une **fonction spécialisée** de ces sites : bergeries vs agricoles (Helmer *et al.* 2005).

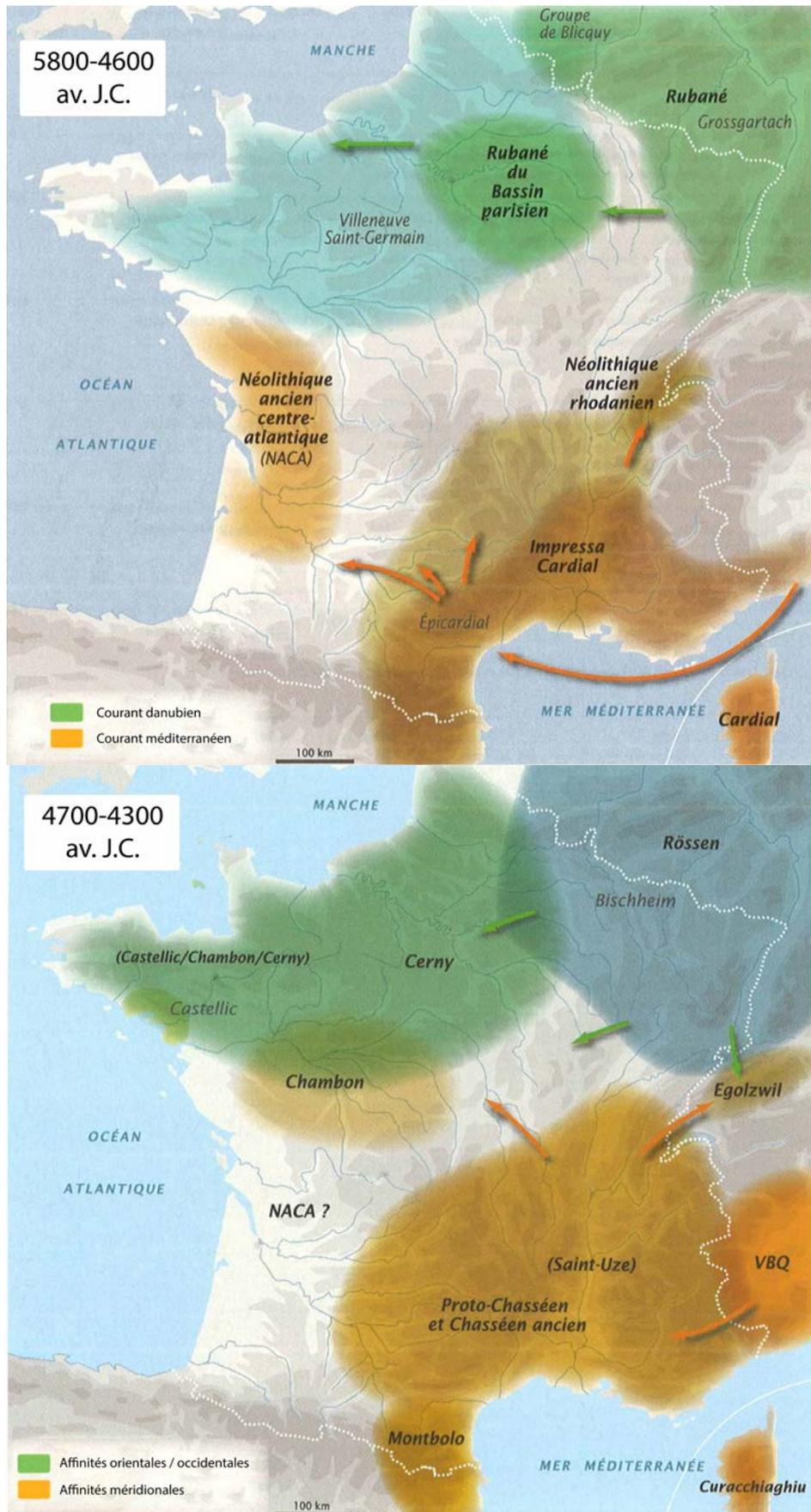
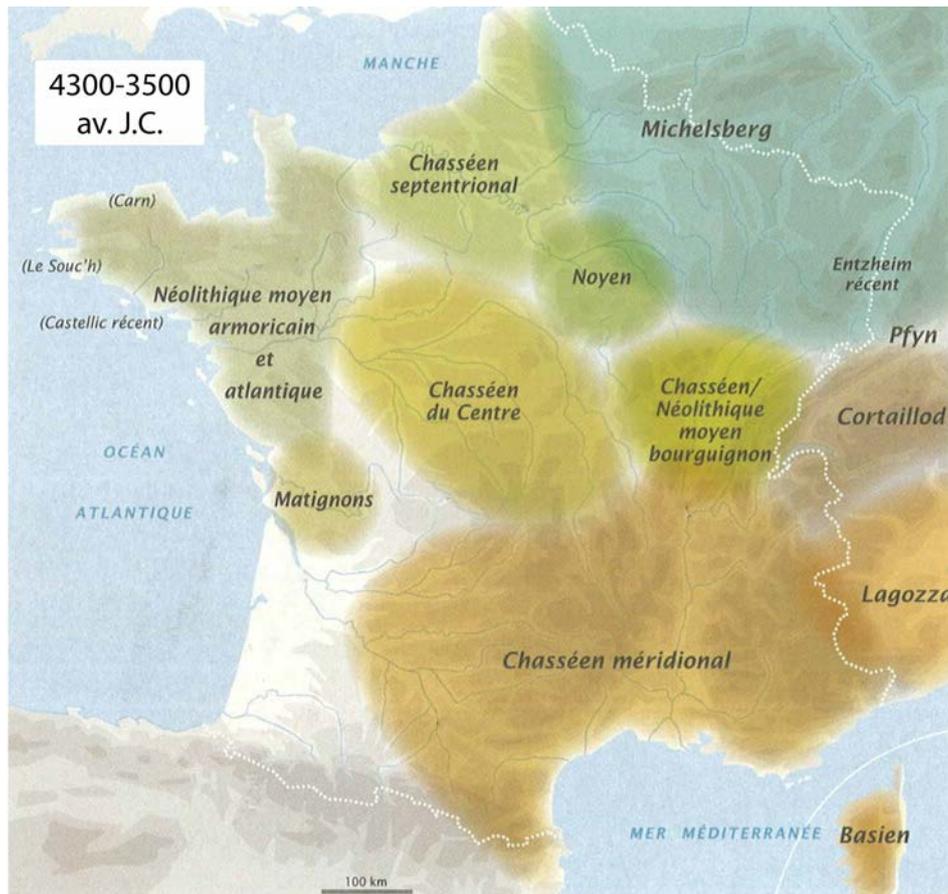


Figure C1. 7 : Cartes de répartition des différentes cultures du Néolithique ancien et moyen en France. Modifié d'après Demoule, 2007, p. 92-94.



(suite)

Les **productions alimentaires** reposent sur la culture de l'orge et des blés tendre et dur, ainsi que sur l'élevage ovicaprin, bovin et porcin. Les **activités agropastorales** s'intensifient avec des parcours peut-être plus extensifs favorisant les échanges transalpins notamment (Binder *et al.* 2008). Les sites de bergeries reposant sur l'élevage des caprinés sont plus nombreux mais, dans les sites de plein air comme ceux du Toulousain ou de la vallée du Rhône, la place du bœuf prédomine (Brehard 2011 ; Bréhard *et al.* 2014).

D'autre part, le Chasséen voit se **développer les échanges à longue distance** (obsidienne de Lipari, roche verte alpine et quartz hyalin, silex de Haute-Provence) indiquant la perméabilité des espaces sociaux et l'émergence des richesses et du pouvoir économique (Beyneix 2007 ; Binder *et al.* 2008).

### I.5.b. Le courant danubien et ses dérivés

- *Le Néolithique ancien danubien*

Dans le Nord de la France, l'arrivée du Néolithique est plus tardive. Le **Rubané ou LBK** arrive d'outre-Rhin (Allemagne, Belgique, Hollande) à la **fin du VI<sup>e</sup> millénaire**. Il porte avec lui plusieurs traits typiques comme les **grandes maisons danubiennes** d'architecture **rectangulaire** (mesurant parfois plus de quarante mètres de long, elles nécessitent des connaissances architecturales affirmées ;

cf. Figure C1. 9, p.32), souvent de même orientation est-ouest, composant des **villages** avec parfois jusqu'à une quarantaine de maisons, comme à Bischoffsheim en Alsace ou une trentaine à Cuiry-les-Chaudardes dans l'Aisne (Demoule 2007). Dans ce dernier site, une répartition des déchets de boucherie différente selon les maisons (dans les fosses latérales) suggère la mise en place d'une organisation sociale particulière au sein du village en lien avec les comportements de subsistance (Hachem 2011a ; cf. II.5.b).

À l'ouest du Rhin, deux ensembles majeurs peuvent être identifiés sur la base des styles céramiques : le Rubané du Nord-Ouest comprenant la Basse-Alsace, le Neckar et le Hainaut, et le **Rubané du Sud-Ouest** intégrant deux faciès distincts que sont le Rubané de Haute-Alsace et le **Rubané récent du Bassin parisien (RRBP)**. Ce dernier nous intéresse tout particulièrement dans ce travail.

De la céramique du **Limbourg** et de **La Hoguette** a été retrouvée dans ces ensembles, témoignant probablement de contact avec les chasseurs-cueilleurs autochtones. Les **influences méridionales** ne sont pas absentes des industries céramiques et lithiques du Rubané, de même que certains éléments de l'économie de production (cf. I.4). Les **circulations d'objets** (matières premières et objets finis) sont visibles à travers les assemblages mobiliers, comme en témoignent les spondyles méditerranéens ou les coquillages de l'Atlantique, ou encore la roche dure ayant servi à la fabrication des herminettes provenant principalement des Ardennes.

Parallèlement aux habitations danubiennes caractéristiques, de **grandes nécropoles apparaissent**, à proximité des habitats, à l'est du Rhin et en Alsace, pouvant compter plus de 200 sépultures comme par exemple à Schwetzingen en Rhénanie-Palatinat (Allemagne ; Gerling et Francken 2007). Après avoir été longtemps décrits comme faiblement différenciés, les groupes rubanés apparaissent aujourd'hui plus complexes, avec des sociétés inégalitaires révélant des richesses partagées par quelques groupes minoritaires (Jeunesse 1996).

Dans le Rubané occidental, C. Jeunesse distingue **deux traditions** (I et II) dont les **pratiques funéraires** divergent, qui suivent globalement la répartition des styles céramiques (Jeunesse 1995, 1996). La tradition I concerne le Rubané du Sud-Ouest (Bassin parisien, Haute-Alsace) et la tradition II le Rubané du Nord-Ouest, le Neckar et la Basse-Alsace (Jeunesse 1995). Ces traditions découlent probablement de la somme d'un clivage déjà ancré dans le processus de colonisation rubanée et de l'acculturation du substrat mésolithique local.

Dans la **tradition I** et en particulier dans le **Bassin parisien (RRBP)**, les tombes sont le plus souvent isolées ou en petits groupes associés à l'habitat. Il existe aussi de petites nécropoles de villages, en opposition aux grandes nécropoles hors habitat retrouvés plus à l'est. De façon presque systématique, les inhumés se présentent en position repliée sur le côté gauche, tête à l'est, déposés dans des fosses en pleine terre. Le corps est fréquemment saupoudré d'ocre et accompagné de parure en coquillages, notamment de spondyles (héritage mésolithique local ; Jeunesse 1995). Des herminettes (en pierre

polie) sont plus souvent associées aux hommes – des distinctions hommes/femmes sont en effet visibles dès le Rubané (Augereau 2021a) – et des tombes d'enfants pourvues d'un mobilier similaire à celles des adultes suggèrent une transmission à la descendance (Jeunesse 1996). Par ailleurs, des structures plus complexes ont été mises en évidence à Berry-au-Bac et Écriennes « La Folie » notamment : les **tombes à alcôve**. Caractéristiques du Rubané récent du Bassin parisien (RRBP) et très standardisées, elles présentent au nord un creusement latéral en niche où repose le défunt, ménageant un espace autour du corps, et une banquette au sud recevant des offrandes dont subsistent les vases en céramique (Bonnabel *et al.* 2003 ; Jeunesse 2003 ; Thevenet 2004).

La **tradition II** recense des sépultures, essentiellement primaires et individuelles, isolées en habitat, en petits groupes associés aux habitats ou dans des **nécropoles** de taille variable à l'écart des habitats (*e.g.* Vendenheim, Bas-Rhin ; Boës *et al.* 2007). Le corps des défunts est toujours fléchi sur le côté gauche mais on y trouve des orientations atypiques et **antipodiques** (tête à l'ouest) par rapport à la tradition I. L'ocre est préférentiellement déposé en fragment et le mobilier est majoritairement composé de céramique, de meules et d'outillage lithique, à la différence de la tradition I (Jeunesse 1995, 1996). Des regroupements de tombes sont observés dans les grandes nécropoles rubanées, ayant peut-être une signification sociale (Jeunesse 1996).

L'agriculture concerne le blé amidonnier et l'engrain issu de la sphère danubienne, mais également l'orge, le pavot et les lentilles qui proviendraient d'influences méridionales (*cf.* II.5.a). Le bœuf est majoritaire dans les assemblages fauniques, suivi du porc et des caprinés dans des proportions variables suivant les régions. La chasse est généralement minoritaire et tient plutôt un rôle symbolique (*cf.* II.5.b).

Dans le Bassin parisien, le **Villeneuve-Saint-Germain (VSG)** succède au RRBP et lui est même partiellement contemporain selon certains auteurs (Jeunesse 1998, Strien 2006). Il marque la fin du Néolithique ancien. Le **groupe de Blicquy** constitue une variante du VSG au sud de la Belgique et lui est généralement associé pour former l'ensemble Blicquy/Villeneuve-Saint-Germain (B/VSG ; *e.g.* Lanchon 2008).

À ce jour, aucune **sépulture** hors contexte d'habitat n'est connue pour le VSG. Le plan des **maisons** évolue vers une forme trapézoïdale, dès le Rubané. Parmi les objets de **parure**, la fréquence des coquillages diminue au profit des bracelets et anneaux. À l'image de l'Épicardial au sud, le VSG peut être interprété comme une diffusion du Néolithique à **l'intérieur des terres**. Alors qu'au RRBP, l'occupation se fait d'abord en bord de vallée le long de l'Aisne, de la Marne et de la Seine, le VSG s'étend aux plateaux environnants (Demoule 2007).

- *Le Néolithique moyen*

Au Néolithique moyen, comme dans le Midi de la France, les cultures définies archéologiquement se multiplient et les pratiques funéraires sont de plus en plus variées. On assiste à une redéfinition complète des frontières des sous-groupes régionaux, toutefois difficile à appréhender en raison des cartographies non superposables des cultures matérielles et des pratiques funéraires (Jeunesse 1995).

Pourtant, dans le domaine funéraire la présence des coffres se généralise. Avec la découverte en Suisse des **cistes de type Chamblandes** (coffres de pierre ; Moinat 2007) et l'élargissement de leur définition aux coffres de bois, le "phénomène Chamblandes" s'étend à l'ouest (*e.g.* Monéteau, Yonne) et au sud (*e.g.* Pontcharaud, Puy-de-Dôme ; Coste-Rouge, Hérault), jusqu'en Catalogne espagnole (Cruells *et al.* 2003 ; Moinat et Chambon 2007). Les cistes de Chamblandes sont caractérisées par de « petites constructions quadrangulaires » (caisson de dalles ou coffre en bois, selon la disponibilité en matière première, vraisemblablement) accueillant des défunts (un ou plusieurs par tombe) en position fléchie sur le côté gauche, suivant une orientation dominante (souvent la tête à l'est) avec une structuration dense des sépultures dans des nécropoles de taille variable, sans organisation apparente (Chambon 2007).

Dans la plaine du Rhin, le Rubané est suivi du **Hinkelstein**, du **Grossgartach** et du **Roessen**, composant le « Mittelneolithikum » (Néolithique moyen du Bassin rhénan ; Denaire 2011 ; Jeunesse 1998). Les pratiques funéraires de ces cultures sont en rupture manifeste avec la tradition II, à commencer par la fin des grandes nécropoles danubiennes et l'évolution vers des groupes généralement plus restreints, exception faite de la nécropole de Rosheim (Denaire et Boës 2009 ; Denaire et Lefranc 2014) puis dans les dispositifs sépulcraux eux-mêmes : dans la position et les orientations des corps d'abord (notamment passage au décubitus dorsal, membres inférieurs étendus) puis, alors que le mobilier céramique et lithique reste fidèle à la tradition II, la parure change radicalement (perles discoïdes en calcaire ou en jais, craches de cerfs et défenses de suidés). Ces nouveaux éléments apparaissent clairement emprunts de l'héritage mésolithique local (Jeunesse 1995). C. Jeunesse montre toute la complexité d'effectuer une synchronisation des séquences du Rhin avec celles du Bassin parisien et en offre une proposition (Jeunesse 1998). Il existe par ailleurs très certainement des phases de chevauchement plus ou moins longues entre ces périodes. Hinkelstein et Grossgartach seraient, au moins partiellement, contemporains du VSG du Bassin parisien : le Hinkelstein évoluerait déjà à la fin du RRBP et le Grossgartach pourrait cohabiter avec le VSG et le début du Cerny. Le Roessen se développe ensuite en parallèle du Cerny et s'étend jusqu'à l'est du Bassin parisien (*ibid.* ; Dubouloz et Lançon 1997).

Vers 4700 cal BC, la **culture de Cerny** apparaît dans le Bassin parisien suite au VSG. Elle est « l'emblème des mutations économiques et sociales du Néolithique moyen en France » (Thomas 2011, p. 22). Avec l'émergence du monumentalisme et de la hiérarchisation sociale, une économie lithique et

céramique autonome (Duhamel et Midgley 2001 ; Tresset 1997), cette culture affirme son identité par rapport au territoire et aux cultures qui l'entourent. Les sépultures sous dalle de type Malesherbes ou les **monuments** de type Passy (pouvant aller jusqu'à 300m de long) font leur apparition (Figure C1. 8 ; Duhamel et Mordant 1997). Érigées pour un ou quelques individus minoritaires et fruit d'un effort collectif, ces dernières structures montrent bien l'ascension d'une différenciation sociale ostentatoire. Toutefois, l'identification de cette culture se fait, comme de coutume, sur la base du mobilier, et le Cerny comprend aussi des nécropoles « ordinaires », au sein desquelles aucune structure monumentale n'a été identifiée (Chichery « Sur les Pâturaux », Yonne et Vignely « La Porte aux Bergers », Seine-et-Marne ; Thomas 2011). Dans les pratiques funéraires, la culture de Cerny présente plus d'affinités avec la **sphère rhénane** qu'avec celle du Bassin parisien. Des sujets sont notamment allongés sur le dos, rappelant la position rencontrée préférentiellement dans le Mittelneolithikum. Les influences rhénanes sont également visibles dans le mobilier (céramique, lithique ; Duhamel et Prestreau 1997). Les sites d'habitat sont rares et l'identité des populations Cerny est principalement caractérisée par son contexte funéraire (Thomas 2011 ; cf. I.6.c).

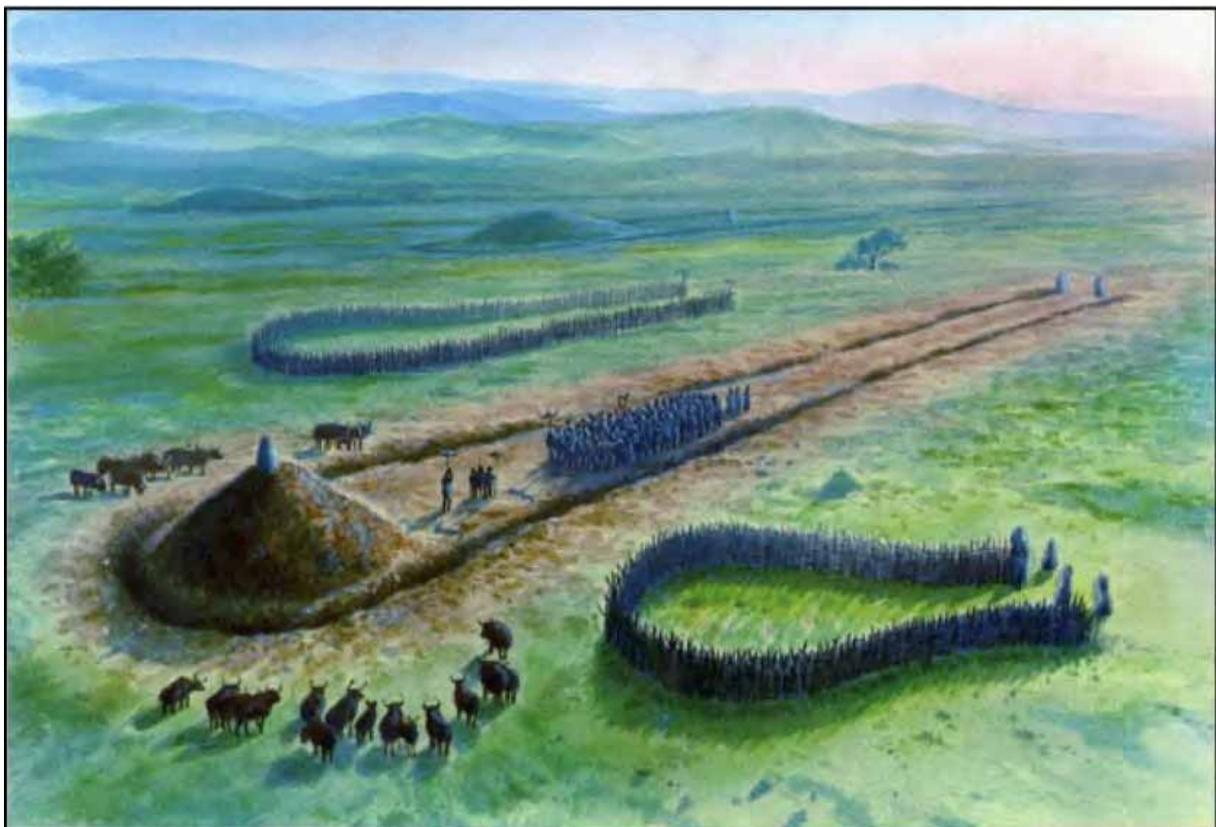


Figure C1. 8 : Proposition de reconstitution d'un monument de type Passy par G. Tosello (dans Constantin *et al.*, 1997). D'après Thomas, 2011.

Au sud du Bassin parisien, le **groupe de Chambon** s'individualise du Cerny, lui étant au moins partiellement contemporain (Irribarria 1997). Il porte des influences des VBQ et du Cardial du Sud de la France (Hamon *et al.* 1997) et montre des affinités avec les tombes à alcôve du RRBP et les cistes de Chamblandes notamment (Chambon *et al.* 2009b).

En Bretagne, le **Castellic** constitue une variante des groupes de Chambon et du Cerny auxquels il s'apparente. Les tertres funéraires et les inhumations sous dalle de pierre rappellent particulièrement le mégalithisme rencontré au Cerny (Demoule 2007 ; Roussot-Larroque et Burnez 1992).

À partir de 4400-4300 cal BC voire plus tôt, le **Chasséen** succède au Cerny dans le Bassin parisien et en Bourgogne. En rupture avec la transition nord-sud de la période précédente, le Chasséen, comme le phénomène Chamblandes, semblent plutôt homogénéiser les « cultures ». L'origine méridionale du Chasséen est couramment avancée mais la cohérence de ses diverses composantes reste problématique. La culture est dite nationale (Perrin *et al.* 2016) tant elle est répartie sur tout le territoire français (et même au-delà, en Catalogne avec les *Sepulcres de fossa*, dans le Nord de l'Italie de par les influences VBQ d'abord puis la filiation avec la culture de Lagozza, en Suisse avec le Cortaillod et en Allemagne avec le groupe de Pfyn). Néanmoins nous l'avons vu, sa définition culturelle est largement débattue (cf. I.4). Identifiée sur la base de la céramique (dont les décors sont par ailleurs peu fréquents rendant plus difficile encore sa périodisation interne), le Chasséen présente de **multiples expressions régionales**. Son unité, son identité et jusqu'à son origine ne sont pas claires et la question reste ouverte. Une synthèse réalisée suite au colloque national consacré à cette culture qui s'est tenu à Nemours en 2014 en présente toute la complexité (Perrin *et al.* 2016). Les **influences méridionales** sont tangibles jusque dans le Chasséen du Bassin parisien et, plus récemment, ont été mis en avant le rôle de **l'impact transalpin** et les **influences italiennes** (VBQ) dans la diffusion du Chasséen.

Une arrivée précoce du **Chasséen de Chassey** en Bourgogne et notamment dans la vallée de l'Yonne (cf. Chap 3) est envisagée (Augereau *et al.* 2016). La contemporanéité avec le Cerny (au moins en partie) a été proposée sur la base de mélanges culturels identifiés dans les assemblages mobiliers (Augereau *et al.* 2003 ; Chambon *et al.* 2013). L'attribution au Chasséen ne se fait que par l'association des structures (funéraires, domestiques ou défensives) à du matériel céramique caractéristique. Le reste du mobilier est plutôt diversifié (e.g. Chambon et Augereau 2009).

D'un point de vue funéraire, il n'existe pas de système chasséen. Globalement, les pratiques funéraires sont diversifiées, plus complexes et les **différenciations sociales** sont de plus en plus marquées, dans la sphère funéraire comme d'ailleurs en contexte domestique/défensif (cf. I.6). On observe un traitement nouveau du cadavre avec le remaniement des corps représenté notamment par les os épars retrouvés dans les fossés d'enceintes comme à Beaumont dans l'Yonne (cf. Chap 3 ; Pariat 2016). Un parallèle avec les Chamblandes et la place des coffres est également avancé, en particulier à Bonnard et Monéteau dans l'Yonne (cf. Chap 3 ; Chambon 2016).

Puis le **Chasséen septentrional** dans le nord du Bassin parisien, qui se distingue en réalité des autres variantes chasséennes, s'installe vraisemblablement après 4000 cal BC, faisant partie plutôt du **Néolithique moyen II**. À la même période le **Michelsberg** remplace le Roessen dans la sphère rhénane et dans l'est du Bassin parisien, le **groupe de Noyen** succède en partie au Cerny et le **Néolithique**

**moyen bourguignon** (NMB) s'étend en Bourgogne et en Franche-Comté (cf. Figure C1. 7, p.22). Ce dernier verra naître les premiers villages lacustres tels que ceux bien connus de Chalain et Clairveaux (Jura ; e.g. Petrequin et Petrequin 2016).

## I.6. La matérialisation de la complexification sociale et des inégalités

Avec la sédentarisation et l'augmentation démographique, les tensions territoriales semblent s'accroître. Les systèmes de production et la possibilité de stockage invitent à accroître les richesses, pouvant créer ainsi de nouvelles manifestations de pouvoir et d'inégalités (Guilaine 2015).

### I.6.a. Structuration de l'habitat

La taille des **villages** augmente avec la densité de population. L'architecture des maisons évolue, elles sont plus hautes ou plus grandes comme les **longues maisons danubiennes** (par exemple à Bucy-le-Long ou Cuiry-les-Chaudardes, dans l'Aisne ; Bickle 2013 ; Hachem et Hamon 2014). Elles peuvent être équipées de fours ou de silos à grains. Leur construction, plus ou moins lourde (en pisé, en pierre, en bois, ou encore torchis et clayonnage), devient pérenne. Ces installations nécessitent une **gestion complexe** et une **plus grande structuration des groupes humains** (Guilaine 2015 ; Jeunesse 2016c, 2018).

La fouille du site du RRBP de **Cuiry-les-Chaudardes**, dans l'Aisne, a révélé plus de 33 maisons et un matériel faunique inégalé en termes de nombre de restes associés à l'habitat dont l'étude a permis d'accéder à un niveau de structuration économique et sociale assez évolué avec des préférences alimentaires selon les secteurs d'habitations et le type de maison (cf. II.5.b ; Hachem 2011a ; Hachem et Hamon 2014).

Dès le Néolithique ancien, certains **bâtiments** de très grande taille étaient sans doute à **usage collectif**, pouvant rassembler les groupes lors de cérémonies ou de repas communs par exemple, comme on le proposera pour les périodes suivantes à Mairy (Ardennes) ou Bourry-en-Vexin (Oise). De grands **banquets** collectifs pouvaient être organisés, comme en témoignent probablement les fosses remplies de galets brûlés (interprétées comme une sorte de fours polynésiens) à Villeneuve-Tolosane (Haute-Garonne ; Gandelin et Vaquer 2008).

Au Néolithique moyen, les **structures d'habitat** évoluent encore, témoignant des nouvelles influences culturelles (Beeching et Sénépart 2009 ; Last 2013). Les longues maisons danubiennes disparaissent au nord de la France et les indices d'habitat sont plus rares, principalement fondés sur des structures de combustions et des fosses contenant du matériel domestique, éventuellement cernées d'une enceinte. Quelques plans de maisons circulaires ou quadrangulaires ont pu être rattachés au Cerny et peut-être au Chasséen (Bostyn *et al.* 2016 ; Bostyn et Joseph 2007 ; Ghesquière *et al.* 2003 ; Last 2013).

### I.6.b. Implantation et marquage du territoire

Point d'intersection des deux grands courants de Néolithisation, la France, et en particulier sa **façade atlantique** marque la **fin de l'expansion** du Néolithique. J.-P. Demoule parle de « piège » européen à partir duquel de **nouvelles tensions territoriales** vont émerger avec la volonté de **marquer son territoire** et d'affirmer son pouvoir, en particulier au Néolithique moyen (Augereau 2010 ; Demoule 2007). C'est là, en Bretagne notamment, que verront le jour les grands monuments mégalithiques carnacéens, bien connus, dolmens et menhirs, symboles de l'émergence du pouvoir territorial.

Les premières phases de colonisation, au sud comme au nord, se font d'abord le long des cours d'eau puis, à l'Épicardial et au VSG respectivement, les installations se répandent à **l'intérieur des terres**. Le Néolithique moyen voit l'émergence de **sites fortifiés** avec des **enceintes palissadées** encerclant plusieurs hectares, notamment au Cerny ou au Chasséen (cf. Chap 3). Ces systèmes défensifs sont associés ou non à des structures domestiques, entourant les villages comme à Berry-au-Bac (Aisne, RRBP-VSG ; Illet et Plateaux 1995) ou à Monéteau (Yonne, Chasséen ; Augereau et Chambon 2011 ; cf. Chap 3.III) ou constituant des camps comme à l'Étoile (camps de hauteur, Somme ; Bréart 1984) ou Gurgy « Le Nouzeau » (Yonne ; Meunier 2007 ; cf. Chap 3.VIII). Ils sont visibles en photographie aérienne, ce qui a permis la découverte d'un grand nombre d'enceintes (cf. Figure C1. 12, p.40). Structures de protection (des animaux ou des humains) et d'affichage territorial, ces fossés doublés de palissades ont nécessité une main d'œuvre considérable et l'abatage de grandes superficies de forêt pour leur construction. Leur fonction n'est pas toujours connue : site défensif, lieu de marché, de rassemblement, enclos pastoral, habitat, sanctuaire, cimetière ?

### I.6.c. Affichage du pouvoir et des inégalités sociales dans la mort

Dès le Rubané, la complexification de la structuration sociale est visible en contexte funéraire, en particulier par le dépôt de haches et herminettes en pierre polie, parfois d'origine alpine, généralement associées à des hommes (Augereau 2021a ; Jeunesse 2016a). D'autre part au RRBP, le faible effectif de sépultures retrouvées (toutes en contexte d'habitat) relativement à la quantité d'habitats recensée, semble indiquer que l'inhumation ait pu ne pas être la norme ou qu'une partie seulement de la population ait bénéficié de ce type de traitement (Thévenet 2009). Existe-il des nécropoles non encore retrouvées, par exemple à l'image de celles découvertes en Alsace et en Europe centrale ? D'autre part, si le recrutement de la population de ces sépultures est proche d'une population naturelle, un déséquilibre entre les classes d'âge indique qu'une sélection de la population a dû avoir lieu, privilégiant une minorité. De surcroît, bien que les inhumations soient plutôt standardisées, codifiées (tête à l'est, position fléchies, membres principalement sur le côté gauche, saupoudrés d'ocre), il existe une distinction dans la localisation des tombes entre les sexes (les femmes sont plutôt rassemblées en petits groupes et les hommes dispersés) et en fonction de l'âge des immatures (les plus jeunes enfants sont inhumés plus près des habitations ; Thévenet 2009).

Des **distinctions dans les pratiques funéraires en fonction de l'âge** chez les immatures et en comparaison des adultes ont également été mises en évidence par une étude portant sur tout le Néolithique français (Le Roy 2015 ; Le Roy *et al.* 2018). Les différences concernent la position des défunts, les objets associés et la localisation des sépultures. Ce travail a permis d'individualiser différentes classes d'âge social (petite enfance, enfance, adolescence et âge adulte) dont les étapes de transition varient entre les périodes et les régions (*ibid.*). Ces observations suggèrent l'existence de règles dans l'organisation et peut-être les prémices de l'affichage du statut social dans la tombe.

Au Néolithique moyen, l'émergence de l'affichage des inégalités dans le **domaine funéraire** est particulièrement spectaculaire avec l'apparition des **sépultures monumentales** : tombes mégalithiques, tertres carnacéens de Bretagne et structures de type Passy dans le Bassin parisien (grands tertres allongés du Cerny mesurant jusqu'à 300m de long ; cf. Figure C1. 8) sont **réservés à une élite** (Cassen *et al.* 2019 ; Cassidy *et al.* 2020 ; Chambon et Thomas 2010 ; Guilaine 2005 ; Midgley 2006 ; Thomas 2014b ; cf. I.5.b).

Le **traitement différencié** des défunts selon leur statut social est de plus en plus visible, même au sein des petits ensembles sépulcraux ou des grandes nécropoles, ainsi qu'en contexte non sépulcral. Cette variété est peut-être déjà le témoin d'une certaine hiérarchisation sociale, ou alors d'une organisation plus horizontale mais divisée, compartimentée. Les pratiques funéraires se diversifient et se complexifient, offrant un accès privilégié à certains individus ou groupes d'individus aux **sépultures les plus riches ou les plus élaborées**. La notion de richesse étant subjective et culturelle, son appréciation ne peut se faire que sur la base de propositions d'après un faisceau d'arguments récurrents (Gallay 2007). Certains sujets sont enterrés dans des structures complexes (coffres de bois ou de pierre de type Chamblandes par exemple) lorsque d'autres en silos domestiques réinvestis à usage funéraire comme au Crès dans l'Hérault (Loison et Schmitt 2009). Des **incinérations** côtoient les inhumations. Quelques individus font l'objet de **manipulations post-mortem**, en contexte funéraire ou non, pouvant parfois être dispersés volontairement dans les fossés d'enceintes, à l'instar des déchets culinaires, comme à Beaumont dans l'Yonne (Jeunesse 2003 ; Pariat 2005, 2007, 2016). Les restes humains épars en contexte non sépulcral sont nombreux au Néolithique moyen, en particulier au Chasséen, du sud au nord de la France (par exemple à Villeneuve-Tolosane ou Cugnaux en Haute-Garonne, à Chassesey en Côte d'Or, à Louviers ou Bourry-en-Vexin dans l'Eure et l'Oise ; Pariat 2016). Au VSG dans la vallée de la Marne par exemple, un net déficit en sépultures et la présence d'os humains dans les fosses latérales de maisons (Figure C1. 9) laisse à penser que l'inhumation ait pu ne pas être la (seule) norme, rappelant ce qui a déjà été proposé pour le RRBP (Pariat et Thevenet 2008).

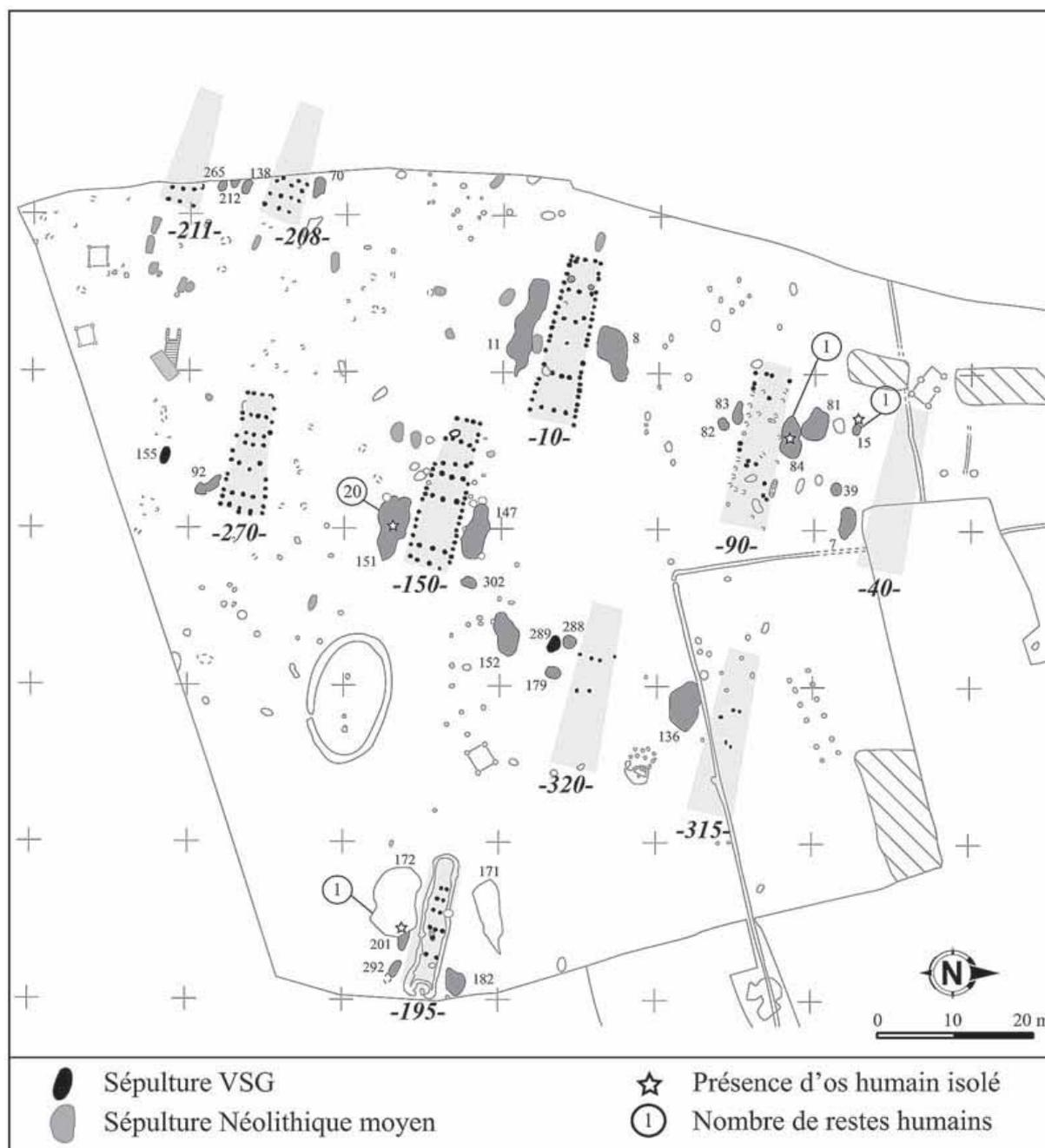


Figure C1. 9 : Plan du site de Vignely « La Porte aux Bergers » (habitat VSG et nécropole du Néolithique moyen) et localisation des os humains épars côtoyant les sépultures. Les numéros en gras indiquent les maisons VSG (représentées par leurs trous de poteaux) et leurs fosses latérales (gris foncé). D'après Pariat et Thevenet, 2008.

D'autre part, en contexte sépulcral, un riche **mobilier** accompagne parfois les défunts quelle que soit la culture considérée (haches polies, longues lames fines en silex à usage symbolique puisque trop fragiles pour être utilisées, spatules « tour Eiffel », riche parure en termes de quantité de perles par exemple, coquillages et autres objets ayant parcouru une longue distance ; Augereau 2021b ; Augereau *et al.* 2003 ; Cassen *et al.* 2019 ; Chambon et Augereau 2009 ; Demoule 2007 ; cf. I.6.f). Le concept **de richesse** semble ici plus accessible (bien que toujours subjectif) à travers la quantité ou la rareté du mobilier, son origine lointaine ou le degré de sophistication technique élevé (donc la durée et la qualité du travail nécessaire à sa fabrication), qui sont autant d'indices d'un caractère prestigieux (Beyneix

2016 ; Jeunesse 2016a). Certains éléments de mobilier peuvent refléter un type de statut particulier comme cela a été proposé pour les ossements d'animaux sauvages et les pointes de flèches symbolisant le **statut du chasseur** et la lutte contre la sphère sauvage, dans la culture Cerny (Chambon et Pétilion 2009 ; Sidéra 2003 ; Thomas 2014b).

Comme énoncé précédemment, les tombes d'enfants ne sont pas dépourvues de ces distinctions, suggérant un système de filiation, de **transmission du pouvoir à la descendance** (Jeunesse 1996 ; Thomas *et al.* 2011). Nous sommes en présence d'une redistribution affichée du système de valeurs, avec une structuration verticale impliquant la notion de territorialité.

#### I.6.d. De la différenciation hommes - femmes

Si elles sont probablement antérieures au Néolithique, des **différences sociales entre hommes et femmes** apparaissent désormais dans de nombreux exemples archéologiques (Augereau 2021a ; Bickle 2019 ; Cintas-Peña et García Sanjuán 2019 ; Testart 2014 ; Thomas et Chenal 2014). Elles s'expriment dans la sphère domestique comme dans les pratiques funéraires et sont perceptibles notamment à travers les objets déposés avec les défunts ou dans leurs tissus-mêmes, par les marques laissées sur leur squelette relatives à un mode de vie ou un type d'activité spécifique, par le traçage biochimique de leurs modalités de subsistance et de mobilité ou encore par la génétique permettant d'accéder à la structuration familiale notamment.

Des **traces laissées sur les outils associés aux défunts** indiquent qu'ils ont servi à des activités différentes entre les sexes, distinguant par exemple la sphère domestique et sauvage (Masclans *et al.* 2020 ; Masclans *et al.* 2021). En Europe centrale au LBK, les hommes sont inhumés avec des outils utilisés pour le travail du bois, la boucherie, la chasse ou le combat alors que les outils enterrés avec les femmes ont servi à travailler la peau (Masclans *et al.* 2021). Sur les squelettes eux-mêmes, les **marqueurs osseux d'activité** (MOA) témoignent d'activités « genrées » comme par exemple la chasse et l'archerie pour les hommes (Thomas 2014a ; Villotte et Knüsel 2014). Une publication récente basée sur l'étude de plus de 2300 tombes LBK d'Europe centrale a montré que **les activités quotidiennes et l'état de santé varie** selon le sexe, les femmes ayant généralement accès à une plus grande diversité identitaire que les hommes, plus contraints socialement (Bickle 2019). Par exemple, une plus forte fréquence des caries a été relevée chez les femmes au LBK en raison d'une plus grande consommation de céréales (Bickle et Whittle 2013).

La question du genre est également perceptible dans la **symbolique du mobilier** : au Néolithique moyen dans le Bassin parisien par exemple, des meules sont plus souvent associées aux femmes alors que des haches et pointes de flèches sont principalement associées aux hommes, bien que cette division ne soit pas systématique (Augereau 2021b ; Augereau et Chambon 2011 ; Chambon et Thomas 2010 ; Thomas et Chenal 2014). D'autre part, la fabrication des outils semble être réalisée par

des catégories sociales différentes. Les lames réalisées dans des matières premières rares ne sont associées qu'à quelques individus masculins alors que les éclats ordinaires et outils non conventionnels fabriqués dans des matières locales sont déposés avec les femmes (Augereau 2019). Certains éléments de **parure** sont plutôt l'apanage d'un sexe que de l'autre : par exemple des dents de faune chassée pour la gent masculine rappelant la dichotomie entre mondes sauvage et domestique (e.g. Augereau et Chambon 2011), également visible à travers nombre d'exemples ethnologiques (Testart 2014) ; certains coquillages plutôt associés aux femmes (e.g. *Napillus* ou petits gastéropodes à la fin du Rubané dans le Bassin rhénan et le Bassin parisien respectivement ; Bonnardin 2009) – ces-dernières pouvaient cependant collecter des ressources sauvages, par opposition à la chasse, plus masculine (Testart 2014). **Les associations sont toutefois souvent plus complexes et les dépôts généralement non exclusifs entre catégories sexuelles.**

NB : Différents critères doivent être observés pour comprendre le type de dépôt de mobilier dans la tombe et son association au défunt : la typologie et la matière première bien sûr, mais aussi les traces d'usures qui permettent notamment de savoir si l'objet a été porté ou non, utilisé ou non (et comment), ou encore la localisation dans la tombe par rapport au corps indiquant s'il pouvait constituer un élément de vêtue funéraire (e.g. élément de collier ou de ceinture) ou un dépôt récurrent à un emplacement particulier (e.g. dépôt d'ocre au niveau du bassin, vase au niveau des pieds, pointes de flèches rassemblées vers le haut du corps témoignant peut-être de la présence d'un carquois). Le type d'assemblage et la quantité d'objets peut également constituer un critère de différenciation (au RRPB par exemple, la parure féminine est plus fournie que celle des hommes ; Bonnardin 2009). Des objets similaires ont ainsi pu être portés ou associés différemment par les sujets (entrant dans des compositions variables) selon leur sexe.

D'autre part, des indices de **mobilité différentielle** entre les sexes peuvent indiquer des schémas de structures patrilocales notamment (e.g. Bentley 2013 ; Bentley *et al.* 2012). Des **marqueurs génétiques** différents entre hommes et femmes stipulent que le passage au Néolithique s'accompagne probablement de nouveaux schémas comme la monogamie et la patrilocalité et/ou la patrilinearité (Rasteiro et Chikhi 2013 ; Sánchez-Quinto *et al.* 2019). En particulier, les tombes mégalithiques du Néolithique ouest-européen semblent d'abord accueillir des hommes, selon une structure patrilinearité (Cassidy *et al.* 2020 ; Sánchez-Quinto *et al.* 2019). Très récemment, la reconstitution des relations de parenté au sein de la nécropole de Gurgy « Les Noisats » (Néolithique moyen indéterminé, Yonne ; cf. Chap 3) a permis d'accéder à un niveau plus fin de la **structure familiale**, mettant en avant un système patrilinearité et patrilocal de type monogame (Rivollat *et al.* 2021a ; Rivollat *et al.* 2021b). De plus, l'étude de l'alimentation à travers la signature biochimique des ossements peut mettre en évidence la consommation de ressources différentes entre les sexes (e.g. Goude *et al.* 2019 ; Schulting 2015 ; cf. III.2.e).

Néanmoins, les différences entre hommes et femmes, dans les pratiques funéraires notamment mais cela vaut dans tous les aspects, ne sont pas aussi nettes qu'elles le seront plus tard comme à l'âge du Bronze par exemple et, pour le Néolithique, elles doivent encore être considérées au sein d'un contexte type et **non généralisées** à l'ensemble des groupes humains (Robb et Harris 2018 ; Schroeder *et al.* 2019). De façon plus générale, les différenciations sociales seront dans l'ensemble plus marquées à partir de l'âge du Bronze, qui verra la naissance des tombes princières notamment.

NB : Quelle que soit la période considérée, il est primordial de toujours garder à l'esprit la différence entre sexe et genre : alors que le premier est défini biologiquement, l'autre est une catégorie sociale, une construction culturelle qui n'est pas toujours accessible en archéologie. Ces deux notions ne coïncident pas nécessairement. Par exemple, chez les Guayakis, chasseurs-cueilleurs nomades d'Amérique du Sud, certains hommes homosexuels « portent le panier », attribut symbolique exclusif de la femme, qui collecte, et sont traités dans la société comme un membre féminin (Clastres 1966).

#### I.6.e. Intensification de l'économie de production

À partir du Néolithique moyen a lieu une **intensification des productions** agropastorales et matérielles. Des **minières de silex** telles que celle de Jablines en Seine-et-Marne ont été mises au jour : près de 5000 puits d'extraction pouvant atteindre sept mètres de profondeur ont été datés principalement entre 4300 et 3500 cal BC. Les **outils agricoles** (e.g. faucilles, bâtons à fouir) sont plus nombreux. L'exploitation animale se développe avec l'augmentation et la généralisation de la production laitière, l'usage de la laine ou de la traction animale, comme en témoignent les diverses traces (Demoule 2007 ; cf. I.3.c).

#### I.6.f. Réseaux d'échange à longue distance et objets de prestige

Dès le Néolithique ancien et plus encore au Néolithique moyen, de **vastes réseaux d'échanges** témoignent de circulation d'objets et de matériaux sur de longues distances, répondant aux nouvelles exigences sociologiques (Perlès 2011). Nous avons vu que la diffusion de **l'obsidienne** s'étend, du Néolithique ancien au Néolithique moyen, sur un large secteur géographique portant sur tout le Midi de la France jusqu'au nord-est de l'Espagne depuis son bassin de production ligure et des îles tyrrhéniennes (Vaquer 2015). Dans l'horizon danubien occidental, et même dans l'ensemble du territoire français et limitrophe (voire jusqu'au Danemark et la Sicile), la circulation des **haches et herminettes en roche alpine** (jadéite, néphrite, éclogite) ou carnacéenne (dolérite) connaît une ampleur considérable, notamment dans la deuxième moitié du Ve millénaire (Figure C1. 10 ; Giligny *et al.* 2012 ; Petrequin *et al.* 1997 ; Pétrequin *et al.* 2012a). Si les premières haches en jade alpin sont retrouvées en contexte rubané au RRB (affichant probablement les prémices de la matérialisation de la hiérarchisation sociale), ce n'est qu'au milieu du Ve millénaire que débute le phénomène pour les grandes haches de prestige, en parallèle à la mise en place de l'économie du cuivre (chalcolithique) en

Europe de l'Est (Giligny *et al.* 2012 ; Jeunesse 2016a ; Pétrequin *et al.* 2012b ; Pétrequin *et al.* 2017). Pièce valorisée et **symbole de prestige** par son matériau, mais aussi sa taille (supérieure à 13 cm) et la qualité de son polissage (dénotant un niveau de sophistication élevé qui les distingue des objets fonctionnels), la hache alpine (notamment du Mont Viso) trouve sa plus grande accumulation dans le golfe du Morbihan conjointement aux manifestations de pouvoir affichées par les monuments carnacéens (Pétrequin *et al.* 2012b). Certaines sont des imitations en silex ou en grès-quartzite, d'autres sont repolies à partir de matériaux exotiques puis diffusées à leur tour, à partir du Morbihan en particulier (haches carnacéennes), mais aussi du Bassin parisien (Giligny *et al.* 2012 ; Pétrequin *et al.* 2012b ; Pétrequin *et al.* 2012c).

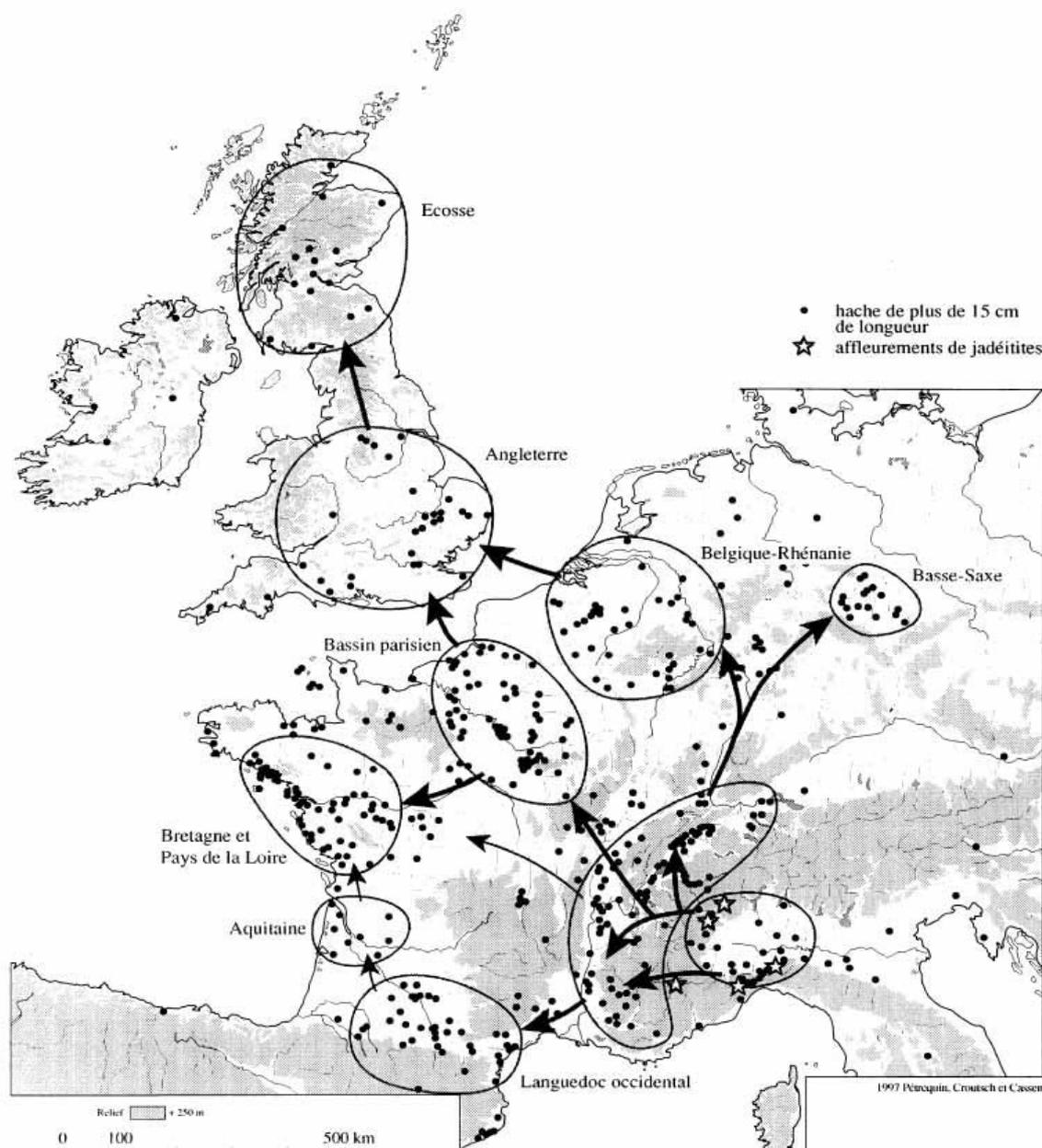


Figure C1. 10 : Interprétation de la répartition des lames polies en roches alpines d'origine piémontaise ou ligure. D'après Pétrequin *et al.*, 1997.

Plus tard au Néolithique final, le silex de la région du Grand-Pressigny au sud-ouest du Bassin parisien sera un matériau de choix pour l'exportation en Europe occidentale des grandes lames pour la fabrication des fameux poignards et autres outils (Chancerel 2020 ; Mallet *et al.* 2012).

D'autre part, **le sel** est exploité et exporté dès la fin du Mésolithique et au Néolithique ancien (Cardial ancien) : la source de Moriez, dans les Alpes, est l'un des plus anciens sites d'acquisition connu en Europe (Weller 2002). Utilisé pour l'alimentation, la préservation des denrées ou la fabrication du fromage, le sel est également considéré comme une richesse d'échange depuis les Alpes, surtout dans la deuxième moitié du Néolithique (Ard et Weller 2012 ; Weller 2002, 2015). Une autre source d'approvisionnement datée d'au moins 4700 cal BC a été découverte dans le Pays basque, aux salines d'Añana, qui a pu jouer un rôle majeur dans l'implantation des premiers agropasteurs néolithiques (projet NéoSal en cours, dir. Weller). Dans l'Yonne, le site de Saint-Père-sous-Vézelay a livré des puits de captage de l'eau salée en chêne datés du Néolithique final (Bernard *et al.* 2008).

Dans le site chasséen septentrional de Bercy, des **pirogues** ont été mises au jour sur les bords d'un ancien chenal de la Seine. Conjointement à une économie de subsistance majoritairement basée sur les animaux d'élevage (90%) plutôt que sur la chasse pour ce qui est de l'apport carné, ces pirogues ont pu servir à la pêche mais ont plus probablement été utilisées comme **moyen de transport pour les échanges** (Arnold 1998).

### I.6.g. Amplification des conflits et de la violence

Le Néolithique va également fournir matière à **l'augmentation des conflits** et de la violence. Avec l'accumulation des richesses, l'émergence du pouvoir et la fixation sur un territoire, les premiers agropasteurs vont également connaître les premiers massacres collectifs ; tout au moins, c'est cette période qui en livre les premières traces les plus probantes (Guilaine 2015 ; Salanova *et al.* 2018). Au sein des communautés rubanées, plusieurs exemples sont répertoriés.

Le site LBK de Talheim en Allemagne a livré une fosse commune emplie de corps entassés portant des traces de coups sur les squelettes – certains mortels – infligés par des haches et herminettes servant initialement à l'agriculture (Beyneix 2001). Le massacre a concerné indistinctement hommes, femmes et enfants.

En Autriche à Asparn-Schletz (LBK), des traces de coups violents ont également été observés sur une centaine d'individus sans distinction d'âge ou de sexe. Ces derniers n'ont toutefois pas été inhumés mais jetés dans les fossés du village (des traces de dents de carnivores indiquent qu'ils sont restés un moment à l'air libre).

À Herxheim en Allemagne (LBK), les restes de plus de 600 individus retrouvés dans les fossés d'enceinte portaient des traces de fracture et de découpe. L'hypothèse du cannibalisme est proposée à

côté de celle d'un traitement rituel extrême (sorte de destruction rituelle) relevant d'actes de guerre ou de situation de crise (Zeeb-Lanz 2019).

Une sépulture collective à Halberstadt (LBK, Allemagne) a récemment révélé des coups mortels sur la calotte crânienne de plusieurs individus (Meyer *et al.* 2018). L'analyse isotopique du strontium (cf. Chap2.VII) sur les ossements de ces individus a révélé une origine exogène des hommes, soulevant l'intéressante hypothèse d'un « raid » qui aurait mal tourné.

Dans la sphère méridionale, de graves blessures sur les squelettes des premiers fermiers du site d'Els Trocs dans les hautes Pyrénées espagnoles ont révélé de violents affrontements entre ces-derniers et d'autres groupes d'agropasteurs ou de chasseurs-cueilleurs autochtones (Alt *et al.* 2020).

Il existe assez peu d'indices en France : quelques flèches fichées dans les vertèbres de certains individus isolés ou, par exemple, une sépulture collective contenant sept inhumations simultanées à Pontcharaud (Auvergne), dont l'un des sujets au moins a été tué d'une pointe de flèche (Loison *et al.* 1991). Quoi qu'il en soit, les indices de violence se multiplient, bien que ceux n'affectant pas le squelette restent cachés aux archéologues.

## II. Au sud-est du Bassin parisien : la Vallée de l'Yonne à la loupe

---

Notre région d'intérêt se trouve au sud-est du Bassin parisien, dans une portion de la vallée de l'Yonne située juste au nord d'Auxerre, en Bourgogne (département de l'Yonne ; Figure C1. 11 ; cf. Chap3).

### II.1. Contexte des découvertes archéologiques

Si le Bassin parisien est bien documenté depuis les années 1970, avec l'essor de l'archéologie préventive et la fouille de nombreux sites domestiques et funéraires, la **vallée de l'Yonne** en particulier compte une **densité exceptionnelle de sites**, notamment néolithiques. Depuis les **années 1950**, elle fait l'objet de nombreuses découvertes archéologiques, d'une part grâce à l'exploitation intensive des **gravières** qui donne accès à une documentation inédite et engendre le décapage de grandes surfaces, d'autre part grâce à la **prospection aérienne** systématique entreprise par J.-P. Delor (1999) dans cette zone géographique. Ce secteur a ainsi vu réapparaître une grande quantité de gisements des périodes préhistoriques à gallo-romaines (sinon modernes), et notamment des sites du Néolithique dont les structures (maisons danubiennes, enceintes, nécropoles monumentales) sont aisément repérables sur photographies aériennes (Figure C1. 12).

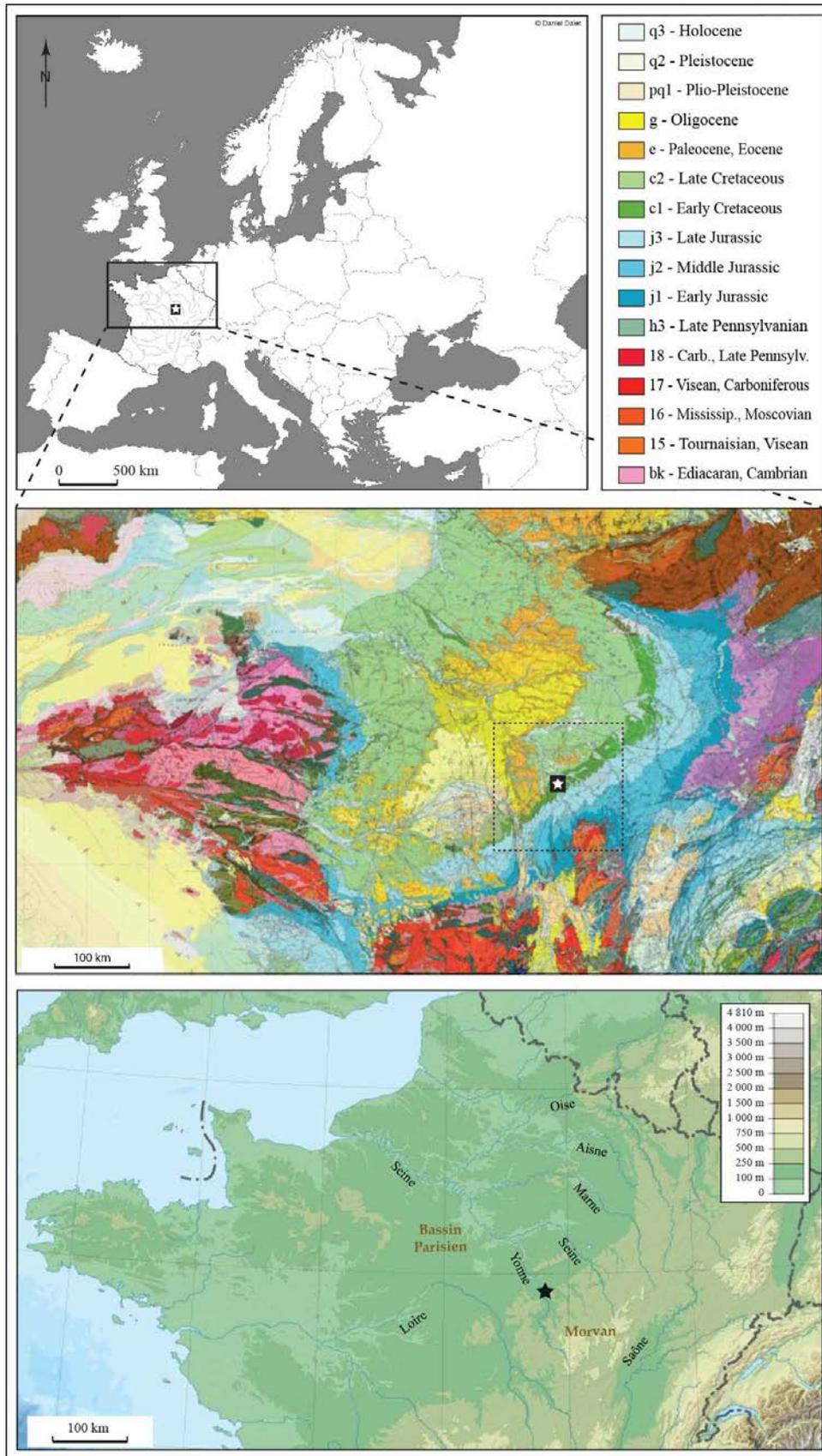


Figure C1. 11 : Carte de localisation en Europe (en haut) de la portion de vallée de l'Yonne considérée dans ce travail (étoile) et au sein du contexte géologique (au milieu) et topographique (en bas) de la moitié nord de la France. La légende géologique concerne la zone encadrée en pointillée. Fonds de carte : Daniel Dalet©, Géoportail et [www.cartesfrance.fr](http://www.cartesfrance.fr).



Figure C1. 12 : Vue aérienne de l'enceinte néolithique moyen de Gurgy « Le Nouveau ». d'après Meunier 2007.

À l'instar des autres vallées du Bassin parisien, l'implantation des sites s'est faite selon le **réseau hydrographique** (gués, paléochenaux), principalement le long de la rivière (Delor 1999 ; cf. II.3). Or, la vallée de l'Yonne constitue une **liaison naturelle entre le Bassin parisien et la vallée de la Saône** (Figure C1. 11), offrant une **situation géographique privilégiée** pouvant expliquer la **richesse d'implantation des sites** (Figure C1. 13). Pour J.-P. Delor, cette dernière fait du Bassin de l'Yonne une région pilote pour **comprendre l'investissement d'un territoire** par les groupes néolithiques.

Pour le **Néolithique ancien**, on recense aujourd'hui au moins 25 gisements dans la vallée de l'Yonne pour les départements de l'Yonne essentiellement et de Seine-et-Marne (Augereau et Chambon 2011). Au moins **douze villages** avaient déjà été identifiés à la fin du XXe siècle (Delor 1999), comptabilisant un minimum de 42 maisons, principalement danubiennes. Le village VSG de Bonnard « Sur le Chemin de Cheny » comprend à lui seul quatorze maisons. Le Néolithique ancien régional est essentiellement représenté par des habitats de type danubien. On rencontre également une maison naviforme à Gurgy « Les Plantes du Mont » et à « Néron », datées de l'extrême fin du VSG ou du début du Cerny. Le plan naviforme est rare, les maisons danubiennes de la zone sont plutôt rectangulaires ou trapézoïdales (longues, orientées est-ouest ; Augereau et Chambon 2011).

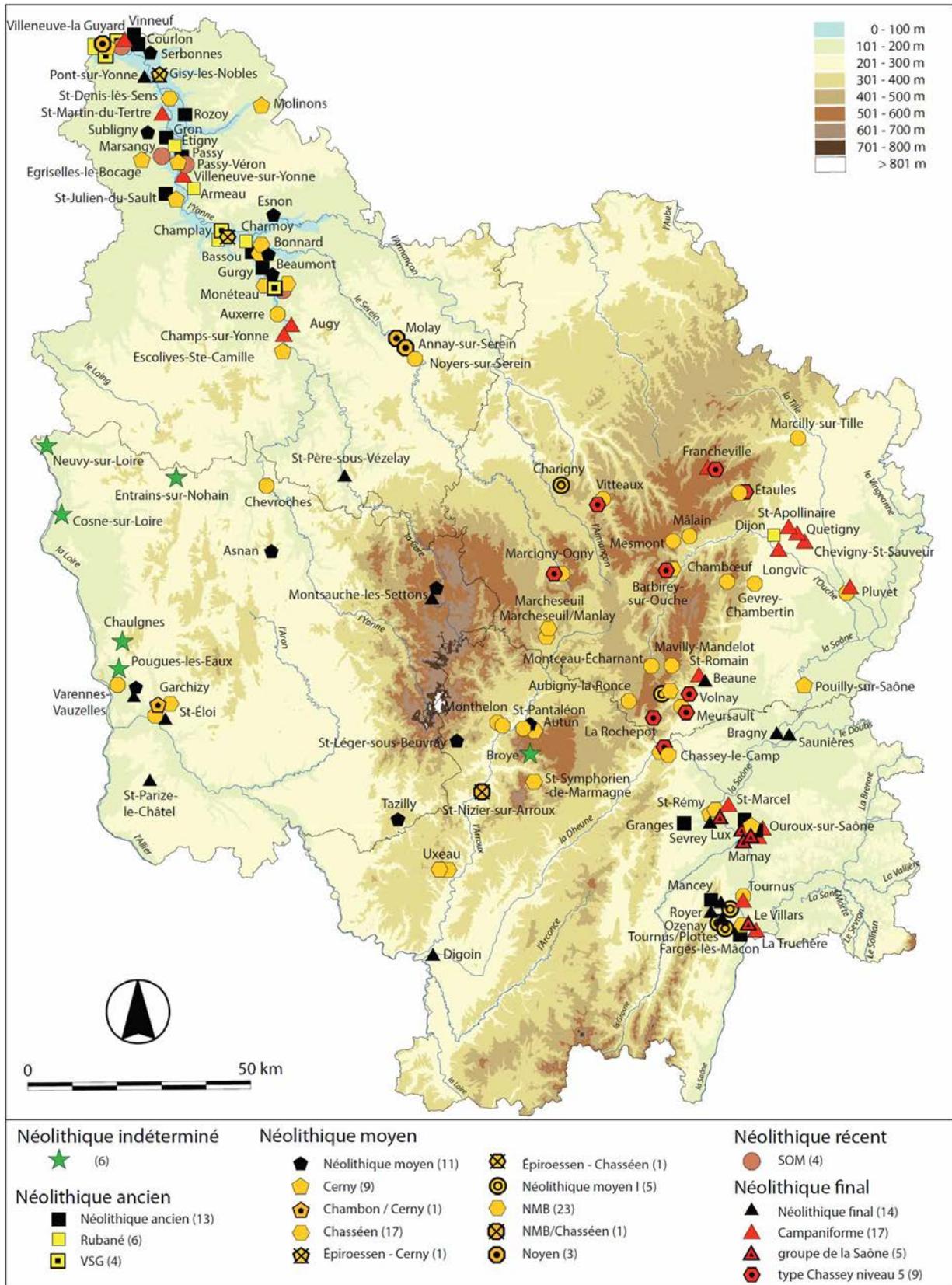


Figure C1. 13 : Carte des principaux sites Néolithiques en Bourgogne en fonction des cultures. D'après Martineau *et al*, 2015.

Pour le **Néolithique moyen**, on compte aujourd'hui plus d'une trentaine d'enceintes (essentiellement dans la basse vallée de l'Yonne) encerclant des espaces allant jusqu'à 15 ha. Parmi celles-ci, le site de Beaumont « Le Crot aux Moines » offre l'un des exemples les plus remarquables (cf. Chap3.V). D'autre part, six nécropoles Cerny recelant des **monuments funéraires de type Passy**, dont ceux de Passy eux-mêmes à « La Sablonnière » et « Richebourg », ont été repérées en prospection aérienne avant les années 2000. Des **ensembles funéraires** non monumentaux, partiellement découverts ou en totalité, indiquent la présence, avérée ou suggérée, de grandes nécropoles, dont celle de Gurgy « Les Noisats » abordée dans ce travail (cf. Chap3). Quelques structures domestiques ont également été recensées (e.g. Gurgy « Les Plantes-du-Mont », Charmoy). Enfin, des **puits de minières** pour l'extraction du silex de craie ont été mis au jour grâce aux photographies aériennes révélant de singulières taches ressemblant à celles de Jablines<sup>3</sup> notamment (Delor 1999 ; Duhamel *et al.* 2015).

Avec la multiplication des opérations de terrain depuis les années 1980 (majoritairement en contexte préventif), **plus de 220 sépultures du Néolithique moyen** ont été mises au jour entre le Serein et le Ru de Baulche, deux affluents de l'Yonne, représentant deux tiers des tombes du Bassin parisien et constituant ainsi **l'un des plus gros corpus français** à l'échelle micro-régionale. **L'hétérogénéité des pratiques funéraires** rencontrée et la richesse archéologique engendra la création en 2006 d'un Projet collectif de recherche (PCR) dirigé par Ph. Chambon (« Évolution, coexistence et confrontation de pratiques funéraires entre 4500 et 4000 cal BC sur un micro-territoire : la Vallée de l'Yonne, entre le Serein et le Baulche » ; cf. II.3), dont notre recherche est complémentaire.

Dans cette région particulièrement bien documentée, la **définition du contexte chrono-culturel** est extrêmement **délicate** et reste à ce jour irrésolue. Le présent travail n'a pas vocation à reprendre l'étude chrono-culturelle de la région mais nécessite la présentation de quelques points clés afin de comprendre le contexte général et l'intérêt de l'analyse biochimique au sein des questionnements et débats existants.

### II.2. Un carrefour culturel

Nous l'avons vu, la **position géographique** de la vallée de l'Yonne lui confère une place stratégique dans le contexte de néolithisation de la France. D'un point de vue géologique et topographique, la microrégion se situe en marge du Bassin parisien, à la frontière du massif du Morvan (Figure C1. 11 ; cf. Chap3.IX.2). D'un point de vue chronoculturel, elle est située à la limite sud-est de l'extension du RRBP, puis du VSG et du Cerny, ainsi qu'à la limite nord-ouest du Chasséen bourguignon, constituant un **point d'intersection** entre le nord et le sud ainsi qu'avec la sphère orientale (Alsace et Bassin rhénan ; cf. Figure C1.7, p.22). Les **nombreuses influences culturelles** - RRBP, VSG, Hinkelstein,

---

<sup>3</sup> Dans la **minièrre de silex** de Jablines en Seine-et-Marne, près de 5000 puits d'extraction pouvant atteindre sept mètres de profondeur ont été datés principalement entre 4300 et 3500 cal (Bostyn et Lançon 1992).

Grossgartach, Roessen, Cerny et chasséennes (cf. Chap3) – rencontrées dans le mobilier et les pratiques funéraires témoignent de cette position de « carrefour culturel » selon l'expression de P. Duhamel (1996) et des interactions entre ces différents territoires. La question de l'origine de la néolithisation dans le secteur n'est à ce jour pas démêlée et l'arrivée ancienne du Chasséen dans la région est l'un des points phares dans le débat actuel sur le développement du Néolithique moyen en France.

### II.2.a. Au croisement des deux voies de néolithisation : le Néolithique ancien

Au croisement des deux voies de néolithisation, **la question de l'origine de la colonisation agropastorale** (et de tout le *package* Néolithique associé) de l'Yonne et de son identité est depuis longtemps débattue (e.g. Duhamel 1996). L'idée d'une origine depuis le RRBP est principalement soutenue par C. Constantin (Constantin 2013 ; Constantin et Ilett 1997) alors que P. Duhamel plaide plutôt en faveur d'une origine orientale depuis le Bassin rhénan (Duhamel *et al.* 2015). Une synthèse à partir des industries lithiques réalisée par A. Augereau semble en faveur d'une origine depuis le Bassin parisien tout en soulignant les influences orientales (Augereau 2004). En revanche, les décors céramiques évoquent le Haut-Rhin et le Cardial (Meunier 2010). Les influences mésolithiques autochtones seront plus marquées au début du Néolithique moyen dans le Cerny (Duhamel et Midgley 2001). Finalement, l'hypothèse de **voies multiples de néolithisation** semble être la plus parcimonieuse, peut-être en association aux réseaux de circulation des matières premières (silex, coquillages). L'influence méridionale pourrait être plus tardive toutefois, perceptible avec l'arrivée précoce du Chasséen dans la région, les preuves d'arrivée du Cardial ou de l'Épicardial étant plutôt minces (alors qu'elles sont plus sensiblement perceptibles dans le Bassin de la Saône ; Thevenot *et al.* 2015).

Le VSG est aujourd'hui assez bien documenté dans la vallée de l'Yonne, et semble être en continuité avec le RRBP (Duhamel *et al.* 2015). Il est notamment attesté à Monéteau (Augereau et Chambon 2011).

### II.2.b. Les multiples influences culturelles du Néolithique moyen : une composante locale

Au Néolithique moyen, les influences culturelles se multiplient (Prestreau et Thevenot 1996). L'extrémité sud-est du Cerny correspondant à l'Auxerrois est assez mal connue et n'est bien représentée qu'à Escolives-Sainte-Camille. Il en est de même pour l'extrémité nord-ouest du Chasséen bourguignon. Le **lien entre le Cerny et le Chasséen**, interrogé dans la région depuis de nombreuses années (Duhamel et Prestreau 1997), est renseigné à travers le mobilier associé sur un même site (notamment à Bonnard « Le Poirier », Beaumont « Le Crot aux Moines » et Monéteau « Macherin » ; cf. Chap3) et à travers la technologie céramique (pâtes dégraissées à l'os brûlé). Au-delà de ce lien

dont nous reparlerons, la diversité des influences et les rapprochements culturels observés très localement entre les sites de la vallée (dans la microrégion d'intérêt) laissent supposer une **composante locale** faisant la spécificité de la région.

Autrement que par le mobilier, le **Cerny** est représenté dans les pratiques funéraires à Chichery « Sur les Pâturaux » notamment (cf. II.3 et Chap3). Mais ces tombes pourraient faire avant tout référence au **Mittelnolithikum rhénan**. Les influences Roessen au sein de la séquence Cerny sont perceptibles dans la céramique et l'industrie lithique (Dubouloz et Lanchon 1997). L'impact de la sphère rhénane (Hinkelstein, Grossgartach, Roessen) est globalement visible dans le mobilier de plusieurs sites de la vallée (Gurgy « Les Noisats », Monéteau « Macherin » pour ne citer qu'eux ; cf. Chap 3).

Le **Chasséen** est particulièrement bien représenté dans l'Yonne et constitue même la seule culture réellement attestée par le matériel céramique (Prestreau 2006). La basse vallée de l'Yonne a fourni de nombreux exemples de son extension, faisant plutôt référence au Chasséen de Chassey (*ibid.*). Le site éponyme de Chassey-le-Camp se trouve au sein du massif du Morvan en Saône-et-Loire (Thevenot 2005). Or les **échanges avec le Morvan** sont attestés depuis le Néolithique moyen, comme en témoignent les nombreuses pièces lithiques retrouvées dans les sites morvandiaux fabriquées dans un silex provenant de la vallée de l'Yonne (Martineau *et al.* 2011). Il est à noter qu'aucune structure du Néolithique ancien n'a été découverte, alors que le Mésolithique est représenté. Au Néolithique moyen, la fréquence élevée de silex auxerrois dans les sites du Morvan suggère que ces derniers étaient occupés par des populations s'approvisionnant dans la vallée ou bien qu'ils aient pu être utilisés, de façon saisonnière ou pérenne, par les populations de la vallée de l'Yonne (*ibid.*). On trouve également dans le Morvan du silex du centre du Bassin parisien, de la vallée de la Saône ou de régions plus éloignées comme le Gard ou l'Italie, reflétant à nouveaux les diverses interactions existant à cette période (*ibid.*).

En Auxerrois, la question du lien avec le **groupe de Chambon** est également soulevée (Duhamel 2004). Du côté opposé, les contacts avec la **sphère alpine** sont indéniables, mis en évidence à travers le mobilier réalisé en matériaux provenant de cette région, comme les haches en particulier (bien qu'elles soient peu nombreuses dans notre microrégion), et les tombes en coffre rappelant les cistes en dalles originaires de la même région (cf. II.3).

### II.2.c. Questions de chronologie

De nombreuses synthèses tentent de synchroniser les séquences culturelles du Néolithique ancien et moyen dans le Bassin parisien et entre le Bassin parisien et les régions limitrophes (notamment avec le bassin rhénan et la sphère méridionale ; e.g. Constantin 2013 ; Dubouloz 2003 ; Jeunesse 1998 ; Perrin 2016). Dans le secteur de la vallée de l'Yonne (et principalement la basse vallée), la **question est problématique** et la **chronologie absolue est mal définie** (Duhamel *et al.* 2015 ; Lemerrier *et al.*

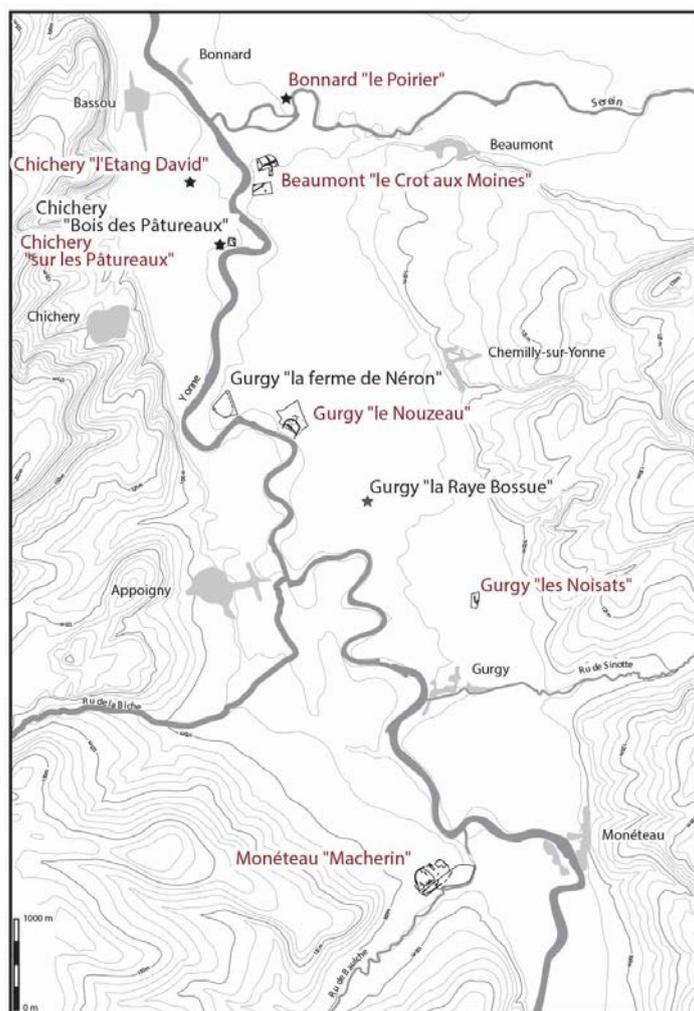
2015 ; cf. Chap3 et Chap5.III.2). Plusieurs campagnes de datations ont été réalisées et le doute persiste quant au calage de plusieurs séquences culturelles.

Globalement, le Rubané de l'Yonne semble s'étendre entre 5200 et 4800 cal BC (Duhamel *et al.* 2015) et la synchronie partielle entre RRBP et VSG proposée par C. Jeunesse (1998) semble être confirmée, avec un VSG de l'Yonne compris entre 4900 et 4550 cal BC (Dubouloz 2003) ou pouvant même se clore avant, vers 4700 cal BC (Chambon *et al.* 2009a). Le Cerny est généralement compris entre 4700 et 4300 cal BC dans le Bassin parisien et pourrait s'étendre de 4500 à 4350 cal BC dans la vallée de l'Yonne (principalement représenté au nord de la vallée ; (Chambon et Pétilion 2009, p. 762 ; Chambon *et al.* 2009a). Néanmoins les récentes datations de Passy paraissent vieillir la fourchette entre 4800 et 4400 (cf. Duhamel *et al.* 2015).

La chronologie du Chasséen pose problème et le mobilier (indubitablement chasséen) retrouvé à Bonnard, Beaumont et Monéteau témoigne d'une **arrivée précoce de cette culture dans la vallée de l'Yonne** (Augereau *et al.* 2016 ; Duhamel et Prestreau 1997 ; Prestreau 2006). Celle-ci serait antérieure au Chasséen méridional, contemporaine du pré-Chasséen. Les impacts chasséens semblent contemporains de la fin du Cerny local qui correspondrait également à la fin du Roessen. La place de la région dans le contexte de diffusion et d'interactions culturelles de cette période est donc particulièrement importante et débattue (Augereau *et al.* 2016 ; Chambon *et al.* 2013).

### II.3. Les pratiques funéraires

Dans la vallée de l'Yonne, la sphère funéraire est très bien documentée grâce au **nombre exceptionnel de sépultures** mises au jour. Le PCR dirigé par Ph. Chambon « **Evolution, coexistence et confrontation de pratiques funéraires entre 4500 et 4000 cal BC sur un micro-territoire : la Vallée de l'Yonne, entre le Serein et le Baulche** » propose d'aborder les questions du phasage chrono-culturel et de l'identité des groupes humains dans la vallée de l'Yonne et de leurs relations avec l'extérieur à travers une approche globale des structures sépulcrales et des restes humains découverts en contexte détritique (Chambon *et al.* 2009a ; Chambon *et al.* 2013). Il se concentre sur la période comprise entre 4500 et 4000 cal BC (bien que sa limite supérieure ait été étendue à 4700 cal BC à la suite de nouvelles datations) et sur une aire restreinte de 10 km de long ayant livré le plus abondant matériel ostéologique de la vallée (Figure C1. 14), en particulier grâce à la découverte des nécropoles de Gurgy « Les Noisats » et Monéteau « Macherin », comprenant respectivement plus de 120 et de 60 inhumations majoritairement individuelles. Des comparaisons avec le reste de la vallée sont bien sûr proposées. La **diversité des dispositifs sépulcraux** rencontrés, de même que le mobilier, renvoie aux différentes sphères culturelles alentour (Chambon *et al.* 2009a ; Chambon *et al.* 2013).



**Figure C1. 14 : Carte de répartition des sites inclus dans le PCR « Évolution, coexistence et confrontation de pratiques funéraires entre 4500 et 4000 av. J.-C. sur un micro-territoire : la vallée de l'Yonne, entre le Serein et le Baulche » dirigé par Ph. Chambon. Les sites de Chichery « Bois des Pâturaux », Gurgy « La ferme de Néron » et « La Raye Bossue » ne sont pas retenus dans l'étude des pratiques funéraires du Néolithique moyen, n'ayant à ce jour pas livré de restes humains ou datant d'une autre période. Les sites en rouge sont tous considérés dans ce travail.**

Notre travail portant sur l'ensemble des sites de ce PCR, les pratiques funéraires seront décrites pour chaque gisement individuellement dans le Chapitre 3 afin d'en développer les caractéristiques particulières. Néanmoins, nous en présentons ici un bref aperçu faisant montre de la grande diversité rencontrée dans l'Yonne et de la complexité d'une définition de l'identité locale. La description des principaux types sépulcraux se base sur la catégorisation proposée par Ph. Chambon et collaborateurs (2013) – uniquement à partir des architectures ici – pour le Néolithique moyen (des variantes peuvent ponctuellement être observées pour les structures les plus simples). Quelques sépultures du Néolithique ancien comptent à l'inventaire mais leur indigence ne permet pas d'approche comparative ici : les pratiques funéraires du Rubané sont, d'une part, abordées plus haut et, d'autre part, les quelques sépultures rubanées ou VSG de la microrégion seront décrites par la suite (Chapitre 3).

- *Les sépultures de type « Balloy »*

Le défunt est disposé **sur le dos en position allongée** dans une fosse dépassant largement sa taille. Le cadavre s'est décomposé en espace vide. La tombe se caractérise par un **double dispositif** : un contenant mobile ouvert en matériaux périssables, de type tronc évidé, est inséré dans un « caveau » dont les parois verticales et le fond plat devaient être architecturés en terre et en bois (Wattez *in* Augereau et Chambon 2011). Des aménagements supplémentaires peuvent parfois être observés tels que des structures de maintien de la tête ou la présence d'une enveloppe souple.

Définies à partir du gisement éponyme de Balloy « Les Réaudins » (Seine-et-Marne), ces structures complexes sont principalement rencontrées dans les nécropoles monumentales **Cerny** comme à Vignely « La Noue Fénard », Gron, Passy ou Escolives-Sainte-Camille, mais on en trouve également dans les nécropoles « ordinaires » de cette culture ne comprenant aucun monument comme à Vignely « La Porte aux Bergers » ou encore à **Chichery « Sur les Pâturaux »** pour la portion de la vallée de l'Yonne considérée ici (cf. Chap3.IV.1.b). Si dans le Bassin parisien elles sont presque exclusivement rattachées au Cerny (cette attribution culturelle est toutefois discutée sur la base d'un mobilier caractéristique indigent), leur origine se trouve vraisemblablement dans le Mittelneolithikum de la vallée du Rhin, voire au Rubané. Dans notre microrégion, hormis à Chichery, c'est dans la nécropole de **Monéteau « Macherin »** que l'on rencontre ce type de structures, au sein des ensembles sépulcraux rassemblant essentiellement des sujets en position repliée. Sur ce gisement, si quelques éléments de mobilier apparentés au Cerny ont été retrouvés, la présence de coupes carénées fait plus clairement référence au Chasséen (cf. Chap3.III ; Augereau et Chambon 2011).

- *Les tombes en coffre*

Rappelant indéniablement les **cistes de Chamblandes** dont le phénomène est initié en Suisse (Moinat 2007), les coffres de la vallée de l'Yonne semblent avoir été construits **en bois et en terre** et accueillent un défunt en **position repliée** qui s'est décomposé en espace vide indiquant que le coffre était fermé. Sur la couverture était déposé un **vase chasséen**.

Des coffres ont été mis en évidence à **Monéteau** notamment, mais également à **Bonnard**, accueillant une sépulture triple. Des indices de coffres sont également observés aux **Noisats** mais l'association avec du mobilier chasséen n'est pas respectée (elle l'est strictement dans les deux sites précédents). Les **fosses cuvelées** identifiées aux Noisats sur la base de la stratigraphie du remplissage (cf. Chap3.II.1.b) pourraient toutefois s'apparenter à une variante du phénomène coffre.

Sur le plan chronoculturel, ces tombes sont à rapprocher de la **sphère alpine**, bien que l'aire de répartition des coffres s'étende peut-être jusqu'en Catalogne dans la culture des *Sepulcres de fossa* en passant par Pontcharaud en Auvergne (Loison 1998), et du **Chasséen** (plutôt d'obédience méridionale ; Chambon 2007).

- *Les tombes à alcôve*

Comportant un **surcreusement latéral** accueillant le défunt, ces tombes rappellent les sépultures à niche du RRBP (cf. I.5.b ; Bonnabel *et al.* 2003 ; Thevenet 2004, 2010).

Ces structures ont été identifiées aux **Noisats** (et uniquement, pour toute la microrégion) dans un contexte postérieur au RRBP (Néolithique moyen indéterminé) et présentent une certaine variabilité par rapport à la tradition rubanée (cf. Chap3.II.1.b ; Figure C3. 5D ; Rottier 2007 ; Rottier *et al.* 2005). Notamment, la « banquette », qui ici ne semble pas en être une, ne supporte pas de mobilier et la « niche » n'a pas d'orientation prédéfinie. Le comblement du puits d'accès paraît aussi relever d'un procédé différent. Si une ascendance rubanée ne saurait être écartée, des comparaisons peuvent être proposées dans différents contextes plus contemporains comme peut-être à Sublaines dans le groupe de Chambon, au Crès pour le Chasséen méridional ou encore dans la culture des *Sepulcres de fossa* (Chambon *et al.* 2009b).

- *Les fosses étroites aménagées*

Il s'agit là de simples fosses non aménagées comprenant un **sujet contraint** en position fléchie dans un **contenant mobile** de type « petit cercueil » représenté par des effets de paroi et une décomposition en espace vide. Principalement utilisé pour des jeunes individus, inhumés en association ou non avec des adultes, ces structures sont présentes à **Monéteau** et à **Gurgy « Les Noisats »**. Aucune occurrence de ce type n'a été renseignée pour le Néolithique ancien et les seules comparaisons connues se trouvent dans les cistes du bassin lémanique ou dans la vallée du Rhône de façon isolée.

- *Les fosses couvertes ou peu aménagées*

L'identification de ces structures se fait plutôt par l'**absence de caractère spécifique** pouvant définir un aménagement. Les fosses sont généralement **étroites** (le squelette est souvent en contact avec les bords de la fosse) et l'espace de décomposition est, au moins partiellement, vide en raison d'une simple couverture (ou parfois colmaté). Le défunt est inhumé en position fléchie voire hyper-fléchie, essentiellement sur le côté gauche et le plus souvent sans mobilier ou peu, ou encore peu caractéristique (cf. Figure C3. 5A). Quelques effets de parois peuvent néanmoins témoigner de parties de coffrage ou d'aménagements simples pouvant servir à recueillir le couvercle par exemple. On rencontre ces structures aux **Noisats**, à **Monéteau** et à **Chichery « l'Étang David »**, sans trouver de comparaison en dehors de la microrégion, suggérant une possible spécificité locale.

- *Les restes humains épars*

Deux gisements ont livré des restes humains **dispersés dans les fossés d'enceinte** : Beaumont et Gurgy « Le Nouzeau ». Attribués respectivement au Chasséen et au Cerny selon toute vraisemblance, les gestes associés aux remaniements de ces défunts varient, comme leur effectif et leur répartition (23

restes au Nouzeau, rassemblés sur une petite surface, contre 140 à Beaumont dispersés sur l'ensemble du site ; cf. Chap3). Le dépôt de restes humains en contexte non sépulcral est devenu pratique courante pour le Néolithique moyen et on en trouve donc des équivalents dans différents sites comme à Berry-au-Bac, Cuiry-les-Chaudardes ou Vignely (Pariat 2007).

### II.4. L'environnement et l'implantation du territoire dans la vallée de l'Yonne

#### II.4.a. Une organisation le long de la rivière

Dans la vallée de l'Yonne au Néolithique ancien, les sites d'habitat sont implantés le long de la rivière : les longues maisons danubiennes avec fosses latérales sont localisées sur les terres fertiles riches en limon (e.g. Monéteau « Macherin », puis Gurgy « les Grands Champs » au VSG). Puis on observe un déplacement dès le VSG en bordure de plateau, qui s'étend sur les plateaux au Cerny où les traces d'habitat sont plus rares, avec des structures circulaires pouvant être interprétées comme tels (comme à Beaumont ; cf. Chap3.V.1.b ; Duhamel *et al.* 2015 ; Mordant et Simonin 1997). Un éloignement de la rivière au début du Néolithique moyen avait été signalé dès les années 1990, correspondant peut-être à un essaimage de l'habitat, « *alors que toutes les terres de fond de vallée, les plus fertiles et les plus faciles à travailler, étaient déjà investies* » (Delor 1999, p.410). Alors que l'habitat était plutôt constitué de hameaux au RRBP (la taille des villages pouvant varier de quelques maisons à plus d'une trentaine comme dans la vallée de l'Aisne), il serait probablement plus dispersé au Cerny, comptant parallèlement des groupes plus importants et plus inégalitaires (Bostyn *et al.* 2018 ; Duhamel *et al.* 2015). Le territoire est alors marqué par le monumentalisme avec les structures funéraires de type Passy et les enceintes dont on recense un grand nombre dans la basse vallée de l'Yonne. La construction de ces grandes structures représentatives de l'identité ostentatoire de cette période nécessite un ouvrage collectif et une certaine organisation. La position géographique des nécropoles monumentales de l'Yonne (Escolives, Gron, Passy), suivant une répartition homogène sur le territoire, a enjoint J.-P. Delor (1999) à proposer une organisation par entités territoriales dirigée par une minorité (Figure C1. 15). L'habitat chasséen, peut-être plus léger, est peu connu, plutôt représenté par des fosses domestiques, généralement au bord de l'eau. Les groupes humains étaient probablement assez mobiles, même dans les montagnes alpines (Beeching 2003 ; Hofmann 2020).

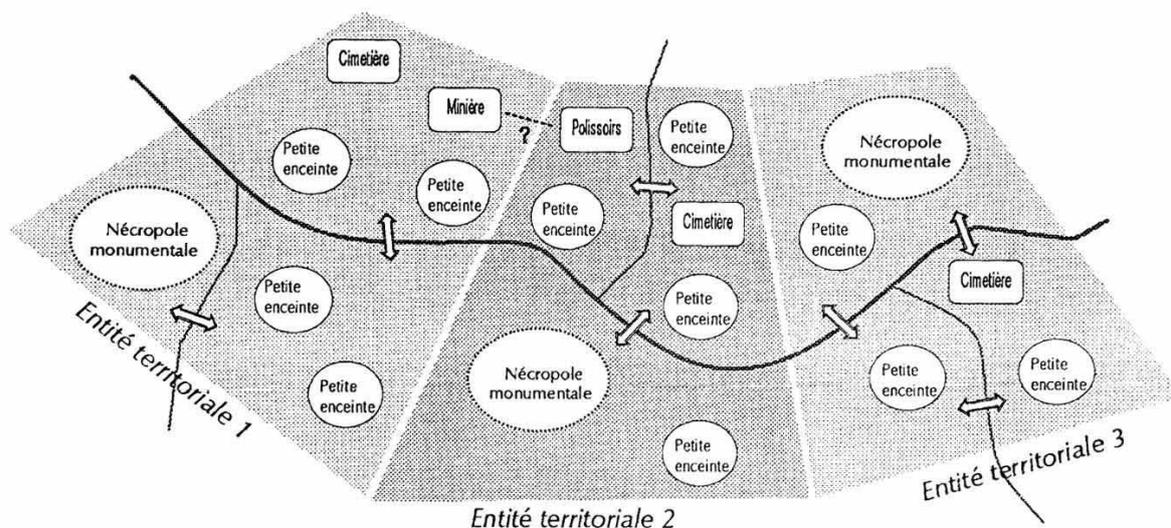


Figure C1. 15 : Proposition schématique de l'organisation du territoire au Néolithique moyen par entités territoriales d'après J.-P. Delor (1999).

Dans notre **microrégion** plus précisément, les sites sont implantés de part et d'autre de la rivière, sur la terrasse alluviale, surplombant parfois un léger relief. Le **sous-sol sédimentaire** est composé de graves (couche inférieure renfermant la majorité des fosses sépulcrales), de sable et de limon. Plus exactement dans la « plaine de Bassou », la première couche, correspondant à la surface cultivée, est argilo-gravillonneuse comportant une fraction limoneuse sur les trente premiers centimètres environ. Une seconde en dessous, sur une dizaine à une quinzaine de centimètres, est plus claire mais de composition similaire comprenant moins de matière organique. Elle est parfois atteinte par les labours. Une troisième couche, au-delà des quarante centimètres approximativement et sur une dizaine de mètres, est gravelo-sableuse, composée essentiellement de calcaire et de grès. C'est cette dernière qui intéresse les exploitations massives de gravières (Garmond et Delor en préparation).

La fluctuation du cours de la rivière, illustrée par les nombreuses traces de paléochenaux fossiles, a sans doute participé au remplissage de certaines structures archéologiques par des concrétions calcaires (qui rendent difficile les observations taphonomiques de ces structures). Non sans compter sur les labours modernes et le décapage mécanique, l'arasement de certaines tombes a également pu être causé par le passage de la rivière (érosion).

Au Néolithique, la proximité de l'Yonne a sans doute conditionné l'implantation des sites, dont les structures sont localisées au **centre du réseau hydrographique**, parfois sur des îlots créés par la divagation de la rivière formant des méandres ayant pu servir de barrières naturelles (Dagobert *et al.* 2006). Par endroits et au cours des périodes de faible précipitations, l'aménagement (naturel ou non) de gués devaient permettre le passage à pied d'une rive à l'autre de la rivière. Au Néolithique moyen, il semblerait que l'exploitation du territoire se fasse dans la **proximité immédiate des habitations** (cf. II.4.b), peut-être sur la berge opposée de la rivière, avec un déplacement des zones de culture (et des

habitats) le long de l'Yonne, à l'épuisement des sols cultivés. Cette stratégie d'agriculture cyclique a été observée plus tard dans les villages lacustres suisses extrêmement bien conservés du Néolithique moyen II, grâce à la dendrochronologie, indiquant une occupation villageoise pendant quelques années à quelques générations, puis un déplacement des groupes vers d'autres installations (Pétrequin 1984a). La mobilité des groupes ou des personnes est également perçue, dès le Rubané, comme ayant un rôle social de « conquête » du territoire (Hofmann 2020).

Les sites de Gurgy « Les Grands Champs » et Monéteau « Macherin » constituaient vraisemblablement de grandes unités d'habitation. Les enceintes de Beaumont et du Nouzeau pouvaient constituer des lieux de rassemblement (leur fonction n'est pas connue) et différents ensembles funéraires étaient utilisés par les groupes humains, peut-être selon une sélection privilégiant l'accès à certains types de traitement mortuaire pour une partie de la population. À Chichery, les deux ensembles de « Sur les Pâturaux » et « l'Étang David » ont peut-être fonctionné en même temps mais présentent des typologies largement différentes. Les grandes nécropoles des Noisats et de Macherin, distantes de quelques kilomètres, présentent des similitudes entre elles, ainsi qu'avec l'Étang David, également éloigné de plusieurs kilomètres. En outre, certains individus ont fait l'objet de manipulations *post-mortem* comme on l'observe à Beaumont et au Nouzeau. La contemporanéité ou la succession de ces sites n'est pas déterminée et aucun habitat n'est directement associé aux nécropoles ni aux plus petits ensembles funéraires. Toutes ces considérations invitent à se poser la question de l'identité de ces groupes humains, de leur relation entre eux et de l'utilisation du territoire.

### II.4.b. Un environnement changeant mais encore peu marqué

Dans le climat tempéré du Bassin parisien, l'analyse des **séquences polliniques** permet de suivre **l'influence de l'homme sur son milieu**. La diminution des pollens arborés ou la fréquence des espèces cultivées et rudérales par rapport à la dynamique régionale de la végétation naturelle sont autant d'indices d'anthropisation du milieu (défrichements, pastoralisme, agriculture ; Leroyer et Allenet 2006). Dans le Bassin parisien, la diminution d'espèces comme le chêne (*Quercus sp.*), le hêtre (*Fagus sp.*) ou l'aulne (*Alnus sp.*) au profit d'une augmentation d'essences comme le bouleau (*Betula sp.*) ou le noisetier (*Corylus sp.*) constitue un témoin de défrichements modérés (Leroyer 2006). La présence d'espèces herbacées (e.g. Poacées, fougères) témoigne quant à elle d'une ouverture plus conséquente du milieu, par exemple pour le pastoralisme. L'identification de plantes cultivées (céréales, lin) et messicoles (des moissons) comme le plantain lancéolé (*Plantago lanceolata*) permet de reconstituer les pratiques agricoles (cf. I.3.a). Les espèces rudérales (rumex, plantains, orties, chénopodes, renouées, astéracées et autres) sont des marqueurs d'activités agropastorales. L'essor du cortège rudéral, dont le plantain lancéolé (*Plantago lanceolata*) fait partie, offre par exemple des indices patents de la pratique de l'élevage (prairies pâturées ; Leroyer *et al.* 2008). L'interprétation combinée des analyses polliniques, anthracologiques et micromorphologiques des paléosols permet ainsi de retracer les activités humaines,

de capter la diversité forestière environnante et les essences de bois utilisées (Dagobert *et al.* 2006 ; Leroyer *et al.* 2008 ; Leroyer *et al.* 2011).

Au **Néolithique ancien**, les indices faibles indiquent que l'homme pratique une agriculture peu destructrice et itinérante (le caractère itinérant a cependant été remis en question récemment pour privilégier l'hypothèse d'une agriculture plus intensive avec travail du sol, désherbage et fertilisation dès le Néolithique ancien ; Bogaard *et al.* 2013). L'impact anthropique sur le paysage forestier est limité, et seulement marqué dans certaines zones d'occupation de forte densité (Leroyer et Allenet 2006 ; Leroyer *et al.* 2008). Les diagrammes polliniques effectués dans le Morvan indiquent des traces anthropiques visibles dès le Néolithique ancien. Ces indices, pourtant ténus, de l'impact agropastoral sont donnés par la présence de céréales, de plantain lancéolé et d'orties ainsi que par une diminution des espèces arborées (Duhamel *et al.* 2015).

Le **Néolithique moyen** voit son couvert végétal **légèrement plus ouvert** (avec un accroissement de la pression anthropique du Néolithique moyen I au Néolithique moyen II) sans qu'aucun défrichement massif ne soit attesté. « L'enregistrement des activités reste assujéti à la densité du peuplement et à la liaison avec des occupations » (Leroyer et Allenet 2006, p.70). La Bassée par exemple semble connaître une augmentation des activités agropastorales au Néolithique moyen (*ibid.*). À cette période, le territoire n'est probablement **exploité que dans les environs proches des villages**. L'impact sur le milieu est variable selon les secteurs et doit être considéré en lien avec les sites d'occupation (Duhamel *et al.* 2015 ; Leroyer 2006), de même que les dynamiques de végétations locales doivent être utilisées comme référence en fonction des contextes climatiques et pédologiques (Leroyer *et al.* 2008). Bien que la construction des enceintes notamment requière une importante consommation de bois qui impactera plus fortement le paysage, l'anthropisation du milieu apparaît globalement encore modérée (Argant et Argant 1996 ; Dubouloz *et al.* 1991 ; Leroyer *et al.* 2008).

C'est au **Néolithique récent/final** que l'intensification des activités agro-pastorales donnera des signes manifestes d'ouverture du couvert forestier (Leroyer 2003 ; Perriere *et al.* 2006).

Tout au long du Néolithique, la présence d'animaux sauvages (cerf, aurochs, ours, castor, poissons, tortues) indique un environnement préservé (Duhamel *et al.* 2015). Mais au-delà de l'occupation du territoire, qu'en est-il de l'utilisation des ressources dans l'alimentation ?

### II.5. Économie et stratégies de subsistance

Si la vallée de l'Yonne a fourni un grand nombre de sites néolithiques, l'accent a été porté sur l'étude du matériel, des structures funéraires et de quelques enceintes. Les données paléalimentaires sont plus ponctuelles et ne bénéficient d'aucune synthèse (Duhamel *et al.* 2015). Régionalement, les indices relatifs à l'économie de subsistance sont finalement assez peu nombreux en comparaison de ce

qui est connu dans le Bassin parisien, en particulier grâce à la fouille et à l'étude approfondie de sites d'habitat du Rubané telle que celui de Cuiry-les-Chaudardes (Aisne ; Hachem 2011a). Les études concernent principalement la faune, mieux préservée que les restes végétaux, notamment dans le Bassin parisien où les conditions pédologiques sont peu favorables à la conservation des graines carbonisées.

Il est donc nécessaire de replacer la vallée de l'Yonne dans un contexte plus large et de comparer les données à ce qui est connu dans les régions avoisinantes. La présentation qui suit ne se veut bien sûr pas exhaustive mais tend à proposer une vision d'ensemble des pratiques agropastorales et de l'utilisation de la sphère sauvage dans la région et alentour au Néolithique.

### II.5.a. Agriculture et cueillette

- *Les espèces cultivées*

Dans le Bassin parisien, la culture des céréales est attestée dès le **Néolithique ancien**, par les séquences polliniques, mais aussi par l'étude des graines carbonisées (carpologie). La culture des **blés vêtus**, **l'amidonnier** principalement (*Triticum dicoccum*) et **l'engrain** (*Triticum monococcum*), prédomine, suivie par celle de **l'orge polystyque nue** (*Hordeum vulgare* var. *nudum*). Ce trio céréalière est retrouvé dans plusieurs sites RRBP et VSG, essentiellement dans la vallée de l'Aisne (e.g. Menneville « Derrière le Village », Berry-au-Bac « le Chemin de la Pêcherie », Bucy-le-Long « La Fosse Tounise » ; Bakels 2008 ; Bouby *et al.* 2018 ; Ilett *et al.* 1995). Les légumineuses présentes sont la **lentille** (*Lens culinaris*) et le **pois** (*Pisum sativum*) majoritairement, mais on trouve aussi de la féverole (*Vicia faba* var. *minor*). Le **lin cultivé** (*Linum usitatissimum*) est également mentionné, représentant les oléagineuses, et le **pavot à opium** (*Papaver somniferum*) est attesté et particulièrement répandu, dans plusieurs sites dès le Rubané (Figure C1. 16 ; Salavert *et al.* 2020). Il est à noter que l'orge nue, le pois et le pavot somnifère sont introduits au Rubané dans un deuxième temps, après les blés vêtus et la lentille, provenant d'une deuxième vague de colonisation danubienne ou bien d'échanges avec la sphère méditerranéenne (Bouby *et al.* 2018). Puis le **blé nu** ou blé tendre (froment ; *Triticum aestivum*) arrive en France septentrionale avec le Grossgartach et le Cerny (probablement depuis le Sud de la France), bien que sa présence ait récemment été attestée dès le VSG (Bakels 1997 ; Dietsch-Sellami 2002). Dès le Néolithique moyen, il prend une place prépondérante dans les assemblages, étant panifiable, aux côtés de l'orge nue (Figure C1. 17). Il sera ensuite (très vite) remplacé en fréquence par le blé tétraploïde ou blé dur/blé poulard (*Triticum durum/turgidum*) également à grain nu et panifiable (bien qu'il lève moins ; c'est le blé aujourd'hui utilisé pour la confection de pâtes et semoule ; Bouby *et al.* 2018).

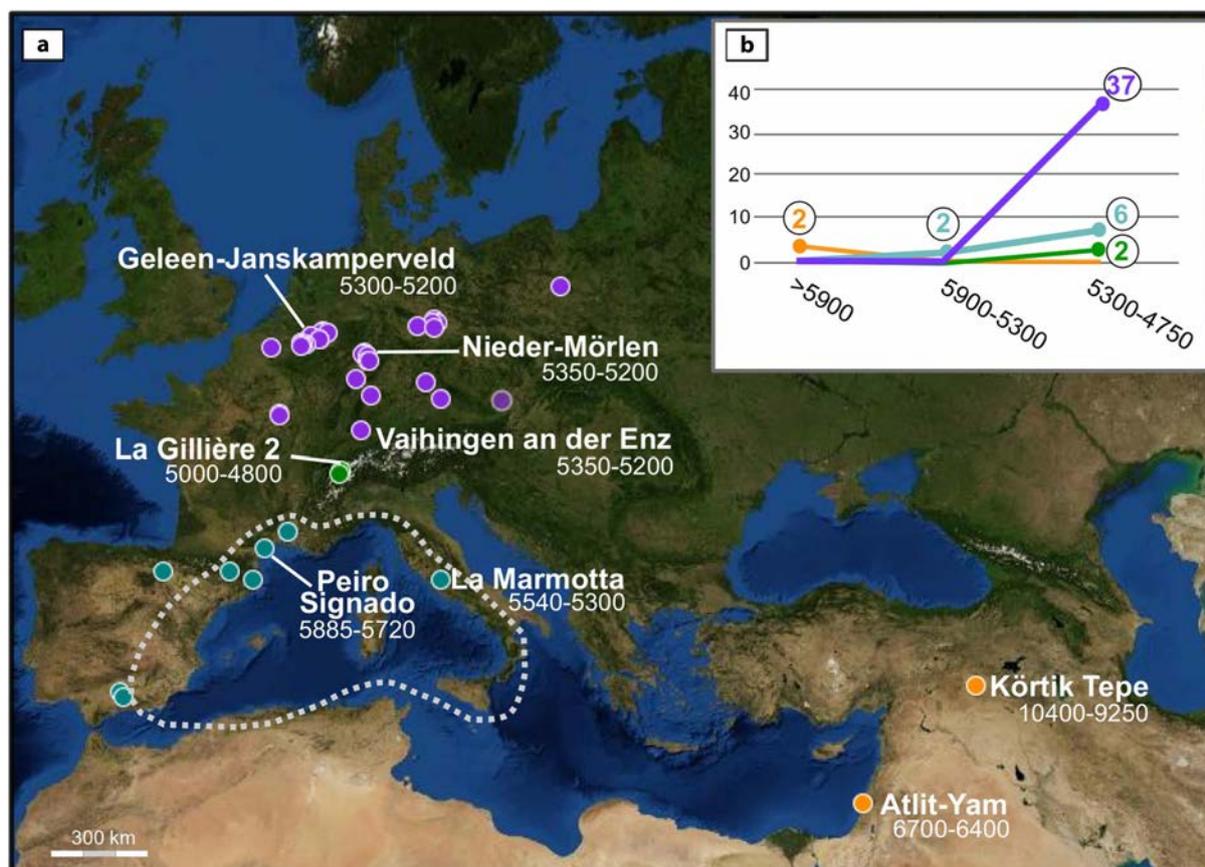


Figure C1. 16 : a. Carte de répartition des sites ayant livré des restes de pavot à opium correspondant aux premières occurrences au Proche-Orient (points oranges), en Méditerranée (points bleus), en Europe tempérée (points violets) et dans l'ouest des Alpes (points verts) et populations actuelles de pavot sauvage (cercle pointillé). b. Nombre de sites du Néolithique ancien ayant livré du pavot par chronologie. D'après Salavert *et al.*, 2020.

L'alternance des espèces céréalières au cours des différentes périodes du Néolithique revêt un caractère adaptatif aux changements de pratiques agricoles et aux fluctuations du climat, les unes résistant mieux à la sécheresse alors que d'autres étaient plus exigeantes en matière azotée, de meilleur rendement ou plus facilement cultivables (Hamon *et al.* 2019).

Dans le **Sud de la France** au Néolithique ancien (Cardial), l'agriculture est majoritairement fondée sur l'exploitation de l'orge nue et du blé nu ou froment (l'orge semble prépondérant dans les cultures céréalières), suivi de l'amidonnier (blé vêtu), ainsi que de l'opium, également présent (Bouby *et al.* 2018 ; Bouby *et al.* 2019 ; Marinval et Ruas 1991 ; Salavert *et al.* 2020). L'en grain sera plutôt cultivé au Néolithique final (Bouby *et al.* 2019). Les légumineuses sont globalement peu représentées. On observe une augmentation des quantités de céréales et de légumineuses au Chasséen par rapport au Cardial, mais le spectre reste globalement inchangé (Bouby *et al.* 2018 ; Martin *et al.* 2016).

Le cas des **Alpes** est particulier. Extrêmement bien documenté, il concerne une végétation d'altitude et des pratiques mieux adaptées au froid (Martin 2011, 2013, 2014 ; Martin *et al.* 2019 ; Martin *et al.* 2012 ; Martin *et al.* 2008 ; Martin et Lundström-Baudais 2013). Non loin, le **domaine lacustre suisse** ayant permis une conservation exceptionnelle des restes est également une source privilégiée d'information pour

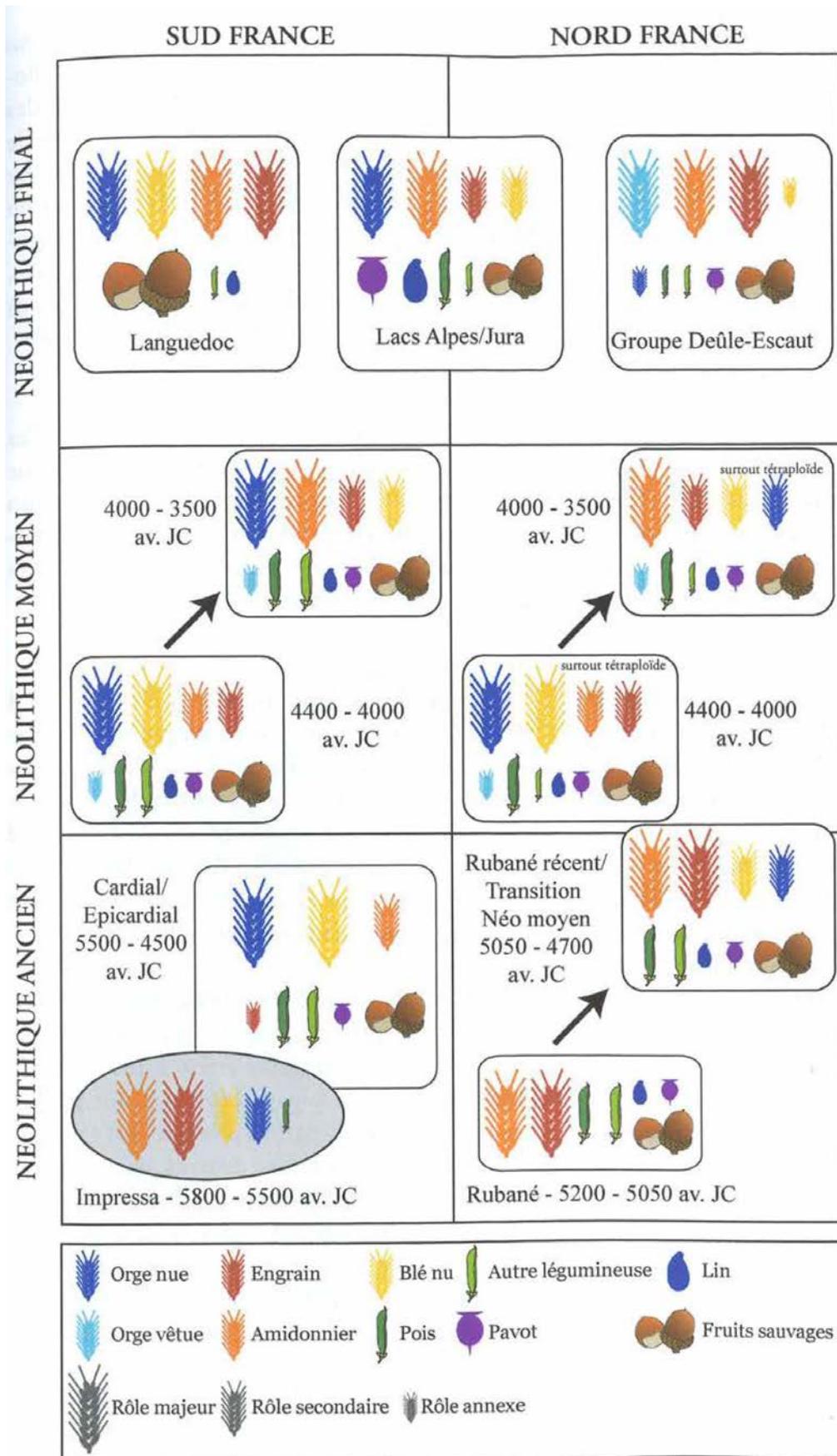


Figure C1. 17 : Représentation schématique de l'évolution des principales ressources végétales exploitées en France au cours du Néolithique (© L. Bouby). D'après Bouby *et al.*, 2018.

la reconstitution de la gestion des ressources végétales ; les vestiges concernent néanmoins des périodes généralement plus récentes de la fin du Néolithique moyen I au Néolithique final (Jacomet 2009 ; Martin et Jacomet 2014 ; Pétrequin 1984a). Dans ces régions (milieu montagnard alpin et plateaux suisses), les mêmes espèces sont globalement retrouvées, mais la quantité de restes mis au jour et leurs conditions de conservation permettent d'accéder à un niveau plus fin d'analyses, révélant la diversité régionale existante en termes d'organisation et de pratiques agricoles, de gestion des ressources et de préparations alimentaires.

Fig. 16

- *Les plantes sauvages*

D'autre part, la cueillette avait également une place non négligeable dans les stratégies de subsistance des Néolithiques, bien que la mise en évidence des **espèces sauvages** soit difficile du fait de leur mauvaise conservation : seuls les graines et fruits carbonisés ou imbibés sont retrouvés (Dietsch-Sellami 2007) mais de nombreuses feuilles et racines pouvaient aussi être consommées (e.g. tilleul, ortie, chénopode, astéracées ; Couplan 2009).

Dans le Bassin parisien et plus généralement dans le Nord de la France, les espèces les plus couramment consommées sont la noisette (*Corylus avellana*) et les glands de chêne (*Quercus robur*/sp.), puis les pommes et poires sauvages (*Malus sylvestris* et *Pyrus pyraster*), les baies de sureau (*Sambucus nigra*), les prunelles (*Prunus spinosa*), le cynorrhodon (*Rosa sp./canina*), le raisin sauvage (*Vitis sylvestris*) ou encore, bien que plus rarement dans le Nord de la France, les framboises (*Rubus idaeus*) et fraises des bois (*Fragaria vesca*), les mûres (*Rubus fruticosus*), le coqueret (*Physalis alkekengi*), et l'aubépine (*Crateagus monogyna* ; Bouby *et al.* 2018 ; Dietsch-Sellami 2007 ; Martin *et al.* 2016). Le cornouiller sanguin (*Cornus sanguinea*) était probablement utilisé pour s'éclairer (Dietsch-Sellami 2007). Des **plantes aquatiques** comme le nénuphar jaune (*Nuphar lutea*) sont également consommées, alors que des plantes de roselières (e.g. le jonc des tonneliers *Schoenoplectus lacustris*) sont utilisées pour couvrir le toit des maisons (Bouby *et al.* 2018).

- *Quelques assemblages micro-régionaux*

Dans le village post-rubané de **Gurgy « Les Plantes-du-Mont »** composé de cinq maisons, deux silos ont livré des graines carbonisées de **pois** (*Pisum sativum*) uniquement, confirmant que cette légumineuse était couramment cultivée dès le Néolithique ancien. Aucun reste de céréale n'a été retrouvé mais les mauvaises conditions pédologiques n'ont peut-être pas permis leur conservation. En outre, des plantes sauvages sont répertoriées : trois fragments de coquilles de **noisettes** (*Corylus avellana*) et une trentaine de restes de **poire sauvage** carbonisées (*Pyrus pyraster*), sous forme de fruits entiers ou demi-fruits et de pépins, témoignant de la cueillette pratiquée. Les poires étaient coupées en deux pour être mises à sécher au-dessus d'un foyer en vue de leur conservation hivernale. La chute des fruits en cours de séchage dans le feu aura permis leur conservation prolongée jusqu'à leur découverte archéologique (Marinval 1995).

Le site VSG de **Gurgy « Les Grands Champs »**, inclus dans notre microrégion, a livré un certain nombre d'outils de mouture et d'armatures de faucille, en plus de la présence de silos, laissant envisager une fonction spécialisée de ce site, tourné vers l'agriculture. Les traces d'usure de certaines meules peuvent témoigner de certaines étapes de transformation des céréales comme par exemple le décortiquage (Meunier *et al.* 2006).

Dans les autres sites de la microrégion, aucun reste botanique n'est parvenu jusqu'à nous. Plusieurs raisons peuvent être avancées : des fouilles anciennes n'ayant pas octroyé les méthodes adaptées à la reconnaissance de tels vestiges, le contexte funéraire majoritaire par rapport aux structures domestiques renfermant généralement ce type de restes et les mauvaises conditions de conservation (les ossements eux-mêmes étant particulièrement dégradés). Quelques fragments de **meules et molettes** ont été retrouvés, en association aux défunts, dans les fossés d'enceinte ou dans des structures isolées mais leur fonction n'est pas connue : probablement à usage agricole, elles pouvaient aussi servir à broyer des matières minérales et animales (Figure C1. 18 ; Hamon 2003, 2006 ; Hamon *et al.* 2011). Le dépôt de meules (suivant des pratiques codifiées, selon leur agencement, leur localisation et leur nature) pouvait avoir un rôle social et symbolique au sein des communautés rubanées du nord-est de la France (Hamon 2005, 2020). En revanche, leur découverte isolée (ou fragmentaire), tout du moins en contexte non sépulcral, revêt probablement un caractère détritique, non symbolique, tout en signalant vraisemblablement un lien avec les pratiques agricoles ou la sphère domestique. Mises au jour dans des sépultures, elles peuvent avoir un lien avec l'activité agricole ou la place de l'individu (souvent des femmes) dans la société (Graefe *et al.* 2009).

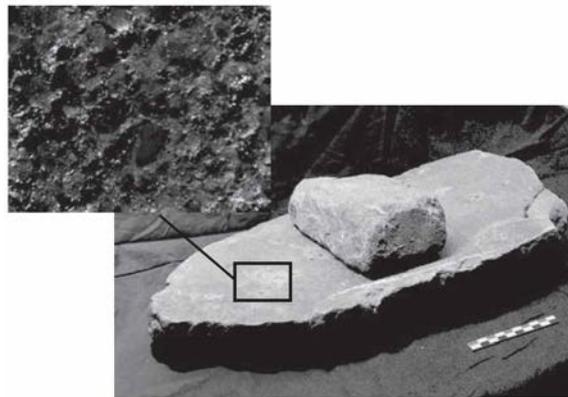


Figure C1. 18 : Meule à céréales du site VSG de Loison-sous-Lens (Pas-de-Calais) avec un détail de la surface active (x50). D'après Hamon *et al.*, 2011.

- *Préparations alimentaires*

Les blés vêtus étaient décortiqués par battage énergique et vannage, ou sur meule de pierre, pour supprimer les glumelles (balles ou enveloppes du grain ; Hamon 2006 ; Hamon *et al.* 2019 ; Marinval et Ruas 1991). Les grains de céréales nues et décortiqués étaient ensuite broyés pour la confection de farines ou utilisés dans des gruaux. Encore mal connues, les préparations alimentaires devaient consister en la réalisation de bouillies, de galettes et de pains, fermentés ou non (Bouby *et al.* 2018).

NB : En dépit de l'existence de sources salées dans l'Yonne, l'utilisation du sel n'est pas attestée dans la région avant le Néolithique final, période à laquelle ont été datées les fontaines salées de Saint-Père-sous-Vézelay (Bernard *et al.* 2008).

### II.5.b. L'élevage et la chasse

Les données concernant les ressources carnées sont mieux documentées en raison de la meilleure conservation des ossements animaux trouvés dans les fossés d'enceintes, les fosses latérales des maisons danubiennes ou les silos domestiques. Ces restes correspondent aux rejets culinaires et de l'industrie osseuse. L'étude archéozoologique des assemblages fauniques rassemble les premiers éléments de reconstitution des comportements économiques et alimentaires concernant les animaux chassés et domestiques (Hachem 2008). En outre, l'analyse biochimique des dents animales par micro-échantillonnage et des résidus piégés dans les poteries vient compléter nos connaissances en renseignant d'autres aspects de l'utilisation des ressources animales comme l'exploitation laitière et la gestion du cheptel ou la consommation de graisses issues d'animaux terrestres ou aquatiques (Balasse et Tresset 2002 ; Regert 2021).

- *Le cheptel domestique et l'exploitation des animaux d'élevage*

Avec l'arrivée du Néolithique en France, les quatre espèces domestiquées au Proche-Orient sont importées et **l'élevage** devient la **principale source de produits carnés**.

Au **Néolithique ancien** dans le Nord de la France et plus spécifiquement dans le Bassin parisien (RRBP et VSG ancien), l'exploitation des **bovins** domestiques (*Bos taurus*) est majoritaire, suivie de celle des **caprinés** (*Ovis aries* et *Capra hircus*), puis du porc (*Sus domesticus* ; Arbogast 1991 ; Arbogast *et al.* 2018 ; Hachem 2011b).

À partir du **VSG moyen**, les caprinés diminuent au profit du **porc**, qui devient la **seconde ressource carnée** après le bœuf (Figure C1. 19 ; Bedault 2009, 2012 ; Bedault et Hachem 2008). Cette tendance se confirmera dans les phases successives du Néolithique où la composition « bœuf majoritaire, puis porc et enfin caprinés de façon minoritaire » perdure durant tout le Néolithique moyen (Hachem 2011b).

Les enceintes **Cerny** de Balloy « Les Réaudins », Chatenay « Les Pâtures » et Barbuise-Courtavant attestent par exemple de la prépondérance du bœuf (70-80 %), puis du porc (10-20 %) dans les assemblages fauniques totaux ; l'exploitation des moutons et chèvres étant minoritaire (Tresset 1989, 1997). Il existe cependant une certaine **variabilité entre les sites**, notamment selon le type de dépôt : à partir de 4200 cal BC dans le Nord de la France, une étude réalisée sur une trentaine de sites rattachés aux cultures du Néolithique moyen I et II (Cerny, Chasséen, Michelsberg, groupes de Noyen et de Balloy) montre que les enceintes et couches d'occupation, à caractère plutôt détritique, présentent des assemblages similaires en espèces domestiques, alors que les fosses d'habitat dévoilent une

dissemblance par rapport aux deux autres types, témoignant peut-être d'activités différentes entre ces sites (Hachem 2011b). Dans les fosses d'habitat Cerny de Conty « Zac Dunant » par exemple (Somme), la quantité de porc surpasse le bœuf, en termes de nombre de bêtes.

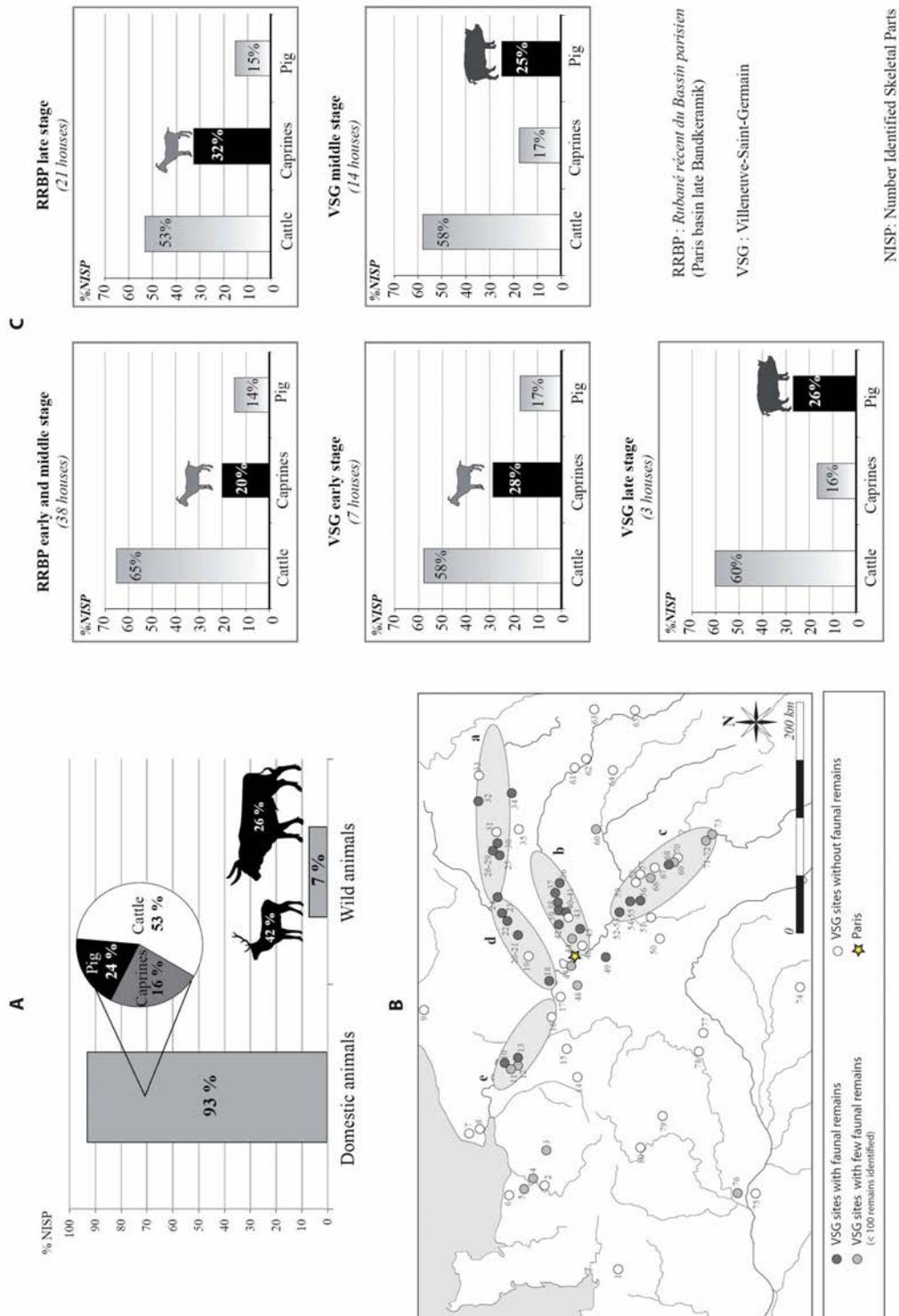


Figure C1. 19 : Composition relative des espèces domestiques et sauvages (A) retrouvées dans plus de 70 sites VSG, localisation de ces sites (B) et composition relatives des espèces domestiques par phase d'occupation (C). Les zones grisées sur la carte correspondent à la vallée de l'Aisne (a), la basse vallée de la Marne (b), la haute vallée Seine/Yonne (c), la vallée de l'Oise (d) et la basse vallée de la Seine (e). Les références des sites sont disponibles en annexe de Bedault 2009, p26. Modifié d'après Bedault 2009.

Pour le **Chasséen**, l'image n'est pas homogène à travers le territoire. Le **Chasséen de Chassey** est représenté notamment par l'étude de la faune du site éponyme (Poulain 2005). Dans le niveau le plus ancien (à partir de 4500 cal BC ou peut-être avant dès 4700 cal BC), les ovicaprins dominent l'assemblage, avant le bœuf et le porc. Puis la tendance s'inverse dans les niveaux suivants : le bœuf est majoritaire, suivi du porc. Des restes de chiens ont également été retrouvés, dès les premiers niveaux. Dans le dernier niveau chasséen, le bœuf prédomine, suivi des ovicaprins puis du porc. Les couches du Néolithique moyen bourguignon, plus récent, ne sont pas traitées ici. La faune sauvage est également représentée et sera discutée ci-après. Au **Chasséen septentrional**, dans les enceintes de Maison-Alfort « Zac d'Alfort » (Val-de-Marne), Passel (Oise) et Villers-Carbonnel (Somme) notamment, les porcs sont à peu près aussi nombreux que les caprinés, le bœuf étant toujours majoritaire, bien que de façon moins écrasante (Hachem 2011b ; Hachem *et al.* 2016).

Dans le **Sud-Est de la France**, les **ovicaprins** occupent une place plus importante. Au Cardial, leur exploitation prédomine sur celle du bœuf, dans les grottes-bergeries comme dans les sites de plein air, toutefois moins connus. Elle est tournée vers la production de viande et de lait (Helmer *et al.* 2005). Au Chasséen, les sites de plein air se multiplient (ils sont en tout cas mieux documentés, après des années de recherches concentrées sur les grottes-bergeries et les abris sous roche) et le **bœuf** est de plus en plus consommé, essentiellement dans les sites de plein air comme on le voit par exemple sur le site chasséen du Crès (Hérault) ou dans le village de Villeneuve-Tolosane (Haute-Garonne ; Brehard 2011 ; Bréhard *et al.* 2014 ; Gandelin 2011 ; Gandelin et Vaquer 2008 ; Geddes *et al.* 1987 ; Loison *et al.* 2004). Il existe notamment une spécialisation des sites, les grottes et abris étant plutôt utilisés pour le pastoralisme ovicaprin, alors que les sites de plein air recensent une plus grande quantité de bœuf (Bréhard *et al.* 2010 ; Gandelin 2011). Le porc est très peu représenté.

Revenons dans le **Bassin parisien**. Plus largement, on observe du Néolithique ancien à l'Age du Bronze, une diminution générale du bœuf et une **augmentation du porc**. Les caprinés eux, sont faiblement représentés au Néolithique moyen par rapport aux périodes antérieures et postérieures (Figure C1. 20 ; Auxiette et Hachem 2007 ; Hachem 2011b). Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer cette augmentation du porc au Néolithique, parmi lesquelles une réponse à l'augmentation démographique proposée par différents auteurs (Bedault 2009 ; Bocquet-Appel et Dubouloz 2003) : le porc, qui offre un meilleur rendement en termes de viande, permettrait de subvenir à une demande nutritionnelle grandissante de la population de plus en plus nombreuse (son cycle de reproduction est plus court permettant de renouveler rapidement les stocks et son taux de graisse est fortement calorique).

À une échelle plus fine, on observe une **évolution de la composition du cheptel** au cours des différentes étapes du Néolithique, ainsi qu'une certaine variabilité entre les sites, même au sein d'une même culture. Cette variabilité peut être chronologique, culturelle, environnementale (en lien avec les modifications climatiques dans le temps notamment ; la localisation du site ne semblant pas être un facteur de variation

notable) ou socio-économique, répondant à un type d'organisation villageoise par exemple. Ce dernier point est parfaitement illustré par le site RRBP de Cuiry-les-Chaudardes (Aisne), dans lequel des différences dans les assemblages fauniques ont été relevées en fonction de la chronologie, de la taille des maisons et de leur implantation dans le village : la part de l'élevage et de la chasse varie, de même que la proportion des espèces au sein de chaque catégorie (Hachem 2011a ; Hachem et Hamon 2014).

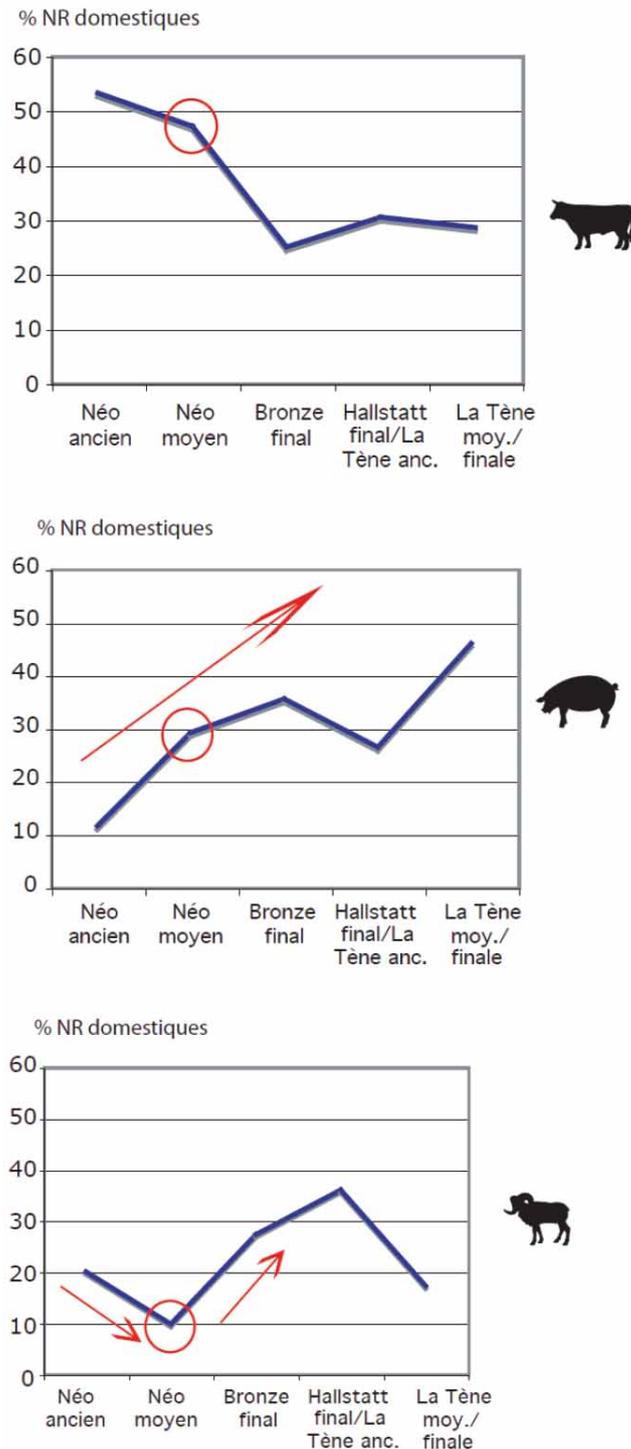


Figure C1. 20 : Évolution de la consommation du bœuf, du porc et des caprinés du Néolithique ancien à l'âge du Fer dans le Nord de la France. Modifié d'après Hachem 2011 à partir d'Auxiette et Hachem, 2007.

D'autre part, le bœuf et les caprinés semblent détenir un **rôle symbolique** particulier (Ghesquière et Hachem 2018 ; Hachem 2018). Au Cerny, des dépôts de moutons entiers ont été mis au jour dans les tombes de Fleury-sur-Orne dans le Calvados, ainsi que des restes de bovins (bucranes, chevilles osseuses), dans des tombes différentes et selon d'autres modalités (Ghesquière et Hachem 2018). Les auteurs parlent de sacrifices pour des rituels avec ou sans consommation de la viande (en opposition pour les bovins et les moutons, ces derniers étant plus probablement ritualisés pour leur toison). Dans le site Hinkelstein/Grossgartach de Trebur en Allemagne, des quartiers de viandes ont été déposés dans les tombes (Spatz et von den Driesch 2001). Ce type d'offrande, en association avec les défunts, est rapporté dès le Rubané dans la vallée du Rhin ou encore à Menneville dans l'Aisne (Arbogast 2013 ; Thevenet 2016). On en rencontre encore au Vigneau (Indre-et-Loire) pour le groupe de Chambon (agneaux ; Coutelas *et al.* 2015). Ces dépôts montrent bien la complexité d'interpréter les restes animaux retrouvés en contexte sépulcral en termes d'alimentation au quotidien.

En ce qui concerne le **type d'exploitation**, les nombreuses traces de découpe observées sur les ossements, de même que l'étude des fréquences anatomiques, attestent de la **consommation de viande**, mais dans certains cas l'**exploitation laitière** est également envisagée. Les **courbes d'abattage**, couplées à la détermination de l'âge au sevrage par l'analyse isotopique notamment, permettent d'identifier le type d'exploitation du bétail et la gestion des troupeaux. Dans les sites chasséens septentrionaux de Bercy (Paris) et Louviers (Eure), la gestion mixte du cheptel indique une bonne maîtrise de l'élevage des bovins. Les profils d'abattage « post-lactation » (de nombreuses bêtes abattues entre 6 et 12 mois, juste après le sevrage) associés à la présence d'individus âgés (vaches laitières « de réforme », de plus de 8 ans) témoignent de l'exploitation laitière (Balasse *et al.* 1997 ; Balasse et Tresset 2002 ; Balasse *et al.* 2000 ; Tresset 1997). En effet, les vaches ne délivrent leur lait qu'en présence de leur petit, en réponse à un stimulus provenant du léchage du pelage du veau (ce qui n'est pas le cas des caprinés ; Balasse 2003). Ces modalités ont aujourd'hui changé en raison de la sélection des bêtes et des modifications apportées volontairement ou non, mais elles avaient cours au Néolithique. Les veaux sont donc maintenus en vie tant que les vaches les allaitent, puis abattus pour éviter d'ajouter des bouches à nourrir pendant la mauvaise saison. Leur viande est alors consommée. L'exploitation laitière ovine et caprine est également possible et peut-être même plus probable à des périodes antérieures dans le Bassin parisien (Balasse *et al.* 2017 ; Hachem 2011a). Elle est attestée dès le Néolithique ancien au sud de la France (Debono Spiteri *et al.* 2016 ; Helmer *et al.* 2005). L'abattage entre 2 et 4 ans (maturité pondérale) des bovins comme des ovicaprins indique une consommation bouchère, alors que les sujets gardés et abattus plus âgés témoignent de l'exploitation des produits secondaires (outre le lait en association avec un abattage des jeunes, les individus plus âgés sont gardés pour le travail voire peut-être la toison ; Balasse et Tresset 2002). L'exploitation laitière est avérée dès le Rubané en Haute-Alsace (elle apparaît quelques générations plus tard en Basse-Alsace ; Casanova *et al.* 2020). Les indices sont toutefois rares

au Néolithique ancien et au début du Néolithique moyen dans le Bassin parisien et dans la vallée de l'Yonne.

Les porcs peuvent aussi être abattus jeunes, non pour le lait mais pour la recherche de **viande tendre de porcelets**, comme le montrent les exemples de Passel et Villers-Carbonnel au Chasséen septentrional (Hachem *et al.* 2016). Dès le Rubané, ils sont généralement abattus avant l'âge de 2 ans (Hachem 2011a).

- *La chasse et la sphère sauvage*

Parallèlement au développement de l'élevage, **la chasse n'est pas abandonnée**, bien qu'elle soit **largement minoritaire** (généralement moins de 10%) dans la plupart des sites du Néolithique ancien et moyen, au nord comme au sud de la France.

Au Rubané dans le **Bassin parisien**, l'**aurochs** (*Bos Taurus*), le **sanglier** (*Sus scrofa*), le **cerf** (*Cervus elaphus*) et le **chevreuil** (*Capreolus capreolus*) sont les principales espèces chassées et constituent encore une part non négligeable des ressources carnées en complément des produits de l'élevage (Bedault et Hachem 2008 ; Jeunesse et Arbogast 1997). À partir du VSG, **la proportion d'animaux sauvages diminue** et la chasse devient moins usuelle, détenant plutôt un **rôle social et symbolique** (Bedault 2009 ; Sidéra 2003). I. Sidéra parle d'un « *transfert de la sphère matérielle à l'idéelle* » (Sidéra 2000). Au Néolithique moyen, et plus particulièrement au Cerny, l'exaltation de la sphère sauvage en contexte sépulcrale (pointes de flèches, parures en défenses de suidés et crâches de cerfs) reflète le changement de structuration sociale et suggère « *l'exacerbation de la compétition sociale* » (Jeunesse et Arbogast 1997 ; Moinat 2003 ; Sidéra 1997). Le cerf, symbolisant la puissance et le pouvoir, devient plus chassé. Les objets sont plus représentatifs d'un statut social que d'une fonction, évoquant parfois l'identité du chasseur (Chambon et Pétilion 2009 ; Sidéra 1997 ; Thomas 2011). Une recrudescence des activités cynégétiques sera ensuite réellement observée dans quelques sites à l'orée du Néolithique moyen II, reflétant peut-être un nouvel impact du substrat mésolithique : les enceintes et sites d'habitat Michelsberg de Crécy-sur-Serre et Cuiry-les-Chaudardes (Aisne) ont livré par exemple une proportion importante, de 25 à 30%, d'espèces chassées (Hachem 2011b ; Tresset 1993).

À côté du grand gibier sont également retrouvés des **petits mammifères sauvages** : castor (*Castor fiber*), blaireau (*Meles meles*), lièvre (*Lepus europaeus*), renard (*Vulpes vulpes*), chat sauvage (*Felis sylvestris*), écureuil (*Sciurus vulgaris*), marte ou fouine (*Martes martes / Martes foina*), hérisson (*Erinaceus europaeus*). Des restes de chevaux sauvages (*Equus* sp.) peuvent faire partie des assemblages, de même que des grands carnivores tels que l'ours (*Ursus arctos*) ou le loup (*Canis lupus* ; Hachem 2011a).

Si tous sont comestibles et devaient compléter les régimes alimentaires désormais basés sur les quelques ressources produites, certains étaient chassés pour le prestige (grands mammifères) ou encore pour leur

peau, leur fourrure ou leurs ossements pour la fabrication d'outils. Dès le RRBP et plus encore au Néolithique moyen, il existe des **variations dans la composition du gibier** entre les sites, pour des raisons environnementales et d'accessibilité aux ressources bien sûr, mais aussi pour des raisons socio-économiques et culturelles (Ghesquière et Hachem 2018 ; Hachem 2011a). Reprenons l'exemple du fameux village RRBP de Cuiry-les-Chaudardes dans lequel une subdivision a été observée entre les types de maisons et les quartiers d'habitation, non seulement pour les espèces domestiques, mais aussi pour le grand gibier, sanglier et cerf se faisant opposition (Figure C1. 21 ; Bedault et Hachem 2008). La dualité entre sphère domestique et sauvage est d'ailleurs tout à fait liée à la problématique de l'organisation sociale du village (Hachem 2011a ; Hachem 2018 ; Hachem et Hamon 2014). Pour le Néolithique moyen, la fonction du site (enceinte vs habitat) jouait, au même titre que pour les animaux d'élevage, un rôle dans la proportion et la composition du spectre chassé (Hachem 2011b).

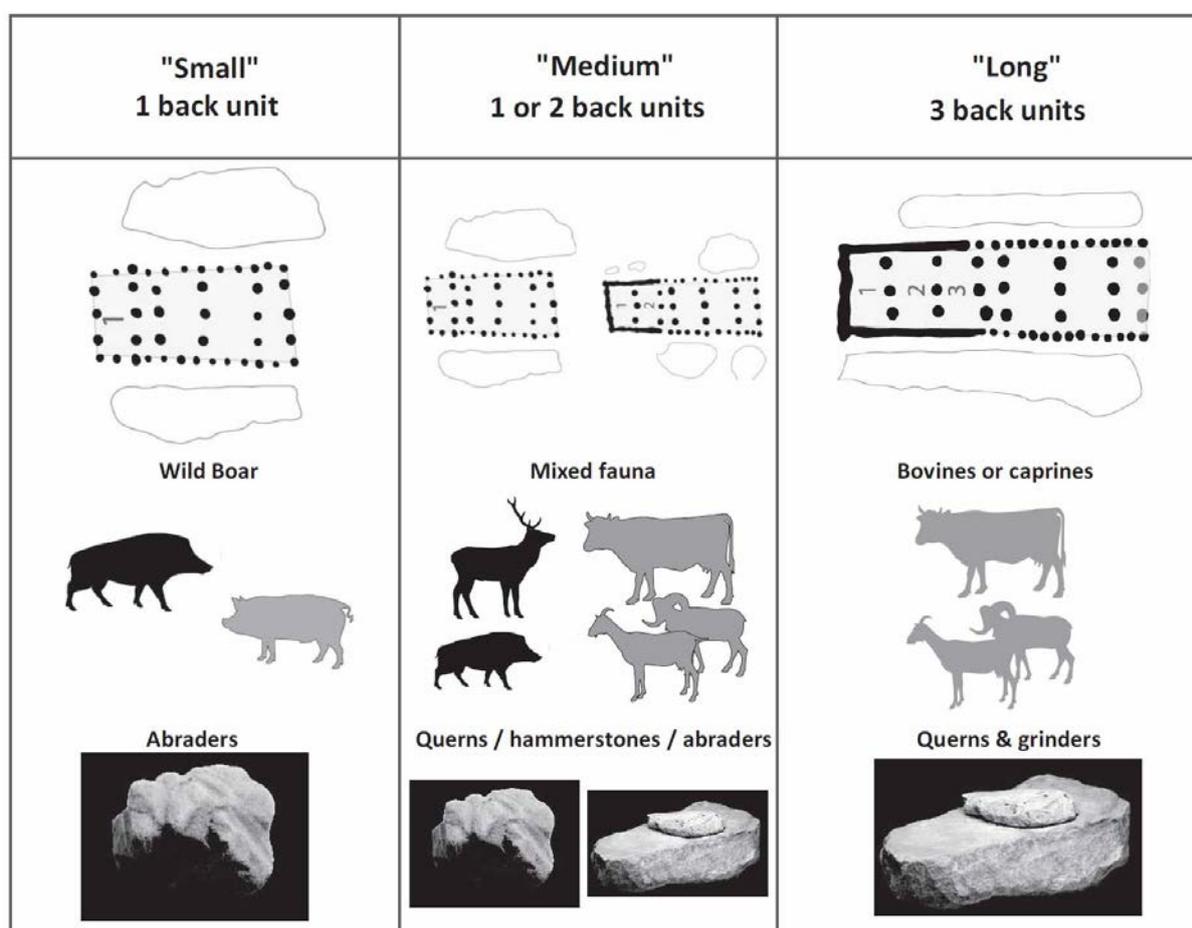


Figure C1. 21 : Représentation schématique de la corrélation entre la taille des maisons, la faune et le macro-outillage lithique du village rubané de Cuiry-les-Chaudardes (Aisne). D'après Hachem et Hamon, 2014.

Si l'on change d'horizon culturel, au **Camp-de-Chassey**, les espèces sauvages sont bien représentées et diversifiées. Parmi les grands mammifères, le sanglier prédomine, suivi de l'aurochs puis des cervidés (cerf et chevreuil) tout au long de la séquence chasséenne. Outre le spectre faunique cité précédemment (blaireau, renard, écureuil...), la **grenouille** est bien représentée : la grenouille rousse (*Rana*

*temporaria*) essentiellement et plus sporadiquement le crapaud commun (*Bufo bufo*), en particulier dans les phases les plus anciennes du Chasséen (plus de 120 restes sont concentrés dans le niveau le plus ancien ; Bailon 2005). Les ossements présentent des traces de mastication, constituant les plus anciennes preuves de consommation de la grenouille (on en trouvera ensuite dans les sites lacustres de Chalain et Clairvaux ; Pétrequin 1984a).

L'utilisation du **miel** est également documentée, notamment à Chassey-le-Camp en ce qui concerne notre région et période d'intérêt (Roffet-Salque *et al.* 2015).

Enfin, la consommation de certaines ressources ne se conservant pas telles que les **œufs** ou les **insectes** (riches en protéines et de bonne qualité nutritive) ne peut être renseignée dans la plupart des contextes. Elles ont toutefois pu faire partie de l'alimentation des humains, comme le montrent de nombreux exemples actuels.

- *Les données micro-régionales*

Plusieurs sites de la microrégion ont fait l'objet d'une analyse des assemblages fauniques. Pour les villages VSG de **Gurgy « Les Plantes du Mont »** et **Gurgy « Les Grands Champs »**, les résultats ne sont pas publiés mais mentionnés dans Bedault 2009.

Concernant l'occupation VSG de **Monéteau « Macherin »**, les restes sont peu nombreux compte tenu de l'étendue du village. Ils sont constitués de quelques fragments de bovins auxquels s'ajoutent une majorité de fragments indéterminés (Augereau et Chambon 2011).

Pour les deux enceintes du Néolithique moyen **Beaumont « Le Crot aux Moines »** et **Gurgy « Le Nouzeau »**, les résultats sont présentés dans le chapitre 3 pour chaque site individuellement. La composition faunique s'inscrit globalement dans ce qui est connu pour la période en Bassin parisien. À Beaumont, les animaux domestiques prédominent largement avec le bœuf en première position, puis le porc, les caprinés étant moins représentés. Au Nouzeau, le schéma est identique excepté pour le porc qui n'est représenté que par un reste, contre quatre pour les caprinés (le matériel est toutefois très pauvre et nombre de restes sont indéterminés). Dans les deux sites, cerf et sanglier constituent les principales espèces chassées, ainsi que l'aurochs au Nouzeau (cf. Chap3).

Les **autres sites** n'ont pas livré suffisamment de matériel faunique justifiant une étude archéozoologique ou bien les restes animaux sont en contexte sépulcral (s'agissant parfois de parure) et présentent vraisemblablement une symbolique à traiter séparément.

### II.5.c. Rupture ou continuité de la pêche ?

Il est plus difficile de mettre en évidence les **ressources aquatiques** : les restes ichtyologiques, qui se conservent mal (à plus forte raison ceux des chondrichtyens, les poissons cartilagineux comme l'anguille), sont **très rarement retrouvés** en contexte archéologique, en particulier parce que les

techniques de fouilles, dont le tamisage, ne sont pas adaptées de façon systématiques. D'autre part, les coquilles mises au jour composent principalement la parure funéraire. Toutefois, quelques sites ont délivré du poisson dans le Bassin parisien, notamment les sites VSG de Fresnes-sur-Marne « les Sablons », Bucy-le-Long « la Fosse Tounise » (Aisne), Longueil-Sainte-Marie « la Butte de Rhuis III » (Oise) et Trosly-Breuil « les Obeaux » (Oise ; Bedault 2012 ; Clavel et Arbogast 2007).

Les **espèces ichtyologiques** (poissons) les plus consommées sont la brème (*Abramis brama*), le gardon (*Rutilus rutilus*), le brochet (*Esox lucius*) et la perche (*Perca fluviatilis*), en proportions différentes entre les sites. D'autres espèces sont également retrouvées : l'anguille (*Anguilla anguilla*), le chevesne (*Squalius cephalus*), le rotengle (*Scardinius erythrophthalmus*), la tanche (*Tinca tinca*) et le goujon (*Gobio gobio*). La plupart sont des cyprinidés (parmi ceux cités ci-avant, seuls l'anguille, le brochet et la perche n'en sont pas). La saisonnalité des captures indique que la pêche a effectivement pu constituer un apport non négligeable de protéines pendant les périodes chaudes, en supplément des produits de l'élevage (Clavel 2009 ; Clavel et Arbogast 2007). La **tortue cistude** (*Emys orbicularis*) dont la consommation est attestée dans le Sud de la France, a également été retrouvée dans le Bassin parisien sur le site de La Butte de Rhuis II (Prodeo *et al.* 1990).

Les poissons pouvaient être **consommés frais**, préparés en bouillies ou rôtis, stockés **séchés** ou encore **fermentés**. Ils servaient également à la **fabrication d'outils** et de parure (ossements), de liens (pour les outils et les vêtements), voire de colle (Clavel et Dréano 2009).

Sur certains sites où les conditions de conservation des vestiges sont particulièrement bonnes et où le tamisage des sédiments des couches anthropiques a été pratiqué, ce sont parfois des assemblages abondants et diversifiés qui ont été mis au jour. C'est le cas des **villages palafittiques suisses** installés sur les bords de lacs de Neuchâtel, Brienne et Morat au Néolithique moyen, dès 4300 cal BC (Cortailod ; Pétrequin 1984b, p. 143-146 ; Oppliger 2013). Également connus sous le nom de cités lacustres, ces gisements dont la qualité de préservation des vestiges est exceptionnelle, témoignent du maintien substantiel de la pêche et livrent de fabuleux indices pour comprendre le rôle des ressources aquatiques dans la vie de ces groupes humains. Néanmoins, le contexte est particulier (habitats sur pilotis en zone marécageuse voir en eau profonde) et ne peut être généralisé aux occupations de bords de rivière.

Plus proche de notre contexte, quelques restes de poisson ont été découverts dans les niveaux chasséens de **Chassey-le-Camp**, toutefois en très faible effectif en dépit du tamisage fin réalisé à la fouille. Leur fréquence semble donc bien refléter la part négligeable de la pêche, mais toutefois présente, dans les modalités de subsistance. Les espèces retrouvées sont la vandoise (*Leuciscus leuciscus*) et le hotu (*Chondrostoma nasus*) pour les cyprinidés, ainsi que le brochet (*Esox lucius*) et la truite (*Salmo trutta* ; Desse-Berset 2005). Ce site a, en outre, livré des **mollusques**, qui pouvaient être ramassés principalement pour la parure mais devaient être aussi consommés pour certains. Les mollusques d'eau

douce comme les bivalves (dont les moules, *Unio* sp.) ont pu être collectés localement, alors que les espèces marines retrouvées ont été importées à des fins apparemment ornementales (dentales, bivalves dont *Glycymeris* et huîtres, gastéropodes).

D'autres **indices de pêche** ou de consommation de ressources aquatiques permettent d'envisager que cette pratique ne soit pas complètement abandonnée au Néolithique : des artefacts de pêche (harpons, hameçons, poids de filet voire pirogues, bien que ces dernières aient pu servir de moyen de transport avant tout) ont été retrouvés dans plusieurs sites du Bassin parisien voire dans la vallée de l'Yonne à Monéteau (cf. Chap3.III.1.b). Les résidus lipidiques de poisson piégés dans les poteries témoignent de leur consommation mais à notre connaissance, ce type d'élément n'a pas été mis en évidence en France (Craig *et al.* 2007 ; Cramp *et al.* 2018). L'analyse des isotopes stables est un autre moyen d'identifier la consommation de ressources aquatiques, mais essentiellement dans certains contextes particuliers. Plusieurs disciplines tendent à développer de nouvelles méthodes pour pallier les nombreux biais inhérents à cette problématique. Nous en expérimentons quelques-unes dans ce travail (cf. Chap2).

L'ensemble des données rassemblées à ce jour indiquent que, dans le Bassin parisien comme sur la façade méditerranéenne, le lien avec les activités halieutiques semble considérablement diminuer jusqu'à rendre leur pratique négligeable dans de nombreux contextes. La pêche n'est toutefois pas abandonnée et des preuves incontestables existent malgré les obstacles à leur découverte. La question de la place qu'elle occupe dans la vallée de l'Yonne se pose donc en termes de spécificité locale de gestion des ressources et de stratégie de subsistance sur le micro territoire mais s'insère également dans un débat plus large de rupture ou de continuité d'une pratique (au profit de la nouvelle économie de production des ressources terrestres) difficile à mettre en évidence.

### II.6. Éléments de conclusion

Au risque de s'éloigner du cadre de notre étude, nous avons souhaité dresser un tableau assez large du contexte de la néolithisation et de la diversité du paysage archéologique, socioculturel, environnemental et économique pour tenter de comprendre au mieux l'ampleur de la problématique qui a guidé ce travail. La complexité des questionnements s'associe à la variabilité des connaissances mises au jour et à l'interconnexion des différents aspects de la vie et de la mort des premiers fermiers néolithiques. Nous proposons ici d'apporter notre collaboration dans un contexte bien défini, à la recherche de l'identité et des modes de vie d'une (ou plusieurs) population(s) par le prisme de l'alimentation, collective et individuelle. Voyons comment.

### III. Étudier l'alimentation comme marqueur identitaire et social

---

Dans toute société l'alimentation constitue un élément d'unité, d'identité et de lien au territoire, mais également un facteur distinctif entre individus en fonction de leur catégorie sociale, de leur rang ou de leur fonction. De nombreuses études sociologiques, ethnologiques et historiques menées dans des contextes variés en témoignent (e.g. Bonnemère et Lemonnier 2007 ; de Saint Pol 2017 ; Faye 2008 ; Lévi-Strauss 2001 ; Mintz et Du Bois 2002 ; Montanari 2009 ; Pollock 1985 ; Twiss 2012). À l'inverse, dans une société égalitaire, la même alimentation peut être partagée par tous. Si les préoccupations actuelles nous engagent aujourd'hui d'autant plus à comprendre comment se nourrissaient nos ancêtres, l'approche biogéochimique permet, au-delà de contribuer à la reconstitution des repas collectifs, d'apporter une image individuelle en lien avec l'organisation des sociétés. Cette approche est cependant indissociable d'une bonne connaissance du milieu et des pratiques alimentaires au sens large et doit s'insérer dans un cadre de recherche plus global sur l'alimentation et la gestion d'un territoire, aux côtés des autres disciplines.

#### III.1. Tour d'horizon des différentes disciplines visant à reconstituer les régimes alimentaires au Néolithique

Plusieurs branches de l'archéologie (classifiées par spécialisation de matériau le plus souvent) s'attachent à reconstituer les régimes alimentaires de nos ancêtres préhistoriques, basées sur les restes de cuisine au sens large, sur l'outillage ou sur les sujets humains eux-mêmes. Nous avons vu comment **l'archéozoologie** (fréquence des restes animaux, courbes d'abattage, traces de découpe ou de pathologies) et **l'archéobotanique** (carpologie, palynologie, étude des phytolithes, anthracologie) permettent d'accéder à un grand nombre de données relatives à la gestion et la consommation des ressources animales et végétales dans leur environnement (e.g. Arbogast *et al.* 2018 ; Bouby *et al.* 2018 ; Delhon 2001 ; Hamon *et al.* 2011 ; Vigne *et al.* 2012). En outre, **l'étude typo-fonctionnelle et tracéologique des outils lithiques** (en silex essentiellement, e.g. pointes de flèches pour la chasse, outils de découpe et de décharnements, lames de faucilles ; e.g. Allard *et al.* 2004 ; Gassin *et al.* 2008 ; Gibaja *et al.* 2014 ; Gosselin et Samzun 2005-2008), **macrolithiques** (notamment en grès ou en granite, e.g. meules, molettes, mortiers ; e.g. Hamon 2003, 2006), **en matière dure animale** (harpons, hameçons, cuillères, herminettes et autres outils en os, dent, corne ou bois de cervidés ; e.g. Maigrot 2016 ; Sidéra 2000) et des **réipients céramiques** (e.g. Vieugué 2014, 2016) permet de retracer les gestes et pratiques en lien avec les stratégies de subsistance. Nous avons également évoqué l'analyse biomoléculaire et biochimique (lipidique) des encroûtements alimentaires et **substances naturelles résiduelles** piégées dans les porosités des poteries (e.g. Regert 2021 ; Régert 2007). Celle-ci permet notamment de détecter la présence de produits laitiers (e.g. Dudd et Evershed 1998 ; Salque *et al.*

2013), graisses animales dont le poisson (e.g. Craig *et al.* 2007 ; Drieu *et al.* 2021 ; Robson *et al.* 2019), huiles végétales (e.g. Regert *et al.* 2003), produits de la ruche (e.g. Roffet-Salque *et al.* 2015) ou encore boissons fermentées (e.g. Liu *et al.* 2019).

L'étude des **coprolithes** (excréments séchés et minéralisés contenant par exemple phytolithes, grains de pollens, poils) renferment de précieuses informations quant aux derniers repas de leur propriétaire (e.g. Argant 2014 ; Delhon et Mazuy 2014). Ils renseignent aussi sur les zones d'occupation du cheptel (type grotte-bergerie utilisées pour l'exploitation caprine par exemple). La **paléoparasitologie**, à partir de coprolithes humains ou d'échantillons de sédiments prélevés au niveau des os coxaux dans les sépultures étudie le spectre parasitaire intestinal en lien avec les habitudes alimentaires (e.g. Delhon et Mazuy 2014 ; Goude *et al.* 2019 ; Harter-Lailheugue *et al.* 2005 ; Le Bailly *et al.* 2005).

De nouvelles méthodes sont développées pour améliorer l'**identification des espèces** animales et végétales potentiellement consommées, telles que la protéomique par ZooMS (*Zooarchaeology by Mass Spectrometry* ; e.g. Buckley *et al.* 2014 ; Richter *et al.* 2011) ou la génétique (e.g. Bon et Marsolier-Kergoat 2021 ; Ottoni *et al.* 2021).

L'analyse des microrestes emprisonnés dans le **tartre dentaire** offre un bon aperçu des aliments consommés au cours des derniers repas des individus (e.g. Cristiani *et al.* 2018 ; Goude *et al.* 2020b ; Jovanović *et al.* 2021 ; Ottoni *et al.* 2021 ; Power *et al.* 2018 ; Power *et al.* 2015 ; Salazar-García *et al.* 2014).

L'analyse de la **sphère bucco-dentaire** plus généralement (atteintes et pathologies liées à l'alimentation, usure et micro-usures dentaires) participe, à l'échelle des populations et de façon variable selon les contextes et les régions, à la caractérisation de certains traits des régimes alimentaires (e.g. Chamel 2014 ; Le Luyer 2016 ; Le Mort *et al.* 2015 ; Schmidt *et al.* 2019 ; Scott *et al.* 2005 ; Thomas 2019 ; cf. Chap9.I). Une augmentation de la fréquence des caries, par exemple, peut être liée à la consommation importante de céréales, riches en glucides, chez les premiers agriculteurs, bien que ce schéma ne soit pas systématique et que les populations mésolithiques et néolithiques ne soient pas toujours directement comparables (e.g. Chamel 2014 ; Thomas 2019). De façon plus indirecte, l'**étude ostéologique** des restes humains permet d'accéder, à travers l'état sanitaire notamment, à certains aspects des pratiques alimentaires : des marqueurs de stress (e.g. *Cribra Orbitalia*, lignes de Harris) ou certaines pathologies (rachitisme, scorbut, tuberculose) visibles sur le squelette sont révélatrices de carences, d'excès, ou de brusques modifications alimentaires, voire de contacts rapprochés avec le bétail porteur de zoonoses (e.g. Baker *et al.* 2017 ; Polet 2013 ; Thomas 2019).

Au-delà de la consommation des ressources, c'est aussi dans la **sphère des activités** que les stratégies de subsistance peuvent être abordées, par le biais d'indicateurs squelettiques comme les enthésopathies et autres marqueurs osseux d'activité (e.g. Thomas 2014a ; Villotte *et al.* 2010 ; Villotte et Knüsel

2013 ; Villotte et Knüsel 2014). Les exostoses auditives externes par exemple (sorte d'excroissances osseuses dans l'oreille interne) suggèrent un contact régulier avec l'eau froide et permettent par extension de discuter indirectement de la pratique de la pêche (Villotte et Knüsel 2016 ; Villotte *et al.* 2014).

Enfin, et c'est ce qui nous intéresse dans ce travail, **l'analyse biogéochimique des restes humains** et animaux permet d'accéder à un autre niveau d'analyse des comportements alimentaires, de façon complémentaire et interdépendante aux autres disciplines.

### III.2. Zoom sur l'analyse directe et individuelle par la biogéochimie

Alors que la majorité des approches présentées ci-avant renseigne sur la nature et la composition du menu des groupes humains, collectivement, ou sur des spécificités individuelles liées aux derniers repas (e.g. tartre et micro-usures dentaires) ou à l'état de santé plus généralement, l'analyse biochimique des tissus humains et animaux offre un **outil de mesure complémentaire, direct et individuel** permettant de restituer le type d'alimentation et l'environnement de chaque membre d'un groupe, à différents moments de vie (de l'enfance au décès, sur une échelle très courte ou moyenné sur plusieurs années), et par là-même, de les comparer entre eux. Elle permet en outre de tracer les **changements alimentaires et la mobilité au cours de la vie** en analysant plusieurs tissus d'un même individu formés à différentes périodes. Enfin, parce que les vestiges culinaires et domestiques sont souvent rares en **contexte funéraire** et adossés à un statut particulier plutôt qu'à un véritable reflet de l'alimentation des vivants, cette approche propose un autre angle d'attaque pour évaluer les stratégies de subsistance des groupes humains.

#### III.2.a. Introduction à la méthode : le principe en bref

Afin de comprendre en quoi l'analyse biogéochimique permettra de répondre aux problématiques posées dans ce travail (cf. IV), le principe général est brièvement exposé ci-après mais le lecteur trouvera le détail des explications dans le chapitre 2.

Lors de l'alimentation, des **éléments chimiques constitutifs des aliments** comme le carbone (C), l'azote (N), l'oxygène (O), le soufre (S), le calcium (Ca), le strontium (Sr), le baryum (Ba), le fer (Fe), le cuivre (Cu) ou le zinc (Zn) sont puisés dans l'environnement, sont assimilés par l'organisme et **entrent dans la composition des tissus**. Certains de façon majeure (O, C, N, Ca), d'autres seulement à l'état de trace (Fe, Cu, Zn, Sr, Ba).

Les éléments dits **essentiels** (e.g. C, N, S, Ca) sont régulés par l'organisme afin de maintenir des concentrations optimales pour le bon fonctionnement du métabolisme (éviter les carences et les intoxications). Leur concentration dans l'organisme ne reflète donc pas directement l'alimentation.

Toutefois, les éléments possèdent différents **isotopes** qui n'interviennent pas de la même façon dans les réactions chimiques, provoquant un fractionnement isotopique (cf. Chap2.II.1). Ce phénomène implique que **différents produits** et/ou provenant de différents milieux puissent avoir des **rappports isotopiques distincts** (le rapport isotopique est la différence mesurée entre deux isotopes d'un même élément). À travers l'alimentation, ces rapports isotopiques sont **enregistrés** le long de la **chaîne alimentaire**, avec une teneur propre à chaque maillon de la chaîne (de ressources en consommateurs), et restent inchangés au cours du temps (pourvu que les conditions de conservation le permettent). De ce fait, il devient possible, **en mesurant les rapports isotopiques de différentes ressources et en les comparant à ceux du consommateur**, de déterminer lesquelles ont pu être ingérées par ce dernier. Certains ratios isotopiques sont plutôt représentatifs du type d'environnement et permettent, selon ce principe, de reconstituer les milieux de vie et la **mobilité** des individus. C'est le cas du S, élément essentiel dont le rapport isotopique varie selon le type d'aliment mais qui est aussi très sensible à l'environnement, ainsi que du Sr, élément non essentiel dont le rapport isotopique dépend de la géologie et constitue un bon marqueur de la mobilité.

Les éléments **non essentiels** (e.g. Sr, Ba) ne sont pas régulés par l'organisme (puisqu'ils n'interviennent pas dans des processus vitaux) et rentrent dans la composition des tissus dans les proportions dans lesquels ils ont été ingérés. La mesure de la **concentration** de ces éléments trace non-essentiels relativement au Ca qui est, lui, essentiel et régulé, permet d'aborder **d'autres aspects de l'alimentation** des sujets (cf. Chap2.VI).

#### III.2.b. Du régime alimentaire à l'identité d'un groupe

Ainsi, selon différentes modalités qui seront présentées dans le chapitre 2, ces méthodes permettent d'estimer les **proportions relatives des différentes ressources considérées** (et uniquement celles-ci) dans l'alimentation des humains (e.g. animaux vs végétaux, ressources terrestres vs aquatiques, animaux chassés vs élevés, bœuf vs porc) pourvu que leur disponibilité dans le milieu ait été identifiée par l'archéozoologie ou l'archéobotanique et que leurs compositions isotopiques soient connues et distinctes. Chaque individu peut ainsi être replacé dans la chaîne alimentaire locale et la méthode renseigne sur **le milieu dans lequel il a puisé ses ressources**. L'analyse des restes animaux, domestiques et sauvages, retrouvés sur les mêmes sites offre, en plus d'un référentiel servant de base pour reconstituer l'alimentation des humains, des informations complémentaires quant à leur **gestion économique** : par exemple, les animaux d'élevage sont-ils parqués dans des espaces séparés, alimentés différemment (pâtures ou affouragements variés), consomment-ils les déchets des humains (se plaçant ainsi au même niveau trophique que ces-derniers) ?

Les types de stratégie de subsistance identifiés peuvent ensuite être **comparés entre différents sites** – et entre différents contextes (pourvu qu'une référence de base locale soit toujours utilisée afin de rendre les données comparables, celles-ci étant variables avec l'environnement) : existe-t-il des différences

d’approvisionnement en ressources entre groupes culturels distincts par exemple ? Dans un même contexte, des ressources qui présentent une signature biochimique identique entrent-elles dans les mêmes proportions dans les régimes alimentaires des humains selon le type de site considéré (enceinte vs nécropole par exemple) ? Quelle est la variabilité alimentaire au sein d’un groupe (alimentation homogène ou diversifiée) ? Peut-on observer pour certains groupes d’individus une plus forte consommation de ressources sauvages ? Quelle est la proportion de viande consommée et de quel(s) cheptel(s) est-elle issue ?

### III.2.c. Identifier des statuts sociaux en lien avec les comportements alimentaires

Enfin, la comparaison de plusieurs individus entre eux au sein du même contexte permet d’identifier des **spécificités individuelles**. Croisées avec les paramètres biologiques (sexe, âge-au-décès et autres caractères anthropologiques) et archéologiques (type de tombe ou de traitement funéraire, mobilier associé, attribution culturelle), ces données peuvent mettre en évidence des distinctions alimentaires en lien avec le statut social des individus, donnant ainsi accès aux questions d’organisation et de structuration des groupes humains, de hiérarchisation éventuelle et d’appartenance culturelle ou fonctionnelle à une entité. Des **schémas de mobilité particuliers** peuvent être définis pour une catégorie de la population par exemple : seuls quelques individus se déplacent. Une majorité de femmes exogènes indique généralement une structure patrilocale. Par ailleurs, le suivi de la signature biochimique dans plusieurs tissus (formés à différentes périodes de la vie ; cf. Chap.2.III) ou à une échelle très fine dans l’émail dentaire (formé de façon incrémentielle comme les cernes d’un arbre) offre la possibilité de suivre les modifications alimentaires et de mobilité au cours de la vie d’un individu et l’observation récurrente de schémas spécifiques permet d’inférer des **changements de statuts sociaux en fonction de l’âge**.

### III.2.d. Une combinaison de marqueurs pour une meilleure définition

Depuis plusieurs années, les **approches multi-proxy** se multiplient, combinant plusieurs isotopes (C, N, S, Sr, O) voire plusieurs disciplines (e.g. biochimie isotopique et élémentaire, analyse du tartre dentaire ou des micro-usures, génétique, paléoparasitologie, carpologie ; Alt *et al.* 2016 ; Cassidy *et al.* 2020 ; Goude *et al.* 2019 ; Salazar-García *et al.* 2016 ; Tsutaya et Yoneda 2015).

**Dans ce travail** seront analysés de façon « conventionnelle » les **rapports isotopiques de C, N et S** du **collagène osseux** (Chap. 5) **et dentaire** (Chap. 6) – analyse du collagène global et analyses séquentielles de la dentine –, ainsi que le rapport isotopique de **l’azote dans les acides aminés** spécifiques du collagène osseux (Chap. 7), méthode plus novatrice, jusqu’à ce jour jamais utilisée en France sur des échantillons néolithiques. Ces marqueurs visent donc à reconstituer les régimes alimentaires des individus à différents moments de leur vie (moyenné sur plusieurs années de la fin de

la vie pour les analyses dans l'os et pendant l'enfance pour l'analyse dans les dents ; cf. Chap. 2.III). Le S permet d'aborder plus spécifiquement la notion de mobilité (cf. Chap. 2).

En supplément, le **rapport isotopique du Sr** sera mesuré conjointement aux concentrations en **éléments traces Sr et Ba** rapportés au Ca (sont mesurés les ratios élémentaires Sr/Ca et Ba/Ca) par **ablation laser** dans l'émail dentaire (et de façon très expérimentale dans l'os ; Chap. 8). La technique de l'ablation laser permet de prélever d'infimes quantités de matières le long des incréments de l'émail pour suivre le signal au cours du temps (pendant l'enfance) de ces marqueurs, utilisés pour la reconstruction des schémas de mobilité (Sr isotopique) et alimentaires (Sr/Ca et Ba/Ca ; cf. Chap. 2). Cette approche est conduite pour la première fois sur un si large corpus (près d'une centaine d'échantillons) afin d'en tester les applications, au regard des autres marqueurs. Elle s'avère être également pionnière en contexte néolithique.

Des **analyses complémentaires** (textures des micro-usures dentaires, pétrographie de tessons céramiques, composition des haches) engagées en collaboration avec différents spécialistes viendront préciser certaines questions relatives à l'alimentation, à la mobilité ou au statut des individus (cf. Chap. 9). Celles-ci seront abordées dans un chapitre à part, de façon additionnelle à l'étude biogéochimique qui constitue le corps principale de notre travail.

#### III.2.e. L'approche biogéochimique en anthropologie : état de l'art au Néolithique en Europe et en France

Nous ne dresserons pas ici de liste exhaustive de l'ensemble des études déjà réalisées sur le Néolithique européen mais souhaitons présenter un aperçu de l'état de la recherche en France et dans les régions limitrophes pour évaluer les comparaisons possibles et replacer notre travail dans un contexte plus général.

- *Des disparités géographiques*

Si certaines régions et certains contextes sont bien documentés (en ce qui concerne les analyses biogéochimiques sur restes humains), d'autres n'ont fait l'objet à ce jour d'aucune analyse et quelques sites isolés sont référencés. La majorité des études concerne les isotopes stables conventionnels C et N et, plus récemment, les études intégrant le S se multiplient. Plusieurs analyses du Sr sont également disponibles.

En Europe, de nombreux travaux ont porté sur la **transition Mésolithique-Néolithique**, depuis les Balkans et les Gorges du Danube (e.g. Bonsall *et al.* 1997 ; de Bechedelievre *et al.* 2020 ; Jovanović *et al.* 2019 ; Papathanasiou 2003), et l'Ukraine (e.g. Lillie *et al.* 2017 ; Lillie et Richards 2000), jusqu'à la façade atlantique où les analyses sont plus ponctuelles (e.g. Lubell *et al.* 1994) et l'Europe du Nord, bien étudiée depuis les années 1980 (e.g. Fischer *et al.* 2007 ; Lidén *et al.* 2004 ; Richards *et al.* 2003a

; Richards *et al.* 2003b ; Tauber 1981), en passant par l'Europe centrale (e.g. Bentley *et al.* 2012 ; Bickle 2018 ; Ogrinc et Budja 2005 ; Price *et al.* 2001) et les côtes nord-ouest de la Méditerranée (e.g. Salazar-García *et al.* 2018).

Le **Néolithique d'Europe de l'Ouest** est l'un des contextes les plus florissants en termes d'analyses isotopiques, réparties inégalement entre les régions, en partie du fait de l'absence de restes humains dans certains secteurs chrono-culturels. L'**Allemagne** de l'Ouest est particulièrement bien documentée, essentiellement pour le Néolithique ancien mais on trouve aussi des données pour le Néolithique moyen (e.g. Bentley et Knipper 2005 ; Bogaard *et al.* 2017 ; Bösl *et al.* 2006 ; Dürrwächter *et al.* 2006 ; Nehlich *et al.* 2009 ; Oelze *et al.* 2011, cf. Rey *et al.* 2019 ; Annexe B2, Online Resource 11). Quelques données sont disponibles pour les **Pays-Bas** (e.g. Kamjan *et al.* 2020), le **Bassin mosan** (e.g. Bocherens *et al.* 2007 ; Semal *et al.* 1999) et la **Suisse** (e.g. Siebke *et al.* 2020). Pour cette dernière, si les sites de bord de lac ont fourni une abondance de vestige pour la deuxième moitié du Néolithique, peu de restes humains associés ont été découverts, contrariant les recoupements avec une approche biochimique.

Pour le **Bassin méditerranéen**, l'Italie du Nord (e.g. Goude *et al.* 2020a ; Le Bras-Goude *et al.* 2006), le Sud de la France (e.g. Goude 2007, 2008 ; Goude *et al.* 2012 ; Goude et Herrscher 2018 ; Goude *et al.* 2020b ; Herrscher et Le Bras-Goude 2010 ; Le Bras-Goude *et al.* 2012) et l'Est de la péninsule ibérique (e.g. Fontanals-Coll *et al.* 2017 ; Salazar-García *et al.* 2018 ; Villalba-Mouco *et al.* 2018) sont bien représentés.

En **France**, en remontant vers le nord, on trouve quelques études de sites de façon plus sporadique (Figure C1. 22) dans le Puy-de-Dôme en Auvergne (Pontcharaud 2, Néolithique moyen 1 de la Limagne ; Goude *et al.* 2013), en Indre-et-Loire (Le Vigneau 2, Néolithique moyen, groupe de Chambon ; Goude *et al.* 2019), en Vendée (Champ-Durand, Néolithique récent ; Schulting et Hamilton 2012) et en Gironde (Le Tumulus des Sables, Néolithique moyen ; James *et al.* 2019), puis plus au nord en Alsace (Gougenheim, Néolithique récent ; Goude *et al.* 2014) et en Pas-de-Calais (Mont d'Hubert, Néolithique moyen ; Goude 2014 ; voir Goude et Fontugne 2016 pour la synthèse la plus récente). Le **Bassin parisien** est assez peu documenté compte tenu de la richesse des sites archéologiques ayant livré des restes humains. Les premières études ont porté presque exclusivement sur des restes animaux (Bercy, Maizy « Les Grands Aisements », Cuiry-les-Chaudardes « Les Fontinettes » ; Balasse 1999), ainsi que sur les restes humains de Louviers « La Villette » (Eure, Chasséen septentrional ; Bocherens *et al.* 2005).

Notre travail vient donc combler un manque latent en apportant une quantité considérable de données (plus de 250 échantillons humains et animaux analysés) pour le sud-est du Bassin parisien et la **vallée de l'Yonne** en particulier qui n'avait connu jusqu'à ce jour aucune étude de ce genre (Rey *et al.* 2017 ; Rey *et al.* 2019). Notre étude ciblée sur une zone géographique limitée permet en outre de documenter spécifiquement les pratiques alimentaires et l'organisation sociale d'un micro-territoire à travers un panel de sites variés et globalement compris dans un intervalle chronologique restreint. Elle constitue à ce jour **le plus gros corpus micro-régional pour le Néolithique ouest-européen**. Très récemment, une étude

réalisée sur un grand nombre d'échantillons (plus de 200 humains et animaux) de sites Cerny dans le Bassin parisien est venue compléter l'image obtenue dans la région (Cheung *et al.* 2021 ; Figure C1. 22) offrant un point de comparaison de choix pour l'étude des sites de la micro-région (cf. Chap5.III.3).



Figure C1. 22 : Répartition des sites français ayant fait l'objet d'analyses isotopiques pour le Néolithique ancien et moyen (ronds) et le Néolithique récent et final (carrés). Les symboles bleus indiquent les sites du sud, les symboles noirs ceux du centre et les symboles rouges et oranges ceux du nord comportant respectivement des restes humains (rouge) ou de la faune uniquement (orange). La zone grisée compte les sites Cerny ayant été publiés très récemment (Cheung *et al.*, 2021). La localisation des sites étudiés dans ce travail est signalée par l'étoile. Modifié d'après Goude et Fontugne, 2016.

• *Des approches différentes, des schémas différents*

La plupart des études s'intéresse à l'aspect alimentaire et économique de la transition du Néolithique et des premières sociétés agropastorales. La question de l'abandon ou de la continuité de la pêche est

l'un des thèmes récurrents dans diverses régions côtières et le long du Danube notamment (e.g. Bonsall *et al.* 2009 ; Budd *et al.* 2020 ; Jovanović *et al.* 2015 ; Jovanović *et al.* 2019 ; Richards et Schulting 2006 ; Richards *et al.* 2003b ; Salazar-García *et al.* 2018 ; Schulting 2018). L'identification, par l'analyse isotopique, de la consommation de ressources aquatiques pouvant s'avérer délicate en eau douce (comparativement aux systèmes marins ; cf. Chap2), de récents développements méthodologiques cherchent à en trouver de nouvelles applications. Une étude réalisée sur les sujets mésolithiques de Noyen-sur-Seine (Seine-et-Marne) a notamment permis de confirmer la consommation de poisson sur ce site, grâce à la mesure du ratio isotopique de **l'azote des acides aminés** du collagène osseux (cf. Chap2.V). Celle-ci a également été mise en évidence par les restes ichtyologiques et le matériel de pêche retrouvés, ainsi que par l'analyse des isotopes stables conventionnels C, N et S (Drucker *et al.* 2018 ; Naito *et al.* 2013). Aucun **site néolithique français** n'avait fait l'objet de ce type d'analyse avant notre travail engagé dans l'Yonne (Rey *et al.* en révision ; cf. Chap7). Néanmoins, plusieurs publications soulèvent la question d'une possible consommation de ressources aquatiques à partir des données isotopiques conventionnelles (C, N et parfois S ; Bocherens *et al.* 2007 ; Dürrwächter *et al.* 2006 ; Goude *et al.* 2013 ; Siebke *et al.* 2020).

Un autre sujet de prédilection au Néolithique concerne la **question du genre** et des **différences sociales entre les sexes**. Toutefois, alors que la question suscite de nombreux débats en archéo-anthropologie (cf. I.6.d), très peu d'études isotopiques ont mis en évidence de telles distinctions entre les sexes (Cintas-Peña et García Sanjuán 2019 ; Goude *et al.* 2019). Notre travail fournit dans ce contexte de précieux indices (Rey *et al.* 2017 ; Rey *et al.* 2021 ; Rey *et al.* 2019; cf. Chap 5 et 6). La problématique de la place de la femme au Néolithique a notamment insufflé le projet de recherche intitulé « Femmes et alimentation dans les premières sociétés agropastorales (Ve - IIIe millénaires cal BC, France) : une approche bio-anthropologique » dirigé par G. Goude et dans lequel s'insère pleinement notre recherche (Goude *et al.* 2018). Le statut de la femme y est notamment interrogé à travers l'analyse isotopique et les différences hommes-femmes enregistrées pouvant témoigner d'une division sexuelle des activités et de statuts sociaux différenciés. La question de la mobilité différentielle (origine exogène des femmes) y tient également une place de choix.

En Europe, les études sur la **mobilité au Néolithique** ont principalement porté sur la migration des fermiers LBK grâce à l'analyse isotopique du **Sr** notamment et du **S** (e.g. Bentley *et al.* 2012 ; Bentley *et al.* 2002 ; Ensor 2021 ; Nehlich *et al.* 2009) mais la structure sociale des groupes humains est également abordée (e.g. Goude *et al.* 2012 ; Goude *et al.* 2019), en particulier grâce aux travaux déterminants de R.A. Bentley en Allemagne (Bentley 2006, 2013 ; Bentley *et al.* 2003). Le phénomène de transhumance a par exemple été identifié à partir du suivi isotopique du Sr dans des dents de bovins en Allemagne (Bentley et Knipper 2005) et très récemment en Suède par ablation laser (cette étude suggère plutôt un système d'échanges que de transhumance ; Sjögren *et al.* 2021).

Cette dernière méthode (ablation laser) est toutefois très peu développée et elle est expérimentée ici pour la première fois sur des humains néolithiques. Il en est de même pour la mesure des éléments traces, que ce soit par ablation laser ou même en solution.

#### IV. Problématique et objectifs

---

Ce travail s'articule en trois axes visant à répondre à trois séries de questionnements :

##### 1. Reconstituer le régime alimentaire

*Comment s'alimentaient nos ancêtres entre 4800 et 4000 cal BC dans la vallée de l'Yonne ?*

Ce premier axe ambitionne d'estimer la proportion relative des différentes ressources, animales et végétales, et vise à évaluer l'éventuelle consommation de poisson. Le type de régime alimentaire mis en évidence sera comparé à ce qui est connu dans les régions alentour pour mieux percevoir la diversité des stratégies de subsistance au Néolithique en Europe de l'Ouest. D'éventuelles spécificités au sein du corpus animal pourront être discutées pour tenter d'apporter des éléments complémentaires à la compréhension des pratiques agropastorales dans la région.

##### 2. Accéder à la variabilité individuelle et collective

*Comment les groupes humains se structuraient-ils dans ce contexte ? Quelle organisation sociale présidait et quelles étaient leurs relations, entre eux et avec l'extérieur ? Ces aspects étaient-ils exprimés à travers l'alimentation ?*

Cet axe peut être scindé en deux sous-parties :

- La première interroge la différence entre les sites considérés, le lien éventuel avec la chronologie, avec les cultures associées ou avec la nature et la fonction du site (e.g. nécropole à vocation funéraire ou enceinte).
- La seconde s'attelle à rechercher d'éventuelles distinctions alimentaires en fonction du sexe des sujets, de leur âge ou de leur classe sociale, de leur rang ou de leur fonction. Les données biogéochimiques seront croisées avec les paramètres biologiques et funéraires disponibles pour tenter d'identifier des statuts sociaux et d'aborder la question de la structuration sociale des inhumés.

Les résultats de ces analyses seront comparés avec les structures sociales alimentaires connues dans les cultures des régions limitrophes et plus éloignées (e.g. Sud de la France, sphère rhénane). Un regard particulier sera porté sur l'interprétation des comparaisons possibles dans des contextes variés.

### 3. Évaluer les apports méthodologiques

*Comment la biogéochimie peut-elle répondre aux questions soulevées ? Quels sont les avantages et les limites, techniques et scientifiques, des différentes méthodes utilisées ?*

Ce troisième axe concerne donc le développement et l'apport de nouvelles méthodes expérimentées ici pour la première fois en contexte néolithique et sur un nombre exceptionnel d'échantillons. Une approche traditionnelle (analyse du collagène osseux des isotopes stables du C, N et S) est menée de front avec des techniques plus novatrices (micro-échantillonnage dentaire et analyse isotopique des acides aminés spécifiques du collagène) voire expérimentales (dosage en tandem des éléments traces et du strontium isotopique par ablation laser dans l'émail dentaire). Les avantages et les limites méthodologiques seront discutés, proposant des perspectives prometteuses.



Dans les chapitres qui suivent, les questions se verront précisées pour chaque site et chaque spécificité méthodologique.

## Chapitre 2. L'analyse biogéochimique des restes humains et animaux : principes méthodologiques

Dans ce chapitre, nous allons voir comment la mesure de différents éléments dans les tissus peut répondre à la question de l'alimentation et de la mobilité, plus largement à l'histoire de vie. Après un bref historique des avancées de la recherche sur les différentes méthodes et une présentation générale des termes, des notions de base de la biochimie et des tissus d'intérêt, nous expliquerons le principe d'enregistrement de chaque proxy utilisé dans cette thèse (un résumé est fourni pour chaque proxy à la fin des sections correspondantes) et les questions auxquelles ils répondent, ainsi que les principes techniques de mesure des échantillons.

### I. Bref historique

---

#### I.1. La mesure des ratios isotopiques (C, N, S, Sr)

Après la première utilisation de l'isotope radioactif du **carbone** ( $^{14}\text{C}$ ) pour la datation absolue au début des années 1950 (Libby 1961), les techniques biogéochimiques se développent. Les applications en sont tout d'abord à visée écologique. L'extraction du collagène osseux devient une routine (*e.g.* Longin 1971) et les types photosynthétiques des végétaux, liés aux teneurs en  $^{13}\text{C}$ , sont mis en évidence (Smith et Epstein 1971). Dans les années 1970-1980, les travaux de N.J. van der Merwe et J.C. Vogel (1978) et de M.J. DeNiro et S. Epstein (1978, 1981) notamment, marquent le début de cette nouvelle voie de recherche appliquée à l'archéologie et à la paléanthropologie : il est désormais acquis que la composition isotopique des tissus animaux reflètent directement celle de leur alimentation. Puis les études se multiplient avec la démonstration des effets trophiques sur les teneurs en **azote** lourd ( $^{15}\text{N}$  ; Minagawa et Wada 1984 ; Schoeninger et DeNiro 1984) et la mise en évidence des facteurs environnementaux, climatiques et physiologiques agissant sur les rapports du carbone et de l'azote (Ambrose 1991 ; Fogel *et al.* 1989 ; Heaton *et al.* 1986 ; Van Klinken *et al.* 2000). Ainsi, depuis une quarantaine d'années, l'approche isotopique se développe dans le but de reconstituer les régimes alimentaires et les paléoenvironnements (voir par exemple Richards 2019).

Les études sur le rapport isotopique du **soufre** (S) en écologie et en archéologie sont plus récentes et moins nombreuses que pour le carbone et l'azote, remontant pour les premières aux années 1990. Les

développements techniques en spectrométrie de masse ont permis l'analyse d'une plus petite quantité de matière rendant possible l'application de cette méthode aux échantillons archéologiques (cf. Nehlich 2015). En effet, le collagène osseux contient très peu de soufre et une plus grande quantité de matière (par rapport au C et N) est nécessaire pour réaliser une analyse (environ 10 mg de collagène purifié pour une mesure de S contre 1 mg pour le C et N – ces quantités diminuent aujourd'hui, jusqu'à 1,5 voire 1 mg pour l'ensemble C, N et S). Les premières mesures dans le collagène humain et animal archéologique ont été réalisées dans le pacifique par B.F. Leach et collaborateurs en 1996, puis en Europe par M. Richard et collaborateurs en 2001, O. Craig et collaborateurs en 2006 ou encore K.L. Privat et collaborateurs en 2007. Elles commencent à se généraliser depuis quelques années seulement, notamment dans le cadre d'études multi-proxies (CNS ; e.g. Díaz-Zorita Bonilla *et al.* 2016 ; Goude *et al.* 2020a ; Irvine et Erdal 2020 ; Moghaddam *et al.* 2016).

En parallèle, le **strontium (Sr) isotopique** est utilisé en routine pour tracer la mobilité humaine depuis une trentaine d'années. Avant d'être utilisé pour la première fois en archéologie dans les années 80 (Ericson 1985), le Sr isotopique était plutôt utilisé en écologie pour cartographier les déplacements géographiques de certaines espèces (et matériaux environnementaux ; e.g. Capo *et al.* 1998). Depuis les années 1990, la méthode se développe pour identifier des migrations humaines à la Préhistoire dans différentes régions du monde comme par exemple en Afrique (e.g. Sealy *et al.* 1991 ; Sillen *et al.* 1995), en Amérique (e.g. Knudson *et al.* 2005) et en Europe (e.g. Bentley *et al.* 2002 ; Grupe *et al.* 1997 ; Price *et al.* 2001).

### I.2. Les éléments traces (Sr/Ca et Ba/Ca)

Les **éléments traces** pour la reconstruction des paléo-régimes sont également étudiés depuis plusieurs décennies mais connaissent un regain d'intérêt dans la communauté scientifique depuis quelques années seulement, après avoir essuyé quelques critiques dans les années 1990 notamment (voir Simpson *et al.* 2021 pour une synthèse récente).

Le **rapport strontium/calcium (Sr/Ca)** est étudié depuis les essais nucléaires aériens dans les années 1950-1960, initialement pour suivre dans l'environnement et les tissus le devenir des retombées radioactives, et notamment du Sr. L'utilité de ce ratio comme marqueur de l'alimentation a été démontrée très rapidement (Comar *et al.* 1957) et utilisé en Préhistoire dès les années 1970-1980 (e.g. Sillen et Kavanagh 1982). L'étude du **rapport baryum/calcium (Ba/Ca)** est plus récente et en conséquence moins bien documentée (Burton et Price 1991). Toutefois, de nombreuses critiques faisant suite à une mauvaise utilisation des éléments traces pour l'étude des comportements alimentaires, trop souvent utilisés sans tenir compte de la diagénèse ni des processus complexes d'absorption et de régulation des éléments, ont quelque peu ralenti les développements méthodologiques (Burton et Price 2002). Ce genre d'application erronée est encore conduit

aujourd'hui sur du matériel humain archéologique (voir à ce propos Lugli 2019 ; Lugli et Cipriani 2017). Or à ce jour, seuls les rapports Sr/Ca et Ba/Ca semblent de bons indicateurs de la paléo-diète (e.g. Balter *et al.* 2001 ; Sponheimer *et al.* 2005), en particulier en complément de l'étude des isotopes stables (e.g. Lüscher *et al.* 2014). Les récents développements techniques du XXI<sup>e</sup> siècle (ablation laser notamment ; cf. I.3) offrent de nouveaux éléments pour suivre et mieux comprendre le fonctionnement de ces indicateurs et, depuis une dizaine d'années, les études se multiplient (Simpson *et al.* 2021).

### I.3. Les récents développements techniques (micro-échantillonnage, acides aminés spécifiques, ablation laser)

Avec l'avancée des méthodes, les analyses biochimiques requièrent **de moins en moins de matériel** et permettent d'accéder à une **échelle plus fine** de mesure des tissus archéologiques. Il est désormais possible de décomposer la matière et d'en mesurer les différents constituants, comme c'est le cas pour les acides aminés du collagène, ou bien de multiplier les mesures sur une même dent, dont la croissance se fait par incréments (comme les cernes d'un arbre), pour suivre l'évolution de sa composition biochimique avec l'âge, au cours du temps.

Les premières analyses isotopiques de **l'azote des acides aminés** individuels remontent aux débuts de la chimie isotopique, toutefois sans grand résultat à cause d'une trop grande incertitude analytique (Schoenheimer et Rittenberg 1939). Les premières déterminations du  $\delta^{15}\text{N}$  des acides aminés ont été obtenues dans les années 1960 sur des protéines hépatiques de rat (Gaebler *et al.* 1966) puis ont commencé à se généraliser dans les années 1980 grâce aux améliorations techniques de préparation des échantillons et de mesure (Hare *et al.* 1991 ; Macko *et al.* 1986). Les développements techniques plus récents (GC/C/IRMS et dérivatisation) ont permis d'augmenter la précision de la mesure et de réduire le temps et la quantité d'échantillon nécessaire (Chikaraishi *et al.* 2010a ; Chikaraishi *et al.* 2010b). Ces progrès ont ainsi rendu possibles les premières applications en archéologie sur du collagène osseux, d'abord en Afrique et au Japon (Naito *et al.* 2013b ; Naito *et al.* 2010 ; Styring *et al.* 2010), puis en France (Naito *et al.* 2013a).

D'autre part, les nouvelles stratégies de **micro-échantillonnage** dans la dentine puis dans l'émail ont vu le jour dans les années 1990-2000, permettant de tracer les modifications alimentaires grâce à la mesure des rapports isotopiques en différents points de la dent, correspondant à des périodes de formation bien précises. Ce type d'analyse est notamment utile pour identifier les modalités de sevrage. Menées sur des dents de bovins domestiques en complément des profils d'abattage, cela a par exemple permis de fournir des indices sur l'exploitation laitière au Néolithique (Balasse *et al.* 2001). Le micro-échantillonnage dans les populations humaines permet également de suivre les conditions d'alimentation chez les enfants ayant survécu jusqu'à l'âge adulte (e.g. Beaumont *et al.* 2013 ; Fuller *et al.* 2003 ; Goude *et al.* 2020a).

À une échelle encore plus fine, **l'ablation laser** couplée à la spectrométrie de masse se développe en géologie depuis les années 1990 (e.g. Jarvis et Williams 1993). Depuis une dizaine d'années surtout, son application en archéologie permet de mesurer des concentrations élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca notamment) ou des ratios isotopiques ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) dans les dents à partir d'une infime quantité de matière (avec une résolution spatiale de l'ordre de 50 à 150 $\mu\text{m}$ ) pour suivre les changements alimentaires ou de mobilité à un rythme quasi journalier (e.g. Balter *et al.* 2012 ; Copeland *et al.* 2011 ; Lazzerini *et al.* 2021 ; Mays *et al.* 2018 ; Meijer *et al.* 2019 ; Sjögren *et al.* 2021). Ce type de dispositif permet également de mesurer une grande quantité d'éléments simultanément, en réalisant par exemple une cartographie de la composition biochimique d'un échantillon dentaire afin d'identifier de possibles zones diagénétiques et de mieux comprendre les processus d'altérations des indicateurs biogéochimiques utilisés en archéologie (e.g. Arora *et al.* 2011 ; Joannes-Boyau *et al.* 2019 ; Kohn *et al.* 2013 ; Willmes *et al.* 2016).

Avant de développer les principes des différentes méthodes utilisées dans ce travail, la section qui suit livre quelques rappels sur les fondamentaux.

## II. Définitions des notions de base et principe général de l'enregistrement élémentaire et isotopique

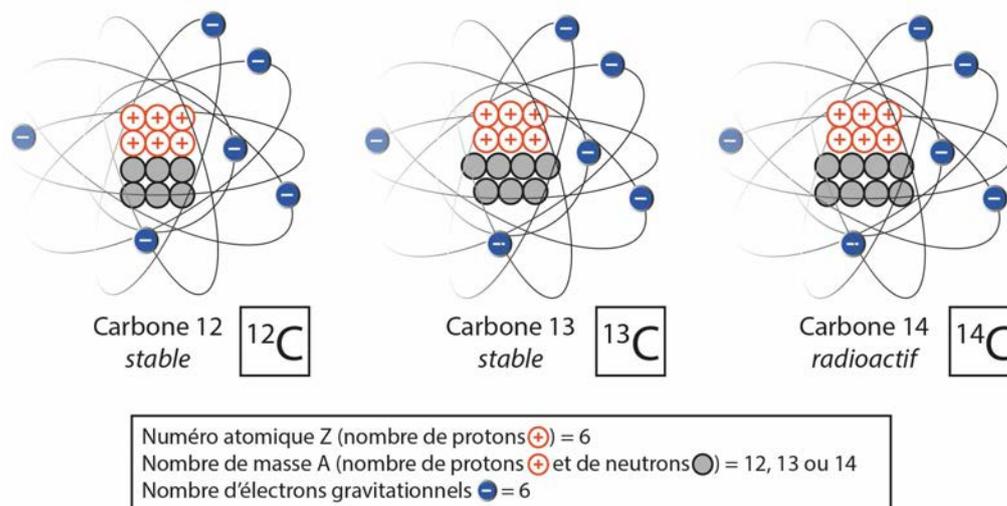
---

### II.1. Sur les rapports isotopiques

Les **isotopes** sont les différentes formes d'un même **élément chimique**. Ils ont un nombre de **neutrons** différent dans le noyau de leurs atomes, leur conférant des masses distinctes. Rappelons qu'un **atome** est constitué d'un noyau, comprenant des protons (de charge positive) et des neutrons (électriquement neutre), autour duquel gravitent les électrons (de charge négative ; Figure C2. 1). Le nombre de protons (+) et d'électrons (-) est le même (contrairement aux ions, chargés électriquement). La quantité de protons (+) dans le noyau définit le numéro atomique (noté  $Z$ ), caractéristique d'un **élément chimique**. Les éléments chimiques sont classés par leur numéro atomique et leur nature dans le tableau périodique (cf. Figure C2. 3, p.86). La quantité de neutrons, elle, est variable pour un même élément, qui aura alors différentes formes : les **isotopes**.

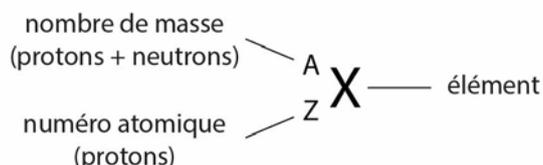
Pour chaque élément chimique de symbole  $X$  et de numéro atomique  $Z$  (nombre de protons), on note  ${}^A_ZX$ , où  $A$  est le **nombre de masse** (total des particules du noyau : protons + neutrons ; Figure C2. 2). Ce nombre de masse ( $A$ ) définit les isotopes. Par exemple, le carbone ( $C$ ) est l'élément chimique de numéro atomique 6 et possède 3 isotopes naturels :  ${}^{12}_6C$ ,  ${}^{13}_6C$  et  ${}^{14}_6C$ . On note généralement  ${}^{12}C$ ,  ${}^{13}C$  et  ${}^{14}C$  (Figure C2. 1).

Les isotopes peuvent être **stables** ou **radioactifs**. Par exemple, le carbone 14 est radioactif. Il se désintègre au cours du temps à une vitesse connue (appelée demie-vie). En mesurant l'abondance relative du  $^{14}\text{C}$  (ou radiocarbone) à un temps donné, on peut donc dater un organisme. Les isotopes stables restent dans des proportions inchangées au cours du temps. C'est le cas du carbone 12 et 13. En les mesurant dans un échantillon, on retrouve donc les proportions enregistrées du vivant de l'individu. Ce sont les **isotopes stables** qui nous permettent de retracer les **régimes alimentaires** des populations passées.



**Figure C2. 1 : Représentation schématique des isotopes du carbone. Chaque atome possède le même nombre de protons (6, en rouge) et d'électrons (6, en bleu) mais un nombre différent de neutrons (en gris), leur conférant une masse différente.**

Les **isotopes** ayant un nombre de neutrons différent, ils ont des masses distinctes qui leur confèrent des propriétés physiques particulières induisant des comportements différents lors des réactions chimiques. Cette différence de comportement entre deux isotopes d'un même élément (un lourd et l'autre léger) au cours d'une réaction induit un **fractionnement isotopique**. Les rapports isotopiques varient au cours de ce processus. Il en résulte des rapports isotopiques distincts entre un réactif et son produit.



**Figure C2. 2 : Formule générale d'un élément chimique.**

Les variations observées lors de ce fractionnement étant très faibles, les mesures isotopiques s'expriment en **delta pour mille** ( $\delta$  ‰) et correspondent au rapport de l'isotope lourd sur l'isotope léger d'un échantillon. L'isotope léger, **plus abondant** dans la nature, peut varier légèrement, c'est

pourquoi ce rapport est exprimé relativement à un standard international. La teneur isotopique mesurée dans un échantillon est donnée par la **formule** :

$$\delta^E X (\text{‰}) = [(R_{\text{échantillon}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}] \times 1000$$

où X est l'élément chimique considéré, E est le nombre de masse de l'isotope le plus lourd (et donc le plus rare) et R est le rapport entre les deux isotopes<sup>1</sup>.

Les **standards internationaux utilisés** sont le PeeDee Belemnite (PDB) pour le  $\delta^{13}\text{C}$ , un fossile calcaire de valeur proche de  $1,6 \pm 1,4 \text{ ‰}$  ; la valeur moyenne de l'azote atmosphérique (AIR pour Ambient Inhalable Reservoir) pour le  $\delta^{15}\text{N}$ , dont la valeur est proche de  $0 \text{ ‰}$  ; et la troilite de la météorite Canyon Diablo (V-CDT, V pour Vienna) pour le  $\delta^{34}\text{S}$ , dont la valeur est proche de  $-6,7\text{‰}$  (Beaudoin *et al.* 1994 ; Nehlich 2015 ; Richards 2019 ; Richards *et al.* 2003).

L'**abondance relative** naturelle d'un isotope correspond à la proportion sur Terre de cet isotope, en pourcentage, par rapport à l'ensemble des isotopes naturels d'un même élément (Tableau C2. 1 ; Rosman et Taylor 1998).

### II.2. Sur les concentrations élémentaires et les éléments traces en particulier

En fonction de leur abondance, les éléments peuvent être classés comme élément majeur ( $>1\%$ ), mineur (entre  $0,1$  et  $1\%$ ) ou trace ( $<0,1\%$  ou  $1000 \text{ ppm}$  ; Mertz 1981). Un **élément trace** est donc un élément chimique présent en faible concentration (à l'état de trace) dans un environnement ou un organisme. On les mesure généralement en parties par million (ppm).

Dans les organismes, certains éléments sont toxiques (par exemple le mercure ou le plomb), d'autres n'ont aucun effet, ils sont dits **biocompatibles** ou non-essentiels, d'autres encore sont **essentiels** : ils sont indispensables au bon fonctionnement de l'organisme dans une concentration donnée et sont donc régulés pour maintenir cette concentration en évitant les carences et les excès, car en trop faible ou trop forte concentration, ces éléments peuvent déséquilibrer le métabolisme voire devenir toxiques. En micro-nutrition, on parle d'**oligo-éléments** (ou micronutriments) pour définir les sels minéraux nécessaires à la vie d'un organisme en très faible quantité (cuivre, fer, fluor, silicium, zinc, etc), mais ce terme n'est pas toujours utilisé avec la même définition. Nous parlerons ici d'éléments, trace ou non, essentiel ou non. Selon les éléments, ils sont plus ou moins assimilables et peuvent être bio-concentrés par la chaîne alimentaire.

---

<sup>1</sup> Cette formule vaut pour la mesure des isotopes stables et non pour le Sr isotopique, radioactif, qui sera abordé plus loin (cf. VII).

Z	élément	symbole	abondance (%)	rapport isotopique utilisé	rapport élémentaire utilisé
6	carbone	<sup>12</sup> C	98.93	$\delta^{13}\text{C} = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$	
		<sup>13</sup> C	1.07		
		<sup>14</sup> C	-		
7	azote	<sup>14</sup> N	99.632	$\delta^{15}\text{N} = {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$	
		<sup>15</sup> N	0.368		
12	magnésium	<sup>24</sup> Mg	78.99		<sup>24</sup> Mg/ <sup>44</sup> Ca
		<sup>25</sup> Mg	10		
		<sup>26</sup> Mg	11.01		
16	soufre	<sup>32</sup> S	94.93	$\delta^{34}\text{S} = {}^{34}\text{S}/{}^{32}\text{S}$	
		<sup>33</sup> S	0.76		
		<sup>34</sup> S	4.29		
		<sup>36</sup> S	0.02		
20	calcium	<sup>40</sup> Ca	96.941		
		<sup>42</sup> Ca	0.647		
		<sup>43</sup> Ca	0.135		
		<sup>44</sup> Ca	2.086		
		<sup>46</sup> Ca	0.004		
		<sup>48</sup> Ca	0.187		
25	manganèse	<sup>55</sup> Mn	100		<sup>55</sup> Mn/ <sup>44</sup> Ca
38	strontium	<sup>84</sup> Sr	0.56	${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$	
		<sup>86</sup> Sr	9.86		
		<sup>87</sup> Sr	7		
		<sup>88</sup> Sr	82.58		
56	baryum	<sup>130</sup> Ba	0.106		
		<sup>132</sup> Ba	0.101		
		<sup>134</sup> Ba	2.417		
		<sup>135</sup> Ba	6.592		
		<sup>136</sup> Ba	7.854		
		<sup>137</sup> Ba	11.232		
		<sup>138</sup> Ba	71.698		
					<sup>138</sup> Ba/ <sup>44</sup> Ca
92	uranium	<sup>234</sup> U	0.0055		
		<sup>235</sup> U	0.72		
		<sup>238</sup> U	99.2745		
					<sup>238</sup> U/ <sup>44</sup> Ca

Tableau C2. 1 : Abondances relatives des isotopes naturels des différents éléments utilisés dans ce travail. En grisé les isotopes n'intervenant pas dans notre étude. Les abondances sont données d'après l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC ; Rossman et Taylor, 1998).

Le **strontium** (Sr) et le **baryum** (Ba) sont des éléments traces non-essentiels. Ils proviennent de l'alimentation et ne sont pas régulés par l'organisme. Le **calcium** (Ca), élément majeur, est un minéral essentiel et il est donc, lui, régulé. C'est d'ailleurs l'élément métallique le plus abondant dans le corps, principalement stocké dans les os et les dents. Il est plus ou moins bioassimilable selon ses formes, selon l'âge et l'état de santé (notamment hormonal) et selon l'aliment dans lequel il est contenu.

Sr, Ba et Ca sont des **métaux alcalino-terreux** selon la classification périodique (2<sup>e</sup> groupe ; Figure C2. 3). Ils ont des propriétés très semblables et interviennent dans le cycle métabolique du Ca. Pour déterminer le régime alimentaire, nous considérons les concentrations élémentaires en Sr et en Ba – qui varient avec l'alimentation – relativement au Ca – qui est stable, homogène et constant dans les tissus minéralisés (on a donc Sr/Ca et Ba/Ca). Le détail de la méthode est expliqué ci-après (cf. VI).

NB : En réalité, lors de l'analyse des éléments traces, on mesure les concentrations de chaque isotope, mais on utilise celles de l'isotope le plus abondant (le plus léger) relativement à l'abondance totale de l'élément. On travaille donc sur l'abondance de ces éléments entre eux (relativement au Ca) et non sur les rapports isotopiques.

**Tableau périodique des éléments**

Z (numéro atomique)

- hydrogène
- métaux alcalins
- métaux alcalino-terreux
- métaux de transition
- métaux pauvres
- autres non métaux
- gaz nobles
- halogènes
- métalloïdes

	1																	2
	H																	He
	3	4											5	6	7	8	9	10
	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
	11	12											13	14	15	16	17	18
	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
	55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
	87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
	Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo
lanthanides	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
actinides	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

Figure C2. 3 : Classification périodique des éléments ou table de Mendeleïv. Les éléments étudiés dans ce travail (pour leur concentration ou leur rapport isotopique) sont encadrés, en rouge pour leur intérêt biologique, en bleu pour leur intérêt diagénétique et leur fonction de contrôle. Modifié d'après ©www.elementsdatabase.com.

- *Question de terminologie*

Parmi les éléments analysés dans ce travail : C, N, S, Ca et Mg sont des éléments majeurs et Ba, Sr, Mn et U sont des éléments traces. Les éléments C, N, S, Ca, Mg, Sr et Ba sont biogéniques (ils proviennent de l'alimentation et reflètent des caractéristiques enregistrées du vivant des individus) alors que les éléments Mn et U sont diagénétiques (ils sont incorporés au cours d'altérations chimiques des tissus après la mort de l'individu). Nous parlerons dans la suite de ce travail d'éléments traces pour désigner les rapports élémentaires Sr/Ca, Ba/Ca, Mn/Ca et U/Ca (et par extension également Mg/Ca) par opposition aux rapports isotopiques  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  et  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .

Les concentrations élémentaires en C, N et S sont utilisées pour contrôler la qualité du collagène et vérifier l'intégrité des ratios isotopiques  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  ; les concentrations en Mn et U sont utilisées pour contrôler l'intégrité de l'apatite et la fiabilité des ratios élémentaires Sr/Ca et Ba/Ca et du ratio isotopique  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (cf. *infra*).

### II.3. Sur les acides aminés (AA)

Les **acides aminés** sont les unités de base des protéines, et donc du collagène. Ils sont assemblés en chaînes linéaires et non ramifiées pour former les protéines. Il en existe au total 21 chez l'Homme (ou 20 selon que l'on considère ou non la forme évoluée de la cystéine en sélénocystéine ; Figure C2. 4). Le collagène en compte 20, dont les formes hydrolysées de la lysine et de la proline (ou 18 si l'on exclu l'asparagine et la glutamine présents en quantités négligeables ; cf. Tableau C2. 3, p.101). Certains sont **essentiels** : ils ne peuvent être synthétisés par l'organisme et doivent être apportés par l'alimentation. On en compte 9 chez l'humain, dont la phenylalanine (Phe) dont nous parlerons dans ce travail (cf. V) ou la methionine (Met). Lors de la digestion, les protéines consommées se décomposent et « libèrent » les acides aminés, qui vont ensuite se recomposer pour former de nouvelles protéines nécessaires à l'organisme, comme le collagène. Les acides aminés **non essentiels** sont produits de novo par l'organisme. Il y en a 12 chez l'humain, dont l'acide glutamique (Glu) qui nous intéresse particulièrement (cf. V). Sur l'ensemble, 18 acides aminés sont constitués uniquement de 4 éléments chimiques : le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote ; 2 acides aminés contiennent en plus un atome de soufre (la méthionine, essentielle, et la cystéine, non essentielle) ; 1 acide aminé, plutôt rare et pas toujours représenté, contient un atome de sélénium (la sélénocystéine ; Figure C2. 4).

NB : Dans la nature, il existe plus de 300 acides aminés ayant des fonctions métaboliques variées (Wu 2009). Parmi eux, seulement 21 servent à fabriquer les protéines. Ils sont appelés acides aminés- $\alpha$  protéinogènes. Nous parlerons par la suite simplement d'acides aminés (AA).

### II.4. Sur les fractions biochimiques ou macronutriments

L'alimentation compte trois **fractions biochimiques** ou trois types de **macronutriments** : les protéines, les lipides ou graisses et les glucides ou carbohydrates (sucres). – Les micronutriments comprennent les vitamines et minéraux et ne sont pas traités ici. – Les **protéines** servent au bon fonctionnement de l'organisme (sous forme d'enzymes, d'hormones, d'anticorps, etc.) et au maintien de sa structure (collagène). Les **lipides** et les **glucides** servent au stockage et à la consommation de l'énergie. Ils constituent tous les deux ce que l'on nomme la **fraction énergétique**. Les lipides ont également un rôle structural, les acides gras étant des constituants des membranes cellulaires notamment.

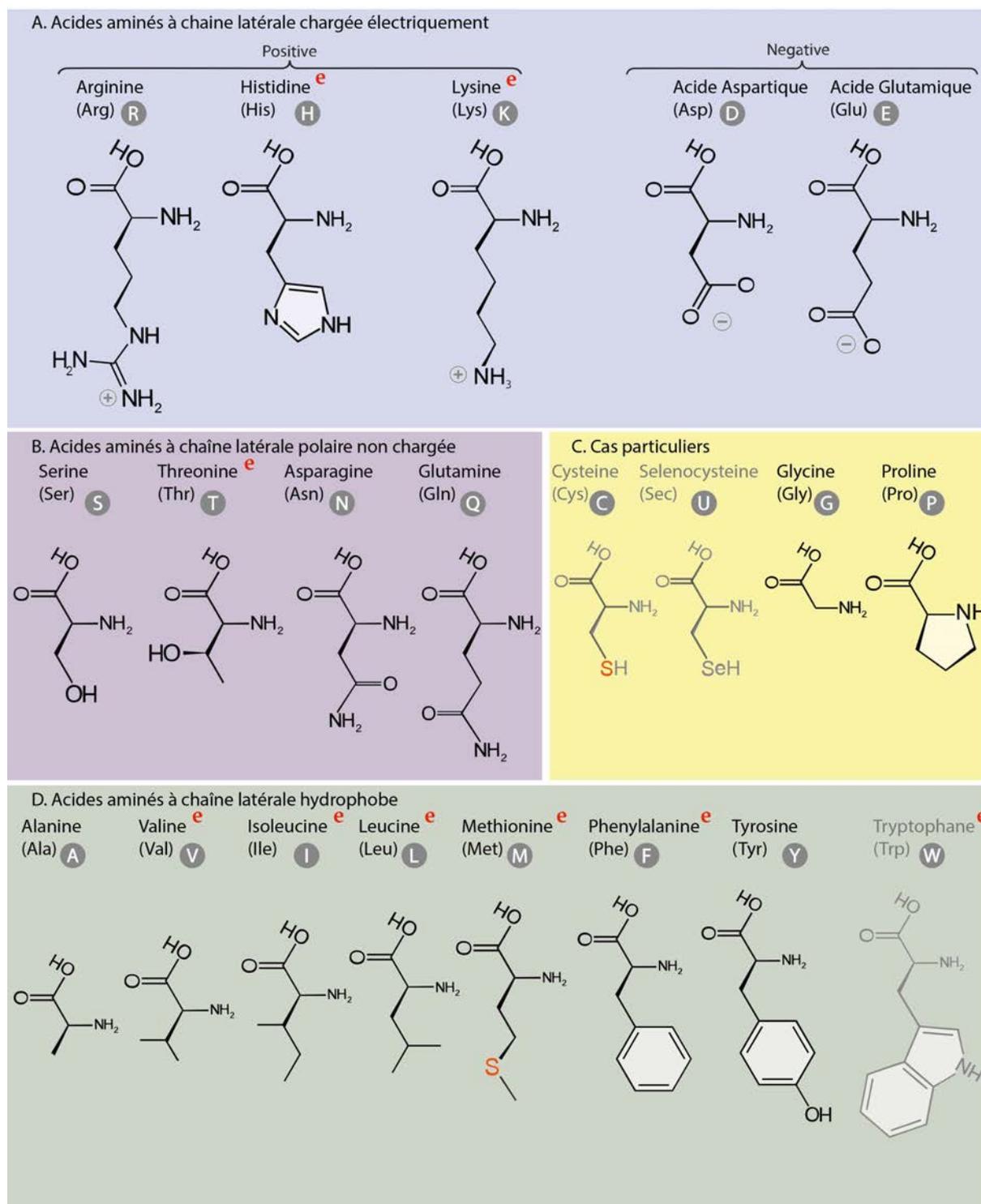


Figure C2. 4 : Formules développées des 21 acides aminés naturels en fonction de leurs principales caractéristiques structurales. e = essentiel, en gris = non présents dans le collagène, en rouge les atomes de soufre. La lysine et la proline existent également sous forme hydrolysée (hydroxylysine et hydroxyproline) non représentées ici. Modifié d'après ©Wikimedia Commons.

Certains aliments sont plus riches que d'autres en une fraction. Par exemple, les **oléagineux** (noix) sont riches en **lipides**, permettant notamment l'extraction d'huiles végétales. Les **tubercules et racines**, organes de réserve (pomme de terre, betterave, carotte, etc), sont riches en **glucides** (amidon, saccharose, etc.). Les céréales et les plantes en général sont plus riches en glucides que les produits

animaux. Certaines plantes contiennent toutefois une proportion importante de protéines, comme les **légumineuses** (e.g. soja, lentilles, jusqu'à 40% de protéines en poids sec), les **algues** (e.g. spiruline, wakame, jusqu'à 70% de protéines en poids sec), ou encore l'ortie, le chanvre, les graines de courge, etc. Les **protéines végétales** n'ont toutefois pas la même digestibilité que les protéines animales et certaines doivent être associées entre elles pour être mieux assimilées (Gaudichon 2019 ; Guéguen *et al.* 2016). De plus, elles ne contiennent pas tous les acides aminés, à la différence des protéines animales qui sont toujours complètes (Chardigny 2017). La qualité des protéines dépend donc de leur digestibilité et de leur composition en acides aminés.

La **viande**, le **poisson**, les **œufs** et les **produits laitiers** sont plus riches en **protéines** que les plantes et également plus digestibles et équilibrés, contenant tous les acides aminés essentiels (e.g. Nau *et al.* 2010), mais ils sont également riches en **lipides**. Certaines espèces contiennent d'ailleurs plus de lipides que d'autres : certains poissons gras (comme l'anguille ou le saumon) ou le porc par exemple sont plus riches en lipides.

Chaque fraction biochimique apporte une certaine quantité d'éléments, essentiels ou non, qui va entrer dans la composition des tissus et de leurs fractions organiques ou minérales. La composition des aliments en macronutriments doit donc être prise en compte lors de l'analyse des différentes fractions de ces tissus pour la reconstitution de l'alimentation, afin d'évaluer les proportions relatives de différentes sources alimentaires.

### III. Les différents tissus et leurs fractions organiques et minérales

---

Sous nos latitudes, les tissus mous, cartilages, cheveux/poils et ongles/griffes/cornes sont rarement conservés en contexte archéologique sans traitement des défunts (comme la momification) ou conditions spécifiques (congélation naturelle par exemple). Nous ne considérons ici que les tissus minéralisés, à savoir les os et les dents, qui sont les seuls conservés dans les sites étudiés.

NB : Le squelette, en plus de son rôle structurel de soutien, de charpente du corps et de protection de certains organes (cage thoracique, crâne), sert de réservoir en sels minéraux nécessaires au métabolisme. Les dents, elles, sont fortement minéralisées en raison de leur fonction de mastication voire, chez les animaux, de défense et d'attaque.

#### III.1. Structure et composition de l'os

Le **tissu osseux** est un tissu conjonctif solide constitué de **cellules** (ostéoblastes, ostéocytes et ostéoclastes) disséminées dans une matrice extracellulaire (MEC) dure, minéralisée. Celle-ci se conserve des milliers d'années (Ambrose 1993). La MEC de l'os, ou matrice osseuse, comporte une partie organique et une partie minérale. La **partie organique** représente 20 à 30% de la masse sèche

osseuse (Leblond et Weinstock 1976). Elle est constituée à 90% de fibres de collagène de type I (cf. III.5.a) et à 10% d'autres protéines (ostéopontine, ostéocalcine, etc.) et protéoglycanes (Price *et al.* 1985). La **phase minérale** correspond aux 70 à 80% restants de l'os sec. Elle est constituée d'hydroxylapatite carbonatée ou (bio)apatite (un phosphate de calcium cristallisé ; LeGeros 1991 ; Sillen *et al.* 1989 ; cf. III.5.b). Ainsi, les fibres de collagène et les cristaux de bioapatite s'entremêlent pour former la matrice osseuse ou trame de soutien du squelette. L'ossification est régie par les **cellules osseuses** qui se trouvent dans cette matrice extracellulaire (cf. II.2).

La composition de l'os est variable d'une zone à une autre et dépend également de l'âge et de l'état de santé de l'individu (*e.g.* ostéoporose, rachitisme ; Valentin 2002). En termes structurels, on distingue 3 catégories d'os : les os longs, les os courts et les os plats, qui diffèrent dans leur format et leur composition relative en différents tissus osseux. Il existe en effet **trois types de tissus osseux** ayant un degré de maturation et une organisation différents : le tissu osseux réticulaire, le tissu osseux lamellaire compact et le tissu osseux lamellaire spongieux (White et Folkens 2005).

- L'os en cours de développement (os immature) est dit **réticulaire** (ou non lamellaire). Il est faiblement calcifié et n'a pas d'orientation organisée des fibres de collagène.

L'os mature est **lamellaire**. Ses fibres de collagène sont orientées selon une organisation spatiale stricte formant des lamelles parallèles. Il peut être compact ou spongieux.

- L'os compact ou **cortical** est constitué de lamelles osseuses qui forment des ensembles circulaires nommés ostéons ou système de Havers (Figure C2. 5). Chaque ostéon comprend un canal de Havers en son centre dans lequel circulent les vaisseaux sanguins. Ils confèrent une résistance maximale à l'os. On le trouve à la surface des os et dans la diaphyse des os longs en particulier. De par sa structure compacte, il est moins sujet à diagenèse (modifications chimiques *post-mortem*) et sera préférentiellement utilisé pour les analyses biochimiques.
- Le tissu osseux **spongieux** ou trabéculaire, est formé d'un réseau de trabécules ramifiées. On le trouve dans les os courts ou plats et dans les épiphyses des os longs. Sa structure « en éponge » est plus friable mais offre une résistance tridimensionnelle, bien adaptée aux articulations notamment, pour répondre aux contraintes biomécaniques. Il est très vascularisé et son renouvellement est plus rapide que l'os cortical (cf. III.2).

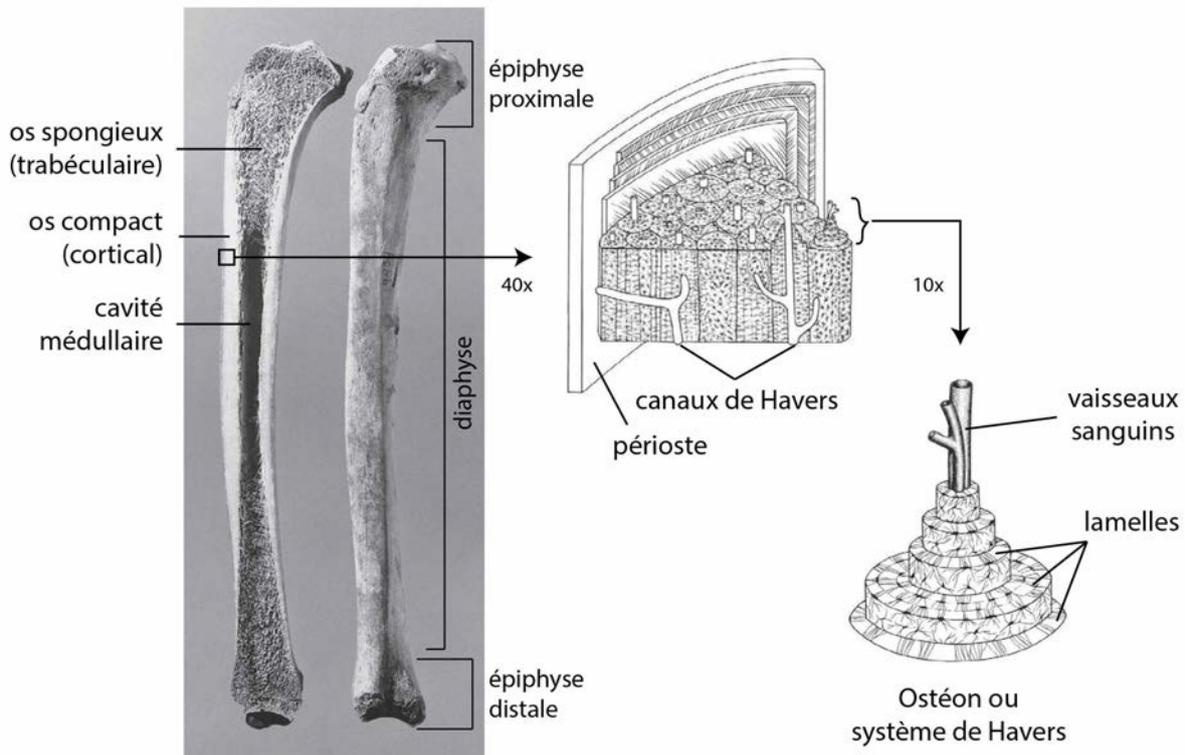


Figure C2. 5 : Structure générale et microscopique de l'os. A gauche, coupe transversale d'un tibia gauche. A droite, structure microscopique de l'os compact. Modifié d'après White et Folkens, 2005.

### III.2. Ossification et remodelage osseux

Le tissu osseux est dynamique : il se renouvelle en permanence grâce à l'activité continue de ses cellules, pendant la croissance et tout au long de la vie (Valentin 2002). Les **ostéoblastes** synthétisent la matrice osseuse en sécrétant des protéines puis en les minéralisant. Une fois matures, les cellules osseuses sont des **ostéocytes** qui contribuent au maintien de la matrice. Ce processus commence dès l'embryogénèse avec l'ossification primaire et se prolonge tout au long de la vie. Les **ostéoclastes** sont responsables de la résorption du tissu osseux (dissolution et dégradation). C'est l'équilibre entre l'activité des ostéoblastes et des ostéoclastes qui assure un renouvellement constant de la trame osseuse, que l'on appelle remodelage (Manolagas 2000).

Le **taux de remodelage** varie selon plusieurs paramètres : la région anatomique, l'âge, le sexe, les processus hormonaux, l'état de santé et l'activité physique (Balasse *et al.* 1999 ; Hedges *et al.* 2007 ; Szulc *et al.* 2000 ; Valentin 2002 ; voir aussi Simpson *et al.* 2021 pour une synthèse de la littérature). Avec ce remodelage osseux se renouvelle également la signature isotopique de l'alimentation. **La composition biochimique des os reflète donc la moyenne de l'alimentation globale d'un individu au cours de ses dernières années de vie** (Libby *et al.* 1964) **et la durée de l'enregistrement dépend du taux de renouvellement osseux** (Balasse *et al.* 1999 ; Fizet 1992). On considère généralement que l'os humain adulte se renouvelle entièrement en 20 ans, en moyenne, mais cette durée peut varier de

quelques années à 30 ans (Ambrose 1993 ; Libby *et al.* 1964 ; Stenhouse et Baxter 1979), voire plus (Matsubayashi et Tayasu 2019).

Ainsi, les tissus **les plus actifs métaboliquement**, comme l'os en formation chez les jeunes (Szulc *et al.* 2000 ; Valentin 2002), l'os spongieux mieux adapté aux contraintes biomécaniques que l'os cortical (Sealy *et al.* 1995), ou l'os soumis à une activité physique plus intense (Ambrose 1993) se renouvellent plus rapidement (Tableau C2. 2 ; Tieszen *et al.* 1983 ; Valentin 2002). Les ossements d'individus jeunes enregistrent les signaux de l'alimentation à plus court terme que ceux des sujets plus âgés, de même que les grands sportifs par rapport aux plus sédentaires. La vitesse du renouvellement diminue avec l'âge chez les adultes (Valentin 2002). L'état sanitaire, de même que certains régimes alimentaires particuliers (par exemple riches en protéines), jouent également un rôle dans la vitesse de renouvellement osseux (Ambrose 1993, 2002 ; Manolagas 2000 ; Szulc *et al.* 2000).

Age	Taux de remodelage (%/an)	
	Os cortical	Os trabéculaire
nouveau-né	300	300
1 an	105	105
5 ans	56	66
10 ans	33	48
15 ans	19	35
adulte	3 (variable)	18 (variable)

Tableau C2. 2 : Taux de remodelage osseux en fonction de l'âge. D'après Valentin 2002.

De même, **la région anatomique et le type d'os** considérés enregistrent un signal plus ou moins long, selon qu'ils soient très spongieux comme les os courts ou les articulations (épiphyses des os longs) ou plus compacts (diaphyse d'os long comme le tibia ou le fémur ; Balasse *et al.* 1999 ; Fizet 1992). La durée d'enregistrement du signal est donc variable, multifactorielle et *in fine* peu connue, même au sein d'un même os. Il est donc nécessaire de prendre en considération cette variabilité dans l'interprétation des résultats (voir par exemple Allen et Burr 2014 ; Ambrose 1993 ; Balasse *et al.* 1999 ; Fahy *et al.* 2017 ; Klepinger 1984 ; Valentin 2002).

NB : Afin d'homogénéiser au maximum le signal, nous avons échantillonné préférentiellement et dans la mesure du possible l'**os cortical** provenant de diaphyses d'os long. Pour **les animaux**, le choix s'est porté sur les ossements disponibles pour refléter un plus grand nombre de spécimens différents (cf. Chap3) et les durées d'enregistrements sont donc plus variables. On parle dans tous les cas d'un signal enregistré sur les dernières années de la vie, et on gardera en mémoire les éventuelles variations de durée lors de l'interprétation des résultats.

### III.3. Structure et composition des dents

Une dent est composée de deux parties, la **couronne** et la **racine**, séparées anatomiquement par le **collet** (ou ligne cervicale). Les pointes de la couronne sont les **cuspidés** (on parle aussi d'apex occlusal), la pointe des racines se nomme apex radiculaire ou simplement apex. Par ailleurs, les dents sont composées de **différents tissus** : l'émail recouvrant la couronne, la dentine constituant la couche intermédiaire dans la couronne et les racines, le cément situé en périphérie des racines et la cavité pulpaire renfermant la pulpe, elle, non calcifiée, au cœur de la dent (Figure C2. 6).

- L'**émail** est constitué à 97% d'apatite, pour sa fraction minérale, et 3% de protéines (énaméline, amélogénine et autres) pour sa fraction organique sèche (LeGeros 1991). Il est acellulaire et constitue le tissu le plus minéralisé du corps humain et le moins sensible aux altérations diagenétiques.
- La **dentine**, comme l'os, est composée à 70% d'apatite pour sa fraction minérale et 30% de protéines (dont 90% de collagène et 10% d'autres protéines) pour sa matrice organique.
- Le **cément** contient des fractions minérales et organiques globalement similaires et ne sera pas discuté dans ce travail.
- La **cavité pulpaire** assure l'innervation et la vascularisation des dents. Elle contient les cellules **odontoblastes** qui synthétisent la dentine secondaire et tertiaire (cf. III.4).

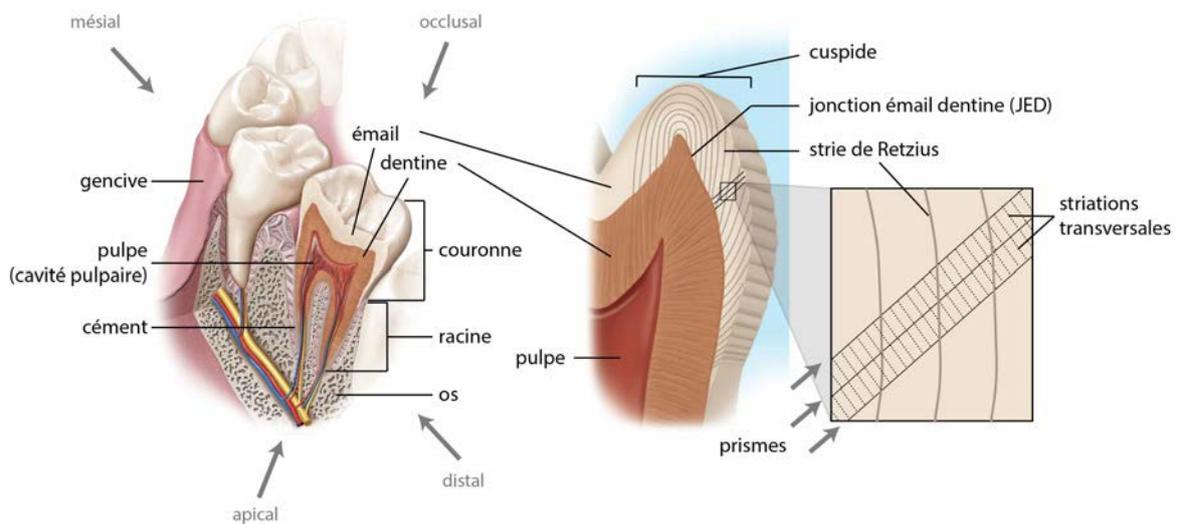


Figure C2. 6 : Structure générale et microscopique de la dent et de ses tissus de soutien. Modifié d'après Nanci 2003.

### III.4. Odontogénèse et calendrier de développement dentaire

À l'inverse des os, les **dents**, une fois formées et minéralisées, ne sont plus remaniées (à l'exception de la dentine secondaire et tertiaire ; cf. *infra*). La mesure de leur composition élémentaire et

isotopique reflète donc les valeurs enregistrées pendant leur croissance. De plus, leur croissance est incrémentielle et permet de retracer les traits d'histoire de vie (dont l'alimentation et la mobilité) en suivant une échelle de temps précise (Dean et Cole 2013 ; Smith 2013). Il est donc nécessaire de connaître les stades et rythmes de développement dentaire pour savoir à quelle période d'âge correspond la dent ou fraction analysée.

Le **développement dentaire** (odontogénèse) inclue l'ensemble des processus depuis l'initiation de la formation de la dent jusqu'à sa minéralisation, en passant par son éruption (émergence et positionnement dans l'alvéole osseuse). Il concerne les dents déciduales (dents de lait) et permanentes (Hillson 2005 ; Nanci 2003).

La **croissance de la dent** se fait de façon concentrique et incrémentielle depuis le sommet des cuspidés jusqu'à la pointe des racines (apex) et depuis la jonction émail-dentine vers l'extérieur pour l'émail et vers l'intérieur pour la dentine. Dans la **couronne**, l'amélogénèse (formation de l'émail) et la dentinogénèse (formation de la dentine) sont sensiblement synchrones, avec un léger décalage initial dû à la nécessaire présence de dentine pour amorcer la formation de l'émail. La croissance **racinaire** se fait dans un second temps, simultanément à l'émergence de la dent en bouche. La fermeture de l'apex marque la fin de la croissance dentaire. Les stades de croissance des molaires permanentes humaines sont donnés dans la Figure C2. 7, d'après l'étude de référence de C. Moorrees et collaborateurs (1963).

Au cours de l'**amélogénèse**, les **améloblastes** assurent la sécrétion de l'émail en couches superposées puis la maturation tissulaire par minéralisation pour le rendre plus solide et moins perméable. L'émail se forme de façon **incrémentielle** selon deux directions : une verticale résultant de la formation des prismes, l'autre horizontale correspondant à l'inclusion de nouveaux améloblastes actifs depuis la jonction émail-dentine (JED) jusqu'à la surface de la dent (Ramirez Rozzi 2010). On observe deux types de **lignes de croissance** résultant de ces processus (Figure C2. 6). Les **striations transversales**, perpendiculaires à l'axe des prismes, se forment quotidiennement et indiquent donc une périodicité journalière (Schwartz et Dean 2000). Les **stries de Retzius** ont une périodicité plus longue, a priori similaire pour toutes les dents d'un même individu mais variable entre les individus. Leur périodicité, quasi hebdomadaire, est donnée par le nombre de striations transverses qui les séparent, entre 6 et 12 (généralement 7) pour l'Homme moderne (Dean 2007 ; Ramirez Rozzi 1993). Des épisodes de stress (malnutrition, infections) peuvent affecter le développement normal de l'émail en créant des déficits d'épaisseur visibles sous formes de sillons linéaires à la surface de l'émail : les **hypoplasies** (Hillson et Bond 1997).

	Ci: Formation initiale du cuspide		
	CCO: Coalescence des cuspidés		R ¼: La longueur de la racine est inférieure à la longueur de la couronne, aperçu d'une zone de bifurcation (fourche forking)
	Coc: Profil du cuspide complet		R ½: La longueur de la racine égale à la longueur de la couronne
	Cr ½: Moitié de la couronne avec formation de la dentine		R ¾: Trois quarts de la longueur des racines sont développées avec des extrémités divergentes
	Cr ¾: Couronne formée à trois quart		RC: Développement de la longueur de la racine terminée avec des extrémités parallèles
	Crc: Couronne achevée avec début de la formation de la cavité pulpaire		A ½: Apex fermé (extrémités de la racine convergentes) avec un large LPD*
	Ri: formation de la racine avec divergence des bords		AC: Apex fermé avec une largeur LPD* normal

Figure C2. 7 : Description des stades de croissance dentaire d'après Moorrees *et al*, 1963 utilisés pour identifier les étapes du développement dentaire des dents multiradiculées. \*LPD : espace du Ligament ParoDontal. Modifié d'après l'atlas de la Queen Mary University of London (@www.atlas.dentistry.qmul.ac.uk).

NB : Il est généralement admis que la formation de l'émail chez l'Homme se déroule à **vitesse constante de 4µm** par jour (Hillson 2005). Pourtant, on ne connaît pas le rythme ni le degré d'incorporation des éléments dans l'émail dentaire (Smith et Tafforeau 2008; cf. *infra*). L'analyse séquentielle des isotopes et éléments traces de l'émail fournit un moyen utile de détecter les changements alimentaires au cours du temps (variabilité relative intra-dent) pourvu que les valeurs absolues soient traitées avec prudence (e.g. Balasse 2003 ; Montgomery *et al.* 2010).

La **dentinogénèse** (formation de la dentine) est assurée par les odontoblastes, qui sécrètent la prédentine et la minéralisent pour former la dentine. Contrairement à l'émail, la dentine se renouvelle en partie au cours du temps. La **dentine primaire** est formée au cours du développement dentaire, la **dentine secondaire** est fabriquée tout au long de la vie, à un rythme beaucoup plus lent, et la **dentine tertiaire**, réactionnelle, est formée suite à un épisode pathologique (carie, attrition ; van Rensburg

1987). De même que pour l'émail, la dentine se forme par incréments, dont le rythme et la durée sont visibles sous forme de **stries de croissances** dans la microstructure dentaire : les lignes de von Ebner correspondent aux striations transversales de l'émail (rythme circadien) et les lignes d'Andersen aux stries de Retzius de l'émail (périodicité de 7 à 9 jours ; Dean 2006, 2007 ; Schwartz et Dean 2000).

NB : On suppose généralement que la dentine se développe à un rythme régulier d'environ **4 à 6  $\mu\text{m}$  par jour** (Dean et Scandrett 1995). Cependant, certaines études ont montré que le taux de croissance est variable tout au long de la formation d'une dent (Dean et Cole 2013 ; Scharlotta *et al.* 2018) et il est possible d'utiliser différents taux de croissance en fonction des zones anatomiques des dents (Czermak *et al.* 2020 ; cf. Chap4.II.1 et Chap6.I).

La **cémentogénèse** ou formation de cément n'est pas abordée dans ce travail.

### III.4.a. Calendrier de croissance dentaire chez les humains

**Alors que le calendrier d'éruption dentaire** permet d'estimer l'âge des individus à partir des dents in situ (en bouche), le **calendrier de croissance**, qui nous intéresse plus particulièrement ici, permet de donner un âge correspondant à la période de formation d'une dent ou section de dent isolée. Les dents permanentes commencent à se former dès les premiers mois de vie et achèvent leur formation entre 9 et 25 ans (avec une plus grande variabilité pour la troisième molaire, la dernière à se former ; Figure C2. 8). Le calendrier de croissance dentaire est **variable entre populations et d'un individu à l'autre**, influencé notamment par des facteurs génétiques, physiologiques et environnementaux (*e.g.* Adams *et al.* 2019). Il ne peut être connu pour les populations du passé, mais comme il a été démontré que le développement dentaire des hominidés du Plio-Pléistocène était singulier par rapport à celui de l'homme moderne par exemple (Ramirez Rozzi 1993), il est fondamental d'envisager que le calendrier de croissance dentaire ait pu l'être également, qui plus est pouvant varier d'une population à l'autre. Les études réalisées depuis des décennies sur un grand nombre d'individus ont permis d'établir des **estimations moyennes** du calendrier de développement dentaire prenant en compte la **variabilité actuelle** mesurée dans un certain nombre d'échantillons (voir par exemple AlQahtani *et al.* 2010 ; Moorrees *et al.* 1963 ; Scheuer et Black 2000). Les populations étudiées restent toutefois limitées et ne reflètent probablement pas la diversité réelle, qui doit être particulièrement considérée en archéologie (Scharlotta *et al.* 2018).

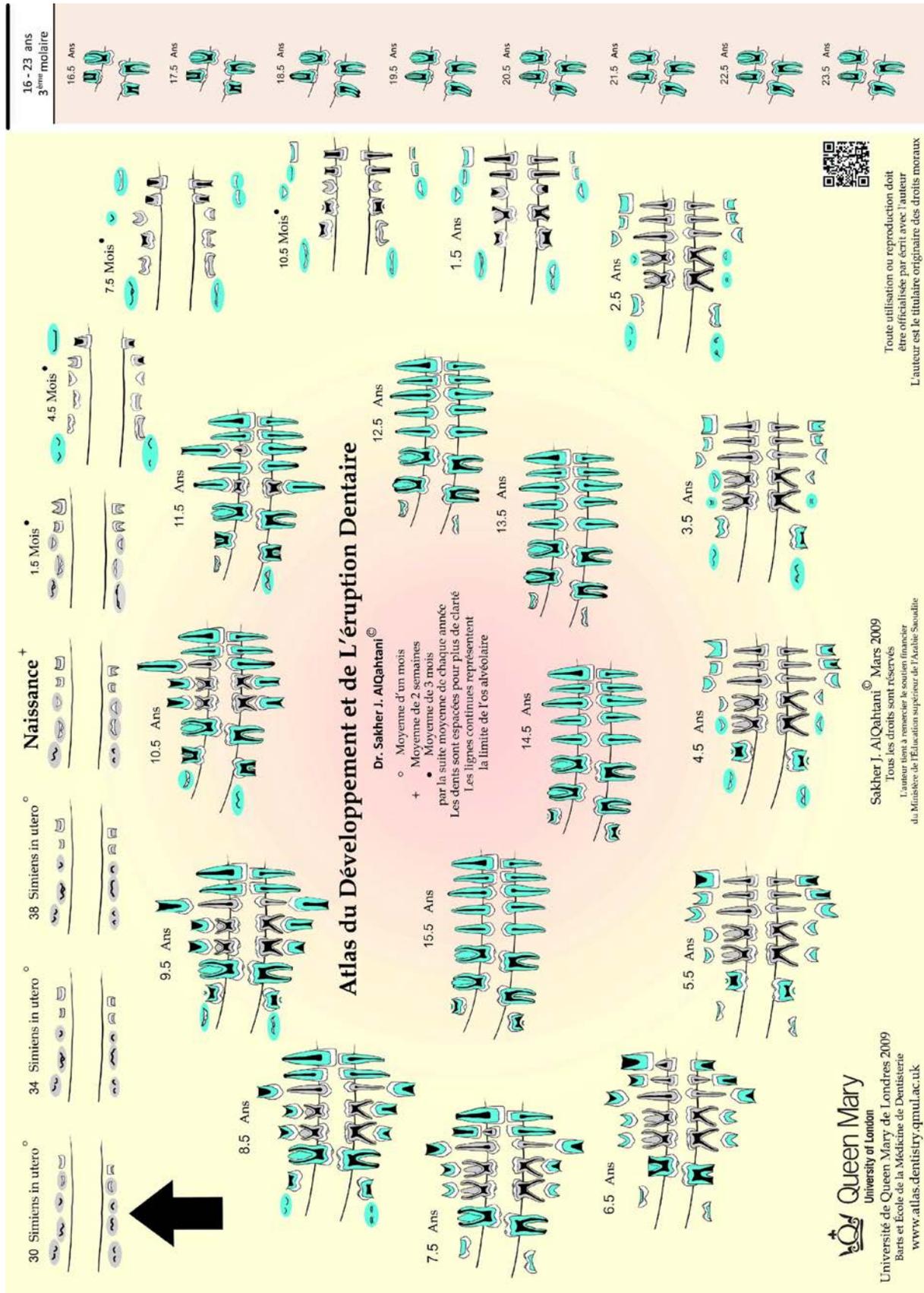


Figure C2. 8 : Atlas du développement dentaire de la Queen Mary University of London (©www.atlas.dentistry.qmul.ac.uk). D'après AlQhatani *et al*, 2010.

- *Focus sur la première et la deuxième molaire permanente*

Dans ce travail, les analyses sur dents humaines ont porté presque exclusivement sur les couronnes des **secondes molaires permanente** (M2) et dans deux cas des **premières molaires permanentes** (M1 ; cf. Chap3 et Annexe A34). D'après les tables du London Atlas (AlQahtani *et al.* 2010), la couronne de la M1 se forme et se minéralise **entre 4,5 mois** ( $\pm 4$  mois) **et 3,5 ans** ( $\pm 0,5$  ans) ; celle de la **deuxième molaire permanente** (M2) entre **2,5 et 8,5 ans** ( $\pm 0,5$  ans). L'atlas et les tables de développement et d'éruption dentaire de la Queen Mary University of London sont téléchargeables gratuitement sur <https://www.qmul.ac.uk/dentistry/atlas/>.

### III.4.b. Le développement dentaire des mammifères non-humains

En fonction de l'espèce, les dents ont un **mode de croissance différent**, qui est étroitement lié à leur structure et au type de régime alimentaire. Le développement dentaire des mammifères non-humains est moins bien connu et plus variable que celui des humains, à plus forte raison pour les spécimens fossiles (Hillson 2005). Le calendrier de développement dentaire était probablement très différent chez les espèces récemment domestiquées par rapport aux espèces actuelles. De plus, W. Brown et collaborateurs (1960) ont montré par exemple que ce calendrier n'est pas le même entre des vaches à viande et des vaches laitières modernes. Il existe également une variabilité entre les sexes de certains grands mammifères (Hillson 2005). Nous présentons ici les grandes lignes du développement dentaire des mammifères non humains analysés dans ce travail : les suidés, les bovidés et les cervidés.

Les suidés, **brachyodontes** comme les humains, ont des dents à couronne basse et à **croissance limitée** (excepté leurs canines ou défenses, chez les mâles, qui sont hypsodontes). Leur émail est épais et s'use lentement (Prat 1970-1975). Leurs molaires sont bunodontes (tubercules arrondis) en rapport avec leur régime omnivore (Figure C2. 9). Globalement, la minéralisation de leur émail dentaire débute avant la naissance et se termine vers 2-3 mois pour la première molaire permanente (M1), se poursuit de 1 à 8 mois environ pour la deuxième molaire, la troisième et la quatrième prémolaires (M2, P3 et P4), et de 3 à 13 mois pour la troisième molaire (M3 ; Hillson 2005; voir aussi Bentley 2006). Ce calendrier est plus tardif pour les espèces sauvages (Hillson 2005).

À l'inverse, les dents jugales des ruminants – bovidés (bœuf, mouton, chèvre) et cervidés notamment – sont **hypsodontes** : elles ont une couronne haute et une **croissance prolongée** qui compensent une usure importante liée à la mastication des végétaux, très fibreux. Elles sont également sélénodontes (en forme de croissant de lune) en rapport avec leur régime herbivore (Figure C2. 9). Leur croissance se fait elle aussi des cuspides au collet, et de la JED à l'extérieur, mais il existe un **remaniement continu en partie occlusale** au fur et à mesure que les dents s'usent (Hillson 2005). L'estimation de l'âge des bovidés et cervidés se fait notamment à partir de la **mesure de la hauteur des dents** et de leur **degré d'attrition**. En effet, « la couronne atteint son maximum de hauteur au moment de l'éruption et les

racines commencent à apparaître au moment où la molaire parvient au niveau occlusal. Au fur et à mesure que son extrémité libre s'use, la dent est expulsée insensiblement hors de l'alvéole. La hauteur de la couronne diminue avec l'âge alors que les racines, qui se forment tard, prennent plus d'importance » (Prat 1970-1975).

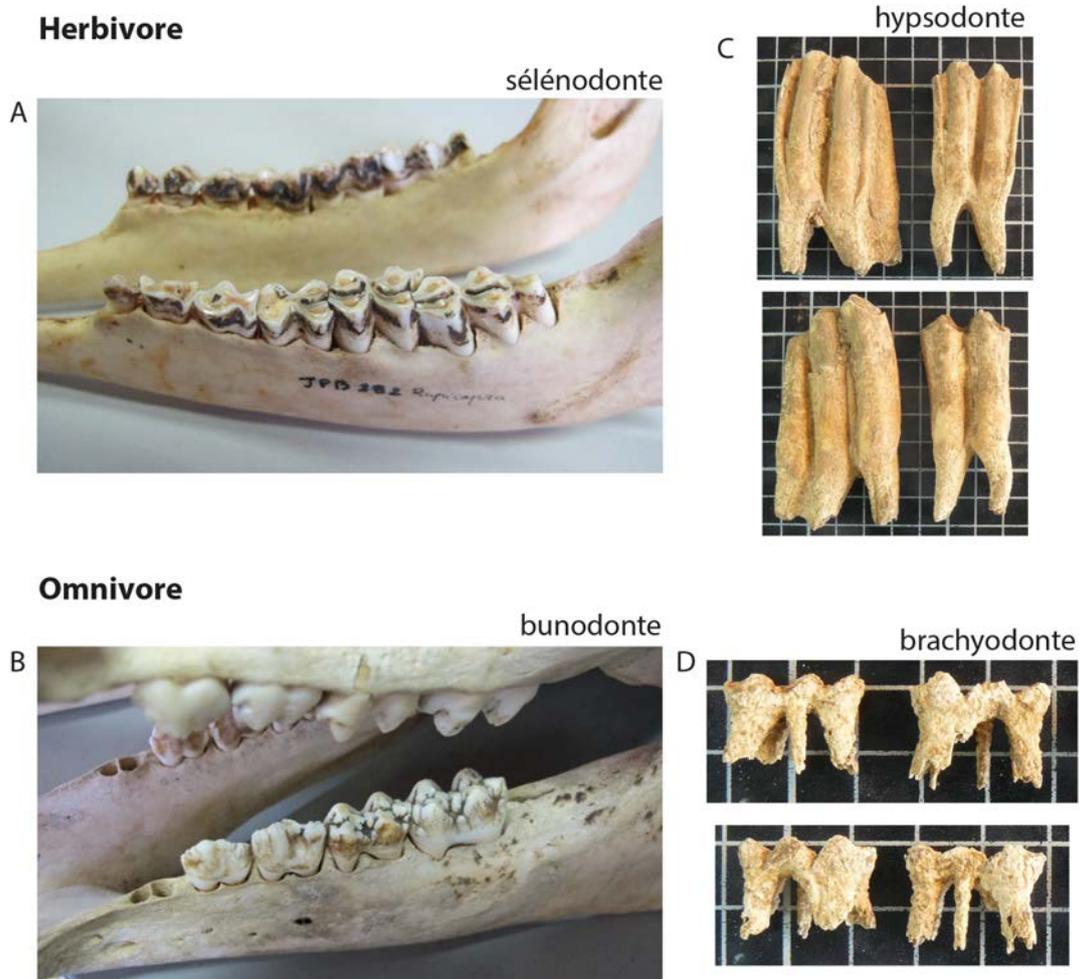


Figure C2. 9 : Différence de morphologie entre des dents d'herbivores (bovidé) à croissance prolongée et d'omnivores (suidé) à croissance limitée. A. denture de capriné actuel (*Rupicapra sp.*), B. denture de suidé actuel (*Sus scrofa*), C. dent de boviné néolithique (*Bos taurus*), D. dents de suidés néolithiques (*Sus scrofa*). Clichés L. Rey.

Chez les **caprinés** (chèvre et mouton), la couronne de la M1 commence à se former in utero et se termine autour de 9 mois (la croissance des racines commence dès l'occlusion complète de la dent). La M2 commence la formation de sa couronne peu de temps après la naissance et l'achève vers 1 an, lorsque les racines commencent leur formation, qui s'achève vers 5 ou 6 ans. La couronne de la M3, ainsi que des prémolaires (P), se forme entre 1 et 2 ans (les racines commencent alors à se former, lorsque la dent sort en bouche).

Pour les **bovinés**, la minéralisation de la M1 débute in utero et se termine vers 2-3 mois ; celle de la M2 s'étend d'environ 1 à 12-13 mois ; celle de la M3 commence vers 9-10 mois et s'achève généralement autour de 23-24 mois (Hillson 2005; voir aussi Gerling *et al.* 2017). Par ailleurs, il existe

une différence de minéralisation entre l'**émail interne et externe** des dents de bovinés (Zazzo *et al.* 2005).

### III.4.c. Vitesse de minéralisation et d'incorporation des éléments

De façon générale, on ne connaît pas la **vitesse d'incorporation des éléments** dans l'émail au cours de la phase de minéralisation (Montgomery *et al.* 2010 ; Müller *et al.* 2019 ; Zazzo *et al.* 2005). D'autre part, la minéralisation n'est pas la même entre la formation de la matrice et la maturation : il existe notamment un délai de minéralisation entre les différentes étapes (Balasse 2003 ; Passey et Cerling 2002 ; Suga 1982). Toutefois, une étude récente a montré que l'incorporation du Sr, que l'on peut tracer par ablation laser dans l'émail, est relativement constante dans les dents de bovidés (Lazzerini *et al.* 2021). En revanche, la minéralisation de la dentine est plus homogène car la matrice est majoritairement minéralisée immédiatement après la sécrétion (Balasse 2003).

Quoi qu'il en soit, il est essentiel de bien connaître la durée de la phase de minéralisation et les processus sous-jacents pour interpréter les valeurs isotopiques et élémentaires précisément dans le temps lors d'une étude par micro-échantillonnage ou par ablation laser (voir aussi Murshed 2018 et An *et al.* 2016 pour le processus de minéralisation dans l'os).

## III.5. Les différentes fractions

### III.5.a. Le collagène

Le collagène est la protéine la plus abondante dans les tissus des mammifères. C'est une protéine structurale qui joue un rôle de résistance mécanique à l'étirement (Fratzl 2008 ; Shoulders et Raines 2009). Il constitue la plus grande partie de la fraction organique de l'os et des dents et il est composé de C, H, O, N et en moindre quantité S. Il est constitué de **microfibrilles** regroupées en fibres non élastiques (Figure C2. 10). Chaque microfibrille est formée de 3 chaînes d'acides aminés (chaînes  $\alpha$ ) assemblées en hélice. Il existe treize types de collagènes ayant une composition différente en acides aminés. Celui de la matrice osseuse et dentinaire est le collagène de **type I** (Ambrose 1993 ; Eastoe 1955 ; Grupe et Turban-Just 1998 ; Turban-Just et Schramm 1998). Sa composition en acides aminés est donnée dans le Tableau C2. 3. Comme toutes les protéines, il se renouvelle en permanence à partir des acides aminés issus des protéines de l'alimentation et de celles de l'organisme.

L'étude du collagène apporte donc une information sur la **part protéique** de l'alimentation majoritairement (mais pas seulement). Si la mesure isotopique du collagène global englobe la composition de tous les acides aminés, essentiels et non essentiels, l'étude individuelle de **chaque acide aminé** permet d'accéder à un niveau plus précis de compréhension de l'alimentation (cf. V).

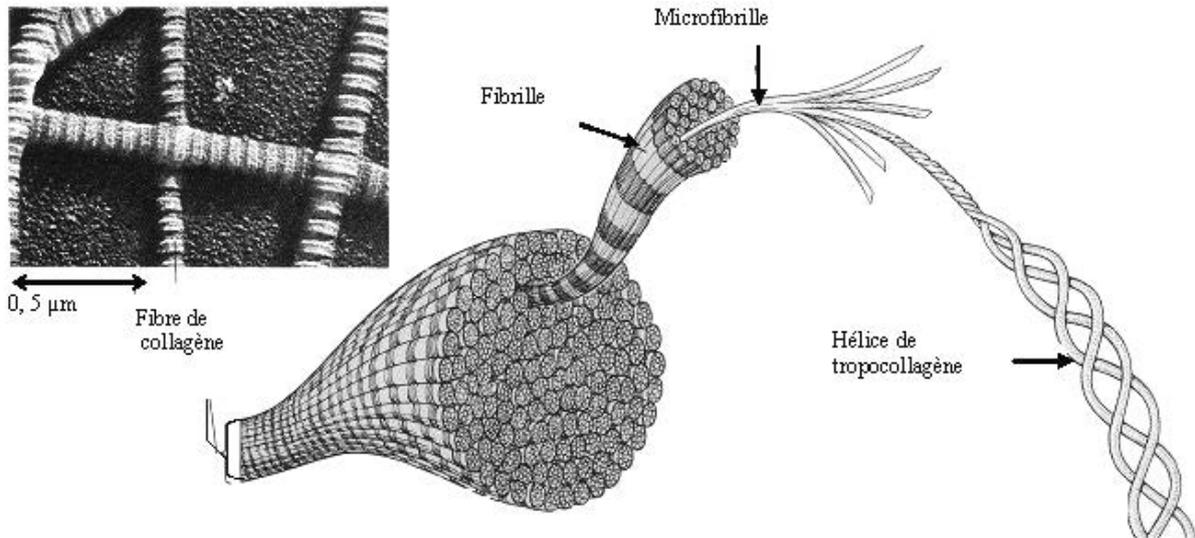


Figure C2. 10 : Représentation schématique d'une fibre de collagène. D'après Campbell 1995.

acide aminé		Ambrose, 1993				Bocherens et al, 2011		Eastoe, 1955		
		% d'AA dans le collagène	atomes de C par AA	% de C dans le collagène	atomes de N par AA	% de N dans le collagène	atomes de S par AA	% de S dans le collagène	% d'AA dans le collagène	% de N dans le collagène
acide aspartique	Asp	4.4	4	4.61	1	3.69			6.7	3.84
hydroxyproline*	Hyp	8.9	5	11.65	1	7.47			14.1	8.2
threonine (e)	Thr	1.7	4	1.78	1	1.43			2.35	1.5
serine	Ser	3.6	3	2.83	1	3.02			4.06	2.94
acide glutamique	Glu	7.4	5	9.69	1	6.21			11.4	5.9
proline	Pro	13	5	17.02	1	10.91			15.3	10.1
glycine	Gly	33.4	2	17.49	1	28.22			25.8	26.2
alanine	Ala	11.2	3	8.8	1	9.4			10.9	9.3
valine (e)	Val	2.5	5	3.27	1	2.1			2.97	1.93
methionine (e)	Met	0.5	5	0.65	1	0.42	1	0.14-0.33	0.84	0.43
isoleucine (e)	Ile	0.9	6	1.41	1	0.76			1.88	1.09
leucine (e)	Leu	2.3	6	3.61	1	1.93			3.6	2.09
tyrosine	Tyr	0.3	9	0.71	1	0.25			0.86	0.36
phenylalanine (e)	Phe	1.2	9	2.83	1	1.01			2.49	1.15
hydroxylysine*	Hyl	0.5	6	0.79	2	0.84			0.62	0.58
lysine (e)	Lys	2.7	6	4.24	2	4.53			4.4	4.59
histidine (e)	His	0.5	6	0.79	3	1.26			0.96	1.41
arginine	Arg	5	6	7.85	4	16.78			8.8	15.4
somme AA essentiels		12.3	47	18.58	11	13.44	1	0.14-0.33	19.49	14.19
somme AA		100	95	100.02	25	100.23	1	0.14-0.33	118.03	97.01

Tableau C2. 3 : Composition en acides aminées du collagène des mammifères. Sur les 21 AA, le collagène ne contient pas de cystéine, sélénocystéine ni tryptophane. (e) = AA essentiel. \*l'hydroxyproline et l'hydroxylysine sont les formes hydrolysées de la proline et de la lysine, de même que l'acide glutamique et l'acide aspartique sont les formes hydrolysées de la glutamine (Gln) et de l'asparagine (Asn), non présentées dans ce tableau. D'après Ambrose 1993, Bocherens *et al*, 2011 et Eastoe 1955.

### III.5.b. L'apatite

L'apatite ou bioapatite constitue la fraction minérale des os et des dents. C'est une forme d'hydroxyapatite, un phosphate de calcium comprenant un groupement hydroxyle, de formule

générale  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ . Elle représente le plus grand réservoir de calcium de l'organisme. Étant isomorphe (sa composition est variable), elle peut subir un **remplacement de ses ions** par d'autres. Notamment, les ions  $\text{PO}_4^{3-}$  sont souvent substitués par des **carbonates**  $\text{CO}_3^{2-}$  (Posner 1987 ; Rey *et al.* 2009 ; Zazzo 2001). C'est pourquoi on parle d'hydroxylapatite carbonatée. Les ions  $\text{OH}^-$  peuvent également être substitués par des ions  $\text{O}^{2-}$ ,  $\text{S}^{2-}$  ou  $\text{F}^-$ , ou encore les ions  $\text{Ca}^{2+}$  par les ions  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  ou  $\text{Mn}^{2+}$  entre autres (Elliott *et al.* 2002 ; LeGeros 1991 ; LeGeros 1981 ; Nielsen-Marsh *et al.* 2000). La bioapatite peut ainsi inclure dans sa composition de **nombreux éléments** du tableau périodique à l'état de trace, comme le baryum (Ba) ou le strontium (Sr). Les substitutions ioniques se font dans des proportions variables entre les tissus. Par exemple, les concentrations en **ions  $\text{Sr}^{2+}$**  sont plus élevées dans l'os que dans l'émail (Elliott et Grime 1993 ; Schweissing et Grupe 2003 ; cf. Chap8.I). Ces substitutions confèrent des propriétés physico-chimiques différentes à ces tissus. Par exemple, l'incorporation d'ions  $\text{CO}_3^{2-}$  a tendance à déstabiliser leur structure cristalline et augmenter leur porosité et leur solubilité (LeGeros 1981 ; Yao *et al.* 2009). L'os étant plus riche en carbonate que l'émail, il est donc moins stable que ce-dernier.

L'hydroxyapatite peut devenir particulièrement instable après la mort et subir des modifications chimiques (comme par exemple la substitution des ions  $\text{Ca}^{2+}$  par  $\text{Sr}^{2+}$ ) avec ou sans changements structurels fondamentaux (Nielsen-Marsh *et al.* 2000 ; Zazzo *et al.* 2004). Toutefois, l'apatite est de façon générale moins sensible à la diagénèse que le collagène et reste plus souvent mieux conservée dans son intégrité (e.g. Collins *et al.* 2002). Les **cristaux d'apatite de l'émail** sont plus gros et plus durs que dans la dentine et l'os, ce qui rend l'émail mieux cristallisé et **plus résistant** à la diagénèse que les autres tissus (Hollund *et al.* 2014 ; Lee-Thorp 2008 ; LeGeros 1991). L'émail est donc souvent préférentiellement utilisé pour mesurer la composition isotopique et élémentaire de spécimens archéologiques. Notons par ailleurs que la diagénèse est moins prégnante au niveau de la jonction émail-dentine (EDJ) qu'à la surface des dents (e.g. Tacaïl *et al.* 2017).

À la différence du collagène, l'apatite reflète **l'ensemble des fractions biochimiques** de l'alimentation : protéines, lipides et glucides (ou carbohydrates ; Ambrose et Norr 1993). Elle permet d'analyser des éléments qui ne sont pas présents dans le collagène (Sr, Ca, Ba, Cu, Mn, etc.) ou de façon instable (O). À l'inverse, l'apatite ne contient pas d'azote (N) ni suffisamment de soufre (S) qui ne peuvent être mesurés que dans le collagène. Le C, lui, se mesure aussi bien dans le collagène que dans l'apatite, représentant d'une part la fraction protéique de l'alimentation et d'autre part l'alimentation globale (respectivement). La comparaison entre les mesures réalisées dans l'une ou l'autre de ces fractions permet de répondre à des questions différentes et complémentaires, puisque l'on ne travaille pas sur les mêmes fractions de l'alimentation (protéique vs totale ; Ambrose et Norr 1993 ; Clementz *et al.* 2009).

### III.6. Synthèse

La Figure C2. 11 synthétise les principales caractéristiques de chaque tissu et de leurs fractions respectives, les principaux paramètres d'enregistrement du signal biochimique et les analyses possibles relatives à chaque phase. Alors que la composition des os reflète un signal moyenné au cours des dernières années de la vie des individus, les dents reflètent le signal enregistré au cours de leur période de formation (qui diffère selon la dent et la section considérée). Par ailleurs, les tissus dentaires et osseux ont des compositions différentes qui, par l'analyse de différents éléments, apportent des informations complémentaires relatives à l'alimentation ou à la mobilité des individus. Le multi-échantillonnage permet, par la comparaison de différents tissus formés à différentes périodes (par exemple un os et une dent, ou différentes dents) de tracer différents moments de vie depuis l'enfance jusqu'à la mort d'un individu. Le micro-échantillonnage dentaire et à plus forte raison l'ablation laser permettent de suivre à une échelle plus fine l'évolution de l'alimentation au cours de la période de croissance d'une dent.

croissance	incrémentielle, pas (ou peu) de remaniement	remaniement permanent
signal	 enfance (période de formation dentaire)	 dernières années de vie
précision	possible traçage des modifications dans le temps (micro-échantillonnage, ablation laser)	moyenne de plusieurs années
tissu		
%	<3%	30%
fraction organique	composition	amélogénine, énaméline
	alimentation	collagène (et autres protéines)
	analyses	part protéique rapports isotopiques : C, N, S
%	97%	70%
fraction minérale	composition	apatite ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ variable)
	alimentation	alimentation totale (protéines, lipides, glucides)
	analyses	rapports isotopiques et éléments trace : C, O, Sr, Ca, Ba, Cu, Mn, Zn, etc.

Figure C2. 11 : Tableau récapitulatif des principales caractéristiques d'intérêt des tissus osseux et dentaires pour l'analyse biogéochimique menée dans ce travail.

## IV. Les isotopes « traditionnels » (C, N et S) dans le collagène

---

### IV.1. Principe de l'enregistrement dans la chaîne alimentaire

À la base de la chaîne alimentaire (ou chaîne trophique), les **plantes assimilent** le carbone (C), l'azote (N) et le soufre (S) à partir du CO<sub>2</sub> et de l'N<sub>2</sub> atmosphérique, ainsi que des nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et des sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) du sol. Ces éléments sont absorbés avec des **teneurs isotopiques** qui dépendent des caractéristiques des plantes, de leur espèce et de l'environnement (voir par exemple Bocherens et Mariotti 2002 et Nehlich 2015 pour une synthèse). Lorsque les plantes (producteurs primaires) sont consommées par les herbivores (consommateurs primaires), puis les herbivores par les carnivores (consommateurs secondaires), etc, ces teneurs isotopiques **se répercutent** tout au long de la chaîne alimentaire, avec un **enrichissement** en isotope lourd entre chaque niveau trophique (*i.e.* entre chaque maillon de la chaîne ; *ibid.*). Cet enrichissement est propre à chaque élément (cf. *infra*). Un exemple théorique est donné en Figure C2. 12. Les **consommateurs enregistrent** ainsi dans leur organisme des valeurs isotopiques caractéristiques de leur environnement et de leur position au sein de la chaîne (niveau trophique). Au cours de l'assimilation des éléments par les **différents tissus** de l'organisme, un autre fractionnement isotopique peut se produire, induisant des valeurs isotopiques propres à chaque tissu considéré. En **mesurant** les teneurs isotopiques dans un tissu d'un individu (par exemple le collagène osseux), il est donc possible de replacer cet individu au sein de la chaîne trophique considérée. Selon l'expression consacrée : “*You are what you eat (plus a few per mil).*”

NB : Pour plus d'informations sur les isotopes stables, voir aussi les articles de synthèse suivants : Ambrose et Krigbawm 2003 ; Hedges *et al.* 2006 ; Katzenberg 2007 ; Lee-Thorp 2008 ; Richards 2019 ; Schoeninger 1995 ; Schoeninger et Moore 1992

### IV.2. Le cas du carbone (C)

#### IV.2.a. Le carbone chez les végétaux

Les **plantes terrestres** tirent leur source de carbone du CO<sub>2</sub> atmosphérique et le fixent grâce à la photosynthèse. L'énergie lumineuse captée par les feuilles leur permet de transformer le CO<sub>2</sub> et l'eau (H<sub>2</sub>O) absorbée par les racines en glucides (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) tout en libérant du dioxygène (O<sub>2</sub>). Ce processus rend disponible le carbone, sous forme de sucres (glucides), pour les organismes non photosynthétiques des maillons supérieurs de la chaîne alimentaire (consommateurs primaires, secondaires, etc.). Selon le **type de photosynthèse** utilisé (C3, C4 ou CAM), propre à chaque espèce, le fractionnement isotopique varie et la valeur du δ<sup>13</sup>C de la plante sera différente (Figure C2. 12 ; Deines 1980 ; O'Leary 1988 ; Park et Epstein 1960 ; Smith et Epstein 1971). Alors que tous les arbres

utilisent une photosynthèse en C3, le type photosynthétique des plantes herbacées est variable. Toutefois, sous nos latitudes au Néolithique, ne sont cultivées ou ne poussent à l'état sauvage que des **plantes en C3** (e.g. blé, orge, pois, herbes sauvages). Pour ces plantes de milieux tempérés (ou froid), le  $\delta^{13}\text{C}$  varie entre -34 et -22‰ en fonction des environnements (DeNiro et Epstein 1978 ; Smith et Epstein 1971, cf. *infra*). Les plantes « **tropicales** » en C4, comme le millet, le maïs, le sorgho ou la canne à sucre, ne sont pas attestées en France avant l'Age du Bronze pour le millet (Goude *et al.* 2015 ; Marinval 1992), voire bien plus tard pour le maïs et le sorgho. Leur  $\delta^{13}\text{C}$  se situe globalement entre -19 et -6‰ (Smith et Epstein 1971). Les **plantes CAM** (Métabolisme Acide Crassulacéen), comme l'ananas, le figuier de Barbarie et autres succulentes, utilisent alternativement la photosynthèse en C3 et en C4, leur conférant des valeurs intermédiaires (Deines 1980 ; Farquhar *et al.* 1989 ; O'Leary 1981). Au Néolithique, aucune plante CAM n'a encore été introduite en Europe de l'Ouest.

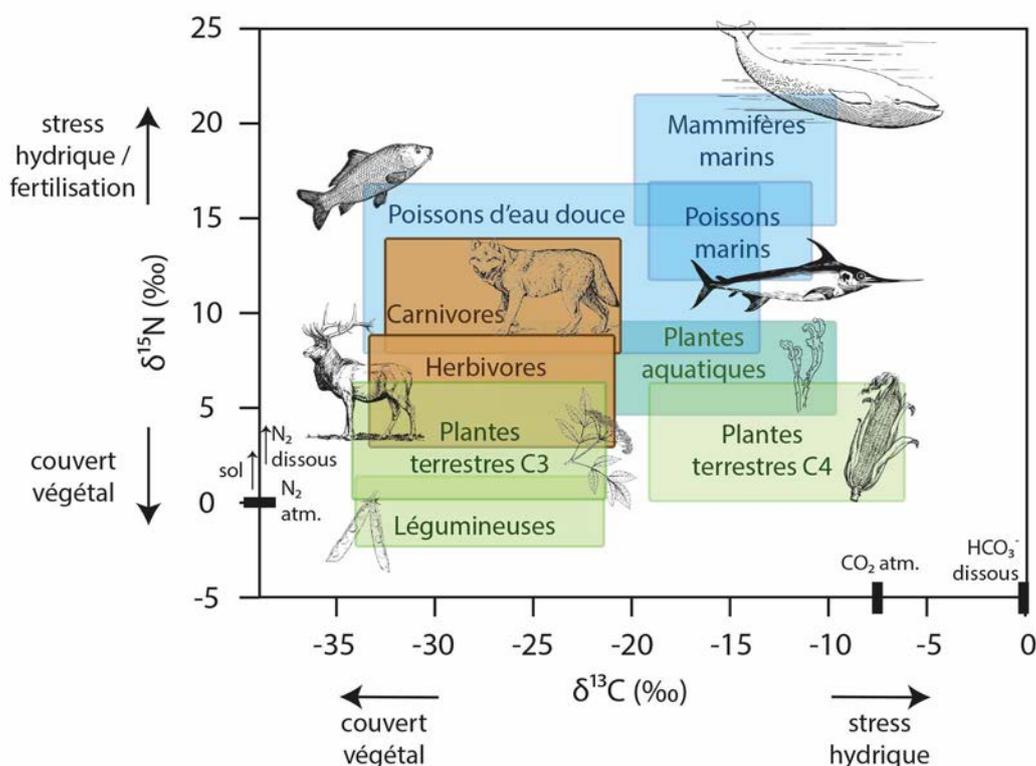


Figure C2. 12 : Schéma théorique de la variabilité isotopique du carbone et de l'azote des ressources alimentaires.

En **milieu marin**, les végétaux utilisent principalement le bicarbonate dissout ( $\text{HCO}_3^-$ ) ayant un  $\delta^{13}\text{C}$  de 0‰, supérieur au  $\delta^{13}\text{C}$  du  $\text{CO}_2$  atmosphérique qui est actuellement de -7,7‰ (DeNiro 1987 ; Van der Merwe 1989). Il en résulte des valeurs distinctes entre les plantes en C3 terrestres et marines, ces dernières ayant des valeurs comprises entre -18 et -10‰ (Chisholm *et al.* 1982 ; Schoeninger et DeNiro 1984). En revanche dans les **écosystèmes d'eau douce**, le carbone peut provenir de différentes sources : des carbonates et bicarbonates provenant de la dissolution des roches calcaires et de la dégradation des matières organiques, ainsi que du  $\text{CO}_2$  atmosphérique dissout à la surface de l'eau. Selon les milieux et les quantités relatives de ces différentes sources, le  $\delta^{13}\text{C}$  des plantes est par

conséquent **très variable**, bien que généralement plus négatif qu'en milieu terrestre (Dufour *et al.* 1999 ; Katzenberg et Weber 1999). La taille des lacs, les conditions locales influent donc directement sur les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$ . Une bonne connaissance du milieu et une mesure directe de la faune et de la flore sont nécessaires pour identifier précisément la gamme de valeurs du  $\delta^{13}\text{C}$  local à la base de la chaîne alimentaire (cf. IV.5.c).

- *Des différences entre parties anatomiques*

Des différences isotopiques peuvent être observées entre les **différentes parties** d'un végétal (feuilles, tige, racine, fruits, graines) et entre les **fractions** biochimiques (Ambrose et Norr 1993). Par exemple, les lipides (graisses végétales) sont appauvris en  $^{13}\text{C}$  et les protéines végétales sont enrichies en  $^{13}\text{C}$  par rapport à la plante entière (Park et Epstein 1960). D'autre part, les protéines des feuilles sont appauvries en  $^{13}\text{C}$  par rapport aux protéines des graines (Deines 1980 ; Tieszen 1991 ; Van der Merwe 1989).

- *Variations environnementales et climatiques*

Les **conditions environnementales et climatiques** ont un impact sur le  $\delta^{13}\text{C}$  des plantes. En effet, la température, l'éclairement, l'hygrométrie, la salinité des sols ou encore l'altitude et la pression atmosphérique (Ambrose 1991, 1993 ; Farquhar *et al.* 1989) jouent sur l'ouverture des stomates et le passage du  $\text{CO}_2$  dans les feuilles, induisant un fractionnement isotopique variable. Par exemple, la variation de la **température et de l'éclairement**, notamment avec les saisons, peuvent faire varier le  $\delta^{13}\text{C}$  jusqu'à 3-4‰ (Heaton 1999 ; Van Klinken *et al.* 2000). D'autre part, une température élevée et un taux hygrométrique bas en période de sécheresse vont causer un **stress hydrique** à la plante induisant un  $\delta^{13}\text{C}$  plus élevé, pouvant aller jusqu'à une augmentation de 3‰ (Ambrose 1993 ; Heaton 1999 ; Van Klinken *et al.* 2000). L'analyse isotopique du carbone dans les plantes cultivées permet, de ce fait, d'évaluer les pratiques agricoles de **gestion de l'eau** dans les périodes anciennes (Ferrio *et al.* 2005 ; Flohr *et al.* 2019 ; Varalli *et al.* 2021 ; Wallace *et al.* 2013).

Par ailleurs, en sous-bois, on observe un « **effet canopée** » : les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  des végétaux diminuent dans les parties basses de la forêt, à mesure que la densité de la végétation augmente (Heaton 1999). D'une part, l'intensité lumineuse y est réduite, induisant la fermeture des stomates, d'autre part, le  $\text{CO}_2$  est appauvri en  $^{13}\text{C}$  à cause de la réutilisation du  $\text{CO}_2$  respiré et de la décomposition organique de la litière et de l'humus au niveau du sol. Ainsi, sous nos latitudes, de faibles valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  pourraient s'expliquer par la fréquentation de milieux couverts par certains herbivores (comme le chevreuil par exemple) ou la consommation de végétaux de sous-bois (e.g. Balasse 1999 ; Drucker *et al.* 2003 ; Rodiere *et al.* 1996).

Comme certains paramètres environnementaux suivent un **gradient géographique**, il en découle des variations spatiales du  $\delta^{13}\text{C}$ , avec la latitude et au cours des saisons (Van Klinken *et al.* 2000 ; Van

Klinken *et al.* 1994). Ces variations se répercutent le long de la chaîne alimentaire et doivent être prise en considération lors de l'interprétation des résultats (Goude et Fontugne 2016).

- *La pollution atmosphérique moderne*

Depuis la **révolution industrielle**, le  $\delta^{13}\text{C}$  du  $\text{CO}_2$  atmosphérique a diminué d'au moins 1,5‰ (de -6,5‰ en 1744 à -8‰ en 1990) à cause du rejet dans l'atmosphère de  $\text{CO}_2$  issu de combustibles fossiles (enrichis en  $^{12}\text{C}$ ) lié au développement des activités humaines (Francey *et al.* 1999 ; Marino et McElroy 1991 ; McCarroll et Loader 2006). Pour compenser cet « effet fuel fossile », il est donc nécessaire d'appliquer une correction lors de la comparaison avec les valeurs isotopiques de végétaux actuels (voir Graven *et al.* 2019 et Rezaie *et al.* 2018).

#### IV.2.b. Transfert isotopique du carbone : de l'environnement au consommateur

- *Enrichissement négligeable entre l'alimentation et le consommateur*

Ces différences de composition isotopique en carbone se **transmettent ensuite le long de la chaîne alimentaire** avec un **enrichissement** en  $^{13}\text{C}$  de 0 à 2‰ entre chaque niveau trophique (cf. Figure C2. 13, p. 112 ; Bocherens et Drucker 2003 ; DeNiro et Epstein 1978 ; Schoeninger et DeNiro 1984). Cet enrichissement est communément appelé facteur d'enrichissement trophique ou **TEF** pour « Trophic Enrichment Factor ». Pour le carbone, le TEF généralement admis est de **1‰** en moyenne (parfois 0,5‰), ce qui est négligeable par rapport à la gamme de variabilité des valeurs isotopiques entre différents organismes (e.g. Arneson et MacAvoy 2005 ; McCutchan *et al.* 2003). Cet enrichissement serait dû au fractionnement ayant lieu lors de la synthèse des acides aminés (Macko *et al.* 1983). Ce fractionnement est variable selon les espèces, les tissus analysés et les fractions biochimiques (Ambrose 1993).

- *Différence entre les tissus (et entre leurs composants)*

Des expériences en nutrition contrôlée ont montré que les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  ne sont pas les mêmes entre les différents tissus du consommateur (Ambrose et Norr 1993 ; Bocherens et Mariotti 2002 ; DeNiro et Epstein 1978). Ces fractionnements sont de plus légèrement variables d'une espèce à l'autre et selon le type d'alimentation (cf. IV.2.b). Par exemple **chez la souris**, les travaux de MJ. DeNiro et S. Epstein (1978) ont montré que le cerveau et les poils ont généralement des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  supérieures de 1‰ à l'alimentation, alors que d'autres organes tels que les reins, le foie, les poumons, les muscles ou la rate ont des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  autour de 2‰ plus basses que celles de l'alimentation, avec une variabilité selon les tissus et le régime alimentaire procuré. Dans cette étude, la différence mesurée entre l'alimentation et le collagène des souris varie de 2,8 à 3,7‰ selon l'alimentation. **Chez l'humain**, la différence de  $\delta^{13}\text{C}$  entre l'alimentation et les tissus peut varier de 1,8 à 6,1‰, selon les tissus (Vogel et van der Merwe 1977 ; Yoshinaga *et al.* 1996).

D'une façon générale, la différence entre l'alimentation et le **collagène** varie de -1,0 à 6,1‰ selon les études et les espèces (Ambrose 1993 ; Ambrose et Norr 1993 ; Tieszen et Fagre 1993 ; Van der Merwe 1989 ; Vogel et van der Merwe 1977). Cette différence est plus importante chez les grands mammifères (environ 5‰) que chez les petits (environ 2‰ ; Ambrose 1993 ; Ambrose et Norr 1993). Par ailleurs, le  $\delta^{13}\text{C}$  du **collagène** reflète essentiellement celui des protéines de l'alimentation (cf. IV.2.b). Ainsi, pour les **humains et autres grands mammifères**, on considère généralement un **enrichissement moyen en  $^{13}\text{C}$  entre les protéines de l'alimentation et le collagène du consommateur de 5‰** (Ambrose et Norr 1993 ; Fernandes *et al.* 2015). La différence entre le corps entier d'un individu et son collagène étant de 4‰ (et la différence entre l'alimentation et le corps entier étant d'environ 1‰). En pratique, on considère donc une différence moyenne de 5‰ entre les plantes et le collagène des herbivores, puis une différence d'environ 1‰ entre le collagène des herbivores et celui des carnivores (TEF  $\approx$  1‰ ; Figure C2. 13).

Bien que la mesure du  $\delta^{13}\text{C}$  dans l'**apatite** ne soit pas abordée dans ce travail, il est à noter que la différence enregistrée entre l'alimentation et l'apatite du consommateur est généralement comprise entre 8 et 9‰ (Ambrose et Norr 1993 ; Tieszen et Fagre 1993, cf. Bocherens 1999 ; Fernandes *et al.* 2015). De plus, alors que le collagène reflète essentiellement la part protéique de l'alimentation, les valeurs de la bioapatite sont directement corrélées à la nourriture globale, c'est-à-dire à toutes les fractions biochimiques (protéines, lipides et glucides ; Ambrose 1993). La mesure conjointe du  $\delta^{13}\text{C}$  dans le collagène et l'apatite permet d'évaluer la différence entre la part protéique de l'alimentation et la part globale de toutes les fractions. Cette différence entre le collagène et l'apatite permet d'apporter des informations complémentaires sur l'alimentation des populations du passé, notamment dans le cas de régimes particuliers où les différentes fractions biochimiques (protéines, lipides, glucides) proviennent de différentes sources alimentaires, dont les  $\delta^{13}\text{C}$  sont différents (cf. IV.2.b; Ambrose et Norr 1993 ; Balasse *et al.* 1999 ; Clementz *et al.* 2009). Cela permet entre autre d'évaluer le degré de « carnivorie » (alimentation riche en protéines animales) dans certains cas de régimes mixtes (*ibid.*).

- *Différence entre les fractions biochimiques*

Il existe également des différences isotopiques entre les fractions biochimiques d'un même organisme. Si les **glucides** ont à peu près la même composition isotopique que l'ensemble des trois fractions, les **lipides** sont toujours appauvris en  $^{13}\text{C}$ , d'environ 4‰, et les **protéines** enrichies en  $^{13}\text{C}$ , d'environ 2‰, par rapport à l'ensemble des fractions (DeNiro et Epstein 1978).

- *L'influence de l'alimentation et le routage du carbone*

Si le  $\delta^{13}\text{C}$  du collagène reflète essentiellement celui des protéines de l'alimentation, il peut également refléter celui des autres fractions biochimiques (protéines, lipides, glucides) dans certaines conditions : dans le cas d'une alimentation sous-protéinée notamment, ou lorsque les différentes fractions tirent leur carbone de sources alimentaires de  $\delta^{13}\text{C}$  différent. En effet, le  $\delta^{13}\text{C}$  du collagène peut fluctuer du

fait du **routage alimentaire différencié du carbone des macronutriments** (*i.e.* l'acheminement différencié des macronutriments), c'est-à-dire que les différents macronutriments (glucides, lipides et protéines) apportent une contribution en C différente dans le collagène (Craig *et al.* 2013 ; Fernandes *et al.* 2012 ; Froehle *et al.* 2010 ; Hare *et al.* 1991 ; Howland *et al.* 2003 ; Krueger et Sullivan 1984). Les lipides contiennent 76,8% de C, les glucides 44,4% et les protéines 52,4% (Morrison *et al.* 2000).

Alors que les acides aminés essentiels doivent être obtenus par les protéines de l'alimentation, les acides aminés non essentiels peuvent être resynthétisés à partir de toutes les fractions biochimiques (protéines, glucides et lipides) de l'alimentation. Les **acides aminés essentiels** constituent **12%** du collagène et le C des acides aminés essentiels 18% (cf. Tableau C2. 3, p.101; Ambrose 1993). Dans des conditions nutritionnelles extrêmes, il est donc possible que seulement 18% du carbone provienne des protéines de l'alimentation. Dans le cas d'une alimentation **pauvre en protéines**, une grande partie des acides aminés est synthétisée de novo à partir du recyclage des protéines du corps. Comme l'enrichissement isotopique entre l'alimentation et le collagène est dû principalement à la synthèse des acides aminés, un recyclage des protéines dans le cas d'une alimentation sous-protéinée induirait une **augmentation du  $\delta^{13}\text{C}$  du collagène**. De plus, dans le cas d'une alimentation pauvre en protéines, la proportion de C (et donc le  $\delta^{13}\text{C}$ ) issue des glucides et des lipides sera mieux représentée (Ambrose 1993). En conditions normales (suffisamment de protéines dans l'alimentation), le  $\delta^{13}\text{C}$  du collagène représente majoritairement celui des protéines de l'alimentation (Ambrose et Norr 1993). Il existe toutefois des différences de fractionnement selon le régime alimentaire herbivore, omnivore ou carnivore dû à l'utilisation différentielle des acides aminés pour la synthèse des protéines (Krueger et Sullivan 1984).

Par ailleurs, si le  **$\delta^{13}\text{C}$  des protéines est significativement différent du  $\delta^{13}\text{C}$  de l'alimentation totale**, le  $\delta^{13}\text{C}$  du collagène, reflétant le  $\delta^{13}\text{C}$  des protéines alimentaires, sera également différent du  $\delta^{13}\text{C}$  de l'alimentation globale (Ambrose 1993). Autrement dit, si les protéines ont un  $\delta^{13}\text{C}$  différent de celui des autres fractions (par exemple lors de la consommation de protéines marines ou en C4 associées à des lipides et glucides en C3 ou inversement), alors la différence entre le collagène et la nourriture sera différente des 5‰ généralement observés (Ambrose et Norr 1993). Dans ce genre de situation, la différence en  $\delta^{13}\text{C}$  entre le collagène et l'apatite peut apporter des informations complémentaires sur le régime alimentaire (*ibid.*). Si cette situation extrême est rare dans la nature et n'a été observée qu'en conditions de nutrition contrôlée expérimentalement (Ambrose et Norr 1993), des situations intermédiaires peuvent se produire dans le cas de régimes mixtes avec des sources alimentaires variées. On peut citer le cas des végétaux en C4, riches en glucides, et de viande en C3, riche en lipides et protéines qui se compensent à peu près. Une brève synthèse en français sur les modèles de routage du carbone est disponible dans la thèse de K. Salesse (2015, p77-80).

#### IV.2.c. Le traçage du $\delta^{13}\text{C}$ dans le collagène

La mesure isotopique du carbone dans le collagène permet de replacer un individu dans sa chaîne trophique et de reconstituer l'environnement dans lequel il a puisé ses protéines. Elle permet en premier lieu de distinguer entre la consommation de **plantes en C3 ou en C4**, ou encore entre les ressources **terrestres et aquatiques** (en combinaison avec l'azote ; e.g. Bocherens et Mariotti 2002). La **couverture du milieu** (plaine vs forêt) ou le **stress hydrique** sont également détectables par l'analyse du  $\delta^{13}\text{C}$  (e.g. Drucker *et al.* 2003 ; Ferrio *et al.* 2005 ; Rodiere *et al.* 1996).

NB : On considère généralement une différence moyenne de 5‰ entre les plantes et le collagène de leurs consommateurs (pour une consommation de 100% de plantes) et une différence d'environ 1‰ entre le collagène d'une proie et de son prédateur (TEF  $\approx$  1‰ ; Figure C2. 13).

Lorsque les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  sont équilibrées entre les fractions biochimiques de l'alimentation, le  $\delta^{13}\text{C}$  du collagène reflète sensiblement le  $\delta^{13}\text{C}$  de l'alimentation.

#### IV.2.d. Autres facteurs de modifications des valeurs isotopiques

- *Cuisson et préparations culinaires*

Certaines **préparations culinaires** (cuisson, fermentation) semblent avoir un effet non négligeable sur le  $\delta^{13}\text{C}$  des aliments, mais ces observations ne sont pas généralisées. Par exemple, B. Doering (2019) a récemment mis en évidence une diminution du  $\delta^{13}\text{C}$  (et une augmentation du  $\delta^{15}\text{N}$ ) lors de la **fermentation du poisson**. À l'inverse, une étude sur la préparation de la **bière** (fermentation de l'orge) ne révèle aucun fractionnement au cours des différentes étapes de fabrication (Brooks *et al.* 2002). La **cuisson alcaline du maïs** en Mésio-Amérique (processus appelé nixtamalisation) est un type de préparation particulier. Il s'agit de tremper ou faire bouillir des grains de maïs séchés dans une solution alcaline, souvent de la chaux. Ce processus ne modifie pas les valeurs isotopiques de l'aliment en lui-même mais affecte la digestion et la biodisponibilité des minéraux et nutriments, induisant une augmentation du  $\Delta^{13}\text{C}_{\text{diète-collagène}}$  (Warinner et Tuross 2009).

Différents types de **cuisson** sur le poisson ou la viande pourraient entraîner une variation du  $\delta^{13}\text{C}$  (Royer *et al.* 2017). D. Drucker (2001) a mesuré une différence allant jusqu'à 2,1‰ entre de la **viande ou du poisson crus et cuits**. À l'inverse, une étude de R. Fernandes et collaborateurs (2014) sur la cuisson du poisson n'a pas relevé de différence significative sur les valeurs isotopiques du C (ni de l'N). D'après une étude de SH. Ambrose et collaborateurs (1997), la différence en  $\delta^{13}\text{C}$  entre des **végétaux crus et bouillis** va de 0 à 3,4‰. Les **graines brûlées et carbonisées** voient généralement leur  $\delta^{13}\text{C}$  augmenter de moins d'1‰ (Ambrose 1993 ; Nitsch *et al.* 2015 ; Styring *et al.* 2013).

NB : En ce qui concerne les **ossements**, l'action de bouillir ou rôtir a toutefois peu d'effet sur les valeurs isotopiques du collagène ; ce sont les **chaleurs plus extrêmes** (durée et température) comme **l'incinération ou la crémation**, qui modifient ces valeurs significativement (DeNiro *et al.* 1985 ; Snoeck *et al.* 2016). Les indicateurs de conservation du collagène décèlent cette dégradation (cf. IV.5.b).

- *Effets de la physiologie*

Aucune modification significative de  $\delta^{13}\text{C}$  n'a été démontrée en lien avec **l'âge ou le sexe** d'individus de la même espèce (DeNiro et Schoeninger 1983). Par ailleurs, les processus physiologiques tels qu'un **état pathologique** ou une **grossesse** influencent rarement les ratios isotopiques du carbone (Katzenberg et Lovell 1999). Certaines maladies dégénératives et infectieuses et certaines fractures osseuses pourraient provoquer une modification du  $\delta^{13}\text{C}$  du collagène dû à une perte importante des protéines dans le corps et une augmentation de la synthèse d'acides aminés à partir du carbone des glucides et des lipides (Olsen *et al.* 2014). De telles modifications ne sont généralement mesurables que dans les zones affectées par les lésions pathologiques (*ibid.*).

#### IV.2.e. Impact de la consommation de poisson sur les datations radiocarbone : l'effet réservoir

Dans les **écosystèmes aquatiques**, les organismes sont généralement **appauvris en  $^{14}\text{C}$**  par rapport à l'atmosphère, ce qui leur confère un âge apparemment **plus vieux** que ce qu'ils n'ont réellement (Cook *et al.* 2001). C'est ce qu'on appelle l'« **effet réservoir** » ou « âge réservoir » (on lit parfois « RRE » pour effet réservoir de radiocarbone aquatique). Dans les **océans**, le cycle de circulation du  $\text{CO}_2$  dissout est relativement long, ce qui vieillit le carbone disponible pour les organismes d'environ 400 ans (Alves *et al.* 2018 ; Ascough *et al.* 2005 ; Fischer *et al.* 2007 ; Yoneda *et al.* 2002). En **eau douce** (lacs et rivières), le carbone est principalement issu de la dissolution de carbonates anciens (effet « eau dure »), appauvris en  $^{14}\text{C}$  (Philippsen et Heinemeier 2013). Ainsi, l'effet réservoir est **variable dans le temps et selon les milieux** (Fischer *et al.* 2007 ; Olsen *et al.* 2010 ; Philippsen et Heinemeier 2013). Le carbone vieilli passe ensuite dans la chaîne alimentaire et se retrouve dans les tissus des consommateurs. La consommation significative de ressources aquatiques peut ainsi vieillir les datations de 100 à plusieurs milliers d'années en eau douce, selon la quantité consommée (Cook *et al.* 2001 ; Fontugne *et al.* 2002).

**Estimer la proportion de ressources aquatiques** consommées permet de **corriger les datations** radiocarbone, pourvu que l'effet réservoir soit connu (Cook *et al.* 2001 ; Fischer *et al.* 2007). S'il est facile d'identifier la consommation de ressources marines grâce à un  $\delta^{13}\text{C}$  distinct des valeurs terrestres, il est plus difficile de discerner les ressources d'eau douce. Le  $\delta^{15}\text{N}$  et le  $\delta^{34}\text{S}$  peuvent y contribuer (cf. *infra* ; Meadows *et al.* 2016 ; Nehlich *et al.* 2010 ; Schulting *et al.* 2014).

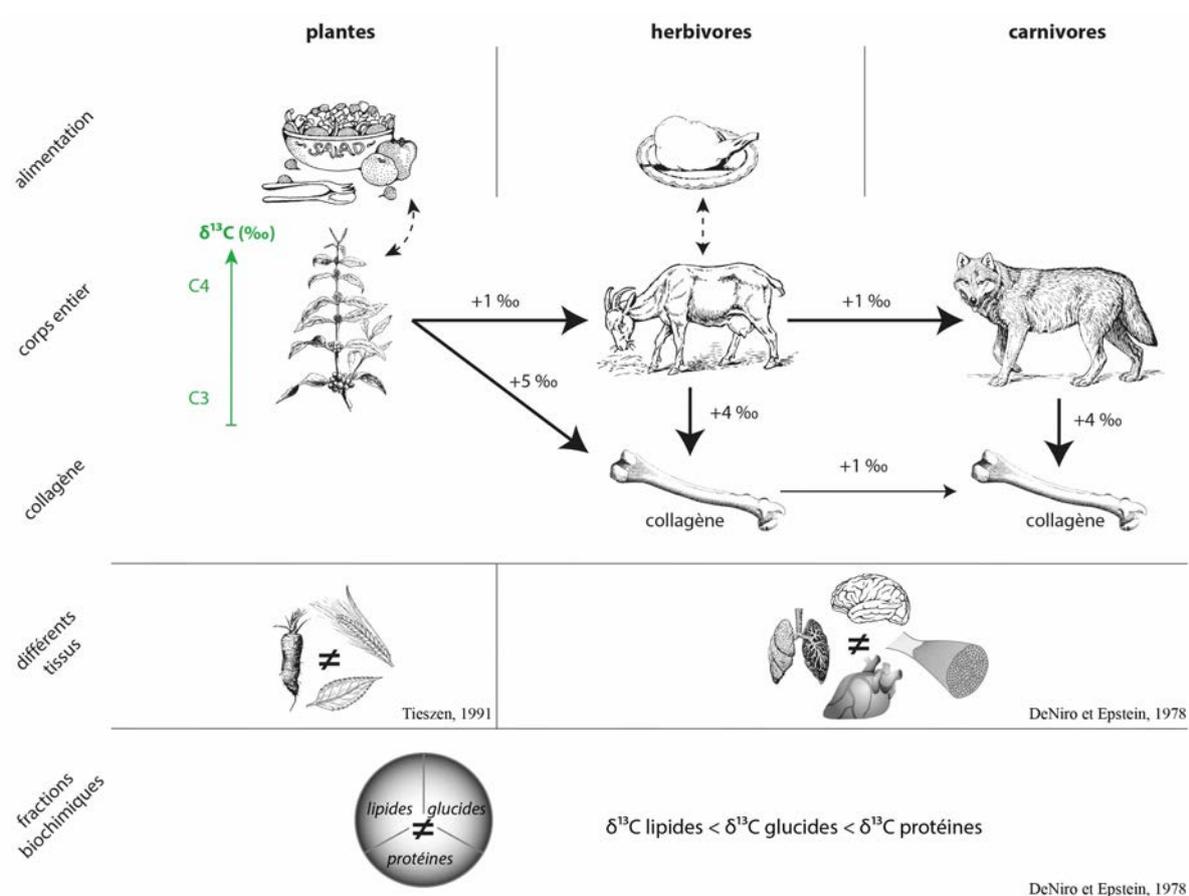


Figure C2. 13 : Schéma théorique du transfert isotopique du carbone dans la chaîne trophique et principales sources de variabilité dans et entre les organismes.

#### IV.2.f. Résumé

##### Mesure du $\delta^{13}\text{C}$ dans le collagène :

La mesure du  $\delta^{13}\text{C}$  dans le collagène permet de reconstituer l'environnement d'un individu et le type de ressources qu'il a consommé : **C3 vs C4** ou **terrestre vs marin/aquatique**.

**L'enrichissement trophique** (TEF) est **négligeable** ( $\approx 1\text{‰}$ ) entre chaque niveau trophique.

La différence de  $\delta^{13}\text{C}$  entre l'alimentation et le collagène du consommateur ( $\Delta^{13}\text{C}_{\text{alimentation-collagène}}$ ) est d'environ **5‰** (à prendre en compte pour la comparaison des plantes avec le collagène des consommateurs).

##### ROUTAGE DU CARBONE à partir des différentes fractions biochimiques (protéines, lipides et glucides) :

- Dans certains cas (régime mixte ou pauvre en protéines), le  $\delta^{13}\text{C}$  du collagène ne reflète pas seulement celui des protéines de l'alimentation mais aussi **les autres fractions biochimiques** et un enrichissement en  $^{13}\text{C}$  peut avoir lieu du fait du recyclage des protéines du corps.

- En conditions nutritionnelles normales, le  $\delta^{13}\text{C}$  du collagène reflète essentiellement le  $\delta^{13}\text{C}$  des **protéines alimentaires**.

- Si le  $\delta^{13}\text{C}$  est équilibré entre les fractions biochimiques des différentes sources alimentaires, alors le  $\delta^{13}\text{C}$  du collagène est similaire à celui de **l'alimentation globale**.

##### Variations du $\delta^{13}\text{C}$ :

Le  $\delta^{13}\text{C}$  des organismes varie avec les **conditions environnementales** (effet canopée, stress hydrique), la **géographie**, la **pollution atmosphérique**, les **parties anatomiques** d'un végétal ou d'un animal, certaines **préparations culinaires** (fermentation, cuisson), la **qualité et la quantité des protéines** alimentaires. Ces variations sont mesurables par l'analyse isotopique.

Pas de modification du  $\delta^{13}\text{C}$  avec **l'âge ou le sexe**. Rares variations dues à un **état pathologique** (certaines fractures ou maladies infectieuses et dégénératives).

**L'effet réservoir** du radiocarbone aquatique vieillit les datations des consommateurs de poisson.

### IV.3. Le cas de l'azote (N)

#### IV.3.a. L'azote chez les végétaux

Les végétaux terrestres utilisent **différentes sources d'azote** en fonction de leur capacité ou non à fixer l'azote atmosphérique ( $N_2$ ). Les **plantes non fixatrices d'azote** (la majorité des végétaux) puisent leur azote dans le sol à partir d'azote organique, sous forme d'ammonium ( $NH_4^+$ ), de nitrates ( $NO_3^-$ ) et de nitrites ( $NO_2^-$ ). Les **plantes fixatrices d'azote**, à savoir les **légumineuses** (fèves, haricots, pois, lentille, luzerne, etc.) et certains lichens, tirent leur azote aussi bien du sol ( $NH_4^+$  et  $NO_3^-$ ) que de l'azote atmosphérique ( $N_2$ ). Elles entretiennent une **symbiose avec des bactéries** du sol qui dégradent la matière organique pour rendre l'azote atmosphérique directement disponible pour les plantes. Comme il n'y a pas de fractionnement isotopique entre la plante et sa source d'azote, les végétaux reflètent directement le  $\delta^{15}N$  de leur source d'azote (Mariotti *et al.* 1980 ; Schoeninger et DeNiro 1984). Les teneurs en  $^{15}N$  de l'atmosphère étant plus faibles que celles du sol (l'activité bactérienne provoque un fractionnement isotopique et augmente le  $\delta^{15}N$  du sol ; Letolle 1980), les légumineuses – qui fixent l'azote atmosphérique – présentent des valeurs inférieures aux plantes non fixatrices d'azote (Virginia et Delwiche 1982).

En **milieu aquatique** (marin et d'eau douce), les cyanobactéries utilisent l' $N_2$  dissout, légèrement enrichi en  $^{15}N$ , et les autres végétaux (non fixateurs d'azote) utilisent des nitrates et de l'ammonium dissout, encore plus enrichis en  $^{15}N$  (DeNiro 1987). Ils présentent donc des valeurs isotopiques ( $\delta^{15}N$ ) généralement supérieures aux végétaux terrestres et qui dépendent des conditions locales (Ambrose 1993 ; DeNiro 1987 ; Schoeninger et DeNiro 1984). Dans les écosystèmes d'eau douce, comme pour le  $\delta^{13}C$ , le  $\delta^{15}N$  est particulièrement variable. Lorsqu'il n'est pas possible de différencier les valeurs aquatiques des valeurs terrestres chez les végétaux, il est souvent possible de les distinguer à des niveaux trophiques supérieurs, les chaînes aquatiques étant généralement plus longues que les chaînes terrestres (France 1994; cf. IV.3.b).

- *Variations environnementales et climatiques*

De nombreux facteurs environnementaux et climatiques influencent les valeurs isotopiques de l'azote dans les plantes (Heaton *et al.* 1986). Par exemple, **la sécheresse et la chaleur** (dans les milieux arides en particulier) provoquent une dénitrification par les bactéries du sol (dégradation des nitrates en  $N_2$  induisant un enrichissement du sol en  $^{15}N$ ) qui **augmente de  $\delta^{15}N$**  des végétaux (Ambrose 1991). À l'inverse, **le froid et l'humidité** induisent une fixation du  $^{14}N$  dans le sol et donc une **baisse du  $\delta^{15}N$**  dans les végétaux (*ibid.*). La **salinité** a également un effet sur le  $\delta^{15}N$  : les plantes de littoral ayant un apport d'azote provenant des embruns marins présentent des **valeurs supérieures** à celles poussant à l'intérieur des terres (Virginia et Delwiche 1982). De plus, on observe un « **effet canopée** » impactant les ratios isotopiques de l'azote en sous-bois. Le  $\delta^{15}N$  est **plus faible en milieu fermé** qu'en milieu

ouvert, à cause d'une intensité supérieure de fixation de l'azote sous la canopée, et ce ratio diminue avec la hauteur des végétaux dans la forêt (Ambrose 1991 ; Heaton *et al.* 1997 ; Mariotti *et al.* 1980 ; Van Klinken *et al.* 2000).

Les **conditions édaphiques** impactent elles-aussi les valeurs isotopiques des plantes (Bocherens et Mariotti 2002). Un **sol acide** (pH<7) diminue le  $\delta^{15}\text{N}$  (Ambrose 1991 ; Mariotti *et al.* 1980 ; Rodiere *et al.* 1996) et un **sol argileux** l'augmente, par rapport à un sol riche en sable ou en limon (Ambrose 1991). Par ailleurs, le  $\delta^{15}\text{N}$  augmente avec la **profondeur du sol** et les végétaux peuvent avoir des valeurs différentes en fonction de la longueur de leurs racines (Ambrose 1991 ; Dawson *et al.* 2002 ; Handley et Raven 1992 ; Mariotti *et al.* 1980). Enfin, la **distribution du sol en nitrates et ammonium** influence également le  $\delta^{15}\text{N}$  (Ambrose 1991 ; Van Klinken *et al.* 2000). On observe par exemple des distinctions entre diverses formes de plantes dans une même formation végétale telles que :  $\delta^{15}\text{N}$  **arbres** <  $\delta^{15}\text{N}$  **buissons** <  $\delta^{15}\text{N}$  **herbes** (Schulze *et al.* 1994 ; Virginia et Delwiche 1982; Figure C2. 14, p. 121). L'ensemble de ces paramètres peut faire varier très localement les valeurs isotopiques des plantes. C'est pourquoi il est nécessaire de bien connaître le milieu et de mesurer directement la gamme de valeur isotopique locale dans les échantillons disponibles. Par ailleurs, G. Goude et M. Fontugne (2016) ont montré, pour la France, que les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  suivent un **gradient latitudinal**, avec un  $\delta^{15}\text{N}$  généralement plus élevé dans le Nord (et un  $\delta^{13}\text{C}$  plus bas) que dans le Sud. Ce phénomène traduit certainement des particularités environnementales régionales (*ibid.*).

- *L'impact de la fertilisation agricole*

Avec l'avènement de l'ère industrielle, le développement des **fertilisants agricoles**, naturels ou de synthèse, a modifié significativement la composition en azote du sol. Le  $\delta^{15}\text{N}$  des végétaux actuels non fixateurs d'azote est donc plus faible aujourd'hui qu'à la préhistoire (DeNiro et Epstein 1981). Mais la fertilisation, intensive ou non, ne date pas d'hier. Les **premiers indices** d'utilisation de fumier organique sont attestés en Europe de l'Ouest depuis le **Néolithique** avec l'apparition de l'agriculture : des mesures de  $\delta^{15}\text{N}$  plus élevées dans certaines graines carbonisées indiquent que les cultures céréalières étaient fertilisées par l'apport d'excréments animaux enrichis en  $^{15}\text{N}$  (Bogaard *et al.* 2007 ; Fraser *et al.* 2011 ; Kanstrup *et al.* 2012 ; Oelze *et al.* 2011). Par extension, certains animaux domestiques présentant un  $\delta^{15}\text{N}$  particulièrement élevé ont pu être nourris avec ce fourrage fertilisé (Oelze *et al.* 2011). À partir de l'âge du Bronze, ces pratiques s'intensifient (e.g. Varalli *et al.* 2021).

### IV.3.b. Transfert isotopique de l'azote : de l'environnement au consommateur

- *Enrichissement entre l'alimentation et le consommateur : l'effet trophique*

Les signatures isotopiques de l'azote **se répercutent** le long de la chaîne alimentaire, comme le carbone, mais cette fois avec un **enrichissement** supérieur, généralement compris entre **3 et 5%**, entre chaque maillon de la chaîne. On parle d'« **effet trophique** » (Bocherens et Drucker 2003 ; DeNiro et

Epstein 1981 ; Hedges et Reynard 2007 ; Minagawa et Wada 1984 ; Schoeninger et DeNiro 1984). Cet enrichissement serait dû à l'élimination préférentielle du  $^{14}\text{N}$  dans l'urée, fournissant ainsi au corps une réserve enrichie en  $^{15}\text{N}$  par rapport à l'alimentation, utilisable pour la synthèse des tissus (Balter *et al.* 2006 ; Gannes *et al.* 1998 ; Minagawa et Wada 1984). Cet enrichissement peut varier de 1,4 à 6,9‰ selon les espèces, les tissus considérés et selon l'alimentation.

En **milieu aquatique**, les chaînes alimentaires sont plus longues, car nombre de poissons sont carnivores voire super-carnivores, ce qui augmente le  $\delta^{15}\text{N}$  des individus ayant consommé du poisson (e.g. Richards et Hedges 1999 ; Schoeninger et DeNiro 1984).

S. Caut et collaborateurs (2009) mettent en garde sur la grande variabilité du facteur d'enrichissement trophique (TEF pour Trophic Enrichment Factor) à partir d'une synthèse de la littérature.

- *Différence entre les tissus*

Des **expériences en nutrition contrôlée** ont montré que cet enrichissement peut varier de 1,4 à 5,8‰ entre les espèces, **entre les tissus** d'un même organisme (muscle, foie, cœur, cerveau, cheveu, collagène) et avec l'alimentation (Ambrose 2002 ; DeNiro et Epstein 1981 ; Hare *et al.* 1991 ; McCutchan *et al.* 2003 ; Minagawa et Wada 1984 ; O'Connell *et al.* 2001 ; Robbins *et al.* 2005 ; Sealy *et al.* 1987 ; Sponheimer *et al.* 2003 ; Warinner et Tuross 2010). Chez la souris par exemple, la différence en  $^{15}\text{N}$  entre l'alimentation et les tissus ( $\Delta^{15}\text{N}_{\text{alimentation-tissu}}$ ) va de 2‰ pour le pancréas à 5,8‰ pour le cerveau, et de +3,5 à +4,4‰ pour le collagène osseux (DeNiro et Epstein 1981). Chez les **humains**, un enrichissement en  $^{15}\text{N}$  entre l'alimentation et les cheveux allant jusqu'à 6,9‰ a été mesuré dans une population de Papouasie-Nouvelle Guinée (Yoshinaga *et al.* 1996) et une estimation de 6‰ a été proposée entre l'alimentation et le collagène osseux à partir de mesures réalisées dans les cellules sanguines puis comparées à la différence donnée par d'autres études entre le sang et le collagène (O'Connell *et al.* 2012).

En revanche, le  $\delta^{15}\text{N}$  **du collagène osseux** est globalement **similaire au  $\delta^{15}\text{N}$  du corps entier** (DeNiro et Epstein 1981), à la différence du carbone qui subit un fractionnement entre le corps entier et le collagène d'environ 4‰ (Ambrose 1993 ; Bocherens 1999). Cela implique que le rapport isotopique mesuré dans le collagène reflète directement celui de l'alimentation (cf. Figure C2. 14, p.121).

Par ailleurs, une étude de MJ. DeNiro et MJ. Schoeninger (1983) n'a révélé aucune différence significative de  $\delta^{15}\text{N}$  entre les différents os d'un même individu ou les différentes parties d'un même os. Il n'y a pas non plus de différences significatives entre les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  de **la viande et du lait** (ou produits laitiers dérivés) issus d'un même individu.

- *La part protéique de l'alimentation*

Si le carbone du collagène peut provenir de toutes les fractions biochimiques de l'alimentation (cf. IV.2.b), l'azote du collagène, lui, reflète uniquement la **part protéique** de l'alimentation (Ambrose 2002). Toutefois, **la qualité et la quantité des protéines** de l'alimentation peuvent faire varier le  $\delta^{15}\text{N}$  du consommateur (DeNiro et Epstein 1981).

D'une part, une alimentation **riche en protéines** (beaucoup de viande ou de poisson) peut **masquer le signal des ressources pauvres en protéines** comme les plantes (Hedges et Reynard 2007). En effet, une petite quantité de viande (plus riche en protéines que les plantes<sup>2</sup>) apportera une plus grande quantité d'azote, augmentant ainsi le  $\delta^{15}\text{N}$  dans les tissus. D'après S.H. Ambrose et collaborateurs (2003), avec une alimentation à 15% de viande (constituée à plus de 80% de protéines), environ la moitié de l'azote provient de la viande. Pour une alimentation à 50% de viande, plus de 85% de l'azote proviendrait de la viande. Ainsi donc, la relation entre le  $\delta^{15}\text{N}$  des ressources végétales et le  $\delta^{15}\text{N}$  des ressources animales n'est pas linéaire : un  $\delta^{15}\text{N}$  élevé peut correspondre aussi bien à une alimentation purement carnivore qu'à une alimentation mixte à dominante carnivore. Cependant, la proportion de protéines dans la viande considérée dans cette étude est à nuancer. D'après les tables de composition nutritionnelle des aliments de l'ANSES (2020) et de l'USDA (Haytowitz *et al.* 2019), la proportion de protéines dans la viande serait plutôt comprise entre 40 et 85% (sur la masse sèche) selon les espèces et les morceaux (les abats comprennent généralement plus de protéines que les muscles entourés de gras). La majorité des végétaux comprendraient, eux, entre 10 et 30% de protéines (sur la masse sèche). Un tableau présentant la composition nutritionnelle de plusieurs types d'aliments issue des tables USDA est donné en Annexe B4, Table A7.

D'autre part, une alimentation pauvre en protéines (**carence**) peut augmenter le  $\delta^{15}\text{N}$  des tissus du fait du **recyclage des protéines du corps** (Hare *et al.* 1991 ; Sealy *et al.* 1987 ; Sponheimer *et al.* 2003; cf. IV.3.d). Mais ce processus est complexe et controversé, n'étant pas systématiquement observé lors d'expériences en nutrition contrôlée sur différentes espèces (Ambrose 2002 ; Robbins *et al.* 2005 ; Van Strydonck *et al.* 2009 ; Wolf *et al.* 2009).

- *L'allaitement et le sevrage*

L'analyse isotopique de l'azote ne permet pas de distinguer la consommation de viande de celle du lait d'un même animal. Toutefois, il est possible de détecter la **consommation de lait maternel** (Fizet *et al.* 1995 ; Fogel *et al.* 1989). En effet, lors de l'allaitement, le petit consomme les protéines de sa mère, et se place donc théoriquement à un niveau trophique au-dessus de celle-ci, entraînant un  $\delta^{15}\text{N}$  **supérieur** (Fogel *et al.* 1989). Cependant, une étude récente a montré que le lait maternel est appauvri

---

<sup>2</sup> Attention, certaines plantes comme les légumineuses et notamment le soja, par exemple, comptent une grande proportion de protéines, parfois autant que la viande, qui peut être, elle, plus grasse selon les espèces et les morceaux (cf. II.4).

en  $^{15}\text{N}$  et que la différence entre les tissus de l'enfant allaité et de la mère ne dépasse pas **2‰** et ne correspond donc pas à la différence attendue entre deux niveaux trophiques successifs de 3 à 5‰ (Herrscher *et al.* 2017).

Une légère augmentation du  $\delta^{15}\text{N}$  mesuré dans le collagène osseux d'un enfant ou dans les dents d'un adulte (correspondant au signal enregistré pendant l'enfance et la période d'allaitement en particulier) marque donc le signal de l'allaitement. Le traçage entre différents tissus (**multi-échantillonnage** sur os et dents se formant à différentes périodes) permet ainsi de mesurer les **variations du  $\delta^{15}\text{N}$**  au cours du temps et d'estimer, avec la diminution du  $\delta^{15}\text{N}$ , **l'âge au sevrage** dans les populations anciennes (Balasse *et al.* 1997 ; Herrscher 2013 ; Herrscher *et al.* 2017). Toutefois, les travaux réalisés sur des populations actuelles (kératine du cheveu) montrent la relation physiologique complexe existant entre le  $\delta^{15}\text{N}$  du nouveau-né et de la mère et invitent à la prudence quant à ces interprétations (e.g. De Luca *et al.* 2012 ; De Luca *et al.* 2019 ; Herrscher *et al.* 2017 ; Romek *et al.* 2018 ; Tea *et al.* 2013). Notre échantillonnage humain excluant volontairement les enfants de moins de 2 ans pour éviter ces complications (cf. Chap3.I.2), nous n'entrerons pas plus avant dans le sujet. Néanmoins, l'analyse de l'os qui a un taux de renouvellement relativement lent doit nécessairement prendre en compte l'âge au décès de l'individu ; le collagène pouvant garder en mémoire le signal prénatal chez les nouveau-nés et les très jeunes enfants, puis le signal de l'allaitement plusieurs années après la fin du sevrage.

### IV.3.c. Le traçage du $\delta^{15}\text{N}$ dans le collagène

On considère généralement une différence de **3 à 5‰** entre les protéines de l'alimentation et le collagène du consommateur (Ambrose 1993 ; Bocherens 1999 ; Bocherens et Mariotti 2002 ; Hedges et Reynard 2007). Cette différence est parfois étendue à 6‰ (Fernandes *et al.* 2015 ; O'Connell *et al.* 2012). Cet « **effet trophique** » permet de replacer un individu au sein de sa chaîne alimentaire et de déterminer son niveau trophique, c'est-à-dire la **proportion de protéines animales** (vs protéines végétales) consommées. Dans certains cas, le traçage du  $\delta^{15}\text{N}$  dans les tissus archéologiques permet d'estimer la consommation de **légumineuses vs plantes non-fixatrices d'azote** et d'organismes **terrestres vs aquatiques**, pourvu que le  $\delta^{15}\text{N}$  des sources soit connu et distinct (DeNiro et Epstein 1981). Il est également possible de détecter un signal **d'allaitement ou de sevrage** lors d'échantillonnages multiples (dans des tissus formés à différentes périodes ; cf. IV.3.b).

Toutefois, il peut être **difficile d'estimer** précisément la place d'un omnivore (régime mixte) dans la chaîne alimentaire (notamment **d'estimer la part de protéines animales vs végétales** dans l'alimentation) du fait de la grande variabilité du facteur d'enrichissement trophique et des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  dans les végétaux (Hedges et Reynard 2007). La combinaison de ressources de niveaux trophiques distincts peut **lisser le signal ou masquer** la lecture de certaines ressources (en particulier des ressources de niveau trophique intermédiaire). Par exemple, la consommation de céréales (faible  $\delta^{15}\text{N}$ ) et de poisson ( $\delta^{15}\text{N}$  élevé) se "**compenseraient**" (induisant un  $\delta^{15}\text{N}$  intermédiaire chez le

consommateur) et pourrait masquer la consommation de cochon, omnivore ( $\delta^{15}\text{N}$  moyen), ou vice versa. De plus, comme nous l'avons vu, les ressources les plus riches en protéines (comme la viande ou le poisson) peuvent **masquer** la part des ressources pauvres en protéines (comme les plantes ; Ambrose *et al.* 2003 ; Hedges et Reynard 2007). Toutefois, si les **proportions précises** ne peuvent être retrouvées, des **tendances générales** permettent le plus souvent d'apporter une représentation intéressante des régimes alimentaires : plus ou moins carnés, consommation ou non de poisson, allaitement et sevrage, etc.

Par ailleurs, la **comparaison des individus** entre eux, au sein d'une même population ou entre différents groupes, permet de s'affranchir de ces considérations et d'identifier des différences liées à des aspects sociaux-culturels par exemple (l'âge, le sexe, le statut social), pour peu que les sources soit connues et que l'on compare la différence entre la faune consommée et les humains. Par exemple, les **différences diachroniques et régionales** permettent de détecter des **changements** dans les stratégies de subsistance ou dans les pratiques agricoles (e.g. Bickle 2018 ; Bogaard *et al.* 2011 ; Siebke *et al.* 2020).

#### IV.3.d. Autres facteurs de modifications des valeurs isotopiques

- *Cuisson et préparations culinaires*

Comme pour le carbone, certaines **préparations culinaires** (fermentation, cuisson) peuvent modifier les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  des aliments, jusqu'à les faire varier de 3,5‰ dans certains cas (Royer *et al.* 2017). Ces modifications sont variables selon les études, les aliments considérés et le type de cuisson ou de fermentation, et dans la plupart des cas elles n'excèdent cependant pas 1,5‰ (Ambrose 1993 ; Ambrose *et al.* 1997 ; Doering 2019 ; Fernandes *et al.* 2014 ; Royer *et al.* 2017). Par ailleurs, la cuisson peut altérer la qualité des protéines alors que certaines préparations comme la fermentation ou le séchage peuvent les concentrer ou les rendre mieux assimilables et biodisponibles (Ali *et al.* 2003 ; Aruna *et al.* 2017 ; Fofana *et al.* 2017 ; Montemurro *et al.* 2019 ; Sarwar 1997 ; Windey *et al.* 2012).

Les **graines brulées et carbonisées** voient généralement leur  $\delta^{15}\text{N}$  augmenter de 0,31‰ ou 0,8‰ en moyenne, selon les auteurs (Nitsch *et al.* 2015 et Styring *et al.* 2013 respectivement). Il est nécessaire de corriger les valeurs isotopiques mesurées dans les carporesses avant d'en interpréter les résultats.

En outre, MJ. DeNiro et collaborateurs (1985) ont montré que des **conditions extrêmes de chauffe** (crémation, incinération) pouvaient affecter les valeurs isotopique de l'azote dans le collagène osseux jusqu'à 4‰. Ce type d'altération est toutefois détectable par différents critères permettant de contrôler la qualité du collagène osseux (cf. IV.5.b).

- *Effets de la physiologie*

Des expériences sur de petits mammifères en nutrition contrôlée ont montré qu'il n'existe pas de différence isotopique en fonction du **sexe** entre les individus d'une même espèce ayant une alimentation identique (DeNiro et Schoeninger 1983). Ce résultat, transposé chez l'humain, indique que des différences isotopiques mesurées entre hommes et femmes d'une même population témoigneraient plutôt de pratiques et de choix alimentaires distincts.

Par ailleurs, si des modifications du  $\delta^{15}\text{N}$  en fonction de **l'âge** ont été mises en évidence dans certains tissus chez le rat (Ambrose 2002), aucun effet de l'âge sur les variations du  $\delta^{15}\text{N}$  n'a été démontré dans le collagène osseux ou dentaire (à alimentation égale et stable au cours du temps). D'après plusieurs études, le phénomène de **croissance** impliquant un métabolisme – dont la synthèse des protéines – plus efficace chez les jeunes individus provoquerait une augmentation du  $\delta^{15}\text{N}$  (Ambrose 2002 ; Katzenberg 1999, voir aussi MacAvoy *et al.* 2005). À l'inverse, d'autres études ont enregistré une diminution du  $\delta^{15}\text{N}$  avec la croissance en raison d'un bilan azoté positif des organismes (Fuller *et al.* 2004 ; Hare *et al.* 1991, voir Waters-Rist et Katzenberg 2010 pour une synthèse). De plus, les variations du taux de remodelage osseux avec l'âge et en fonction de nombreux paramètres (croissance, activité, hormones, etc.) modifient la durée du signal enregistré (Valentin 2002). Toutefois, S. Ponsard et P. Averbuch (1999) n'ont pas décelé de variation du  $\delta^{15}\text{N}$  avec la croissance des animaux (à alimentation stable) et une étude plus récente de A.L. Waters-Rist et M.A. Katzenberg (2010) a montré que la croissance ne semble pas avoir d'impact sur le  $\delta^{15}\text{N}$  du collagène osseux.

Le **stress hydrique** (manque d'eau, environnement aride) chez les animaux provoque une augmentation du  $\delta^{15}\text{N}$  (Ambrose 1991). En effet, lors d'un stress hydrique, l'urine excrétée sera plus concentrée en urée et, comme l'urée est appauvrie en  $^{15}\text{N}$  par rapport à l'alimentation, l'azote restant dans l'organisme sera enrichi en  $^{15}\text{N}$  (*ibid.*).

**Un stress nutritionnel** (sous-nutrition) amenant à des états pathologiques de dénutrition, lors de périodes de disettes ou de famines provoque une augmentation du  $\delta^{15}\text{N}$  due notamment au recyclage des protéines du corps et à l'excrétion préférentielle de  $^{14}\text{N}$  dans l'urée (Fuller *et al.* 2005 ; Mekota *et al.* 2006).

**La grossesse et l'allaitement** semblent avoir un effet variable sur les valeurs isotopiques de l'azote avec une augmentation du  $\delta^{15}\text{N}$  en début de grossesse due au stress nutritionnel causé par les nausées et vomissements puis une diminution du  $\delta^{15}\text{N}$  pendant le troisième trimestre de gestation due à la prise de poids (D'Ortenzio *et al.* 2015 ; Fuller *et al.* 2004, 2005 ; Jenkins *et al.* 2001).

Enfin, plusieurs **pathologies** impactent de façon variable les ratios isotopiques de l'azote, à la suite de désordres métaboliques affectant l'absorption des nutriments ou de processus physiologiques localisés induisant le recyclage des protéines notamment (Curto *et al.* 2019 ; Fuller *et al.* 2005 ; Hatch *et al.*

2006 ; Katzenberg et Lovell 1999 ; Scorrano *et al.* 2014). Une augmentation du  $\delta^{15}\text{N}$  est souvent observée chez des patients pathologiques divers généralement affectés par une perte de poids (e.g. maladie cœliaque ; Fuller *et al.* 2005 ; Scorrano *et al.* 2014), mais certaines maladies peuvent également entraîner une diminution du  $\delta^{15}\text{N}$  (e.g. anorexie et boulimie mentale, cirrhose ; Hatch *et al.* 2006 ; Petzke *et al.* 2006), d'autres n'entraînant aucune modification du  $\delta^{15}\text{N}$  (e.g. syphilis ; Salesse *et al.* 2019). Si l'influence de ces pathologies est relativement bien étudiée dans le cheveu où le suivi des modifications isotopiques est bien visible, elle l'est moins dans l'os où le remodelage est beaucoup plus lent et les processus impliqués sont moins bien connus (Petzke *et al.* 2010). Il est clair toutefois que le taux de remodelage osseux varie avec l'état de santé, impliquant un métabolisme et un remodelage beaucoup plus actif chez certains patients atteints de maladies graves (Katzenberg et Lovell 1999, cf. Brickley et Ives 2008). Par ailleurs, certaines maladies et infections diminuent la disponibilité des nutriments et leur absorption, de même qu'elles requièrent une plus grande dépense énergétique au repos. Un **régime alimentaire particulier** peut également être associé à un mauvais état de santé, influençant de ce fait directement les rapports isotopiques.

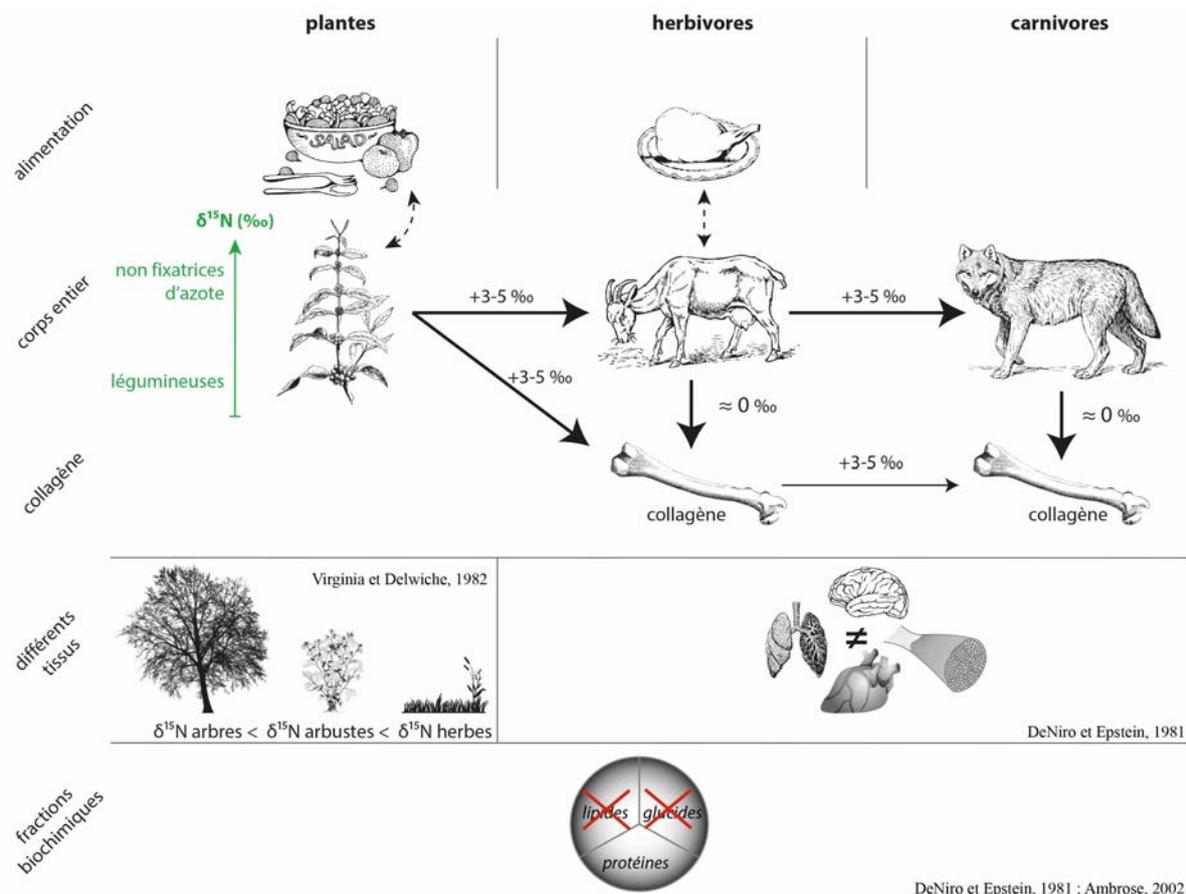


Figure C2. 14 : Schéma théorique du transfert isotopique de l'azote dans la chaîne trophique et principales sources de variabilité dans et entre les organismes.

### IV.3.e. Résumé

#### **Mesure du $\delta^{15}\text{N}$ dans le collagène :**

Bon indicateur du **niveau trophique** et notamment de la part des protéines animales dans l'alimentation (degré de « carnivorie »).

Différence de  $\delta^{15}\text{N}$  généralement admise entre l'alimentation et le collagène (TEF) entre **3 et 5%**.

Pas de fractionnement entre le collagène et le corps entier.

#### **Variation du $\delta^{15}\text{N}$ :**

La grande **variation du TEF** peut rendre difficile l'estimation précise du niveau trophique.

Attention aux **régimes mixtes** (par exemple végétaux + poisson similaire à un régime très carné) – coupler avec d'autres indicateurs.

La **qualité et la quantité des protéines** de l'alimentation influence le  $\delta^{15}\text{N}$ .

Un  $\delta^{15}\text{N}$  particulièrement élevé peut indiquer la consommation significative de **poisson** (coupler avec d'autres indicateurs isotopiques et archéologiques).

Différences entre les **tissus des animaux** : la consommation de différents morceaux de viande ou d'abat peut faire varier le  $\delta^{15}\text{N}$  du consommateur.

Différences entre les **végétaux** : légumineuses vs non fixatrices d'azote, profondeur des racines, arbres vs herbes.

**La fertilisation** peut augmenter les valeurs du  $\delta^{15}\text{N}$ .

Variabilité du  $\delta^{15}\text{N}$  avec les **conditions environnementales** et **climatiques** (sécheresse, humidité), **édaphiques** (sol argileux vs sableux/limoneux), **géographiques**, mais également avec certaines **préparations culinaires** (e.g. fermentation).

Identification des **modalités d'allaitement** (augmentation du  $\delta^{15}\text{N}$ ) et de **sevrage** (diminution).

Pas de différence isotopique entre les **sexes** ou en fonction de **l'âge**.

Altération du  $\delta^{15}\text{N}$  lors de **stress nutritionnels** ou **hydriques** et **d'états pathologiques**.

#### IV.4. Le cas du soufre (S)

##### IV.4.a. Le soufre chez les végétaux

Les deux **principaux réservoirs** de S sont le noyau métallique terrestre dont le  $\delta^{34}\text{S}$  est proche de 0‰ et le sulfate océanique dont le  $\delta^{34}\text{S}$  est proche de +20‰.

Les **plantes** absorbent le soufre par leurs racines sous forme d'ions **sulfates** ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), indispensables à leur croissance, ou de **dioxyde de soufre** ( $\text{SO}_2$ ) atmosphérique par les feuilles (Thode 1991 ; Trust et Fry 1992) – elles peuvent également recevoir du S par les gouttes d'eau ayant capturé du  $\text{SO}_2$  atmosphérique, formant de l'acide sulfureux ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ). Les sulfates du sol dérivent du lessivage des formations géologiques locales par les eaux souterraines et les rivières. Le  $\delta^{34}\text{S}$  des végétaux dépend donc de la **localité**, de la **géologie** et du **type de plantes** (Nehlich 2015). Il est compris **entre -22 et +22‰** (Peterson et Fry 1987). Les plantes sont généralement appauvries en  $^{34}\text{S}$  de 1,5‰ par rapport aux sulfates du sol, fractionnement négligeable en comparaison de la variabilité totale observée (Trust et Fry 1992). Toutefois, un fractionnement isotopique plus variable a été enregistré entre l'environnement et le soufre assimilé par les plantes (voir Nehlich 2015). La variabilité du  $\delta^{34}\text{S}$  intra-plante peut atteindre 10‰ selon N. Tanz et H.L. Schmidt (2010), bien qu'elle soit en moyenne aux alentours de 3‰ entre les tissus d'une même plante (et d'une même localité ; *ibid.*). Ainsi, le  $\delta^{34}\text{S}$  des plantes reflète en principe directement les valeurs du sulfate géologique et hydrologique local (Peterson et Fry 1987).

Dans les **océans**, on trouve le soufre principalement sous forme de sulfates dissous ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), qui sont assimilés par les organismes et entrent dans la composition des fonds sédimentaires. Le  **$\delta^{34}\text{S}$  marin** est relativement constant, autour de +20‰, du fait du mélange permanent des eaux océaniques (Rees *et al.* 1978). De ce fait, les **régions côtières**, marquées par les embruns marins (« **sea-spray effect** »), ont un  $\delta^{34}\text{S}$  proche de +20‰ (Nehlich 2015). Toutefois, des variations environnementales peuvent faire varier ce ratio. Des valeurs marines peuvent également être retrouvées à plus grande distance des côtes, portées par le régime des vents (Zazzo *et al.* 2011).

Dans les écosystèmes **d'eau douce**, le  $\delta^{34}\text{S}$  est considérablement plus variable, allant de -22 à +20‰. Cette variabilité est due à l'action des bactéries qui dégradent la matière organique (ions sulfates  $\text{SO}_4^{2-}$ ) en **sulfure** d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ) appauvri en  $^{34}\text{S}$  et dont l'action dépend des conditions environnementales (Richards *et al.* 2003).

- *Polluants sulfureux/soufrés modernes*

Les récentes activités anthropiques industrielles ont considérablement modifié le cycle du soufre dans le monde. Il est nécessaire de prendre en compte les possibles contaminants soufrés (notamment par les oxydes de soufre) lors de l'analyse de plantes ou organismes modernes. Parmi ces contaminants,

du **dioxyde de soufre** (ou anhydride sulfureux,  $\text{SO}_2$ ) est rejeté dans l'atmosphère lors de la combustion du charbon, du pétrole et du gaz. Combiné avec l'eau, celui-ci retombe dans le sol sous forme de pluies acides (acide sulfureux,  $\text{H}_2\text{SO}_3$ ). Le dioxyde de soufre sert également de stabilisant pour le vin. Les **sulfites** ( $\text{SO}_3$ ) sont des conservateurs alimentaires. Les **sulfates** ( $\text{SO}_4$ ) sont utilisés en agriculture comme engrais et produits phytosanitaires (fongicides), pour la vigne notamment (comme par exemple le bien connu sulfate de cuivre constituant la bouillie bordelaise). Les sulfates rentrent aussi dans la composition des polluants de l'air (smog).

### IV.4.b. Transfert isotopique du soufre : de l'environnement au consommateur

Chez les animaux, le soufre est un élément essentiel qui doit être obtenu par l'alimentation, et en particulier par la méthionine et la cystéine (acides aminés essentiel et non essentiel, respectivement). Dans le squelette, le soufre est présent dans la matrice inorganique sous forme de sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ) et dans le collagène sous forme de méthionine.

- *L'apport du soufre par l'alimentation*

Une fois les sulfates assimilés par les plantes, celles-ci vont les réduire pour **synthétiser les acides aminés soufrés** (cystéine et méthionine) par le biais d'une réaction appelée réduction anabolique des sulfates. Ces acides aminés vont rentrer dans la composition des protéines végétales qui seront ingérées par les consommateurs de ces plantes. La **méthionine** est un acide aminé essentiel pour les animaux qui ne la synthétisent pas ; elle doit donc être apportée entièrement par l'alimentation. La cystéine est non-essentielle et peut provenir soit de l'alimentation soit du recyclage des protéines.

- *Fractionnement négligeable entre l'alimentation et le consommateur*

La différence en  $\delta^{34}\text{S}$  entre l'alimentation et les tissus des consommateurs a été mesurée dans un faible nombre d'organismes que pour le carbone et l'azote. Toutefois, diverses études montrent que cette différence est proche de zéro, ce qui indique un fractionnement négligeable entre le soufre des acides aminés de l'alimentation et celui des nouvelles protéines synthétisées dans les tissus des consommateurs (Arneson et MacAvoy 2005 ; McCutchan *et al.* 2003 ; Nehlich 2015). On considère généralement que :  $\text{TEF} \approx 0,5 \text{ ‰}$  (Nehlich 2015), voire  $0 \text{ ‰}$  (cf. Figure C2. 16, p.128).

- *Différence entre les tissus négligeable*

Quelques expériences en nutrition contrôlée ont été menées sur plusieurs espèces, relativement peu sur les mammifères. La plupart n'ont mis en évidence qu'un **faible fractionnement entre les tissus** d'un même individu et l'alimentation ( $<2 \text{ ‰}$  ; Richards *et al.* 2003). Toutefois, N. Tanz et H.L. Schmidt (2010) ont observé chez les herbivores un enrichissement de  $4 \text{ ‰}$  pour les cheveux, les sabots et la corne, et de  $-5 \text{ ‰}$  entre l'alimentation et le cartilage. On admet généralement un fractionnement négligeable entre les muscles ou le collagène et l'alimentation (Nehlich 2015).

- *Le  $\delta^{34}\text{S}$  du collagène reflète le  $\delta^{34}\text{S}$  de la méthionine*

Le collagène de type I ne comportant pas de cystéine, le  $\delta^{34}\text{S}$  du collagène reflète directement (et uniquement) celui de la méthionine de l'alimentation (Nehlich 2015).

#### IV.4.c. Le traçage du $\delta^{34}\text{S}$ dans le collagène

Ainsi, le  $\delta^{34}\text{S}$  du collagène est directement liée à l'environnement dans lequel le consommateur a puisé des ressources. Sa mesure permet de retracer d'une part la **mobilité** des individus et d'autre part la possible **consommation de poisson d'eau douce**, pourvu que les conditions environnementales locales distinguent les écosystèmes terrestres et aquatiques par leurs valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$ . En effet, selon les régions, les gammes de valeurs du  $\delta^{34}\text{S}$  terrestres et aquatiques peuvent être clairement différenciées ou alors se confondre parfaitement. L'analyse du S vient en complément des analyses de C et N et permet de les préciser.

Les premières études ayant mis en évidence la distinction entre consommation de ressources terrestres et **aquatiques** (d'eau douce) par les humains ont été réalisées par D. Privat et collaborateurs en 2007, puis O. Nehlich et collaborateurs en 2010. Par exemple, les premiers ont mesuré en Russie (Age du Bronze / début de l'Age du Fer) des valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  entre 4,2 et 12,3‰ pour les animaux terrestres et entre 11,9 et 22,2‰ pour les animaux aquatiques (Figure C2. 15 ; Privat *et al.* 2007). Cette même étude montre qu'en Ukraine en revanche, les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  des deux écosystèmes se recoupent (*ibid.*). Dans les Gorges du Danube, différents auteurs ont pu identifier clairement deux écosystèmes, terrestre et aquatique, distincts (de Becdelièvre *et al.* 2020 ; Nehlich *et al.* 2010). Conjointement aux valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$ , corrélées au  $\delta^{34}\text{S}$ , ils ont ainsi pu évaluer la consommation – ou non – de ressources d'eau douce par les humains. La corrélation des valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  avec les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  mettant en évidence la consommation de poisson d'eau douce a également été observée dans un site Néolithique du centre de l'Allemagne, alors que d'autres sites de la région n'ont révélé aucune consommation de poisson (Nehlich *et al.* 2014). Cette étude a également pu identifier la présence d'individus **non-locaux**, au regard de la faible variabilité du  $\delta^{34}\text{S}$  dans la région (*ibid.*).

Des indices de **mobilité** grâce à l'analyse du  $\delta^{34}\text{S}$  en supplément des valeurs isotopiques de C et N ont été observés dans plusieurs études dans des contextes différents (e.g. Goude *et al.* 2020a ; Goude *et al.* 2020b ; Goude *et al.* 2019 ; Moghaddam *et al.* 2016 ; Nehlich *et al.* 2012 ; Vika *et al.* 2009). Toutefois, l'identification d'individus non-locaux dépend elle aussi des valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  locales et n'est pas toujours possible (e.g. Craig *et al.* 2010 ; Oelze *et al.* 2012). L'analyse du Sr peut alors apporter des informations complémentaires.

Selon les spécificités locales, il peut être également possible de distinguer la consommation de **différentes espèces**, si leurs gammes de valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  diffèrent significativement. Une telle différence a été mise en évidence par exemple dans un site énéolithique ukrainien, où les ovicaprins

présentaient des valeurs distinctes des autres espèces, dont des humains, indiquant que ces derniers n'ont probablement pas consommé de protéines de caprinés (cf. Figure C2. 15 ; Privat *et al.* 2007). Ces derniers étaient potentiellement « parqués » dans des environnements différents (*ibid.*).

Les applications de l'analyse isotopique du soufre sont donc plurielles et complémentaires à celles d'autres indicateurs (C, N, Sr...). Toutefois, il n'est pas possible de prédire les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  pour identifier des patterns alimentaires et de mobilité à cause de la grande variabilité isotopique spatio-temporelle et chaque étude dépend des spécificités locales (Nehlich 2015).

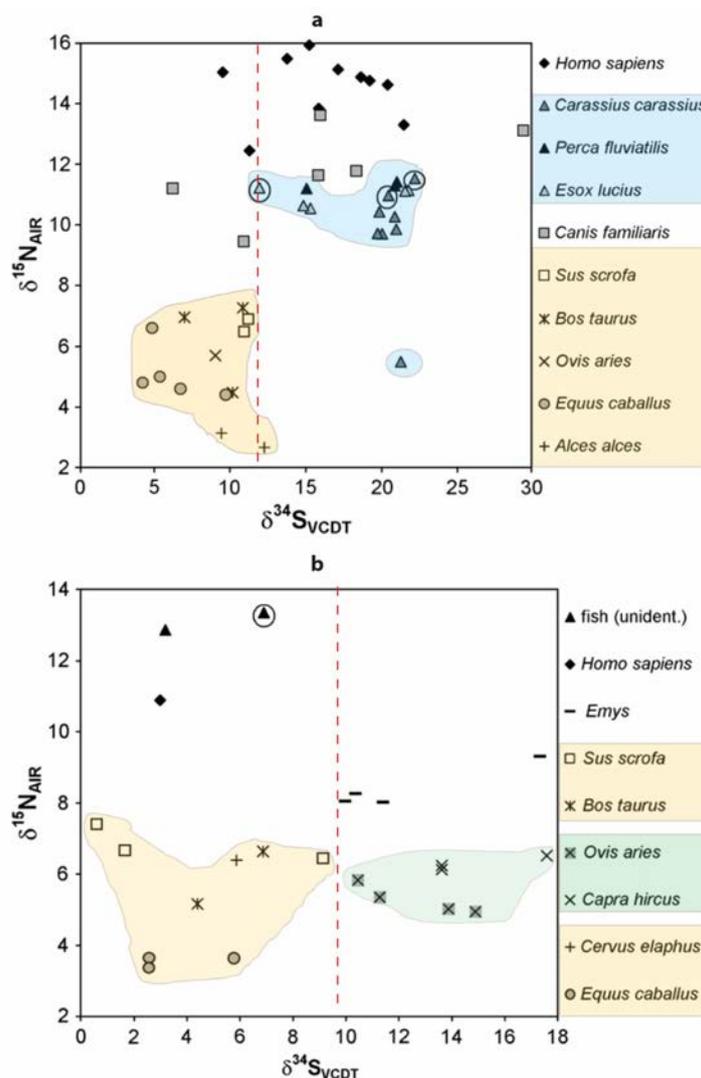


Figure C2. 15 : Distribution des valeurs isotopiques du soufre ( $\delta^{34}\text{S}$ ) des animaux et des humains des sites archéologiques de Chicha (a ; Age du Bronze Récent, sud-ouest de Sibérie) et de Bil' Shivtsi (b ; Énéolithique, ouest de l'Ukraine) montrant les distinctions entre poissons d'eau douce et animaux terrestres, d'une part, et entre ovicaprinés et autres animaux terrestres d'autre part, d'après les données de Privat *et al.*, 2007. Dans les deux cas, les valeurs des humains sont similaires à l'un des deux groupes, indiquant une consommation préférentielle et sélective des ressources. Les symboles entourés correspondent aux échantillons pour lesquels les rapports élémentaires N/S et C/S étaient inférieures aux valeurs modernes. Modifié d'après Privat *et al.*, 2007.

#### IV.4.d. Facteurs de modifications des valeurs isotopiques

- *L'utilisation de fertilisants agricoles*

Une étude récente a montré que l'utilisation de fertilisants marins (à base de poisson ou d'algues) pour la culture de haricots pouvait impacter significativement les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  (Gröcke *et al.* 2021). Il n'est pas incohérent d'envisager que d'autres types de fertilisations puissent influencer les valeurs isotopiques du soufre dès le néolithique.

- *Cuisson et préparations culinaires*

À notre connaissance, aucune étude ne porte sur les possibles modifications du  $\delta^{34}\text{S}$  des aliments cuisinés (cuits, séchés, fermentés). Par ailleurs, si la consommation de **sel** pourrait avoir un impact sur les valeurs isotopiques du S inorganique, le  $\delta^{34}\text{S}$  du collagène n'en est a priori pas modifié (Arneson et MacAvoy 2005).

- *Effets de l'alimentation et de la physiologie*

Il est possible qu'une **carence** en acides aminés contenant du S induise un **recyclage des protéines** et un fractionnement isotopique modifiant le  $\delta^{34}\text{S}$ . C'est l'hypothèse proposée lors de la consommation de plantes en C4, dont les protéines sont moins bien assimilables et conduirait à un recyclage des protéines du corps et un fractionnement jusqu'à 4‰ (Richards *et al.* 2003).

Par ailleurs, une étude sur les poissons a montré que la taille et l'âge des poissons, ainsi que la température de l'eau faisaient peu varier les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  (Barnes et Jennings 2007). Aucune étude, à notre connaissance, n'a mis en évidence de variations des valeurs isotopiques du soufre en lien avec la physiologie, l'âge, le sexe ou l'état de santé des populations animales et humaines.

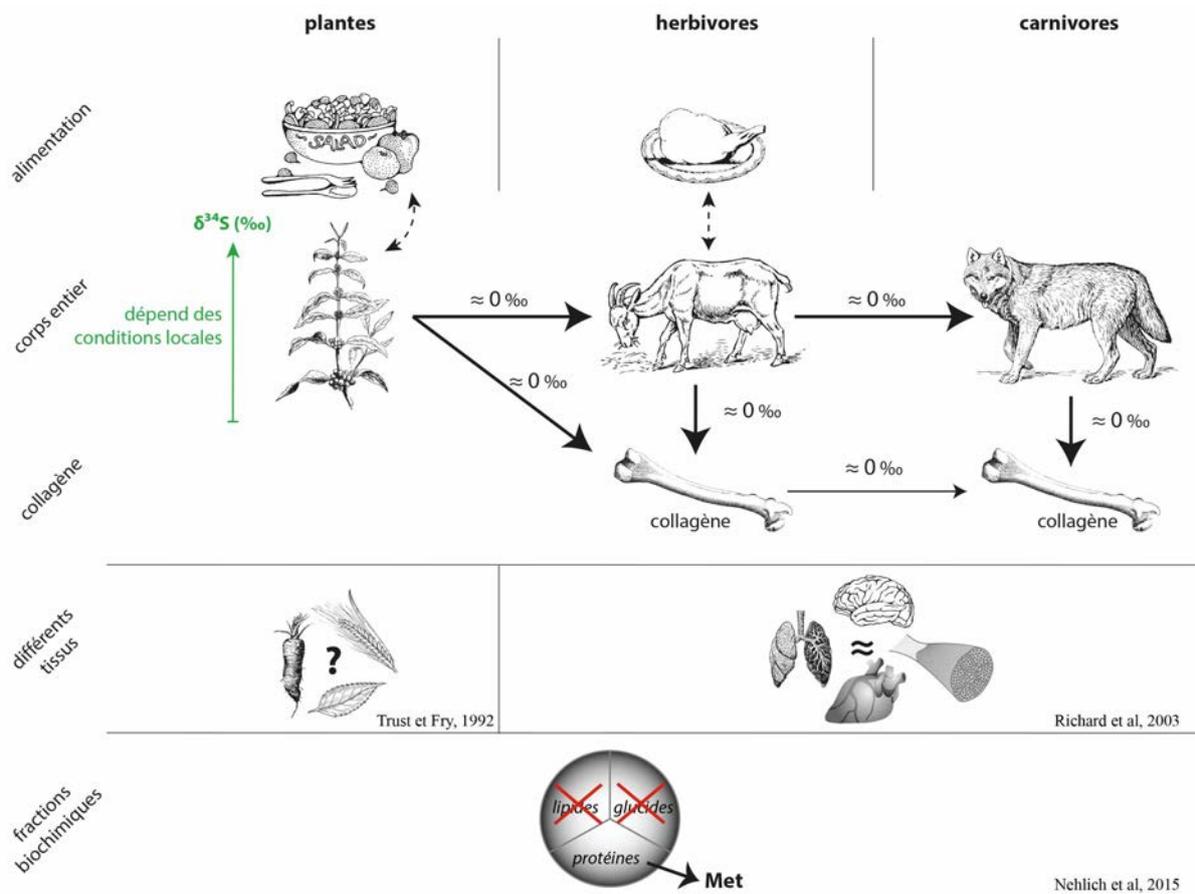


Figure C2. 16 : Schéma théorique du transfert isotopique du soufre dans la chaîne trophique et des principales sources de variabilité dans et entre les organismes.

#### IV.4.e. Résumé

##### **Mesure du $\delta^{34}\text{S}$ dans le collagène :**

Le  $\delta^{34}\text{S}$  reflète la **localité** et la **géologie**.

Le soufre provient uniquement de l'acide aminé **méthionine** et reflète la **part protéique** de l'alimentation via cet acide aminé.

**Fractionnement négligeable** (TEF  $\approx 0,5\%$ ) entre l'alimentation et le consommateur, et entre les différents tissus.

Possibilité d'identification de spécificités alimentaires (différences inter-espèces) ou de mobilité **variable en fonction des régions** et des environnements. Valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  **impossibles à prédire** (nécessité d'un référentiel local).

Bon indicateur de **mobilité des populations** (par l'identification de différences intra-populationnelles) – en combinaison avec C, N et Sr.

Détection de la consommation de **ressources d'eau douce** possible – en comparaison avec les valeurs locales et en combinaison avec C et N.

Valeurs de **ressources d'eau douces** très variables : entre -22 et +20%.

Peu de connaissances sur la variabilité du S entre les tissus animaux et végétaux ou sur les préparations culinaires.

#### IV.5. Limites méthodologiques et fiabilité des résultats

Comme pour toute analyse réalisée sur du matériel archéologique, l'interprétation des résultats nécessite un préalable contrôle de la fiabilité des mesures. Celui-ci concerne plusieurs niveaux.

D'abord, il est nécessaire d'estimer la **variabilité méthodologique**, inhérente à la composition biochimique du tissu analysé, à la méthode d'extraction de la molécule visée et à l'incertitude analytique conférée par l'équipement et le traitement des mesures (calibration, exactitude des mesures et précision). Ces considérations sont valables quelque soit l'élément mesuré et le matériel analysé. Il faut ensuite s'assurer que le **collagène soit bien conservé**, ni dégradé, ni contaminé, reflétant ainsi les valeurs enregistrées du vivant des individus. Enfin, ces valeurs doivent être comparées à celles d'un **référentiel local** indiquant la gamme de valeurs attendue dans cet environnement spécifique. Ces trois aspects sont détaillés ci-après.

Alors, il est possible d'interpréter les variations en termes de signature biologique, comportementale et environnementale tout en gardant en mémoire que de possibles modifications physiologiques (e.g.

stress nutritionnel, pathologies, différence entre les tissus ; cf. *supra*) aient pu impacter les valeurs mesurées. Notamment, d'après le **paradoxe ostéologique** de JW. Wood (1992), les restes archéologiques de jeunes individus indiquent qu'ils sont morts jeunes et potentiellement de maladie ou mauvaise santé, pas forcément visible sur le squelette. De ce fait, ces individus ont pu avoir des régimes alimentaires particuliers ou des processus physiologiques ayant altéré dans quelque mesure que ce soit les ratios isotopiques et élémentaires.

### IV.5.a. Variabilité méthodologique des valeurs isotopiques

Il existe différents niveaux d'incertitude liés à la variabilité méthodologique rencontrée à plusieurs échelles : inter-laboratoires, intra-laboratoire et intra-échantillon.

Tout d'abord, la **méthode d'extraction du collagène** peut influencer le rendement et la qualité du collagène ainsi que les valeurs isotopiques, comme cela a été démontré à plusieurs reprises (e.g. Goude 2007 ; Sealy *et al.* 2014 ; Szpak *et al.* 2017a ; Talamo *et al.* 2021). En particulier, l'ultrafiltration ou non et l'utilisation d'EDTA (Acide Ethylène Diamine Tétracétique ; cf. Bocherens 99 ; Richard *et al.*, 2019) ou non pour la déminéralisation produiront des résultats isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) pouvant varier jusqu'à plus de 2‰ dans certains cas. Par exemple, dans une étude comparative de 100 échantillons analysés selon deux chaînes opératoires différentes (méthode d'extraction et équipement analytique de deux laboratoires variables), G. Goude (2007) a mesuré une différence allant de 0 à 2,6‰ en  $\delta^{13}\text{C}$  et de 0 à 3,7‰ en  $\delta^{15}\text{N}$ .

D'autre part, les mesures peuvent varier en fonction de **l'équipement et des conditions analytiques** de différents laboratoires (Goude 2007 ; Pestle *et al.* 2014). Si les valeurs des échantillons sont calibrées par rapport à des standards internationaux, les **méthodes de calibration** peuvent varier, de même que l'exactitude et la précision des mesures pour chaque session, qui doivent être renseignées (Roberts *et al.* 2018 ; Szpak *et al.* 2017b). Le caractère essentiel de la précision analytique est toutefois controversé compte tenu de la forte variabilité observée au cours du prétraitement notamment (voir par exemple Roberts *et al.* 2018 et Dunn *et al.* 2015 qui recommandent plutôt de placer un « mouchard » dès le début du prétraitement à analyser en même temps que les autres échantillons).

- **L'exactitude** ( $u(\text{bias})$ , « accuracy or systematic error ») est définie par l'éloignement des valeurs de standards mesurées par rapport à la valeur connue, c'est à dire basée sur l'erreur systématique des mesures de standards non utilisés pour la calibration.
- La **précision** ( $u(Rw)$ , erreur standard ou reproductibilité) représente l'éloignement par rapport à la moyenne des mesures répétées de standards (servant ou non à calibrer les données, mais qui doivent être adaptés à la matrice, "*matrix-matched*", c'est-à-dire dont la composition isotopique est proche de celle des échantillons) et d'échantillons calibrés.

- **L'incertitude analytique** ( $u_c$ ) comprend l'exactitude et la précision des mesures conjointement et se calcule grâce à l'équation :

$$u_c = \sqrt{u(R_w)^2 + (u(bias))^2}$$

d'après Szpak *et al.* 2017b.

Enfin, il faut garder en mémoire que le **collagène est un tissu complexe, instable** et dont la structure interne et la composition varient. Ainsi, deux mesures isotopiques d'un même échantillon de collagène pourront donner un résultat sensiblement différent (e.g. Goude 2007). Rappelons que les différents os et parties d'os peuvent également présenter des différences isotopiques.

C'est pourquoi la comparaison d'échantillons doit se faire préférentiellement à partir de matériaux comparables. Dans la mesure du possible, les échantillons doivent porter sur une même portion anatomique, le collagène extrait selon une même méthode et analysé avec un équipement identique. Ces conditions ne pouvant pas toujours être réunies, à plus forte raison entre des études menées par différentes équipes de recherche, la prise en compte de cette possible variabilité est essentielle. D'après WJ. Pestle et collaborateurs (2014), **les différences supérieures à 0,6‰ en  $\delta^{13}\text{C}$  et 0,9‰ en  $\delta^{15}\text{N}$  ont de fortes probabilités d'être d'origine biologique plutôt que d'être un artefact de prétraitement ou d'analyse.**

#### IV.5.b. Critères de conservation du collagène et validité des valeurs isotopiques

Les critères présentés ci-après sont valables aussi bien pour le collagène osseux que dentinaire (Ambrose 1990).

Après la mort des individus et leur enfouissement, les restes archéologiques peuvent subir différents type **d'altérations** dites **diagénétiques**, modifiant leur structure et leur composition (e.g. Collins *et al.* 2002 ; Dauphin et Williams 2004 ; Grupe *et al.* 2002 ; Price *et al.* 1992). Des échanges chimiques avec le milieu environnant peuvent notamment altérer les ratios isotopiques. Avant d'interpréter les résultats isotopiques mesurés dans les tissus osseux et dentaires, il est donc nécessaire de s'assurer de l'intégrité du collagène – qu'il ne soit pas dégradé ou contaminé – et de vérifier que les valeurs isotopiques mesurées reflètent bien celles enregistrées du vivant des individus. Des **traitements préalables** lors de l'extraction du collagène (cf. Chap4.I.1.) permettent de supprimer une partie des contaminants. Ensuite, plusieurs **indicateurs** permettent de caractériser son état de conservation. Ils ont été estimés à partir des teneurs de l'os moderne pour déterminer les gammes acceptables dans l'os – et la dentine – archéologique.

Le **rendement d'extraction du collagène** évalue la quantité de collagène extrait (et donc sa dégradation). Il doit être supérieur à **10mg/g** (ou 1%) pour être quantitativement suffisamment bien

conservé (van Klinken 1999). Les **teneurs élémentaires** (C, N, S) sont mesurés simultanément aux rapports isotopiques grâce à la combinaison d'un analyseur élémentaire au spectromètre de masse (cf. VIII). Ces concentrations doivent être supérieures à 30% pour C, 11% pour le N et doivent être comprises entre 0.15 et 0.35% pour le S (Ambrose 1990 ; DeNiro 1985 ; Nehlich et Richards 2009). Les **rapports élémentaires** constituent de bons indicateurs de la qualité du collagène et doivent être compris entre 2,9 et 3,6 pour C/N, entre 300 et 900 pour C/S, et entre 100 et 300 pour N/S (Ambrose 1993 ; Bocherens *et al.* 2011 ; Nehlich et Richards 2009). La gamme C/N dépend du milieu et peut être abaissée à 3,1 – 3,4 pour plus de fiabilité (van Klinken 1999). Les échantillons présentant des valeurs au-delà de ces limites doivent être écartés de l'étude. Des valeurs isotopiques aberrantes, pouvant refléter celles du milieu environnant, doivent également être considérées avec prudence.

### IV.5.c. Référentiel local et croisement des données

Afin de s'affranchir du problème de la variabilité locale, environnementale et climatique des valeurs isotopiques, les rapports isotopiques mesurés sur les humains doivent être comparés à ceux de la **faune locale et contemporaine**, dans la mesure du possible, voire aux valeurs des végétaux (graines carbonisées par exemple) ou du sol (ces dernières pouvant nécessiter une correction due aux modifications subies depuis leur utilisation, comme la carbonisation ou la pollution moderne ; e.g. Casey et Post 2011 ; Goude et Fontugne 2016). La **comparaison directe** des valeurs des consommateurs et des ressources potentiellement consommées, accompagnée d'une bonne connaissance du **facteur d'enrichissement trophique** (TEF), permettra d'estimer la **proportion relative des protéines** issues des différentes ressources mesurées ou estimées, et d'elles seules. Le résultat obtenu vise à approcher au maximum la consommation réelle mais ne peut raisonnablement pas la refléter rigoureusement. Au-delà de ces considérations alimentaires, c'est a fortiori la distinction individuelle et la comparaison entre groupes humains – toujours relativement à un référentiel local – qui fera de l'analyse isotopique un outil des plus intéressants.

En outre, la **distinction des signatures isotopiques** des différentes **ressources** est une condition déterminante à l'estimation des proportions consommées par les humains. Les types de ressources (par exemple végétaux, bétail et poisson) doivent avoir des gammes de valeurs bien identifiées et séparées pour pouvoir être distinguées les unes des autres. Ainsi, il est parfois possible de distinguer en sus la consommation de différentes espèces animales (par exemple entre bovins et caprins) ayant dans d'autres contextes des valeurs tout à fait similaires.

Dans certains cas – notamment en contexte funéraire – **aucun reste** alimentaire (animal ou végétal) n'est retrouvé associé aux restes humains d'un site. La comparaison avec **des données issues de sites voisins** ou de contextes chrono-culturels et environnementaux similaires apportera une idée la plus proche et sincère possible du contexte local. Toutefois, il est primordial de toujours garder en mémoire le fait qu'une même espèce puisse présenter des valeurs isotopiques différentes entre deux sites voisins

et contemporains, du fait de **spécificités très locales**, comme des **pratiques agricoles particulières** par exemple. En effet, l'apport de fumier à la culture céréalière, la gestion d'un cheptel dans des espaces séparés ou encore l'utilisation des algues marines comme affouragement des animaux domestiques peut faire varier la signature isotopique des espèces d'un site à l'autre – et se répercuter chez les humains ayant consommé ces ressources (e.g. Balasse *et al.* 2009 ; Bogaard *et al.* 2013 ; Gron *et al.* 2017 ; Kanstrup *et al.* 2011 ; Oelze *et al.* 2011).

Le **croisement des résultats** isotopiques avec les données issues d'**autres disciplines** (archéozoologie, archéobotanique, analyse des résidus de poterie, outils agricoles et culinaires, analyse du tartre ou de la micro-usure dentaire, indicateurs squelettiques et bucco-dentaires, etc.) apporte un panel d'informations utiles et complémentaires pour retracer les pratiques alimentaires des populations du passé. Nous considérons dans ce travail tous les apports possibles et croisons (ou envisageons de croiser pour des analyses à venir) un maximum de données issus de ces diverses disciplines (voir notamment Chap9.I).

## V. L'azote des acides aminés (AA) spécifiques

---

À notre connaissance, cette synthèse est la première réalisée en langue française.

À une échelle plus fine, il est possible de mesurer le  $\delta^{15}\text{N}$  spécifique de chaque acide aminé (AA) du collagène. Deux acides aminés en particulier sont retenus ici : l'acide glutamique (Glu) et la phénylalanine (Phe). Voyons en quoi l'analyse de ces deux AA spécifiques vient affiner l'image obtenue par la mesure du  $\delta^{15}\text{N}$  dans l'ensemble du collagène (communément appelé « *bulk collagen* »).

### V.1. Principe

#### V.1.a. Généralités, notations et appellations

La méthode, communément abrégée **CSIA-AA**, de l'anglais *compound-specific isotope analysis of amino acids*, est basée sur le fractionnement différentiel des AA, c'est-à-dire sur le fait que l'enrichissement en  $^{15}\text{N}$  entre l'alimentation et le consommateur est différent entre les AA d'un même organisme. En mesurant la **différence de  $\delta^{15}\text{N}$  entre deux AA** dans un même organisme (ici entre Glu et Phe), on peut **estimer son niveau trophique**, quelque soit son environnement et donc *a priori* quelque soit le  $\delta^{15}\text{N}$  à la base de la chaîne alimentaire (Chikaraishi *et al.* 2011 ; Chikaraishi *et al.* 2010a ; Chikaraishi *et al.* 2014 ; Naito *et al.* 2016a).

- *Notations et appellations*

La glutamine (Gln) et l'asparagine (Asn) sont hydrolysées en acide glutamique (Glu) et acide aspartique (Asp) respectivement. Ainsi, lors de l'analyse, les mesures reflètent les ensembles **Gln + Glu** et **Asn + Asp**. Certains auteurs écrivent Glx et Asx pour se référer à ces ensembles, quand d'autres (plus nombreux) indiquent simplement Glu et Asp. Nous choisissons ici la deuxième notation.

En outre, l'acide glutamique (Glu) est parfois appelé **glutamate** (sa forme anionique) de même que l'acide aspartique est aussi appelé **aspartate**.

### V.1.b. Les voies métaboliques des AA

Une bonne compréhension du métabolisme des AA est cruciale pour pouvoir interpréter correctement les analyses dans les AA spécifiques. Nous tentons ici d'en faire une brève présentation. La **structure générique** d'un AA est rappelée dans la Figure C2. 17.

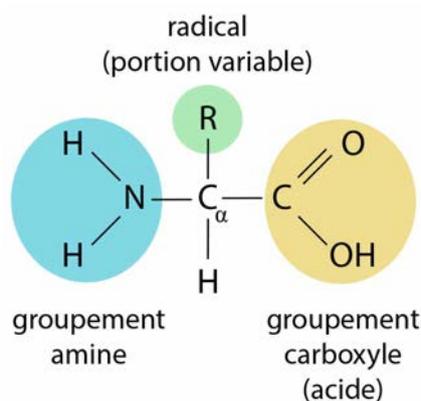


Figure C2. 17 : Structure générale d'un acide aminé. Le radical correspond à la chaîne carbonée latérale qui est variable entre les acides aminés (voir Figure C2. 2).

Les **voies métaboliques des AA** (biosynthèse et catabolisme) relient l'azote de sa source à sa destination finale dans le corps. Les deux principaux processus enzymatiques contrôlant le flux d'azote sont la transamination et la désamination (McMahon et McCarthy 2016). Ces réactions permettent de dégrader (catabolisme) des AA et d'en synthétiser d'autres (non essentiels), en assurant des échanges d'azote. La **transamination** correspond au transfert d'un groupement amine d'un acide ( $\alpha$ -aminé) à un autre ( $\alpha$ -cétonique) sous l'action d'une enzyme (le catalyseur) : la transaminase. L'acide aminé transaminé (ayant transféré son groupe amine, donc) devient un acide cétonique et rejoint le cycle de Krebs. La **désamination** correspond, elle, à la perte du groupement amine d'un AA. Ce processus permet de cliver les AA et d'apporter de l'énergie (NADH) en libérant de l'ammoniac ( $NH_3$ , toxique pour l'organisme) qui sera ensuite converti en urée ou acide urique pour être excrété dans l'urine (cycle de l'urée). La réaction de désamination est catalysée par les enzymes désaminases.

Ces deux réactions favorisent l'isotope léger  $^{14}N$  selon un **fractionnement** qui **varie en fonction des AA** (selon leur degré de transamination et désamination). Les AA « **trophiques** » (Glu, Asp, Ala, Ile,

Leu, Pro, Val) subissent de plus importantes réactions de transamination/désamination et donc un plus grand fractionnement, résultant en un pool Glu résiduel enrichi en  $^{15}\text{N}$  (Figure C2. 18). À l'inverse, les AA « sources » (Phe, Met, Tyr, Gly, Ser, Lys<sup>3</sup>) subissent un fractionnement minime au cours du transfert trophique.

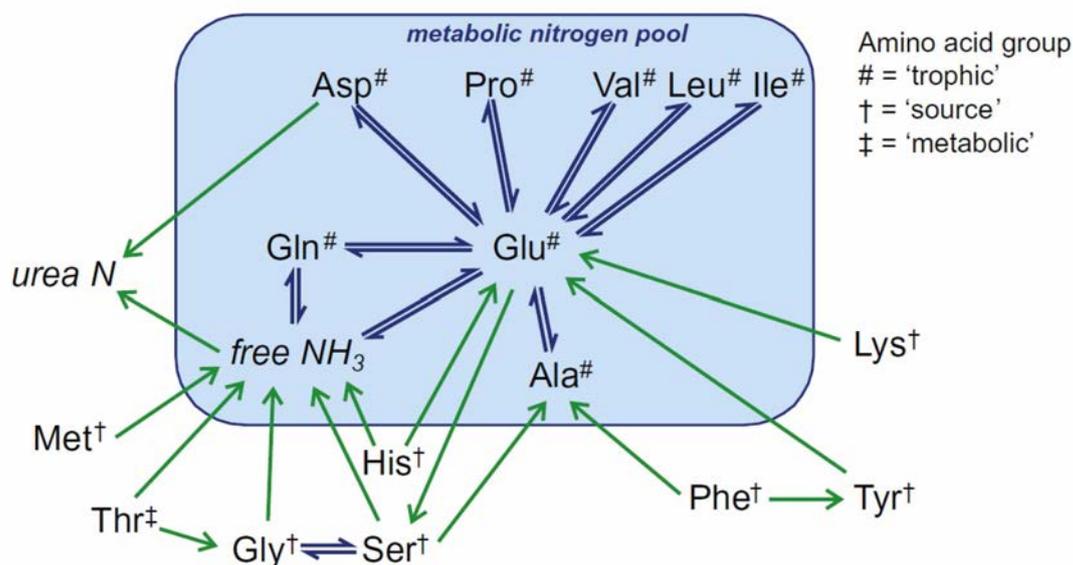


Figure C2. 18 : Représentation schématique du devenir métabolique de l'azote dans les AA «trophiques» et «sources» chez les mammifères. Les flèches indiquent les migrations de l'azote entre AA et autres composés azotés. Les doubles flèches  $\rightleftharpoons$  indiquent les échanges et les simples flèches  $\rightarrow$  les transferts unidirectionnels d'azote (désamination ou transamination irréversible). Le rectangle bleu correspond au pool métabolique d'azote qui comprend les acides aminés «trophiques» (#), dont l'azote peut être facilement échangé en une seule étape chimique, et l'ammoniac libre ; ils sont reliés par une double flèche. Les acides aminés «sources» (†) et l'acide aminé «métabolique» (‡), en dehors de ce pool, peuvent transférer de l'azote aux AA du pool métabolique mais ne peuvent pas en échanger (sauf entre Gly et Ser). D'après O'Connell 2017.

**Glu** joue un **rôle central** dans le cycle métabolique de l'azote des acides aminés (transfert du N entre les AA ; Figure C2. 18). Il présente le **plus grand fractionnement**. À l'inverse, **Phe** présente le **plus faible fractionnement** trophique : sa principale voie métabolique est l'hydroxylation en Tyr par l'enzyme phénylalanine hydroxylase et ce processus ne crée pas de fractionnement isotopique de l'azote (McMahon et McCarthy 2016). La valeur de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  reflète donc directement celle à la base de la chaîne alimentaire ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$  ; McClelland et Montoya 2002). Toutefois, cette valeur peut varier ( $\pm 1,6\%$ ) dans certains cas, du fait d'un processus secondaire de transamination de la Phe en phénylpyruvate, induisant, lui, un fractionnement (McMahon et McCarthy 2016). Si ce processus est mineur chez les organismes en bonne santé, il peut modifier le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  dans certains cas, comme par exemple chez des organismes atteints de **phénylcétonurie**, une maladie rare liée à un déficit en phénylalanine hydroxylase (cf. V.2.c ; Blau *et al.* 2010).

<sup>3</sup> Certains subissent quand-même un fractionnement non négligeable et les « vrais » AA sources sont en réalité Phe, Met et Lys.

### V.1.c. Estimation du niveau trophique (TP)

Le principe est simple et se base sur les assertions suivantes :

- Des Facteurs d'Enrichissement Trophique (TEF) distincts entre Glu et Phe

Comme évoqué précédemment, le  $\delta^{15}\text{N}$  de la majorité des AA augmente entre chaque niveau trophique (AA « trophique ») alors que le  $\delta^{15}\text{N}$  de la phénylalanine (Phe) et de la méthionine (Met) reste stable (AA « source » ; Figure C2. 19 ; O'Connell 2017 ; Ohkouchi et Takano 2014). Des expériences en nutrition contrôlée ont montré que le facteur d'enrichissement trophique (TEF) de Glu et de Phe est stable pour différents organismes et entre chaque niveau trophique. Ainsi, le  $\delta^{15}\text{N}$  de l'acide glutamique ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$ ) augmente d'environ  $+8\text{‰} \pm 1,1\text{‰}$  à chaque saut trophique ( $\text{TEF}_{\text{Glu}}$ ) et celui de la phénylalanine ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$ ) ne varie que de  $+0,4 \pm 0,4\text{‰}$  ( $\text{TEF}_{\text{Phe}}$ ) dans les écosystèmes aquatiques (Chikaraishi *et al.* 2007 ; Chikaraishi *et al.* 2009 ; McClelland et Montoya 2002) et terrestres (Chikaraishi *et al.* 2011).

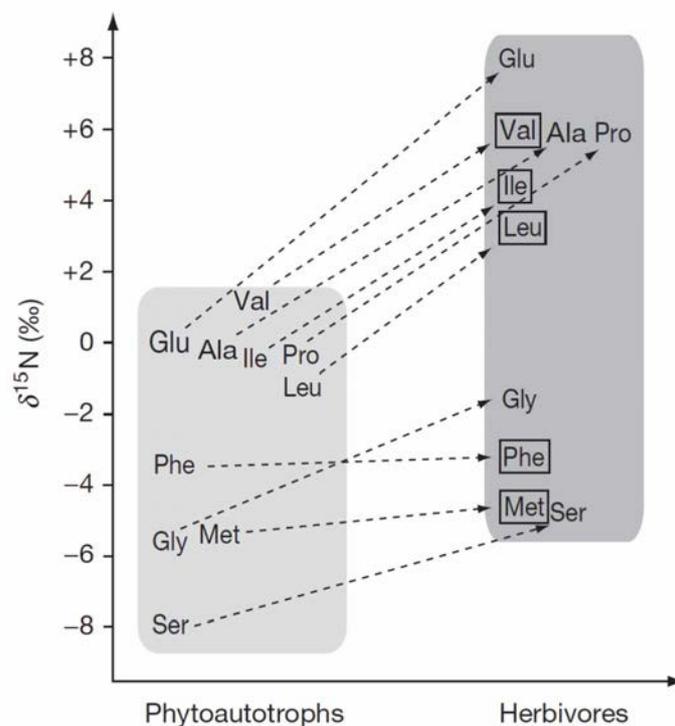


Figure C2. 19 : Composition isotopique de l'azote des acides aminés d'organismes photoautotrophes (*i.e.* macro et microalgues et cyanobactérie) et herbivores dans un écosystème aquatique. Les flèches symbolisent l'effet trophique. Les acides aminés encadrés sont essentiels (non synthétisés par les herbivores). D'après Ohkouchi et Takano, 2014 (données issues de Chikaraishi *et al.*, 2010a).

- Le TDF ( $\text{TEF}_{\text{Glu}} - \text{TEF}_{\text{Phe}}$ )

La différence entre les facteurs d'enrichissement trophique (TEF) de Glu et de Phe est appelée **Facteur de Discrimination Trophique (TDF)**. En termes mathématiques :

$$\text{TDF}_{\text{Glu-Phe}} = \text{TEF}_{\text{Glu}} - \text{TEF}_{\text{Phe}} = \Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}} - \Delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$$

où  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  est la différence de  $\delta^{15}\text{N}$  entre l'alimentation et le consommateur pour chaque AA.

D'après leurs expériences en nutrition contrôlée, Y. Chikaraishi et collaborateurs (2007) ont proposé la valeur moyenne du  $\text{TDF}_{\text{Glu-Phe}}$  de 7,6‰, qui est proche de la valeur proposée par JW. McClelland et J. Montoya, 2002 de 7,0‰. Il est depuis communément admis la valeur « universelle » de 7,6‰ (néanmoins débattue ; voir V.2.b).

- *Le facteur  $\beta$  :  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu-Phe}}$  chez les producteurs primaires*

La différence de  $\delta^{15}\text{N}$  entre Glu et Phe ( $\Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu-Phe}}$ ) a été mesurée dans un certain nombre d'organismes végétaux et s'avère distincte selon le type d'écosystème. Cette différence, appelée **facteur  $\beta$**  chez les producteurs primaires, est d'environ -8,4‰ chez les plantes en C3, environ +0,4‰ chez les plantes en C4 et environ +3,4‰ chez les végétaux aquatiques tels que les algues ou les cyanobactéries (Figure C2. 20 ; Chikaraishi *et al.* 2007 ; Chikaraishi *et al.* 2010a).

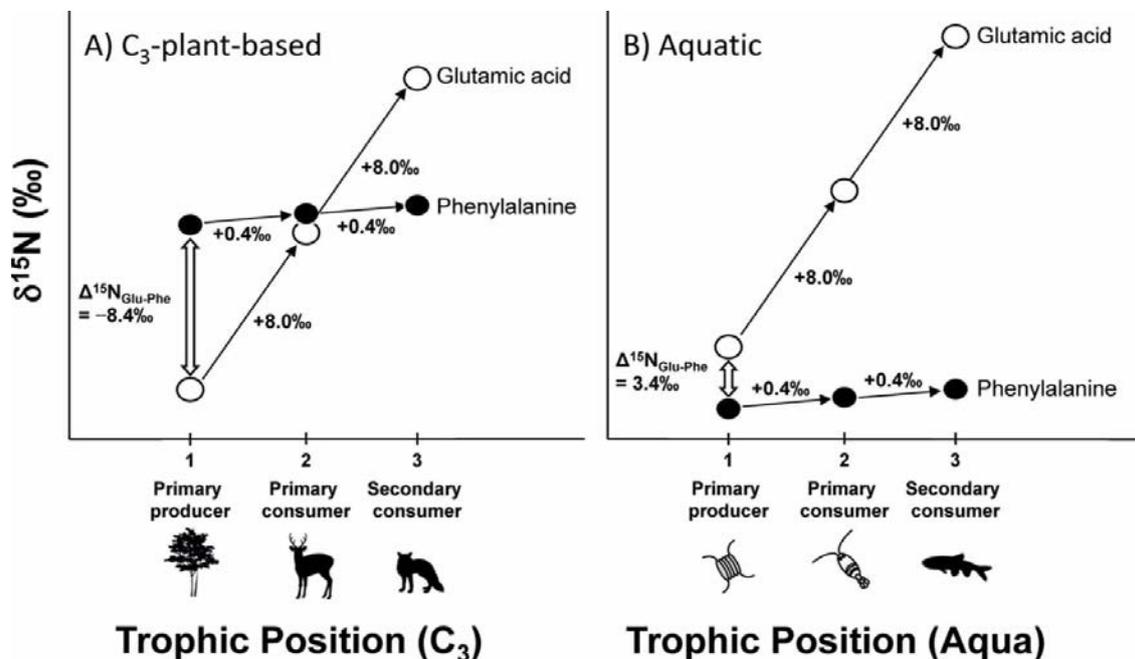


Figure C2. 20 : Représentation schématique de la relation entre le niveau trophique et la composition isotopique de l'azote de l'acide glutamique et de la phénylalanine dans A) les écosystèmes terrestres en C3 et B) les écosystèmes aquatiques. Les valeurs de  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu-Phe}}$  des producteurs primaires diffèrent entre les plantes en C3 (-8,4‰) et les plantes aquatiques telles que les algues et les cyanobactéries (+3,4‰ ; Chikaraishi *et al.*, 2007, 2010a). D'après Naito *et al.*, 2013a modifié d'après Chikaraishi *et al.*, 2011.

La **cause** de la **différence de facteur  $\beta$**  entre les plantes en C3, les plantes en C4 et les photo-autotrophes aquatiques n'est pas connue. Elle reflète probablement des vitesses de fractionnement isotopique distinctes associées aux réactions de transamination ou des différences dans le mécanisme d'assimilation de l'N inorganique ou dans les voies de biosynthèses des AA entre ces producteurs primaires (Chikaraishi *et al.* 2010a ; cf. V.2.a).

Des études récentes ont montré néanmoins que la différence entre les écosystèmes terrestres et aquatiques serait due en partie au fait que la **phénylalanine** soit un point de branchement dans le

métabolisme végétal qui **synthétise la lignine** (molécule structurale responsable de la rigidité chez les plantes vasculaires – elle compose principalement le bois) de façon plus abondante en milieu terrestre pour le **renforcement structural** (Kendall *et al.* 2019 ; Ohkouchi et Takano 2014).

- *Équations générale et particulières*

Sur la base de ces observations, Y. Chikaraishi et collaborateurs (2009) ont proposé d'estimer le niveau trophique d'un échantillon à partir de l'équation générale suivante :

$$TP_{AA} = ([\delta^{15}N_{Glu} - \delta^{15}N_{Phe} + \beta] / TDF) + 1$$

Où  $TP_{AA}$  est le niveau trophique (TP pour « Trophic Position ») estimé grâce à l'analyse des AA. Ce qui donne pour chaque écosystème en particulier les équations (Chikaraishi *et al.* 2011) :

$$TP_{AA}(C_3) = ([\delta^{15}N_{Glu} - \delta^{15}N_{Phe} + 8.4] / 7.6) + 1 \text{ pour les écosystèmes terrestres en C3 (1)}$$

$$TP_{AA}(C_4) = ([\delta^{15}N_{Glu} - \delta^{15}N_{Phe} - 0.4] / 7.6) + 1 \text{ pour les écosystèmes terrestres en C4 (2)}$$

$$TP_{AA}(aqua) = ([\delta^{15}N_{Glu} - \delta^{15}N_{Phe} - 3.4] / 7.6) + 1 \text{ pour les écosystèmes aquatiques (3)}$$

- *Estimer le TP sans requérir de référentiel local*

Puisque le  $\delta^{15}N_{Phe}$ , qui ne change pas avec le niveau trophique, représente le  $\delta^{15}N$  à la base de la chaîne alimentaire alors que le  $\delta^{15}N_{Glu}$  varie avec le niveau trophique, la mesure de **l'écart entre ces deux AA** dans un même organisme permet d'estimer directement le niveau trophique en s'affranchissant de la variabilité locale (Figure C2. 21 ; Chikaraishi *et al.* 2010a). Cela offre à la méthode l'avantage de ne pas avoir besoin de connaître le  $\delta^{15}N$  à la base de la chaîne alimentaire et donc de pouvoir se soustraire, en théorie, à la mesure conjointe d'un référentiel local. Cela présente un avantage considérable dans le cas d'écosystèmes complexes et dynamiques, pour estimer directement les plus hauts TP des consommateurs intégrant des ressources multiples (e.g. Steffan *et al.* 2013) et les TP de consommateurs mobiles (notamment dans les écosystèmes aquatiques ; e.g. Ishikawa *et al.* 2014 ; Lorrain *et al.* 2009). La méthode offre de surcroît un avantage majeur en archéologie lorsque les ressources ne sont pas préservées (ou pas accessibles ; e.g. Itahashi *et al.* 2014 ; Naito *et al.* 2016a). Elle permet, de plus, les comparaisons directes de spécimens de différents contextes spatio-temporels.

### V.2. Sources de variabilité de l'estimation

Depuis que les principes fondamentaux de la méthode ont été posés, de nombreuses études s'attachent à affiner les connaissances sur les processus métaboliques en jeu pour renforcer et préciser l'estimation du TP en mesurant le  $\delta^{15}N_{AA}$  dans une large variété d'organismes et d'écosystèmes. Ainsi, plusieurs recherches ont mis en évidence une importante variabilité du  $\delta^{15}N_{AA}$  dans les organismes et un enrichissement trophique variable en fonction des conditions et mécanismes métaboliques

impliqués. Il est nécessaire de prendre en considération ces facteurs de variation avant d'interpréter les résultats.

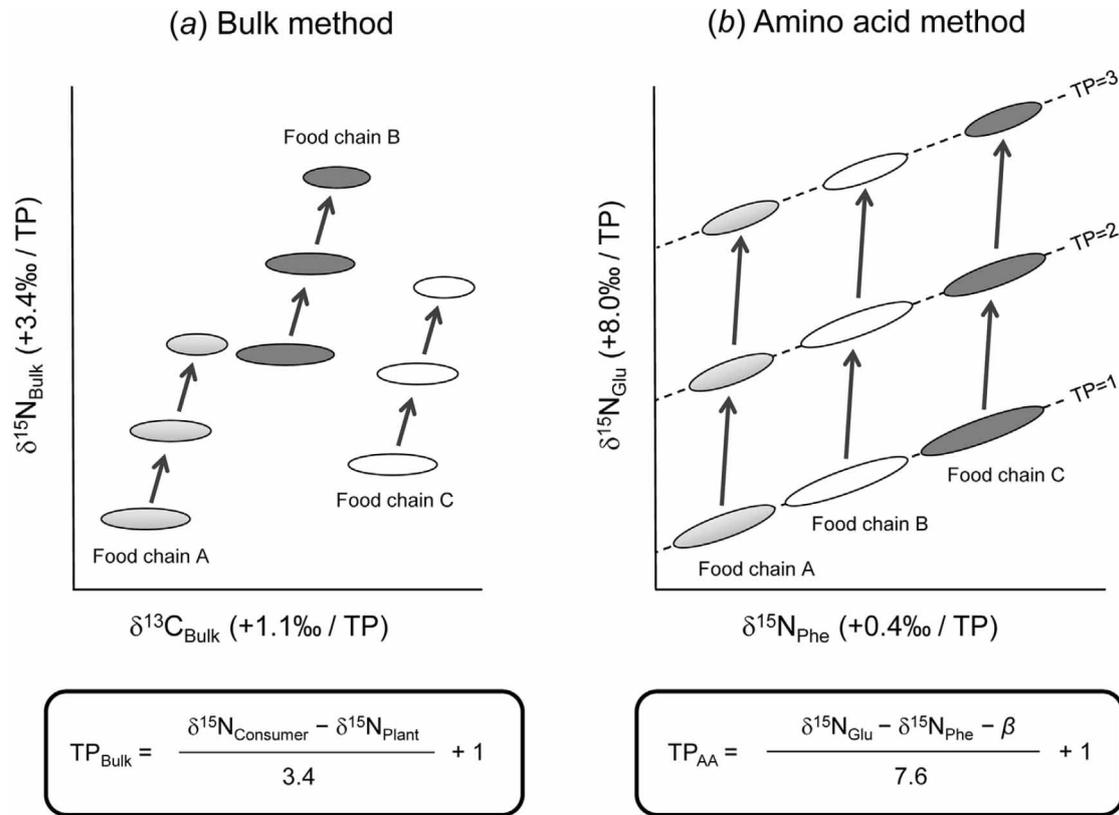


Figure C2. 21 : Comparaison des estimations du niveau trophique (TP) basées sur a) la composition isotopique du carbone et de l'azote du collagène global (bulk) et b) la composition isotopique de l'azote de l'acide glutamique et de la phénylalanine (AA). Selon l'approche "bulk", la valeur de  $\delta^{15}\text{N}$  de consommateurs ayant le même niveau trophique peut varier en fonction de la valeur de  $\delta^{15}\text{N}$  à la base de la chaîne alimentaire (par exemple chez les plantes) et il est souvent difficile d'estimer cette valeur. Selon l'approche "AA", l'estimation de la valeur de  $\delta^{15}\text{N}$  à la base de la chaîne alimentaire n'est pas nécessaire car la méthode se base sur la différence entre deux acides aminés d'un même individu (le consommateur). Les organismes de même niveau trophique (TP) devraient présenter des valeurs sur la ligne pointillée correspondante car les plantes terrestres sont supposées avoir des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  et  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  cohérentes entre différents contextes environnementaux (Naito *et al.*, 2013a), permettant ainsi une évaluation plus claire du TP des consommateurs. D'après Naito *et al.*, 2016b.

### V.2.a. Variabilité du $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ chez les végétaux (variabilité du facteur $\beta$ )

Tout d'abord, plusieurs études ont montré que le  $\delta^{15}\text{N}$  des AA varie selon le type de plante et en fonction du type d'acquisition de l'azote (Bol *et al.* 2002 ; Kendall *et al.* 2019 ; Paolini *et al.* 2015 ; Styring *et al.* 2014b ; Takizawa *et al.* 2017 ; Yoneyama et Tanaka 1999), impliquant un  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu-Phe}}$  (facteur  $\beta$ ) variable de -12 à 0‰. La Figure C2. 22 montre la dispersion des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  et  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  de différentes plantes modernes d'après les données de la littérature (voir tableau récapitulatif en Annexe A1). Il existe notamment une corrélation directe entre le  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu-Phe}}$  et la **teneur en lignine** (Kendall *et al.* 2019). Ainsi, I. Kendall et collaborateurs (*ibid.*) mesurent dans les feuilles un  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu-Phe}}$  moyen de **-9,3 ± 1,6‰ pour les plantes ligneuses** comme les arbres et de **-5,8 ± 2,1‰ pour les plantes herbacées**. Les auteurs avancent l'idée que l'enrichissement observé du  $\delta^{15}\text{N}$  de la **Phe** soit dû à son rôle dans la voie des **phénylpropanoïdes**, des composés organiques biosynthétisés à partir de la

Phe dans les plantes, ayant un rôle de défense contre les attaques extérieures notamment, ou qui constituent parfois des pigments (*ibid.*).

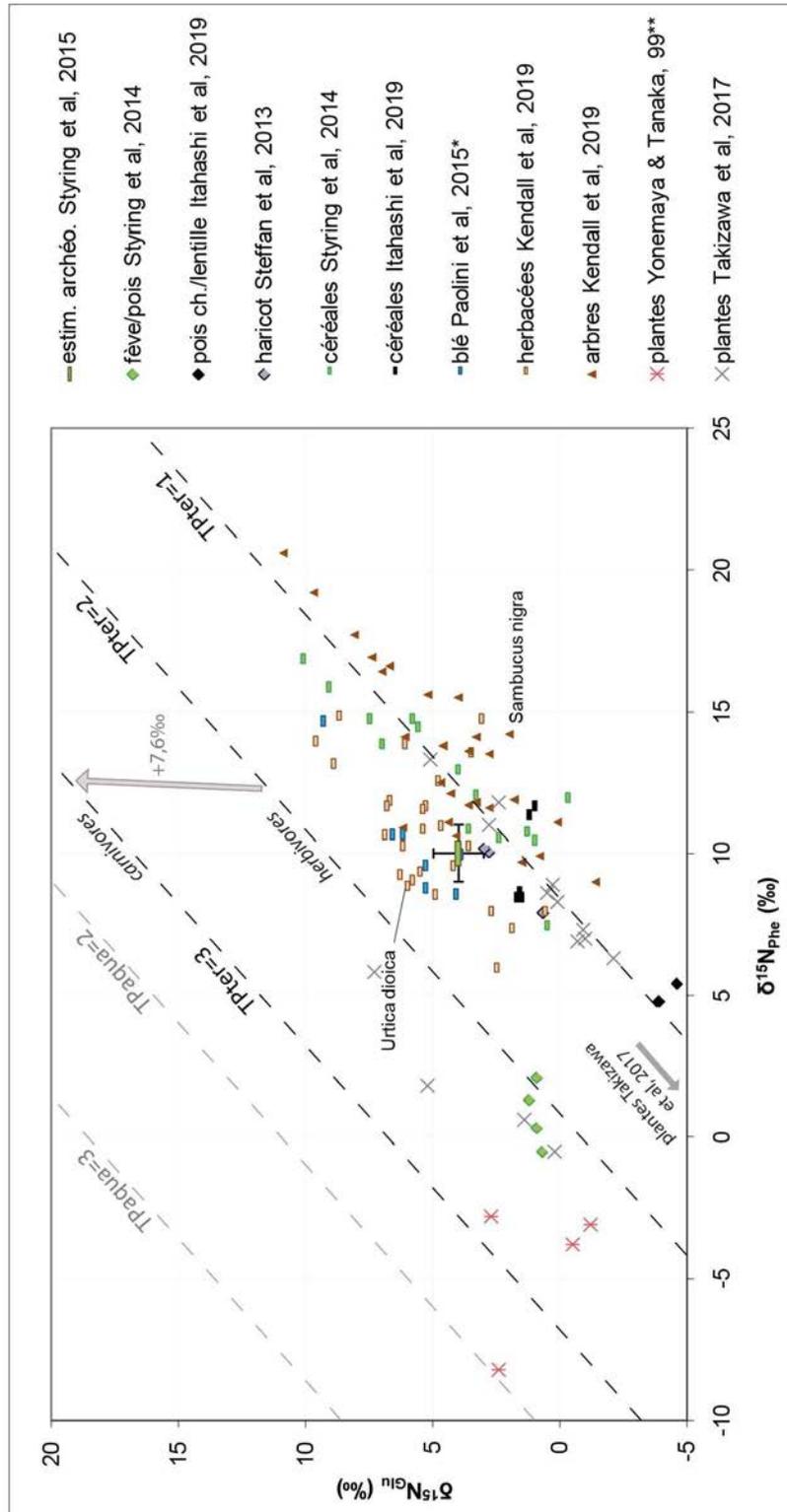


Figure C2. 22 : Distribution des valeurs isotopiques de l'azote des acides aminés Glu et Phe chez les plantes modernes d'après les données de la littérature. Les résultats expriment la grande variabilité du facteur  $\beta$ . Parmi cette variabilité, les estimations d'A. Styring *et al*, 2015 ne sont pas aberrantes. \*blé fertilisés \*\*publication ancienne, valeurs extrêmes.

Voici quelques exemples de  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu-Phe}}$  (facteur  $\beta$ ) mesurés dans cette étude, pour des plantes comestibles relativement communes sous nos latitudes : -2,6‰ pour l'ortie (*Urtica dioica*, plus petit facteur  $\beta$  mesuré), -5‰ pour la stellaire ou l'amarante (*Stellaria media* et *Amaranthus lividus*), -12,2‰ pour le sureau noir (*Sambucus nigra*, plus grand facteur  $\beta$  mesuré), -10,9‰ pour le noisetier (*Corylus avellana*) ou -10,9‰ pour le prunellier (*Prunus spinosa*; Kendall *et al.* 2019). Au Néolithique, si quelques fruits (et autres ressources végétales) sauvages sont consommés par les humains (noisettes, cynorrhodons, cenelles, prunelles, etc.), il semblerait que les protéines végétales proviennent essentiellement des plantes herbacées cultivées : céréales et légumineuses herbacées (pois, lentilles, etc. ; cf. Chap1.I.3.a et Chap1.II.5.a ; Bouby *et al.* 2018). En revanche, certains herbivores mangent également les feuilles des arbres (la consommation de feuilles d'arbres comme le tilleul ou le prunellier par exemple n'est pas non plus exclue pour les populations néolithiques humaines comme ces espèces sont attestées sur le territoire français à cette période et leur consommation est bien connue dans les pratiques traditionnelles ; e.g. Couplan 2009 ; Marguerie et Gebhardt 2006 ; Salavert *et al.* 2018). Cette considération **limite l'utilisation des CSIA-AA sans référentiel faunique local en archéologie**.

NB : Pour les plantes aquatiques dont la consommation est attestée au Néolithique dans le Nord de la France, comme le nénuphar jaune par exemple (*Nuphar lutea*; Bouby *et al.* 2018), les valeurs de facteur  $\beta$  ne sont pas documentées mais sont susceptibles d'être fortement distinctes des plantes terrestres. Leur consommation n'est toutefois pas attendue en grandes quantités d'après les données archéobotaniques et serait plus probablement anecdotique. Elles ne doivent néanmoins pas être écartées.

Par ailleurs, une étude sur les céréales (blé et orge ; *Triticum aestivum* et *Hordeum vulgare*) et les légumineuses (fève et pois ; *Vicia faba* et *Pisum sativum*) a mis en évidence, d'une part une plus grande variabilité du  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu-Phe}}$  dans les **tiges** que dans les **graines** des céréales, probablement parce que les cellules du rachis sont plus sensibles aux légères différences de conditions de croissance et aux adaptations à l'environnement, et d'autre part (et surtout) une nette différence entre le  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu-Phe}}$  des **céréales** (autour de **8‰**) et celui des **légumineuses** (autour de **0‰**; Styring *et al.* 2014b). Les auteurs suggèrent que ce phénomène est probablement dû à des différences de routage métabolique des AA dans les graines en développement de ces légumineuses (*ibid.*). Toutefois, ils concluent qu'en raison du manque de données comparatives sur le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  des légumineuses, il est très difficile d'expliquer ces valeurs observées. À titre de comparaison, voici de rares exemples de  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu-Phe}}$  de légumineuses trouvés dans la littérature (voir aussi la distribution des valeurs Figure C2. 22): **-7,2‰** pour le haricot (*Phaseolus vulgaris*; Steffan *et al.* 2013), **-7,3‰** pour le trèfle blanc (*Trifolium repens*; Kendall *et al.* 2019), **3,3‰** et **1,9‰** pour des feuilles et des racines de soja (*Glycine max*, il s'agit toutefois d'un génotype particulier, « supernodulant », cultivé dans des conditions particulières d'hydroponie ; Yoneyama et Tanaka 1999), **-9,3‰** en moyenne pour des lentilles et pois chiches (*Lens culinaris* et

*Cicer arietinum* ; Itahashi *et al.* 2019). Ce dernier résultat (facteur  $\beta \approx -9,3\%$ ) est loin de celui observé par A. Styring et collaborateurs (2014b) dans des fèves et haricots (facteur  $\beta \approx 0\%$ ). Toutefois, les deux études ont mesuré un facteur  $\beta$  similaire, proche de 8%, dans les mêmes espèces de céréales (blé et orge ; *Triticum aestivum* et *Hordeum vulgare* ; Itahashi *et al.* 2019 ; Styring *et al.* 2014b). La variabilité rencontrée chez les légumineuses à travers ces différentes études ne va pas dans le sens d'une différence idiosyncrasique (s'accompagnant d'une différence de routage métabolique des AA) entre les légumineuses et les plantes non-fixatrices d'azote. Plus de données sont nécessaires afin de mieux comprendre les mécanismes en jeu dans le cycle métabolique de l'azote des AA des végétaux et leur influence sur le facteur  $\beta$ .

### V.2.b. Variabilité du TDF ( $TEF_{Glu}-TEF_{Phe}$ )

S'il est généralement admis un  $TDF_{Glu-Phe}$  « universel » de 7,6%, cette valeur a récemment été remise en question. KW. McMahon et MD. McCarthy (2016) ont mis en évidence un TDF très **variable, de 0 à plus de 10%** dans une grande variété de chaînes trophiques, selon l'espèce et la combinaison aliment-consommateur (Figure C2. 23). Cette variabilité est néanmoins bien plus restreinte si l'on ne considère que les **écosystèmes terrestres (de 6 à 8%)**. Dans les écosystèmes loin des côtes, on peut donc considérer à moindre risque une valeur de TDF autour de 7,6%. De plus, la majorité des études réalisées en nutrition contrôlée dans les écosystèmes terrestres portent sur des insectes ou des champignons (Chikaraishi *et al.* 2011 ; Chikaraishi *et al.* 2010a ; Ishikawa *et al.* 2017 ; Steffan *et al.* 2013), quelques une seulement sur des mammifères (Nakashita *et al.* 2011 ; Steffan *et al.* 2015). D'ailleurs, lorsque nous reprenons le TDF mesuré sur les mammifères de ces dernières études, nous trouvons pour chacune d'elles des valeurs entre 7 et 8%. D'autre part, le TDF est particulièrement variable avec la qualité de l'alimentation et le mode d'excrétion de l'azote (*ibid.*).

En effet, le  $TDF_{Glu-Phe}$  est **plus faible** dans le cas d'une **alimentation de qualité supérieure**, c'est à dire lorsque la composition en AA de l'alimentation est proche de celle du consommateur (faible déséquilibre des AA entre l'alimentation et le consommateur). Dans les hauts niveaux des chaînes alimentaires, par exemple chez les carnivores qui consomment de la viande, les protéines sont similaires entre l'aliment et le consommateur. La diminution du TDF serait due à une incorporation et un routage des AA plus direct avec moins de transaminations/désaminations entraînant un fractionnement.

D'autre part, le TDF est plus faible pour les consommateurs **producteurs d'urée/acide urique** en comparaison des producteurs d'ammoniac (McMahon et McCarthy 2016). Toutefois, dans la plupart des cas, les consommateurs de bas niveau trophique sont des producteurs d'ammoniac, et les consommateurs de haut niveau trophique sont des producteurs d'urée/acide urique. D'autre part, le facteur « qualité alimentaire » semble influencer plus fortement le TDF que le mode d'excrétion.

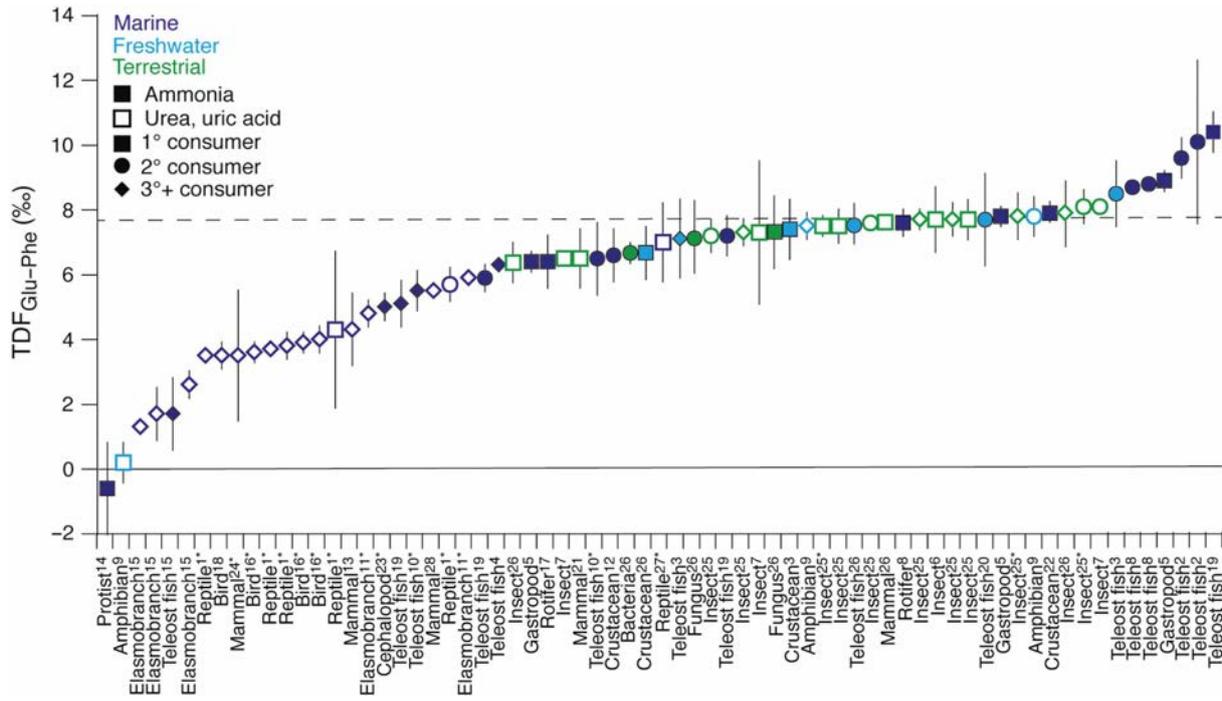


Figure C2.23 : Facteurs de discrimination trophique ( $TDF_{Glu-Phe}$ ) moyens ( $\% \pm SD$ ) pour une large gamme de paires consommateur-régime alimentaire provenant d'études d'alimentation contrôlée publiées et de collections de terrain bien délimitées (indiquées par \*). Les valeurs  $TDF_{Glu-Phe}$  ont été calculées comme la différence des facteurs de fractionnement trophique ( $\Delta^{15}N = \delta^{15}N_{consommateur} - \delta^{15}N_{alimentation}$ ) des valeurs d'acide glutamique et de phénylalanine des consommateurs. Les symboles bleu foncé, cyan et vert représentent respectivement les consommateurs marins, d'eau douce et terrestres ; les symboles remplis et ouverts représentent respectivement les consommateurs produisant de l'ammoniac et de l'urée/acide urique ; et les symboles carrés, circulaires et losanges représentent respectivement les consommateurs primaires, secondaires et tertiaires (et supérieurs). La ligne pointillée horizontale indique un  $TDF_{Glu-Phe}$  de 7,6‰. D'après McMahon et McCarthy, 2016.

Les auteurs stipulent que si le  $TDF_{Glu-Phe}$  est constant dans la chaîne alimentaire des insectes et le transfert trophique est « invisible » dans la chaîne alimentaire microbienne, il n'en va pas de même dans les chaînes supérieures plus complexes qui doivent prendre en compte la variabilité du TDF pour réaliser pleinement le potentiel de la méthode CSIA-AA (McMahon et McCarthy 2016). Les auteurs suggèrent notamment la nécessité de développer un modèle incorporant directement cette variabilité grâce à l'utilisation d'une **équation multi- $TDF_{Glu-Phe}$** .

Par exemple, un TDF très bas a été mesuré chez des **amphibiens d'eau douce** (Figure C2.23 ; Chikaraishi *et al.* 2015). Mais ce phénomène serait peut-être dû à un manque important de protéines alimentaires (modification du  $\delta^{15}N_{Glu}$  mais pas du  $\delta^{15}N_{Phe}$ ). Les autres données sur des organismes d'eau douce (crustacés, amphibiens et poissons téléostéens) affichent plutôt des valeurs autour de 7 à 8‰ (Bowes et Thorp 2015 ; Chikaraishi *et al.* 2009 ; Miller *et al.* 2013 ; Steffan *et al.* 2015). Une étude sur les poissons montre la variabilité du TDF avec la composition en lipides : plus l'organisme contient de lipides, plus le TDF observé est bas (Blanke *et al.* 2017). D'autres recherches, en milieu terrestre, suggèrent un TDF inférieur à 7,6‰ pour **les ruminants** (de 4‰) d'après une expérience en nutrition contrôlée sur des bovins (Kendall *et al.* 2017). Ce comportement s'expliquerait essentiellement par le fait que les ruminants peuvent hydrolyser et recycler l'azote de l'urée via le

rumen. Comme l'urée est appauvrie en  $^{15}\text{N}$  par rapport à l'alimentation, cela diminue le TDF. Pour cette raison, les auteurs soulignent que la mesure du TDF dans chaque chaîne trophique est nécessaire pour estimer précisément le TP des consommateurs en archéologie.

Chez l'humain, il est éthiquement compliqué de mesurer le TDF et l'approche s'appuie sur des valeurs obtenues à partir d'expériences en nutrition contrôlée sur des animaux. Une meilleure connaissance du TDF chez l'humain est requise pour évaluer avec plus de précision et de fiabilité le niveau trophique des humains, à savoir la part relative des protéines animales et végétales dans leur alimentation. **Néanmoins, un TDF constant semble relativement bien adapté aux chaînes alimentaires où tous les consommateurs ont le même mode d'excrétion de l'azote et une alimentation de bonne qualité, c'est-à-dire que la valeur de 7,6‰ est généralement applicable dans la plupart des études sur l'humain en archéologie, tout en gardant en mémoire la possible variabilité, notamment vers les hauts niveaux trophiques des chaînes aquatiques** (McMahon et McCarthy 2016).

### V.2.c. Autres facteurs de modification du $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$

Normalement, les AA essentiels tels que Phe proviennent essentiellement de l'alimentation. Toutefois, dans le cas d'une **alimentation pauvre en protéines**, il peut y avoir un apport d'AA synthétisés *de novo* par les bactéries intestinales (Clementz *et al.* 2009 ; Newsome *et al.* 2011). Ce mécanisme pourrait *in fine* modifier le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  du consommateur (McMahon et McCarthy 2016). Ce cas de figure reste néanmoins peu connu chez l'humain et semble être somme toute mineur.

Par ailleurs, lors de l'étude de consommateurs de **très haut niveau trophique**, la différence entre le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$  et le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  peut être significative, du fait de **l'accumulation du faible fractionnement** (Chikaraishi *et al.* 2009).

Enfin, la **fertilisation** (usage de fumier, d'engrais organique) augmente le  $\delta^{15}\text{N}$  de tous les AA sans distinction (pas d'impact sur le routage métabolique du N) chez les végétaux non fixateurs d'azote (comme les céréales). En revanche, la fertilisation n'a apparemment pas d'impact chez les légumineuses (aucune augmentation du  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ ). Dans les deux cas, le TP associé à l'analyse du  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  n'est pas modifié par la fertilisation, mais les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  et  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  des non fixateurs d'azote peuvent l'être (Styring *et al.* 2014a).

## V.3. Intérêt et limites

Un des intérêts majeurs de cette méthode est de pouvoir préciser, dans un grand nombre de contextes, la **proportion de plantes** dans l'alimentation des populations du passé (Styring *et al.* 2015). En comparaison, l'analyse du collagène global se base généralement sur 2 présupposés : 1) le  $\delta^{15}\text{N}$  des

plantes consommées par les humains est le même que celui des plantes consommées par les animaux et 2) le TEF est constant. Or, les **céréales** consommées par les humains ont souvent des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  **supérieures** à celles du **fouillage** des animaux (du fait notamment de l'utilisation du fumier pour la culture céréalière mais aussi de par la nature même des plantes consommées de façon différentielle) et le  $\text{TEF}_{\text{bulk}}$  **est variable**, de 3 à 5‰ voire plus (Styring *et al.* 2015). Avec la méthode CSIA-AA, il n'y a pas de modification du TP lors de la fertilisation (tous les AA voient leur  $\delta^{15}\text{N}$  augmenter de la même façon) et le **TDF** est *a priori* moins variable. Une étude récente a par exemple permis de préciser la proportion de plantes consommées par des ours (Naito *et al.* 2020).

Intérêt corolaire, la méthode permet souvent de préciser la **proportion de viande** des consommateurs (évaluation de la « carnivorie » ; Naito *et al.* 2013b). Par exemple, une étude sur des populations japonaises montre que d'après l'analyse du  $\delta^{15}\text{N}$  dans les AA, les humains ont consommé plus de viande que ce qu'indiquaient les résultats sur le collagène global (*ibid.*). Une étude similaire a révélé une plus grande proportion de plantes dans l'alimentation des Néandertaliens de Spy Cave (Belgique) que ne le dénotaient les résultats sur le collagène global (Naito *et al.* 2016b). Dans ce contexte, la méthode CSIA-AA a permis de ré-estimer le TP des mammouths, herbivores, qui présentaient un  $\delta^{15}\text{N}$  très élevé dans le collagène global, ce qui empêchait d'estimer précisément le régime alimentaire de ces Néandertaliens.

Toutefois, si cette méthode se révèle d'une **grande utilité dans différents contextes**, elle recèle également des **limites**. Tout d'abord, la variabilité du facteur  $\beta$  et du TDF doit être prise en considération dans l'interprétation des résultats (Ishikawa *et al.* 2017 ; McMahon et McCarthy 2016 ; Naito *et al.* 2018 ; O'Connell et Collins 2018). Il serait notamment judicieux de mesurer le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  **dans les plantes** à la base du réseau trophique étudié pour déterminer le facteur  $\beta$  local dans les équations d'estimation du TP (tout du moins un facteur  $\beta$ -type pour un contexte particulier). Malheureusement, les AA ne survivent pas en assez grande quantité dans les graines de céréales carbonisées (0,4% des AA hydrolysables par rapport aux graines fraîches) et ces mesures sont, à ce jour, impossibles en archéologie (Styring *et al.* 2013). A. Styring et collaborateurs (2015) proposent d'en faire une estimation à partir des valeurs locales de  $\delta^{15}\text{N}$  du collagène global et de la différence, mesurée dans les plantes modernes, entre le  $\delta^{15}\text{N}$  du collagène global et le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$ . Le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  est estimé à partir du  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  de la faune consommée et des consommateurs (cf. Chap7.I., voir aussi Soncin *et al.* 2021).

Par ailleurs, si l'intérêt de la méthode réside en partie sur le fait qu'aucun **référentiel local** ne soit nécessaire, dans certains cas de **régime mixte**, il est utile de connaître la position des ressources de niveau intermédiaire ou dont la position peut varier. Par exemple, la consommation de **viande d'omnivore**, comme le porc, peut troubler les estimations si le TP du porc n'est pas connu ou varie d'un individu à l'autre dans un même contexte. De même, les **poissons** ayant un TP et un  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$

variables (Figure C2. 24), il est difficile d'estimer la part de cette ressource dans l'alimentation des consommateurs sans connaître leur  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  et leur  $\text{TP}_{\text{AA}}$ . Dans certains cas, une différence entre les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  du consommateur et celles des ressources terrestres permet de trancher sur la consommation ou non de poisson, mais une estimation précise des proportions reste impossible sans la mesure directe de ces ressources. Enfin, dans le cas de régime mixte basé sur des ressources variées dont les TP et les  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  se recourent, l'estimation des proportions de chacune des ressources sera compliquée.

NB : Une nouvelle méthode a récemment été développée pour identifier la consommation de poisson de façon plus directe, basée sur la différence entre le  $\delta^{15}\text{N}$  de la phénylalanine et de la méthionine (Ishikawa *et al.* 2018).

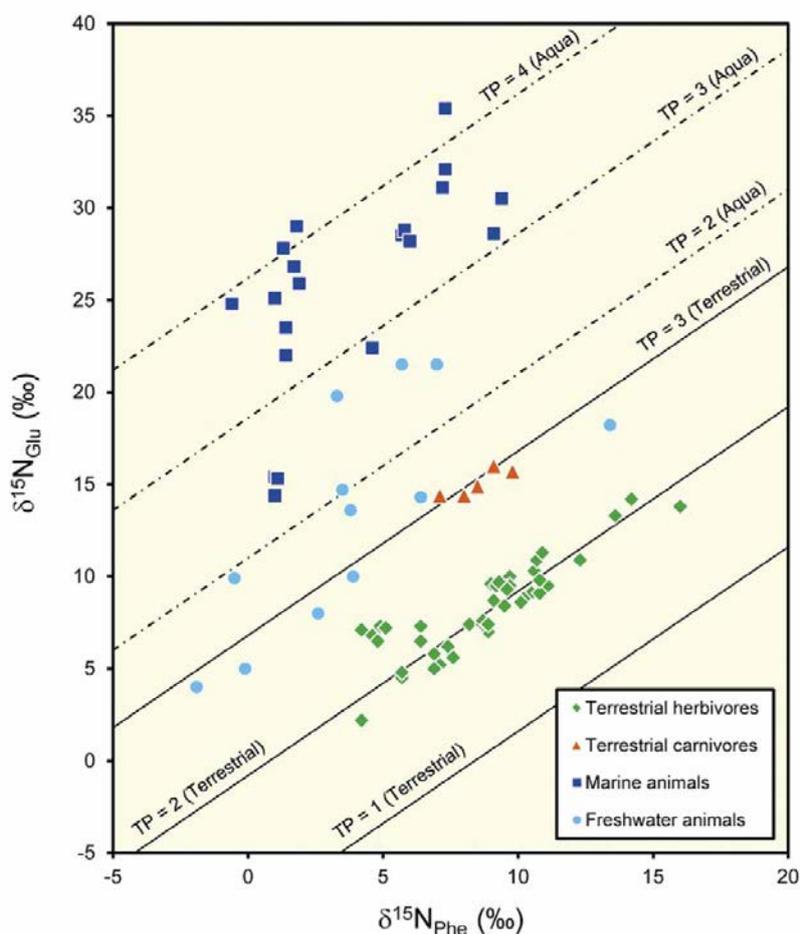


Figure C2. 24 : Dispersion des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  et  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  des spécimens archéologiques de différentes espèces animales étudiés par Naito *et al* 2016b. Les lignes continues et pointillées représentent les niveaux trophiques théoriques (TP = 1, 2 et 3) pour les écosystèmes terrestre et aquatique, respectivement. D'après Naito *et al* 2016b.

#### V.4. Fiabilité des résultats

Tout d'abord, TC. O'Connell et MJ. Collins (2018) conseillent de présenter les **résultats avec une incertitude**, en considérant notamment la variabilité du facteur  $\beta$  de -3,3 à -12,1‰ pour les écosystèmes terrestres en C3 au lieu de la seule valeur constante de -8,4‰ généralement admise et notamment valable pour des carnivores se nourrissant de protéines d'herbivores (haute qualité alimentaire). Néanmoins, cette variabilité vaut surtout dans les longues chaînes aquatiques et la grande incertitude des résultats qui s'en dégagerait ne serait d'aucune utilité dans le cas de l'étude de l'alimentation des humains en contexte archéologique pour lequel une grande variabilité des ressources est déjà envisagée. Pour éviter la possible variation du facteur  $\beta$ , Y. Naito et collaborateurs (2018) recommandent de comparer les valeurs des humains avec celles de la faune locale, au même titre que pour le collagène global. Ils soulignent que les valeurs les plus variables du facteur  $\beta$  (de -3,3 à -12,1‰) correspondent à des situations extrêmes (céréales fertilisées et fumées ; Paolini *et al.* 2015) ou à des cas particuliers (légumineuses ou fleurs d'arbres ; Styring *et al.* 2014b ; Takizawa *et al.* 2017).

D'autre part, pour évaluer la qualité analytique des mesures d'acides aminés, TC. O'Connell et MJ. Collins (2018) suggèrent de vérifier la **différence de  $\delta^{15}\text{N}$**  entre les AA proline (**Pro**) et hydroxyproline (**Hyp**). Selon les auteurs, comme l'Hyp dérive de la Pro, les valeurs  $\delta^{15}\text{N}$  des deux doivent être similaires. Sinon, cela indiquerait très probablement une **erreur de mesure**. Un graphique croisé de tous les échantillons ayant fourni des valeurs de Pro et d'Hyp (l'Hyp est mesurée ou non selon la méthode de dérivation utilisée) devrait montrer une relation linéaire entre Pro et Hyp d'équation proche de  $y=x$ . Cependant, les mesures peuvent s'écarter légèrement de la ligne 1:1 pour des raisons inconnues mais sans que la fiabilité des résultats ne soit remise en question (Naito *et al.* 2018). En effet, des conditions analytiques robustes en termes de résolution de référence sur le chromatogramme (cf. VIII.4.), avec l'utilisation de standards pour la calibration, et de reproductibilité des valeurs originales de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  (pour les acides aminés dérivés) sur la base de réglages techniques appropriés rendent peu probables des problèmes de mesure à l'origine d'une telle divergence (*ibid.*). Comme on ne connaît pas l'influence des processus cataboliques du collagène osseux sur la composition isotopique de l'azote, la différence entre Pro et Hyp pourrait être due à de la **diagénèse** affectant particulièrement l'un ou l'autre des AA. Ces considérations doivent être prises en compte avant d'utiliser la Pro à des fins de reconstruction des régimes anciens et il serait judicieux de s'abstenir tant que sa validité n'a pas été prouvée.

NB : Dans notre étude, la Pro n'est pas utilisée pour la reconstruction des patrons alimentaires et la diagénèse est évaluée par ailleurs par les concentrations élémentaires et le chromatogramme.

## V.5. Résumé

### Mesure du $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ – dans les acides aminés spécifiques – du collagène :

Le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  peut préciser le **niveau trophique (TP)**, notamment la proportion de **protéines végétales** vs **protéines animales** (« degré de carnivorie ») et détecter la **consommation de poisson** en l'absence de **référentiel local**.

Le facteur d'enrichissement trophique (TEF) du  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  est d'environ  $+8\% \pm 1,1\%$  alors que le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  varie très peu entre deux niveaux trophiques (TEF  $\approx +0,4 \pm 0,4\%$  ; cf. Figure C2. 20, p.137).

Le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  reflète directement le  $\delta^{15}\text{N}$  à la **base de la chaîne alimentaire** (et donc l'environnement).

La méthode s'affranchit de la variabilité environnementale et climatique et les résultats sont directement comparables **quelque soit le contexte spatio-temporel** parce qu'elle est basée sur la différence entre les deux AA d'un même individu (cf. Figure C2. 21, p.139).

La différence entre  $\text{TEF}_{\text{Glu}}$  et  $\text{TEF}_{\text{Phe}}$  correspond au facteur de discrimination trophique (**TDF**) dont la valeur « universelle » (généralement admise) est de **7,6%**.

**L'équation** d'estimation du niveau trophique est :  $\text{TP}_{\text{AA}} = ([\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}} + \beta] / \text{TDF}) + 1$

TP = 1 pour les producteurs primaires (végétaux), TP = 2 pour les consommateurs primaires (herbivores), TP entre 2 et 3 pour les omnivores, TP = 3 pour les consommateurs secondaires (carnivores), etc.

La différence de  $\delta^{15}\text{N}$  entre Glu et Phe ( $\Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu-Phe}}$ ) des **végétaux**, dit aussi **facteur  $\beta$** , est d'environ -8,4‰ chez les plantes en C3, environ +0,4‰ chez les plantes en C4 et environ +3,4‰ chez les végétaux aquatiques (algues et cyanobactéries ; cf. Figure C2. 20, p.137).

### Variabilité du $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ et conséquences :

Le **facteur  $\beta$** , à la base de la chaîne alimentaire, servant à calculer le TP est **variable** entre les plantes.

Le **TDF** servant à calculer le TP est **variable** (surtout dans les plus longues chaînes et dans des conditions particulières) notamment selon la qualité alimentaire (équilibre des AA entre les protéines de l'alimentation et celles du consommateur) et le métabolisme (e.g. cas particulier des ruminants ?).

L'interprétation des résultats est plus délicate dans les **chaînes alimentaires complexes** avec des ressources de **niveaux intermédiaires** (comme les omnivores).

La mesure d'un **référentiel local** peut s'avérer utile voire nécessaire dans le cas de régimes alimentaires mixtes.

Le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  n'est **pas mesurable dans les végétaux archéologiques** (pas assez d'AA) et sera au mieux seulement estimé à partir de la différence entre valeurs de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  modernes et de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  archéologiques.

### VI. Les éléments traces (Sr/Ca et Ba/Ca)

---

Parmi tous les éléments traces étudiés depuis plusieurs dizaines d'années, à ce jour seuls le strontium (Sr) et le baryum (Ba), et plus exactement les rapports Sr/Ca et Ba/Ca, constituent de bons proxies pour tenter de reconstituer les régimes alimentaires à partir des ossements archéologiques (Burton et Price 2002 ; Lugli et Cipriani 2017, 2018 ; Simpson *et al.* 2021). Ils complètent l'image obtenue par l'analyse des isotopes stables pour retrouver le niveau trophique et la proportion relative de plantes vs viande dans un système à deux sources principalement. Les chaînes alimentaires complexes s'avèrent une fois encore plus difficiles à retracer mais la combinaison des marqueurs permet de préciser les schémas alimentaires des populations anciennes. L'analyse des éléments traces est toutefois assez peu utilisée en archéologie et comporte un certain nombre de variables méconnues. Leur mesure se réalise non plus à partir du collagène mais sur la fraction minérale (bioapatite) des os et des dents.

NB : L'abréviation TE pour « *trace element* » pourra être utilisée (notamment dans les figures et tableaux) pour se référer aux concentrations mesurées dans ce travail et en particulier aux rapports Sr/Ca et Ba/Ca.

#### VI.1. Principe

##### VI.1.a. Métabolisme et biopurification du Ca

Le Sr et le Ba sont des éléments non essentiels chimiquement analogues au Ca : ils appartiennent au même groupe des métaux alcalino-terreux (même colonne du tableau périodique ; cf. Figure C2. 3, p.86). À l'inverse du Ca qui est un élément majeur essentiel, le Sr et le Ba n'ont pas de fonction métabolique dans l'organisme et tendent à **suivre le métabolisme du Ca**, à le mimer (pour les plantes et les animaux ; Elias *et al.* 1982). Les ions Sr<sup>2+</sup> et Ba<sup>2+</sup> peuvent **se substituer au Ca<sup>2+</sup> dans l'hydroxyapatite** des os et des dents pendant leur formation et leur remaniement (cf. III.5.b). Toutefois, le passage du Sr et du Ba dans la circulation sanguine à partir du tube digestif est moins efficace que celui du Ca du fait de leur plus grande taille atomique, de sorte que seulement environ 20 % de Sr est absorbé par rapport au Ca (Burton et Wright 1995), et encore moins pour le Ba, plus lourd (Humphrey 2014)<sup>4</sup>. Parmi le Sr et le Ba absorbés, la quasi-totalité s'accumule dans les os, où ils remplacent donc le Ca dans l'hydroxyapatite. Ce qui n'est pas absorbé est éliminé par les reins.

L'élimination préférentielle du Sr et du Ba par rapport au Ca, processus appelé **biopurification du Ca**, conduit à un appauvrissement en Sr et Ba, et donc une diminution des rapports Sr/Ca et Ba/Ca, entre l'alimentation et le corps (dont les os et les dents ; Burton *et al.* 1999 ; Comar *et al.* 1957).

---

<sup>4</sup> Le principe est le même pour les plantes avec le transfert du Ca et dans un moindre mesure du Sr et du Ba à travers les membranes cellulaires et dans le cytoplasme, induisant une diminution des rapports Sr/Ca et Ba/Ca entre le sol et les plantes (Elias *et al.* 1982).

Rappelons que le Ca, essentiel, est régulé par l'organisme et reste stable, contrairement au Sr et au Ba qui reflètent directement les taux de l'alimentation. Il en résulte une **diminution de ces rapports Sr/Ca et Ba/Ca entre chaque niveau trophique ascendant**, les **plantes** ayant des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca **plus élevées que les herbivores** qui les consomment, eux-mêmes ayant des valeurs **supérieures aux carnivores** qui s'en nourrissent (Figure C2. 25).

### VI.1.b. Rapport observé (OR) entre l'os et l'alimentation

La Figure C2. 25 montre la corrélation existant entre les rapports Sr/Ca et Ba/Ca pour trois écosystèmes terrestres de référence (Burton *et al.* 1999 ; Elias *et al.* 1982 ; Gilbert *et al.* 1994). Pour une meilleure lecture des graphiques, les rapports Sr/Ca et Ba/Ca sont **transformés en logarithme** et représentés en **ordre inverse**. Le passage en logarithme permet de maintenir le même ordre de grandeur pour chaque intervalle entre deux niveaux trophiques (à l'inverse, les unités linéaires témoignent de la très forte contraction de la variabilité des ratios Sr/Ca et Ba/Ca pour les niveaux trophiques les plus hauts ; voir la Figure C2. 31, p.166).

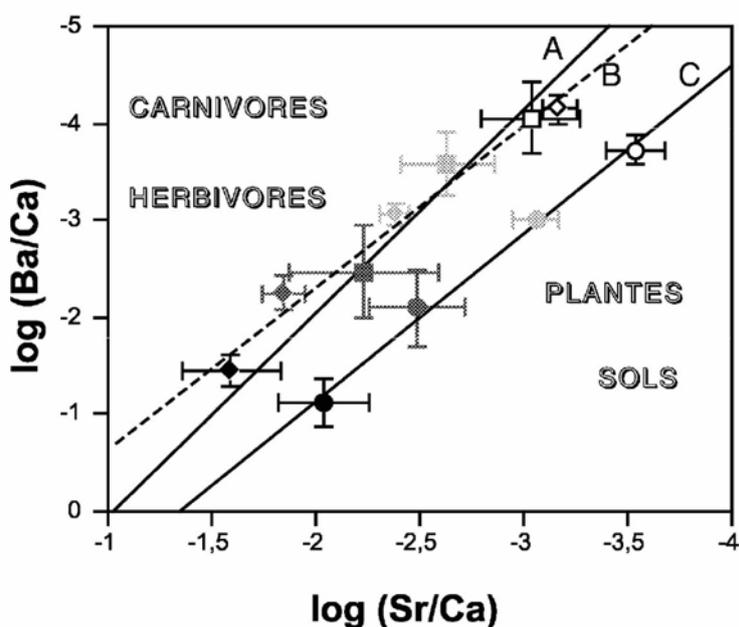


Figure C2. 25 : Représentation de la diminution des rapports Sr/Ca et Ba/Ca avec l'augmentation du niveau trophique dans trois écosystèmes terrestres de la région du Cap (Afrique du Sud ; A, carrés), de Californie (États-Unis ; B, losanges) et du Wisconsin (États-Unis ; C, ronds) d'après les données de Gilbert *et al.*, 1994, Elias *et al.*, 1982 et Burton *et al.*, 1999, respectivement. Les données sont exprimées en log pour obtenir une représentation linéaire de la corrélation entre Sr/Ca et Ba/Ca (voir aussi Figure C2. 31). Les droites de régression d'équation  $\log(\text{Ba/Ca}) = \alpha \cdot \log(\text{Sr/Ca}) + \beta$  ont une pente similaire ( $\alpha = 1,71, 1,62$  et  $1,97$  respectivement) et un  $\beta$  variable du fait d'un décalage en  $\log(\text{Sr/Ba})$  entre les écosystèmes dû à la composition particulière des plantes, qui dépend elle-même de la nature géologique des sols. D'après Balter *et al.*, 2001.

La diminution concomitante de ces deux rapports avec l'augmentation du niveau trophique (TP) induit une **relation de puissance** entre Sr/Ca et Ba/Ca – et une corrélation **linéaire** entre  $\log(\text{Sr/Ca})$  et  $\log(\text{Ba/Ca})$  – avec un ratio observé entre chaque niveau trophique constant, cela dans tous les réseaux

des **mammifères terrestres**, indépendamment des paramètres écologiques (Balter 2004). Cette relation de corrélation est illustrée dans la Figure C2. 25. La pente de ces droites de corrélation est globalement similaire entre les différents écosystèmes et la moyenne de ces pentes ( $\alpha = 1,79 \pm 0,33$ ) correspond au **coefficient allométrique** reliant Sr/Ca à Ba/Ca entre chaque niveau trophique (Balter 2004 d'après les moyennes des droites de régression de Burton *et al.* 1999 ; Elias *et al.* 1982 ; Gilbert *et al.* 1994).

NB : Cette relation est valable pour l'os et les muscles mais ne prévaut pas pour les dents (cf. VI.1.c).

Le **rapport observé (OR)** entre l'os et l'alimentation est donné par les formules :

$$OR_{Sr} = \frac{Sr/Ca_{os}}{Sr/Ca_{alimentation}} \quad \text{et} \quad OR_{Ba} = \frac{Ba/Ca_{os}}{Ba/Ca_{alimentation}}$$

Ce rapport est connu et varie de 0,16 à 0,39 pour le Sr ( $OR_{Sr} \approx 0,30 \pm 0,08$ ) et de 0,08 à 0,33 pour le Ba ( $OR_{Ba} \approx 0,16 \pm 0,08$ ), selon les données disponibles pour les écosystèmes terrestres actuels (voir la synthèse de Balter 2004). Ces valeurs sont reliées par l'équation  $OR_{Ba} = OR_{Sr}^\alpha$  où  $\alpha$  est le coefficient allométrique cité plus haut égal à  $1,79 \pm 0,33$  (*ibid.*).

NB : L'OR serait l'équivalent du TEF utilisé pour les rapports isotopiques. Si le terme OR est le plus couramment utilisé (Comar *et al.* 1957) et celui que nous emploierons dans ce travail, certains auteurs utilisent également les termes de « rapport de bioségrégation » (RB ; Balter *et al.* 2001), « facteur de transfert trophique » (TTF ; DeForest *et al.* 2007) ou encore « facteur de biopurification » (BPF) qui est l'inverse de l'OR ( $BPF = \frac{Sr/Ca_{alimentation}}{Sr/Ca_{os}}$  ; Elias *et al.* 1982).

C'est ce rapport qui permet de retracer les niveaux trophiques, néanmoins sous certaines conditions (cf. VI.2). Il est à noter que le rapport **Ba/Ca** constitue un **indicateur du niveau trophique plus sensible** que le Sr/Ca du fait du rayon atomique plus grand de Ba par rapport à Sr et de sa plus grande bioségrégation (Burton *et al.* 1999 ; Ezzo *et al.* 1995 ; Kohn *et al.* 2013). L'infériorité de l' $OR_{Ba}$  par rapport à l' $OR_{Sr}$  témoigne de cette caractéristique (élimination préférentielle de Ba par rapport à Sr). En effet, plus l'OR est petit, plus l'écart entre l'alimentation et le consommateur est grand.

### VI.1.c. Différence entre les tissus et cas particulier de l'émail

La mesure des concentrations élémentaires de Sr, Ba et Ca dans différents tissus de plusieurs mammifères montre que, si leur composition diffère, les rapports Sr/Ca et Ba/Ca **des muscles et des os** sont **similaires** (Figure C2. 26 ; Balter 2004 ; Elias *et al.* 1982). Les valeurs mesurées dans l'os des herbivores offrent donc une bonne estimation de l'alimentation des carnivores. Notons par ailleurs que ces ratios sont identiques dans tous les os (Sillen et Kavanagh 1982). Toutefois, l'os étant plus sensible à la diagenèse que l'émail dentaire, ce dernier pourrait constituer un support plus approprié pour

l'étude des restes anciens mal conservés. Or, si l'OR entre l'os et l'alimentation est bien connu, il existe beaucoup moins de données **dans l'émail** et aucun  $OR_{\text{émail-alimentation}}$  n'a pu être défini.

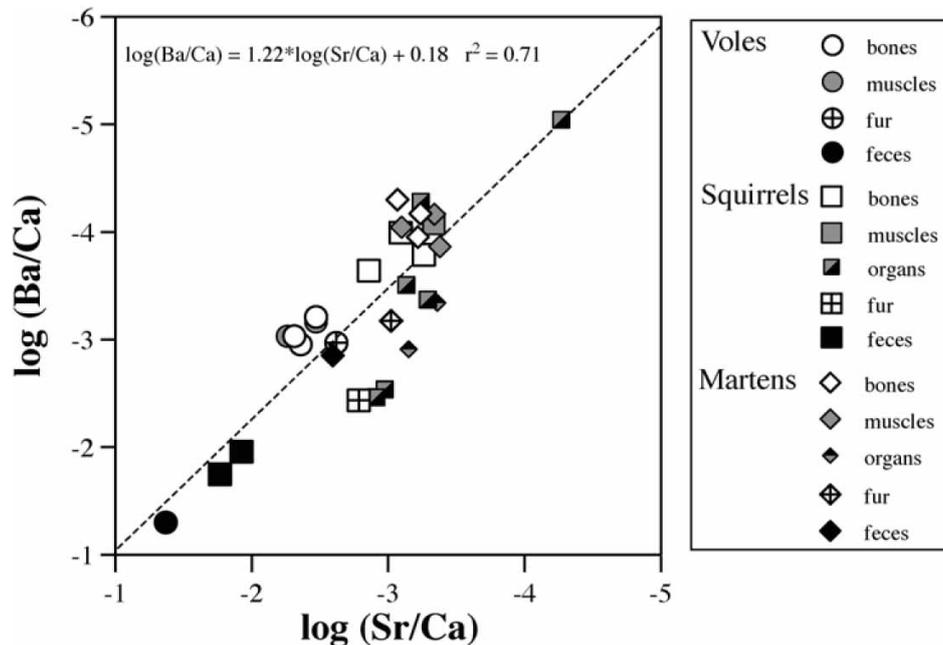


Figure C2. 26 : Distribution des valeurs de  $\log(\text{Sr}/\text{Ca})$  vs  $\log(\text{Ba}/\text{Ca})$  des tissus mous, de l'os et des excréments de plusieurs mammifères - campagnols (ronds), écureuils (carrés) et martes (losanges) - d'après les données d'Elias *et al.*, 1982 compilées par Balter 2004. La composition des tissus mous varie au sein d'un organisme mais les rapports Sr/Ca et Ba/Ca des muscles et des os sont similaires. L'élimination préférentielle de Sr et Ba chez les mammifères est illustrée par le fort enrichissement systématique des fèces. D'après Balter 2004.

La comparaison des rapports Sr/Ca et Ba/Ca entre l'os, la dentine et l'émail de bovinés et cervidés élevés en conditions de nutrition contrôlée a permis de mettre en évidence des différences significatives entre ces différents tissus (Peek et Clementz 2012a). Les résultats de cette étude, dont l'exemple des cervidés est reporté dans la Figure C2. 27, montrent que les rapports Sr/Ca et Ba/Ca sont presque systématiquement **plus faibles dans l'émail** que dans l'os et la dentine, d'une part, et d'autre part qu'ils **varient largement entre les dents et leur localisation**, dans l'émail.

Les dents **déciduales** présentent notamment des valeurs inférieures à celles des dents **permanentes** (*ibid.*). Ce résultat a été confirmé par une étude plus récente sur des dents humaines (Tacail *et al.* 2017). La différence entre les dents déciduales et permanentes, dont les couronnes commencent à se former in-utero et après la naissance respectivement – pendant la période de l'allaitement pour les permanentes les plus précoces comme la première molaire ou les incisives (AlQahtani *et al.* 2010) –, est probablement due à une différence de transfert de Sr et Ba à travers le placenta et la glande mammaire (cf. VI.1.e). L'émail des dents déciduales étant formé en partie in utero (presque totalement pour les incisives, alors que les canines et les deuxièmes molaires finissent leur formation d'émail vers 10 mois en moyenne, bien que le calendrier soit très variable d'un individu à l'autre), le transfert de Sr et Ba restreint à travers le placenta peut expliquer les valeurs plus faibles dans les dents déciduales (AlQahtani *et al.* 2010 ; Humphrey 2014). En outre, la variabilité au sein des dents déciduales et entre

les dents permanentes s'explique probablement par leur calendrier de croissance asynchrone et par le fait que les ratios Sr/Ca et Ba/Ca varient avec l'âge (cf. VI.1.d). La variabilité élémentaire pré et post-natale entre les tissus dentaires formés à différents moments de la vie a également été montré par A. Dolphin et collaborateurs (2005).

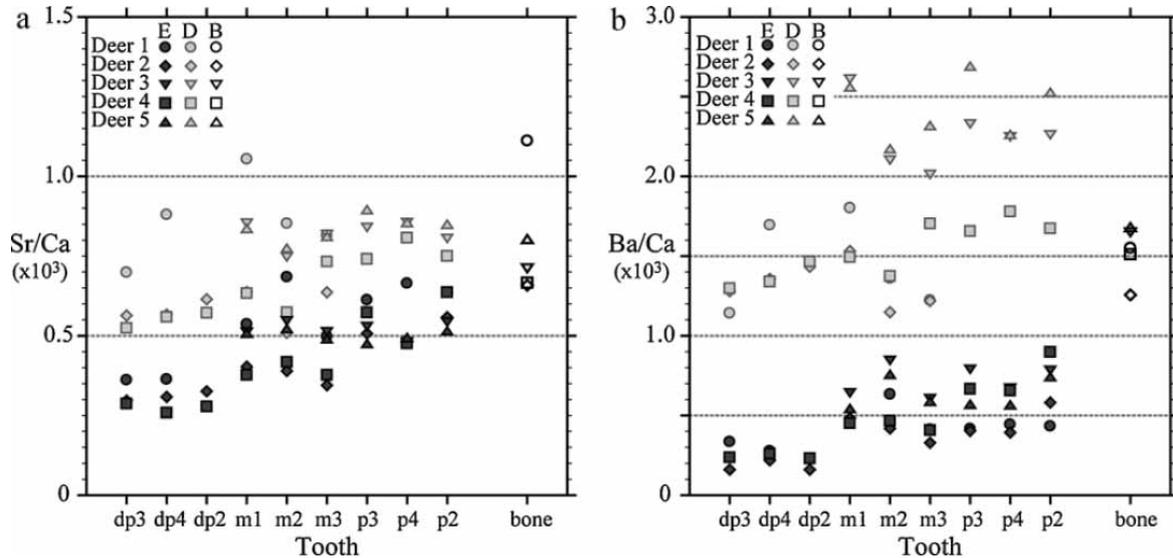


Figure C2. 27 : Distribution des valeurs de Sr/Ca (a) et Ba/Ca (b) de cinq cerfs en fonction du type de dent. Les symboles gris foncé représentent l'émail (E), les symboles gris clair la dentine (D) et les symboles blancs l'os (B). Les erreurs liées à ces valeurs sont inférieures à la hauteur des symboles. Les dents sont classées par ordre de minéralisation de l'émail. D'après Peek et Clementz 2012a.

De plus, l'étude de T. Tacail et collaborateurs (2017) montre que les ratios **Sr/Ca et Ba/Ca diminuent depuis la jonction émail dentine (JED, voir Figure C2. 6, p.93) vers la surface de l'émail** pour les dents permanentes, où ils deviennent également beaucoup plus variables. Cette dernière étant plus sensible aux modifications élémentaires post-minéralisation, il est conseillé de réaliser les analyses le long de la jonction émail-dentine pour une plus grande fiabilité (*ibid.*). La variabilité élémentaire observée dans les dents par ces différentes études souligne l'importance d'un échantillonnage cohérent et adapté lors de l'étude des éléments traces dans l'émail dentaire.

Du fait de cette variabilité, et parce que les analyses des éléments traces (Sr/Ca et Ba/Ca) portant sur l'émail sont beaucoup plus sporadiques que dans l'os, il semble **difficile d'établir un  $OR_{\text{émail-alimentation}}$  stable**. À titre d'exemple, une étude de M. Sponheimer et J. Lee-Thorp (2006) propose des OR différents pour les herbivores et les carnivores à partir d'échantillons modernes :  $OR_{Sr} = 0,18$  et  $0,53$  et  $OR_{Ba} = 0,12$  et  $0,26$  pour les herbivores et les carnivores respectivement. Si ces valeurs sont du même ordre de grandeur que dans l'os, le manque de données de comparaison ne permet pas de confirmer ou non leur caractère systématique. De plus, la variabilité des valeurs mesurées dans l'émail appelle à **précaution** quant à l'interprétation des données dans un but de reconstitution alimentaire.

Enfin, les éléments n'ont pas la même **diffusivité** dans les os que dans les dents (Kohn et Moses 2013 ; Reynard et Balter 2014) et la comparaison des concentrations élémentaires dans différents tissus (à

savoir pour notre travail dans l'os et l'émail dentaire) doit prendre en compte ces différences. Toutefois, la comparaison des ratios Sr/Ca et Ba/Ca (relativement au Ca donc) s'affranchit justement de ce problème, bien qu'une bonne connaissance des facteurs de diffusivité permette de comprendre les processus en jeu lors de l'absorption des différents éléments dans la bioapatite.

#### VI.1.d. Influence de l'âge sur le rapport Sr/Ca

Chez les **nourrissons**, le **taux d'absorption de Sr est plus élevé** du fait d'une moindre discrimination du Sr vis-à-vis du Ca. En effet, les tout-petits n'ont pas encore la capacité d'éliminer préférentiellement le Sr et l' $OR_{Sr}$  est donc plus grand chez les plus jeunes (proche de 1 à la naissance, c'est-à-dire qu'il existe donc moins de différence entre leur alimentation et leur bioapatite ; Tableau C2. 4). Mais comme la teneur en Sr disponible est plus basse (le lait maternel est appauvri en Sr ; cf. VI.1.e), les rapports **Sr/Ca** enregistrés chez les **tout-petits** sont généralement **plus bas** que ceux des adultes (Comar *et al.* 1957 ; Sillen et Kavanagh 1982 ; Tsutaya et Yoneda 2015). Ensuite, le rapport Sr/Ca **augmente avec le sevrage** (cf. VI.1.e). De plus, le Sr/Ca semble **plus variable avant 14 ans** du fait de processus physiologiques mal connus probablement en lien avec la croissance ; le coefficient de variation diminue ensuite chez les adultes (Sillen et Kavanagh 1982). Lors de l'échantillonnage dans les tissus dentaires, il est utile de privilégier les dents formées plus tardivement, comme les M2, pour éviter la variabilité de ce signal (dans la mesure où l'on ne cherche pas à l'identifier). L'analyse d'ossements immatures doit également prendre en compte cette variabilité.

NB : L'influence de l'âge n'est, à notre connaissance, pas documenté pour le Ba.

Individus jeunes			Adultes	
Espèce	Age	$OR_{Sr}$	Espèce	$OR_{Sr}$
rat	14-18 jours	0,97	chèvre	0,23
bœuf	2 jours	0,99	cochon	0,19
	2 mois	0,91	mouton	0,2
	3 mois	0,86		0,24
	naissance-6 semaines	0,70-0,80	souris	0,35
cochon	6 semaines - 3 mois	0,4	rat	0,27
chien	naissance-sevrage	0,8	cochon d'Inde	0,27
cerf	jeunes	1,05	lapin	0,22
humain	2 à 9 mois	1,05		0,2
	25-46 jours	0,92	rat kangourou	0,16
	1 an	0,6	vache	0,3
	4-14 jours	0,39	chien	0,25

Tableau C2. 4 : Valeurs d' $OR_{Sr}$  entre l'alimentation et l'os de plusieurs mammifères sains juvéniles et adultes d'après les données de Sillen et Kavanagh 1982 et Sillen et Smith 1984.

#### VI.1.e. La lactation

Une étude longitudinale (par ablation laser) sur des dents humaines d'enfants et de macaques en captivité a montré une **augmentation claire du ratio Ba/Ca pendant l'allaitement** : on observe une

augmentation du Ba/Ca à la naissance puis une diminution avec le sevrage (Austin *et al.* 2013). Les tissus dentaires formés en période prénatale ont une concentration en Ba plus faible à cause d'un transfert de Ba restreint à travers le placenta (Krachler *et al.* 1999). Ensuite, une **biodisponibilité plus élevée de Ba dans le lait** associé à un transfert actif de Ba à travers la glande mammaire conduit à une **augmentation du rapport Ba/Ca** chez les individus allaités (Austin *et al.* 2013 ; Humphrey 2014). Cette étude a par exemple mis en évidence une cyclicité avec des phases de retour d'allaitement en période de disette et de stress physiologique chez les Australopithèques. Une augmentation du Ba/Ca avec l'allaitement ne va pas dans le sens des suppositions préalablement exprimées sur la base de l'observation du Sr/Ca (cf. *infra*). Malheureusement, le Ba est moins bien documenté que le Sr parce qu'étudié plus récemment.

À l'inverse, le ratio de **Sr/Ca** est **plus bas dans le lait maternel** en raison d'un effet de ségrégation au niveau de la glande mammaire, induisant une diminution du ratio Sr/Ca chez les enfants non sevrés (Humphrey *et al.* 2008). Le schéma semble toutefois moins clair pour le Sr/Ca que pour le Ba/Ca lorsque l'on observe les profils mesurés par ablation laser (voir VIII pour le principe technique de l'ablation laser ; Austin *et al.* 2013 ; Tacail *et al.* 2017).

C. Austin et collaborateurs (2013) observent, eux, une augmentation continue du Sr/Ca après la naissance chez les macaques élevés en captivité et un profil similaire au Ba/Ca (plus élevé pendant la période d'allaitement) chez Néandertal. La variation des rapports Sr/Ca et Ba/Ca dans les tissus formés entre la période pré-natale, d'allaitement et de sevrage est complexe et due à une série de processus métaboliques incluant l'absorption gastro-intestinale, l'excrétion rénale, le transfert à travers le placenta et la glande mammaire et la formation de la bioapatite (Humphrey 2014 ; Tsutaya et Yoneda 2015). Quoi qu'il en soit, l'analyse séquentielle des éléments traces dans les dents, et notamment Ba/Ca qui a un meilleur pouvoir discriminant que Sr/Ca et montre un signal plus clair, permettrait de suivre le signal de l'allaitement au cours du temps (Austin *et al.* 2013 ; Mays 2003). Plus d'analyses sont toutefois nécessaires pour mieux comprendre les processus en jeu au cours de cette période de transition alimentaire. Notamment, comment Ba/Ca peut augmenter pendant l'allaitement et Sr/Ca avoir l'effet inverse et diminuer alors que tous deux sont censés suivre le métabolisme du Ca ?

D'après une étude sur des dents humaines actuelles, le traçage du Ba/Ca et Sr/Ca dans différentes dents déciduales de trois individus (dont on ne connaît pas la durée de l'allaitement) n'a révélé aucune récurrence (Tacail *et al.* 2017). Le calendrier de croissance dentaire étant très variable d'un individu à l'autre, le repérage histologique de la ligne néonatale et la connaissance de la durée de l'allaitement permettrait de caler précisément les valeurs de cette étude avec la naissance des individus pour tenter de détecter les tendances des rapports élémentaires en lien avec l'allaitement.

## VI.1.f. Influence de l'alimentation et teneurs en Ca

Si les rapports Sr/Ca et Ba/Ca dans la bioapatite reflètent l'apport moyen en Sr/Ca et Ba/Ca du régime alimentaire, cette moyenne est influencée de manière disproportionnée par les **aliments à forte teneur en calcium** (Burton et Wright 1995). Les plantes, extrêmement plus riches en Ca que la viande (les légumes feuille tels que l'amarante contiennent par exemple dix fois plus de Ca et de Sr que la viande ; Burton et Price 2002) auront plus d'impact sur les valeurs du consommateur que la viande, si ces deux ressources sont consommées dans les mêmes proportions. De plus, la biodisponibilité du Ba, du Sr et du Ca n'est pas la même selon les ressources végétales ou animales (Austin *et al.* 2013). Les concentrations élémentaires varient également entre les plantes et se répercutent le long de la chaîne alimentaire (cf. VI.3.b). La Figure C2. 28 montre la corrélation directe entre la concentration en Ca des plantes et les valeurs de Sr/Ca de l'alimentation, d'après les données de J. Burton et T. Price (2002). De la même façon que pour les ratios isotopiques, il est nécessaire de considérer les teneurs relatives en Ca des différentes sources alimentaires et de les inclure dans les équations avant de vouloir déterminer leurs proportions relatives (*ibid.*). Ce **modèle de bilan massique** (*mass-balance model*) correspond à ceux utilisés dans les modèles impliquant les ratios isotopiques de C et N et les concentrations en C et N de chaque ressource (cf. Chap4.VII).

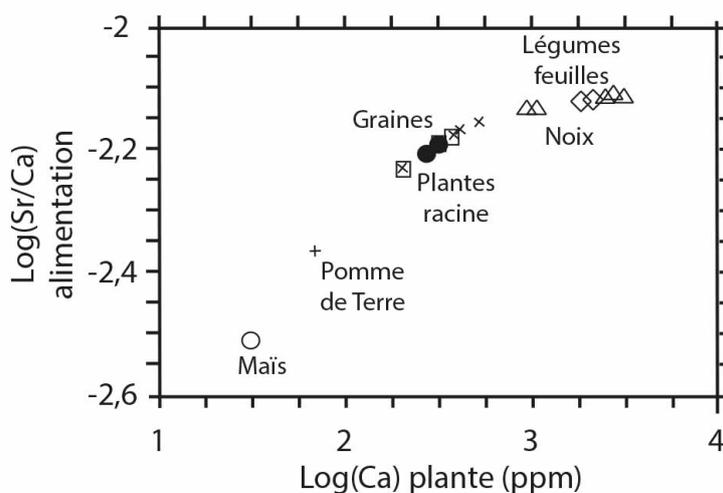


Figure C2. 28 : Distribution des valeurs de Sr/Ca alimentaire en fonction de la teneur en Ca des plantes. Modifié d'après Burton et Price 2002.

Par ailleurs, il semblerait que certaines **préparations alimentaires** puissent avoir un effet sur les rapports de Sr/Ca et Ba/Ca (Burton et Wright 1995). Pour finir, de fortes **carences en Ca** pourraient modifier les modalités d'absorption et les processus métaboliques du Ca et ainsi influencer les ratios enregistrés dans les tissus. Les auteurs proposent que les ratios de Sr/Ca et Ba/Ca soient plutôt utilisés pour détecter les composants alimentaires riches en minéraux que pour évaluer quantitativement le niveau trophique (*ibid.*).

## VI.2. Retracer les niveaux trophiques

### VI.2.a. Dans un système simple... sous certaines conditions

De façon analogue à l'analyse des rapports isotopiques, la mesure des ratios Sr/Ca et Ba/Ca dans les **ossements archéologiques** fournit un indicateur pertinent (grâce à l'OR) pour **suivre le niveau trophique** des humains en les comparant avec les données des animaux consommés. Mais cette méthode est valable principalement dans les chaînes simples et sous **certaines conditions** : 1) si les rapports biologiques sont **conservés** (cf. VI.4.a), 2) **surtout dans les chaînes simples** pour estimer la proportion relative de plantes vs viande dans le cas d'une alimentation bimodale (deux sources alimentaires ; cf. VI.2.b), 3) si les sources ont la même **teneur en Ca** ou en considérant les différentes teneurs en Ca de chaque source dans l'équation (cf. VI.1.f) et 4) à partir des données de l'**os** car la variabilité de l'émail est encore mal connue (cf. VI.1.c).

### VI.2.b. Le cas des régimes alimentaires complexes

Dans le cas d'une **alimentation omnivore complexe** (plusieurs sources de Sr/Ca et Ba/Ca distincts et dont les teneurs en Ca sont variables), l'utilisation **d'équations simplistes** peut conduire à de **mauvaises interprétations** (Balter 2004 ; Burton et Price 2002). En effet, si on a une équation à deux inconnues (deux sources alimentaires en proportions inconnues) du type :

$$(\text{Sr/Ca})_c = x1.(\text{Sr/Ca})_{s1} + x2.(\text{Sr/Ca})_{s2} \text{ et } (\text{Ba/Ca})_c = x1.(\text{Ba/Ca})_{s1} + x2.(\text{Ba/Ca})_{s2}$$

où c est le consommateur, s1 et s2 sont les deux sources distinctes et x1 et x2 les proportions relatives de ces deux sources, alors on a une seule combinaison possible (Balter 2004). Plus on multiplie les sources, plus on a de combinaisons possibles. Il est donc nécessaire de travailler dans un **système surdéterminé** (plus de proxies que de sources) et de raisonner par inversion (par élimination des possibilités) en utilisant par exemple la **méthode des moindres carrés** (système de matrices et ajustement sous contraintes) – il faut notamment considérer les différentes teneurs élémentaires de chaque source selon une équation mixte (cf. Balter 2004 ; Balter et Simon 2006). NB : Ce raisonnement est globalement valable quelque soit l'indicateur considéré.

Dans certains cas où des sources de même niveau trophique présenteraient des ratios Sr/Ca et Ba/Ca différents (c'est le cas par exemple des herbivores mangeurs d'herbes dits « pâtureurs » vs mangeurs d'arbustes – feuilles, branches, etc. – dits « brouteurs » ; cf. VI.3.c), l'utilisation graphique du **rapport Sr/Ba** permet de rétablir l'équilibre et d'accéder directement au niveau trophique (Sponheimer et Lee-Thorp 2006). Par exemple, le castor et le lièvre, tous deux purs herbivores, présentent un Sr/Ca différent, celui du lièvre étant intermédiaire entre le castor et le lynx (ce dernier étant pur carnivore ; Burton et Price 2002). Une simple interprétation de ce résultat conduirait à interpréter à tort un régime omnivore du lièvre. Une **bonne connaissance des sources alimentaires** et de leur **signature en**

**Sr/Ca et Ba/Ca** est essentielle pour une évaluation correcte du régime alimentaire. Si dans le cas de régimes complexes, cette méthode ne permet pas de déterminer avec précision le niveau trophique, elle peut aider à estimer le type de ressources consommées en combinaison des analyses isotopiques notamment (c'est ensuite la comparaison entre eux des humains dont on veut reconstituer la paléodiète et le croisement des ratios élémentaires avec les données bioarchéologiques – âge, sexe, paramètres funéraires, etc. – qui permet d'accéder à la variabilité alimentaire en lien avec les statuts sociaux).

### VI.3. Autres sources de variation des rapports Sr/Ca et Ba/Ca

#### VI.3.a. Variabilité régionale avec la géologie et autres facteurs environnementaux

Le rapport Sr/Ca varie avec l'environnement local en fonction de la **disponibilité en minéraux** (Sr et Ca) du sol pour les plantes (Sillen et Kavanagh 1982). La concentration en éléments traces de la roche mère, le taux de lessivage et le drainage des sols ainsi que le pH sont autant de facteurs influençant le Sr/Ca des plantes. Par conséquent, des **sols granitiques** auront un Sr/Ca plus élevé que des **sols calcaires et sédimentaires** par exemple. La **température**, la **pluviométrie** et la **salinité** vont également faire varier ces rapports (*ibid.*). De la même façon le rapport de Ba/Ca varie selon les régions et les sites (Balter *et al.* 2002 ; Sponheimer et Lee-Thorp 2006). L'utilisation d'un **référentiel local** (comparaison des données au sein d'un même site) permet de s'affranchir de cette variabilité en comparant directement les valeurs de Sr/Ca et de Ba/Ca entre elles (cf. VI.4.c).

#### VI.3.b. Variabilité chez les plantes

Il existe une **grande variabilité** inter et intra-spécifique chez les plantes (e.g. Burton *et al.* 1999 ; Ražić *et al.* 2003 ; Sponheimer et Lee-Thorp 2006). Des différences entre les parties anatomiques des végétaux ont également été mises en évidence, du fait de processus d'absorption du Ca (et Sr et Ba) distincts depuis les racines jusque dans les feuilles et les organes aériens (Comar *et al.* 1957). Par exemple, des différences ont été observées entre les racines, les tiges, les feuilles et les fleurs d'une astéracée (Ražić *et al.* 2003). Les **organes de réserve** comme les bulbes et tubercules semblent avoir un haut Sr/Ca et un faible Ba/Ca, de même que les **graines d'herbacées** (Comar *et al.* 1957 ; Sponheimer et Lee-Thorp 2006). Ces différences ont par exemple été interprétées comme pouvant expliquer les valeurs de Sr/Ba d'Australopithèque correspondant à un niveau trophique au-dessus des carnivores (*ibid.*).

Dans cette même étude portant notamment sur des plantes modernes en Afrique du Sud, les auteurs ont montré que les ratios de Sr/Ca et Ba/Ca sont beaucoup plus élevés dans les **plantes herbacées** (*graze*) que dans les **arbres** (*browse*), ce qui induit d'ailleurs des différences entre les herbivores « **pâturiers** », consommateurs d'herbes uniquement (*grazers*), et les « **brouteurs** », consommateurs

diversifiés d'herbes, de feuilles, de branches, de fruits et d'écorce d'arbres et arbustes (*browsers* ; Sponheimer et Lee-Thorp 2006 ; cf. VI.3.c).

- *La question de la fertilisation au fumier animal*

À notre connaissance, **aucune documentation** n'existe concernant l'impact de la fertilisation des plantes sur les ratios Sr/Ca et Ba/Ca. Néanmoins, les **fèces animales** sont **enrichies en Sr et Ba** par rapport aux tissus de l'organisme, en raison de leur élimination préférentielle, ce qui induit des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca supérieures à celles de l'os et des muscles notamment et à plus forte raison à celles de l'émail (cf. Figure C2. 26, p.152). D'après les données de R.W. Elias et collaborateurs (1982), les excréments d'écureuils et de campagnols, essentiellement herbivores (l'écureuil se nourrit aussi de petits animaux, limaces, insectes ou œufs d'oiseaux), présentent des valeurs supérieures à -2 (en log), alors que les déjections de martres, carnivores, sont inférieures, proche de -3. Les valeurs de plantes étant généralement comprises entre -3 et -1,5 approximativement (Burton *et al.* 1999 ; Elias *et al.* 1982 ; Gilbert *et al.* 1994), celles-ci pourraient s'avérer sensiblement impactées par l'apport de fumier organique présentant des valeurs inférieures ou supérieures à celles des plantes, selon le cas. Bien que le phénomène n'ait jamais été mesuré expérimentalement ou dans la nature, le Sr et le Ba du fumier pourrait passer dans le sol et se rendre disponible pour les plantes, influençant ainsi leur ratio élémentaire en conséquence. L'étude en conditions expérimentales de l'impact de la fertilisation organique sur les végétaux offrirait de précieux indices quand à la variabilité du Sr/Ca et du Ba/Ca en fonction des pratiques agricoles.

### VI.3.c. Variabilité chez les herbivores

Comme énoncé ci-avant, des différences significatives de Sr/Ca et Ba/Ca ont été observées en Afrique du Sud dans l'émail de dents d'herbivores **mangeurs d'herbe** majoritairement, dits « pâtureurs », par rapport aux herbivores « brouteurs » **mangeurs d'arbres et arbustes**, dont les valeurs sont plus proches des carnivores que des mangeurs d'herbes. Ces différences reflètent les rapports élémentaires plus faibles mesurés dans les arbres par rapport aux plantes herbacées. L'observation du **rapport Sr/Ba** permet néanmoins de distinguer clairement l'ensemble des herbivores (« brouteurs » + « pâtureurs ») des carnivores (Sponheimer et Lee-Thorp 2006). Le même schéma est observé sur d'autres échantillons d'Afrique du Sud : « brouteurs » et « pâtureurs » présentent des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca distinctes mais le calcul du Sr/Ba donne un résultat strictement identique (Balter *et al.* 2012). De nouvelles données issues d'autres écosystèmes sont nécessaires pour savoir si ce type de schéma est reproductible quelque soit la localisation géographique. Par exemple, sous nos latitudes et dès le Néolithique, on trouve en France des **chèvres** (principalement brouteurs) et des **moutons** (principalement pâtureurs), taxons tous deux ruminants souvent difficiles à distinguer l'un de l'autre sur la base de quelques ossements mal préservés. Une telle distinction entre brouteurs et pâtureurs, si

elle s'avérerait systématique, permettrait d'accéder à un niveau plus fin de connaissances sur le type d'élevage pratiqué au Néolithique.

Par ailleurs, des différences de Sr/Ca et Ba/Ca dans l'os ont été mises en évidence chez des ongulés paléolithiques entre les **ruminants** (bison, cerf, renne) et les **non-ruminants** (mammouth, cheval et rhinocéros), probablement en raison du système digestif distinct de ces herbivores (mono- et digastriques ; Balter *et al.* 2002). Un temps plus long de résidence des aliments dans le tractus gastro-intestinal des ruminants (digastriques) permettrait une plus grande absorption des éléments traces et des ratios plus élevés de Sr/Ca et Ba/Ca par rapport aux non ruminants (*ibid.*). De plus amples analyses sur des ongulés actuels permettraient de confirmer ce résultat et mieux comprendre le métabolisme sous-jacent.

### VI.3.d. Le cas du poisson

Une synthèse de la littérature rassemblant un grand nombre de données Sr/Ca et Ba/Ca pour des organismes terrestres et marins de différents niveaux trophiques (plantes, mammifères, poissons, invertébrés) mesurés dans divers endroits de la surface du globe montre qu'en **milieu marin**, et dans une moindre mesure en eau douce, les espèces de même niveau trophique présentent généralement un **Sr/Ca supérieur** et un **Ba/Ca inférieur** à ceux des milieux terrestres (Figure C2. 29 ; Peek et Clementz 2012b). Par ailleurs, une étude sur les rayons de nageoire de l'esturgeon indique qu'en eau douce, le Sr/Ca est inférieur et le Ba/Ca supérieur à ceux enregistrés en eau de mer pour les mêmes spécimens (l'étude a tracé la mobilité de ces derniers ; Allen *et al.* 2009). Ainsi, la différence entre milieu aquatique et terrestre s'estompe quelque peu en eau douce par rapport au milieu marin (probablement en raison de l'effet de la salinité). Le ratio Ba/Sr indique particulièrement bien la variabilité existant entre les organismes et les milieux terrestres, d'eau douce et marins (Figure C2. 29 ; Burton et Price 1990).

Si les variations environnementales dans les écosystèmes aquatiques semblent moins influencer les valeurs de Sr/Ca que dans les milieux terrestres (Peek et Clementz 2012b), la température (et la salinité) jouent un rôle sur le métabolisme du Ca et donc sur les rapports élémentaires (Allen *et al.* 2009 ; Balter et Lécuyer 2010). En effet, le fractionnement entre deux phases (en particulier entre les fluides physiologiques et la bioapatite) est thermodépendant. Si ce phénomène n'est pas visible chez les mammifères, c'est que ceux-ci sont homéothermes (Balter 2001).

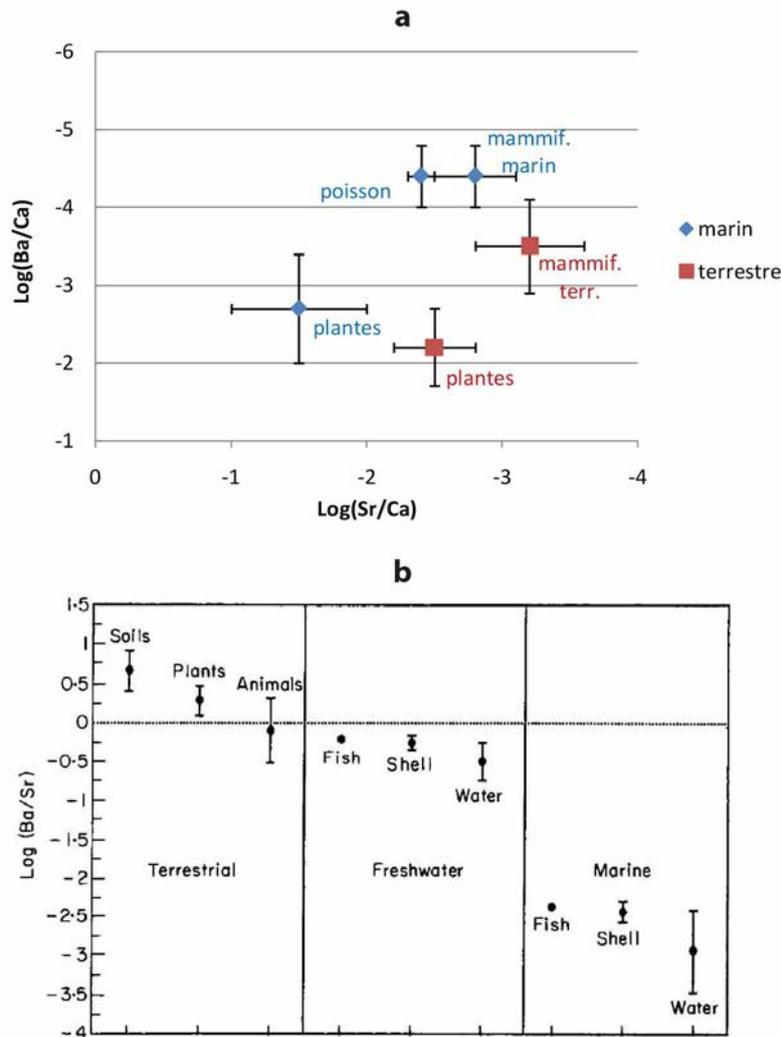


Figure C2. 29 : (a) Distribution des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca de plantes et d'animaux terrestres (en rouge) et aquatiques (en bleu) à partir des données de S. Peek et M.T. Clementz (2012b) et (b) représentation du ratio Ba/Sr (en  $\log \times 1000$ ) montrant la variabilité entre les écosystèmes terrestres et aquatiques à partir des données mesurés dans divers échantillons terrestres (sol, plantes et animaux), d'eau douce et marins (eau, coquillages et os de poissons); d'après Burton et Price 1990. mammif = mammifère. Les points avec les barres d'erreur correspondent aux valeurs moyennes et écart-types.

Le lien entre la consommation de poisson et l'enregistrement des éléments traces est mal connu chez les humains. D'après A. Sillen & M. Kavanagh (1982), une faible consommation de poisson ne serait que très peu visible dans les tissus des consommateurs parce que leurs chairs seraient pauvres en Ca, au même titre que la viande. Cependant, une recherche rapide dans les récentes bases de données nutritionnelles de l'ANSES-Ciqual ou de l'USDA<sup>5</sup> par exemple nous indique qu'en moyenne, le poisson aurait une composition en Ca similaire à celle des plantes (env. 30 mg/100g, lorsque la viande affiche plutôt 10 mg/100g; Anses 2020; Haytowitz *et al.* 2019). Une forte concentration en Ca dans le poisson est également rapportée dans l'étude de V. Balter et collaborateurs (2001, tableau II) à partir d'une revue de la littérature. En outre, dans leur étude, A. Sillen & M. Kavanagh (1982) énoncent que les valeurs du squelette des poissons ne reflètent pas nécessairement celles des muscles. Davantage

<sup>5</sup> <https://ciqual.anses.fr/> et <https://fdc.nal.usda.gov/index.html>

d'études sont nécessaires pour caractériser la variabilité en Sr/Ca et Ba/Ca du poisson (chair et squelette), notamment en fonction des régions et en particulier en eau douce, et l'impact qu'aurait sa consommation dans les tissus des consommateurs.

NB : Si nous abordons ici la question du poisson, nous laissons de côté celle des œufs, insectes, coquillages et crustacés, par exemple, autres denrées riches en Ca pour lesquelles aucune donnée, à notre connaissance, n'est répertoriée.

### VI.3.e. Influence de la physiologie

Pendant la **grossesse**, le Sr/Ca augmente dans le plasma maternel et dans le squelette. Toutefois, le taux de renouvellement osseux n'est généralement pas assez rapide pour enregistrer ces changements, sauf peut-être dans le cas de plusieurs grossesses successives (Sillen et Kavanagh 1982).

La **vitamine D** jouant un rôle dans l'absorption du Ca, des carences peuvent modifier les rapports Sr/Ca et Ba/Ca dans l'organisme (Sillen et Kavanagh 1982). Ce lien est toutefois peu connu. Le **rachitisme** est un cas extrême de déficience en Ca survenant au court de la croissance. Par ailleurs, l'OR mesuré chez des patients atteints de diverses maladies (leucémie, tumeur ovarienne) ne semble pas être différent de celui des individus sains (Comar *et al.* 1957). En revanche, l'ostéoporose et autres conditions pathologiques telles que l'ostéomalacie ou l'ostéogénèse imparfaite pourraient avoir un impact non négligeable sur les rapports Sr/Ca et Ba/Ca, comme la perte de Ca induirait un remplacement par des ions Sr dans l'apatite (Landi *et al.* 2007).

## VI.4. Fiabilité des résultats

### VI.4.a. Le problème de la diagénèse

Un des problèmes majeurs que pose l'étude des éléments traces est la **quantification de la diagénèse**, en particulier dans l'os, plus poreux et donc plus susceptible que l'émail. Au cours de la diagénèse, **diverses altérations** *post-mortem* des phases minérales peuvent survenir : dégradation ou contamination physique par le sol, chimique par des sels solubles, biologique par des microorganismes qui précipitent des oxydes métalliques ou recristallisation de l'hydroxyapatite (Burton et Price 2002). Diverses réactions avec le milieu environnant peuvent ainsi entraîner la perte de la signature « biogénique » des éléments et/ou l'apport d'une signature « diagénétique » résultant de la contamination du contexte sépulcral. La **présence d'éléments** qui ne sont **habituellement pas trouvés** dans les tissus osseux et dentaires non contaminés (minéraux secondaires), comme par exemple l'uranium (U), le manganèse (Mn), le fer (Fe) ou les terres rares (*rare earth elements* ou REE – le scandium, Sr, l'yttrium Y, les lanthanides) permet **d'identifier les possibles altérations diagénétiques** (Kohn *et al.* 1999 ; Lugli et Cipriani 2018 ; Reynard et Balter 2014).

En effet, ces éléments sont apportés par des dépôts secondaires de **calcites** (carbonates de calcium de formule  $\text{CaCO}_3$  avec des traces de Mn, Fe, Zn, Ba, Sr, Mg, Al, etc.) ou des **oxydes et hydroxydes métalliques** (de Mn, de Fe, etc.). Ils peuvent donc entraîner avec eux du Ca, du Ba et du Sr et modifier les ratios biogéniques concernés. Les modalités d'incorporation du Ca, Sr, Ba dans la bioapatite, de même que les processus diagénétiques affectant ces concentrations, ont été décrits en détail par V. Balter (2001).

Pour l'analyse en solution, des **pré-traitements à l'acide** permettent de supprimer une partie de la diagénèse (notamment les carbonates de calcium secondaires), même s'ils ne l'éliminent pas tout à fait (notamment pas les oxy-hydroxydes ; Fabig et Herrmann 2002 ; Hoppe *et al.* 2003 ; Sponheimer et Lee-Thorp 2006). Si l'émail est dans la plupart des cas relativement bien conservé (pouvant maintenir 95% de son intégrité), l'os est beaucoup plus sensible à la diagénèse et fait toujours l'objet de certaines difficultés en archéologie. Par ailleurs, le Sr est plus susceptible aux altérations diagénétiques que le Ba à cause de sa plus grande diffusivité (Kohn et Moses 2013).

Dans ce travail les analyses sont réalisées par **ablation laser** qui **ne permet pas de nettoyer les échantillons au préalable**. En effet, ces traitements nécessitent de pulvériser l'os ou la dent, or l'analyse par ablation laser suppose de conserver les tissus solides et leur surface d'ablation intact (cf. VIII.5. et Chap4.III.). Un nettoyage surfacique peut être réalisé à l'acide (e.g. Kang *et al.* 2004), mais on ne connaît pas l'impact de l'acide sur la surface de l'émail et sur son degré de pénétration en profondeur. De plus, une trop forte dissolution sur des matériaux mal préservés pourrait « désaplanir » la surface polie et conduire à défocaliser le laser. De nouvelles analyses par ablation laser avant et après traitement de la surface de l'émail seraient nécessaires pour évaluer l'efficacité de ce type de protocole. En l'état actuel de nos connaissances, il est indispensable de **vérifier l'intégrité** de la composition élémentaire des tissus analysés **a posteriori** (Reynard et Balter 2014). À ce jour, aucun protocole n'a été mis au point pour le traitement des résultats d'un grand nombre d'échantillons, ce type d'analyse étant tout à fait novateur. Nous discuterons donc de la mise en place d'un tel protocole dans l'article relatif (cf. Chap8.I.). Néanmoins, voici ci-après quelques éléments de compréhension pour le choix des proxies utilisés.

Tout d'abord, la **majorité des contaminations entraînent le plus souvent certains éléments** très diffusifs comme l'**uranium (U)** ou le **manganèse (Mn)**. Ces éléments sont donc de **bons indicateurs** de diagénèse (Millard et Hedges 1996 ; Reynard et Balter 2014) et serviront dans cette étude à tracer les éventuelles altérations diagénétiques. – Le cas du **Mg** dont le statut est particulier sera discuté plus loin (Chap8.I.). – La Figure C2. 30 montre la différence de concentration en différents éléments entre des échantillons d'émail moderne, d'émail fossile et de dentine fossile, d'après des données de la littérature recueillies par M. Kohn et collaborateurs (1999). Par exemple, la teneur en U est inférieure à 0,1 ppm dans l'émail moderne mais est autour de 0,5 ppm dans l'émail fossile et 100 ppm dans la

dentine fossile. L'os, proche de la dentine, contient généralement beaucoup plus d'U que l'émail dans les échantillons fossiles (cf. Reynard et Balter 2014, Fig. 12). Le Mn est généralement inférieur à 10 ppm dans l'émail moderne et avoisine les 1000 ppm dans l'émail fossile de ces échantillons – et 10 000 ppm dans la dentine fossile. À titre informatif, les auteurs indiquent des concentrations dans les dents modernes de : Ca  $\approx$  370 000 ppm, Mg  $\approx$  1000 ppm, Sr  $\approx$  100 à 1000 ppm, Ba  $\approx$  10 à 100 ppm (et U/Pb < 1 ppm ; Kohn *et al.* 1999, Table 1, données issues de la littérature). Concernant la distribution du Mn dans l'émail et dans la dentine, M. Arora et collaborateurs (2011) indiquent que dans l'émail, le ratio Mn/Ca est plus élevé au niveau de la surface externe de l'émail (de 0,57 à 4,74), notamment sur une épaisseur de 20-40  $\mu$ m, et plus bas dans les couches plus profondes (de 0,005 à 0,013). Les plus hautes teneurs en Mn étant enregistrées dans la dentine en proximité de la pulpe (de 2,27 à 6,95). Ces données confortent les résultats obtenus par T. Tacail et collaborateurs (2017) qui préconisent de mener les analyses le long de la jonction émail dentine.

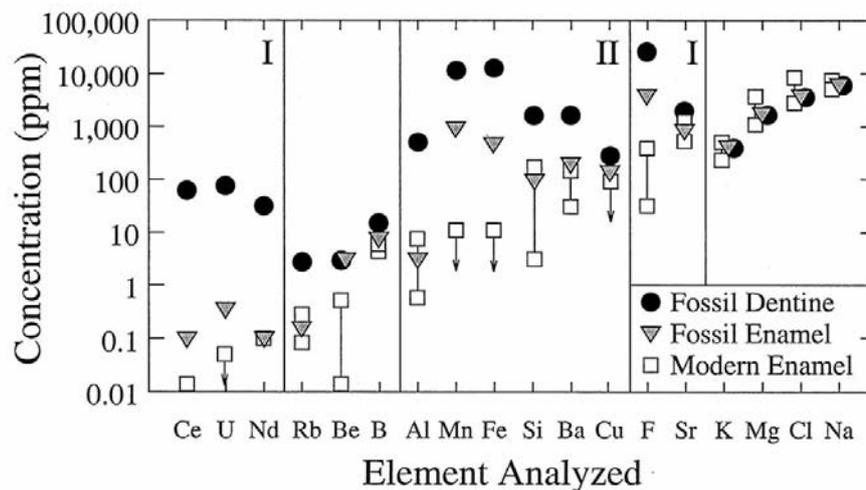


Figure C2. 30 : Analyses à la microsonde ionique de la composition en fonction des éléments de l'émail moderne (carrés), l'émail fossile (triangles) et la dentine fossile (ronds), montrant de fortes augmentations des concentrations de nombreux éléments traces et mineurs associés à la fossilisation. Les zones notées "I" correspondent aux éléments probablement associés à l'altération chimique de l'apatite. La plus forte concentration des éléments de la zone "II" reflète probablement des analyses mixtes d'apatite et d'oxyhydroxyde. Bien que tous les matériaux fossiles soient altérés, l'altération est plus importante dans la dentine que dans l'émail. Les lignes verticales reliant les carrés montrent la gamme des concentrations mesurées pour les échantillons modernes, et reflètent principalement les différences de composition entre les espèces. D'après Kohn *et al.*, 1999.

Toutefois, si de fortes concentrations en U et en Mn indiquent un certain degré de diagénèse, celles-ci peuvent ne pas être accompagnées d'une altération des ratios biogéniques de Ba/Ca et Sr/Ca. C'est l'observation de corrélations entre ces différents proxys, biogéniques et diagénétiques, qui permet de déceler en particulier les altérations *post-mortem* des ratios qui nous intéressent pour reconstituer l'alimentation (Balter, comm. pers.). De plus, la diagénèse est généralement unidirectionnelle, faisant augmenter les ratios Sr/Ca et Ba/Ca en même temps que les éléments diagénétiques (Fabig et Herrmann 2002). La multiplication des proxys et l'observance de toute aberration dans les profils biologiques sont autant d'outils permettant d'établir un diagnostic le plus

fiable possible (cf. Chap8.I.). Bien que la mesure d'un type d'altération ne témoigne pas avec certitude de l'absence totale d'autres altérations, ces éléments U et Mn sont les plus souvent atteints et apportent donc la meilleure probabilité de mesurer la diagénèse.

Enfin, si l'on ne peut pas certifier que les tissus n'ont subi aucun changement chimique, il est souvent possible d'estimer si le **schéma écologique** concerné a été altéré ou non par la diagénèse (Reynard et Balter 2014). Notamment par l'observation des écarts entre les niveaux trophiques et la **conservation des ordres de grandeurs** observés pour des valeurs d'échantillons analogues.

NB : Le **rapport Ca/P** de l'apatite est souvent utilisé pour mesurer la perte de matière osseuse ou la présence de nouveaux minéraux issus de l'environnement de la tombe. Un rapport autour de 2,0 indique des tissus non altérés (Hoppe *et al.* 2003 ; Reynard et Balter 2014). Toutefois, la teneur en phosphore (P) n'est pas mesurée par l'ablation laser.

#### VI.4.b. L'utilisation des standards

Afin de calibrer les mesures, l'utilisation de **standards** adaptés, **similaires aux tissus analysés** (*matrix-matched*), est particulièrement essentielle lors de l'analyse des éléments traces et des ratios isotopiques du strontium par l'ablation laser dont le dispositif est particulièrement sensible, pour éviter les interférences. Le SRM 1400 "bone ash" (cendres d'os), certifié, est un standard solide, homogène, correspondant à la matrice osseuse et à sa concentration.

De plus, dans le cadre de l'analyse par ablation laser, les standards sont utilisés en **encadrement des échantillons** et la calibration se fait de proche en proche avec un facteur dépendant de leur position relative ("*bracketing calibration*" ; cf. encadré) et non plus avec une courbe de calibration classique comme pour la spectrométrie de masse isotopique (voir par exemple Zhang *et al.* 2020 pour une comparaison des méthodes de calibration).

#### **Calibration des échantillons par encadrement avec les standards ("*bracketing calibration*") :**

Plusieurs échantillons sont encadrés par deux standards certifiés dans chaque séquence. Chaque échantillon est calibré non par la moyenne des deux standards mais par la moyenne pondérée des standards par rapport à la position relative de chaque échantillon dans la séquence.

Par exemple, si trois échantillons sont encadrés par deux standards SRM1 et SRM2, tels que la séquence suivante : SRM1 – éch1 – éch2 – éch3 – SRM2,

le premier échantillon (éch1) sera calibré à 75% sur la valeur du SRM1 et 25% sur la valeur du SRM2, le deuxième (éch2) sera calibré à 50% sur la valeur du SRM1 et 50% sur la valeur du SRM2, le troisième (éch3) sera calibré à 25% sur la valeur du SRM1 et 75% sur la valeur du SRM2.

### VI.4.c. La nécessité d'un référentiel local

De même que pour l'analyse isotopique, les paramètres géographiques et géologiques faisant fluctuer largement les ratios élémentaires Sr/Ca et Ba/Ca, il est nécessaire de comparer les données avec un référentiel local (animaux ou plantes potentiellement consommés par les humains) afin de déterminer, d'une part, si le **schéma écologique est maintenu** avec un écart entre les différentes sources de l'ordre de grandeur attendu pour des échantillons bien conservés et, d'autre part, pour **estimer les possibilités de consommation** (et la part relative) des différentes ressources (Balter et Simon 2006 ; Reynard et Balter 2014 ; Sponheimer et Lee-Thorp 2006).

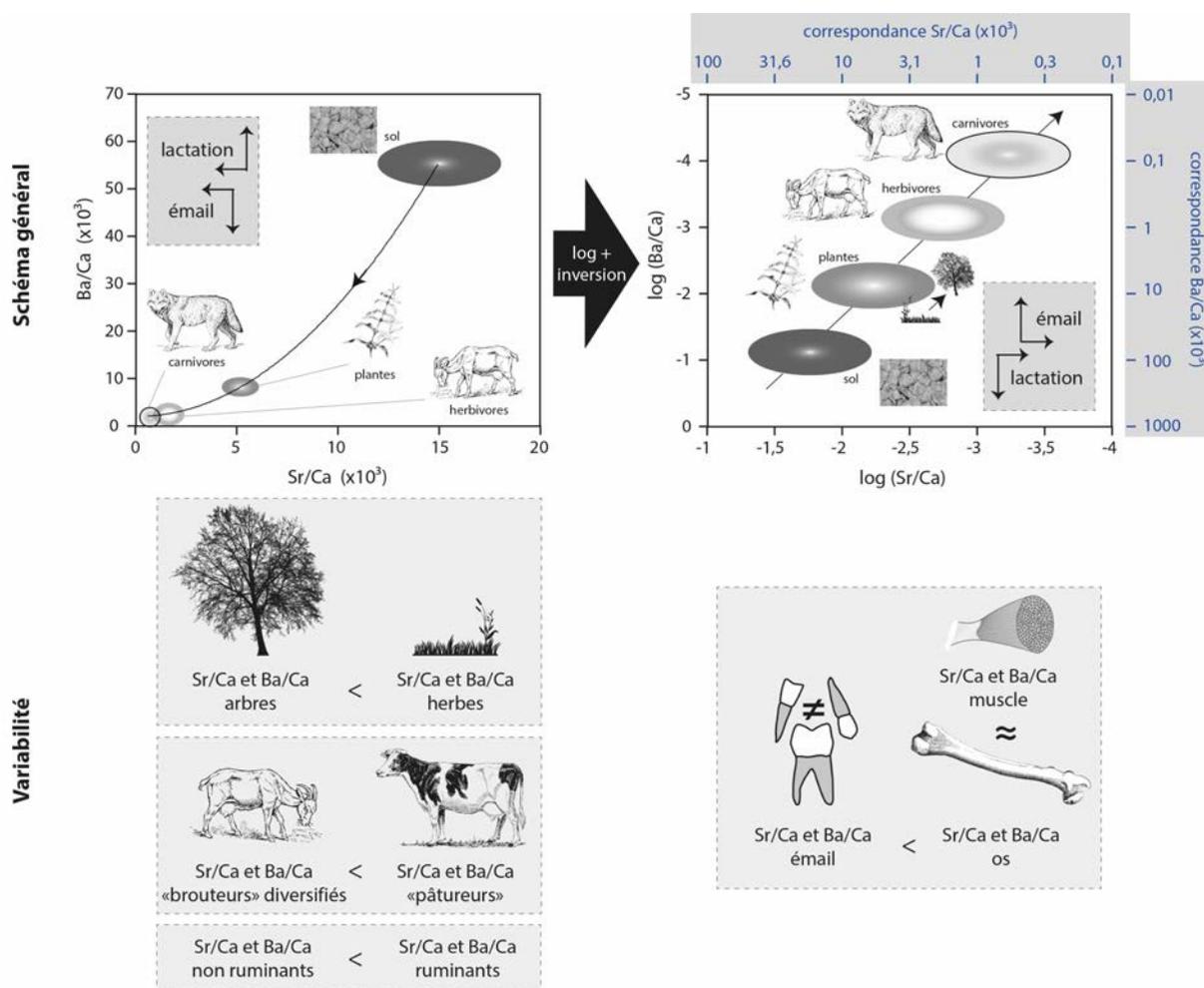


Figure C2. 31 : Schéma de synthèse théorique illustrant les différences en Sr/Ca et Ba/Ca entre les niveaux trophiques et les facteurs de variation de ces valeurs entre différentes catégories animales et végétales et différents tissus. Les données pour les mammifères terrestres sont celle de l'os. Les flèches fines symbolisent la succession des niveaux trophiques. La flèche épaisse symbolise le passage en logarithme décimal et l'inversion des valeurs sur les représentations graphiques pour une meilleure lecture.

### VI.5. Résumé

La Figure C2. 31 synthétise schématiquement les principaux paramètres théoriques de base de la méthode qui seront utiles dans ce travail.

#### Mesure des ratios Sr/Ca et Ba/Ca dans la bioapatite :

La **biopurification du Ca** implique une discrimination du Sr et Ba en faveur du Ca et entraîne une **diminution** des ratios **Sr/Ca et Ba/Ca** avec l'augmentation du **niveau trophique**.

Les rapports Sr/Ca et Ba/Ca dans l'os sont liés par une **relation de puissance** que le passage en logarithme permet d'exprimer de façon linéaire. La **pen**te des droites de régression d'équation  $\log(\text{Ba/Ca}) = \alpha \cdot \log(\text{Sr/Ca}) + \beta$  est similaire pour les différents réseaux trophiques de mammifères terrestres et correspond au **coefficient allométrique** :  $\alpha = 1,79 \pm 0,33$ .

Le **rapport observé (OR)** entre l'os et l'alimentation est d'environ **0,30 ± 0,08** pour le **Sr** et **0,16 ± 0,08** pour le **Ba** dans toutes les chaînes trophiques des mammifères terrestres.

Ils sont donnés par les formules :  $\text{OR}_{\text{Sr}} = \frac{\text{Sr/Ca}_{\text{os}}}{\text{Sr/Ca}_{\text{alimentation}}}$  et  $\text{OR}_{\text{Ba}} = \frac{\text{Ba/Ca}_{\text{os}}}{\text{Ba/Ca}_{\text{alimentation}}}$

soit :  $\log(\text{OR}_{\text{Sr}}) = \log(\text{Sr/Ca}_{\text{os}}) - \log(\text{Sr/Ca}_{\text{alimentation}})$  et  $\log(\text{OR}_{\text{Ba}}) = \log(\text{Ba/Ca}_{\text{os}}) - \log(\text{Ba/Ca}_{\text{alimentation}})$

et sont liés par l'équation :  $\text{OR}_{\text{Ba}} = \text{OR}_{\text{Sr}}^{1,79 \pm 0,33}$  soit  $\frac{\log(\text{OR}_{\text{Ba}})}{\log(\text{OR}_{\text{Sr}})} = 1,79 \pm 0,33$ .

Le schéma est plus compliqué dans l'**émail** et l' $\text{OR}_{\text{émail-alimentation}}$  n'est a priori pas stable ; les rapports de **Sr/Ca et Ba/Ca** dans l'émail sont généralement **plus faibles** que dans l'os et **variables** entre les dents selon le calendrier de croissance (processus mal connus).

#### Variabilité des rapports Sr/Ca et Ba/Ca :

Les ratios Sr/Ca et Ba/Ca varient avec l'**âge et l'allaitement** (généralement Sr/Ca plus faible et Ba/Ca plus élevé chez les enfants non sevrés, suivant un métabolisme complexe et assez mal connu).

La **teneur en Ca** des aliments influence les rapports Sr/Ca et Ba/Ca des consommateurs.

Les ratios Sr/Ca et Ba/Ca peuvent varier avec la **géographie**, entre les **végétaux** et entre les **animaux** de même niveau trophique. La connaissance des sources alimentaires, de leur signature en Sr/Ca, Ba/Ca et de leur teneur en Ca est indispensable (**référentiel local**).

L'intégrité des **ratios biogéniques** (Sr/Ca et Ba/Ca) doit être contrôlée par l'absence de **corrél**ation avec les **ratios des éléments diagénétiques** (U/Ca, Mn/Ca) notamment et la conservation des schémas écologiques.

Ainsi, après avoir éliminé au maximum et dans la mesure du possible le problème de la diagénèse, il est nécessaire de connaître (au moins d'estimer) les Sr/Ca et Ba/Ca des différentes sources, leurs teneurs relatives en Ca et de se placer dans un système surdéterminé (plus de proxies que de sources) pour tenter d'évaluer les possibilités de consommation relative des différentes sources envisagées (utilisation de modèles inverses dans l'os – méthode des moindres carrés), en complément des résultats des autres analyses.

## VII. Le strontium isotopique ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) comme marqueur de mobilité

---

Le rapport isotopique du strontium ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) est un outil puissant pour **caractériser la mobilité** des populations anciennes et identifier **l'origine non locale** des individus puisqu'il reflète la composition de la roche-mère constitutive du sol sur lequel le consommateur a puisé ses ressources. Avec l'altération des roches, le **Sr biodisponible** passe tout au long de la chaîne alimentaire, du sol aux plantes puis aux animaux, avec un **fractionnement négligeable**. La **signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  local** s'enregistre donc dans les tissus animaux et reflète leur lieu de résidence au moment de la formation des tissus. La mesure du rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  s'effectue dans la fraction minérale (bioapatite) des os et des dents.

### VII.1. Principe

#### VII.1.a. Le $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans les roches

Parmi les quatre isotopes du strontium,  $^{84}\text{Sr}$ ,  $^{86}\text{Sr}$  et  $^{88}\text{Sr}$  (le plus abondant) sont stables et  **$^{87}\text{Sr}$  est radiogénique** : il se forme au cours du temps par la **désintégration  $\beta$  de  $^{87}\text{Rb}$**  qu'il remplace. Quand  $^{87}\text{Rb}$  diminue,  $^{87}\text{Sr}$  augmente proportionnellement – le rapport Rb/Sr est notamment utilisé en géochronologie pour dater les roches. Cette désintégration est notable à l'échelle des temps géologiques, du fait de la demi-vie extrêmement longue du  $^{87}\text{Rb}$  (environ 49 milliards d'années ; Bentley 2006). Le  $^{86}\text{Sr}$  étant, lui, stable, le ratio  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  reflète donc l'âge des roches. Les plus vieilles présentent généralement un rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  plus élevé et les plus jeunes un ratio plus faible (celui-ci dépend également du rapport initial  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ ). Néanmoins, une même roche contient différents minéraux qui peuvent avoir un  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variable, donc le  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  d'une roche dépend aussi de sa **composition en minéraux**. Ainsi, chaque roche a une signature spécifique et la signature locale d'une zone dépend de sa géologie (Bentley 2006). Aujourd'hui, le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  des différentes roches de la croûte terrestre continentale varie généralement de 0,702 à 0,750 (*ibid.*, Price *et al.* 2002).

#### VII.1.b. Le Sr biodisponible et le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans le sol et les plantes

C'est **l'altération de la roche mère** (couche minérale superficielle de la couche terrestre) qui, par un processus de **météorisation**<sup>6</sup> puis d'**érosion**, va **former les sols**. Au cours de ce processus se fait le **transfert du Sr** de la roche mère dans les sols (Bentley 2006). Toutefois, une carte géologique des variations en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans les roches n'est pas toujours suffisante pour prédire le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  qui rentre dans le cycle environnemental et il est nécessaire de considérer la signature isotopique du **Sr disponible biologiquement** pour les plantes et les animaux. En effet, si la signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  d'un

---

<sup>6</sup> La **météorisation** est la fragmentation et l'altération de la roche mère au contact des agents atmosphériques ou météores. L'**érosion** est la dégradation des sols au contact de ces agents qui va former les reliefs, entraînant cette fois un transfert des matériaux.

sol dérive principalement de celle de la roche-mère sous-jacente, reflétant la géologie locale, elle est également influencée, dans une moindre mesure, par d'autres sources.

D'abord, les différents minéraux de la roche mère peuvent avoir non seulement une signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  distincte, mais aussi une teneur en Sr propre, et des potentiels d'altération variables : ces minéraux ne seront pas altérés de la même façon et pourront influencer la signature des sols différemment. Par ailleurs, des **dépôts atmosphériques** (poussières, aérosols, embruns marins, polluants atmosphériques) transportés par le vent ou les eaux météoriques<sup>7</sup> et présentant des signatures de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  éloignées de celles du sol peuvent faire varier les rapports isotopiques d'un sol (e.g. Bentley 2006 ; Naiman *et al.* 2000 ; Probst *et al.* 2000 ; Xu *et al.* 2009). Ces dépôts ont toutefois des teneurs en Sr tellement faibles que leur influence sur la signature des sols est **négligeable**, sauf peut-être dans les régions de fortes précipitations ou dans les **régions côtières** (Capo *et al.* 1998). Dans ces dernières, le Sr isotopique dérive principalement des embruns et des pluies provenant de l'évaporation de l'eau de mer. Comme les **océans** reçoivent en permanence du matériel provenant des continents via l'érosion et la météorisation, leur signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  représente la moyenne de celles de la croûte continentale terrestre érodée et cette signature est homogène dans tous les océans de la planète (0,7092 ; Bentley 2006). Les régions côtières auront donc un rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  particulier (Figure C2. 32 ; Sealy *et al.* 1991).

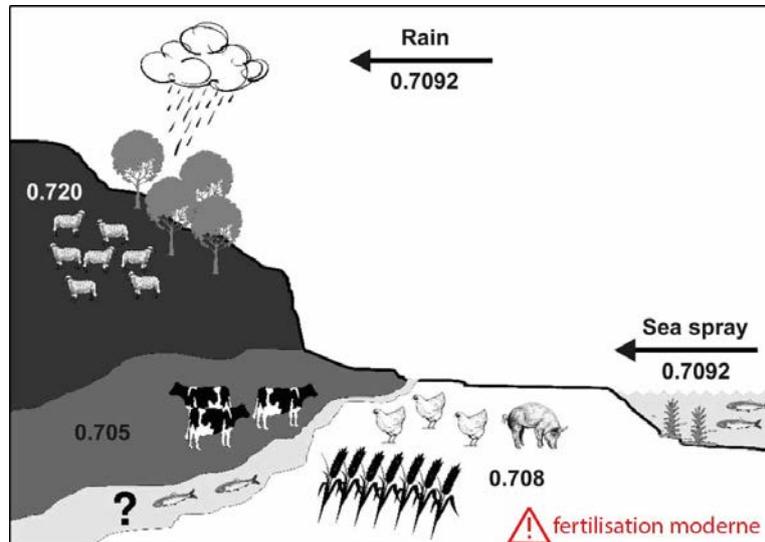


Figure C2. 32 : Schéma illustrant les sources de Sr qui, si elles sont consommées (alimentation ou eau de boisson), peuvent contribuer au ratio moyen pondéré de l'émail dentaire des humains. La visibilité d'une source alimentaire dépend de son exploitation, de la quantité consommée et de la quantité de Sr incorporée à partir de cette source. La boisson d'eau de rivière peut entraîner l'ingestion de Sr provenant de sources rocheuses éloignées et les sources atmosphériques peuvent, dans une moindre mesure et selon l'environnement, influencer la signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .  
D'après Montgomery 2010.

<sup>7</sup> Les **eaux météoriques** sont toutes les eaux atmosphériques, quelque soit leur état - pluie, neige, brouillard, etc. - n'ayant pas encore touché une surface.

En outre, les **eaux souterraines** peuvent incorporer des eaux plus profondes et vieilles et modifier le  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . Les **eaux de ruissellement** (superficielles) peuvent également influencer la signature initiale d'un sol par le lessivage des sols qu'elles traversent, entraînant du Sr de différentes signatures isotopiques (Bentley 2006). Enfin, le Sr de la **biomasse** (mobilisé par les organismes) peut être réinjecté dans le sol avec une signature modifiée.

Le Sr biodisponible du sol est ensuite **incorporé dans les plantes** (en suivant le métabolisme du Ca ; cf. VI.1.a) qui acquièrent ainsi une signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  similaire à celle du sol sur lequel elles poussent. Cette signature peut toutefois varier légèrement avec la profondeur à laquelle les racines vont puiser le Sr et selon les proportions de Sr incorporé à partir des dépôts atmosphériques et des eaux de surface et souterraines. Cependant, la **variabilité du  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  d'un sol est moyennée dans les plantes** (et le sera d'autant plus dans les herbivores, ainsi de suite **le long de la chaîne alimentaire**). Ainsi, leur signature est plus représentative du Sr biodisponible que celle du sol (Bentley 2006).

- *Fertilisation et pollution moderne*

Dans les écosystèmes actuels, la **fertilisation agricole** contribue de façon significative à modifier les valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  des sols et des plantes (Maurer *et al.* 2012 ; Négrel et Deschamps 1996). La poussière des routes et la pollution industrielle semblent avoir une influence moins significative sur les ratios biogéniques locaux (cf. Åberg *et al.* 1998). Il est donc primordial de prendre en compte ces possibles contaminations avant d'utiliser des échantillons modernes en tant que référentiel.

### VII.1.c. Transfert du $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ le long de la chaîne alimentaire

Le Sr biodisponible rentre dans la chaîne alimentaire, du sol dans les plantes puis dans les animaux, avec un **fractionnement négligeable** du fait de la **masse atomique du Sr importante**, à l'inverse des éléments plus légers comme H, C, N ou O (Bentley 2006). En effet, la différence de masse entre deux isotopes lourds étant plus faible qu'entre deux isotopes légers, leurs propriétés physiques sont plus similaires induisant un moindre fractionnement. Le **rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ne change donc pas significativement** au cours des processus d'assimilation dans la bioapatite.

Nous avons vu que les ions  $\text{Sr}^{2+}$  se substituent aux ions  $\text{Ca}^{2+}$  dans les apatites (cf. III.5.b). Le Sr provenant essentiellement de **l'alimentation**, les ratios  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de l'apatite du consommateur reflètent donc théoriquement ceux de la géologie locale, c'est-à-dire ceux du territoire sur lequel il se nourrit/puise ses ressources. **Chez les animaux, il n'y a pas de différence de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  entre les tissus** (pourvu que l'individu ait puisé ses ressources au même endroit lors de la formation des différents tissus) puisque le fractionnement à l'échelle de l'organisme est négligeable. Ainsi donc la signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de l'os doit être théoriquement la même que celle de l'email (qui plus est de celle de l'alimentation), si l'individu est resté au même endroit et a consommé les mêmes ressources lors de

la minéralisation de son émail et de son squelette (Bentley 2006). La différence entre l'analyse des os et des dents sera plus approfondie ci-après (cf. VII.3.b).

Du fait de la biopurification du Ca, la **moindre concentration de Sr** qui est enregistrée **dans les plus hauts niveaux de la chaîne alimentaire** (cf. VI.) engendre une **plus faible variation** (variance) **des ratios isotopiques** du Sr à mesure que l'on progresse dans la chaîne trophique. De plus, les **herbivores** consomment une **variété de plantes** dont les signatures en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  peuvent varier et leurs tissus enregistrent une **moyenne de la somme de ces signatures** sur plusieurs années (période de formation des tissus). L'inventaire de plusieurs études a montré que le coefficient de variation (CV) de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans les ossements d'animaux locaux reste inférieur à 0,6% (pour les animaux modernes ; Price *et al.* 2002). Ce coefficient dépend toutefois de la **mobilité de ces animaux**, sachant par exemple que des animaux sauvages tels que les cervidés se nourrissent sur de plus grandes surfaces que certaines espèces domestiques, pouvant être gardées proches de l'homme comme le chien par exemple. Dès le Néolithique, les bovins domestiques pourraient être amenés à pâturer sur des terrains divers alors que les cochons pourraient être maintenus plus proches des humains sur un territoire plus restreint (Bentley *et al.* 2004). En outre, les oiseaux couvrent un large territoire alors que les petits mammifères ont une aire de répartition beaucoup plus restreinte et présentent donc théoriquement une gamme de variation moins large que les plus gros animaux (Bentley 2006).

## VII.2. Facteurs de variation des ratios isotopiques du Sr

### I.1.2. Influence de l'alimentation et teneurs en Sr des aliments

De même que pour le rapport Sr/Ca (cf. VI.1.f), les **aliments les plus riches en Ca et Sr**, comme les plantes, vont **influencer plus fortement les rapports  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$**  que ceux de moindre teneur en Sr, comme la viande (Bentley 2006). Par conséquent, la consommation à part égales de plantes et de viande d'animaux ayant poussé et s'étant nourris, respectivement, sur des milieux dont la signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  est différente reflètera majoritairement la signature des plantes. Réciproquement, il faudra donc une plus grande proportion de viande, par rapport aux plantes, dans l'alimentation pour que sa signature soit visible dans les tissus des consommateurs. Ainsi, pour des sources alimentaires dont les signatures isotopiques et les teneurs en Sr sont diverses, ces deux paramètres doivent être pris ensemble en considération pour interpréter la signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  du consommateur. Un graphique représentant les valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  au regard de **la teneur en Sr en ppm** (généralement en ordre inverse **1/Sr**) peut permettre de distinguer les contributions de différentes sources (Figure C2. 33 ; Montgomery 2010).

NB : Si le lait est riche en Ca, il est presque aussi pauvre en Sr que la viande et sera visible dans la même mesure.

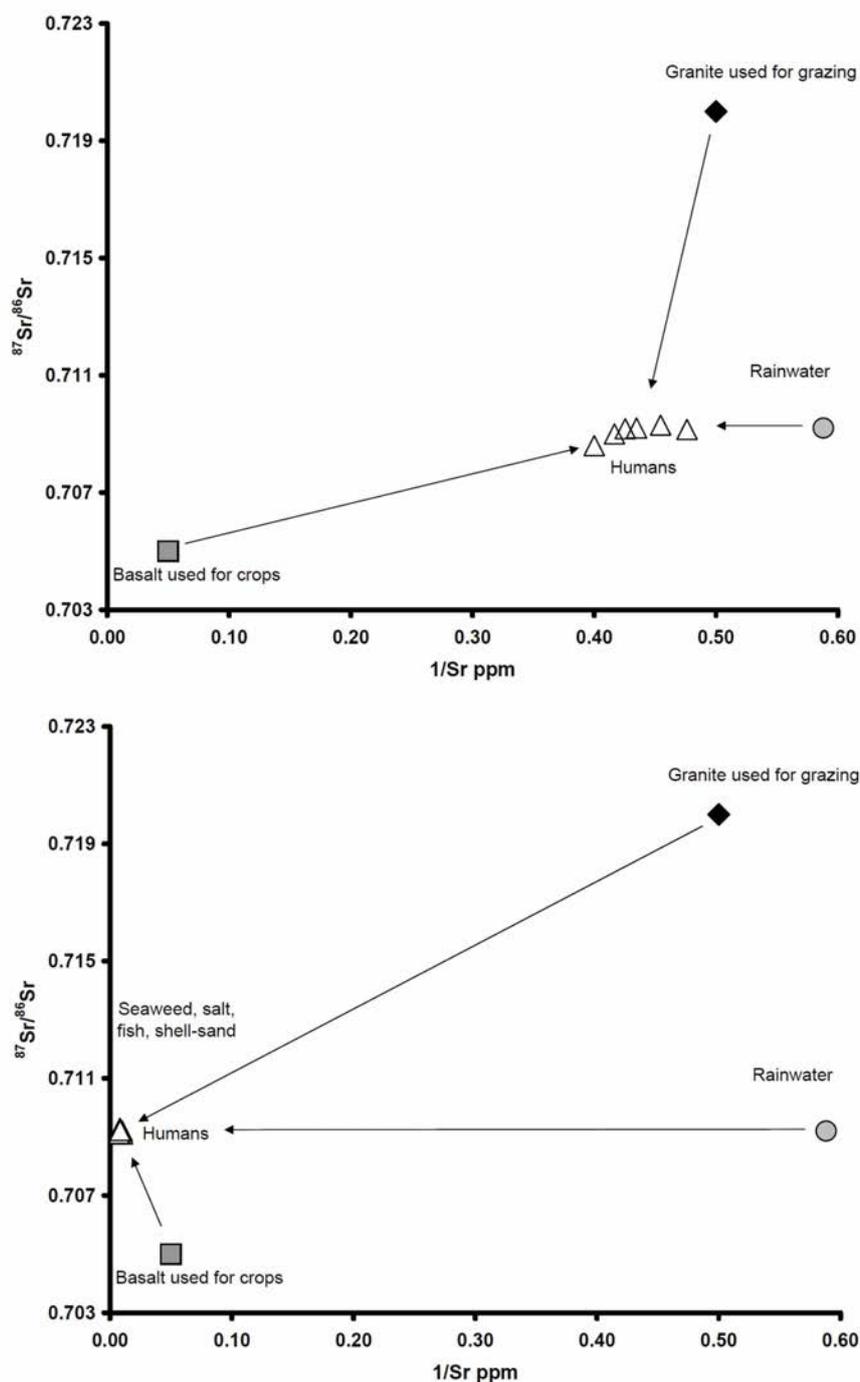


Figure C2. 33 : Exemple de l'influence de fortes précipitations apportant une signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  marin (en haut) et de l'influence du Sr marin sur la signature des humains ayant consommé des plantes cultivées en région côtière où l'eau, de plus forte concentration en Sr, est chargée en sels marins (en bas). La concentration en Sr permet de trancher entre l'influence des pluies et celle des plantes, apportant toutes deux une signature marine. D'après Montgomery 2010.

### I.1.3. L'eau de boisson

La consommation d'eau de rivière peut entraîner l'ingestion de strontium provenant de sources rocheuses éloignées (Montgomery 2010). Une eau de boisson particulièrement riche en Sr influencera d'autant plus le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  du consommateur (Weber *et al.* 2020).

#### I.1.4. *Le poisson marin*

Une étude récente sur des cochons alimentés en conditions contrôlées expérimentalement a montré que le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  est légèrement modifié par l'inclusion de **ressources marines** dans l'alimentation (Lewis *et al.* 2017). De ce fait, la négligence d'une possible contribution des ressources marines dans l'alimentation peut mener à de mauvaises interprétations en termes de mobilité des humains, ceux qui auraient consommé du poisson marin pouvant être à tort identifiés comme des non-locaux (Lahtinen *et al.* 2020). Toutefois, la consommation de poisson doit être substantielle pour que la signature marine soit enregistrée dans les tissus, notamment si le reste de l'alimentation se compose majoritairement de plantes terrestres, plus riches en Sr.

#### I.1.5. *Introduction de Sr par les outils en pierre*

Il semblerait que l'**ingestion non intentionnelle** de Sr à partir des **outils en pierres** (moulins manuels, meules, etc.) constituerait moins d'1% de l'alimentation et n'induirait a priori pas de modification du  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de plus de 0,001 (Johnson *et al.* 2019). L'utilisation d'outils en matériaux exogènes ne contribuerait donc pas à la signature finale des humains de façon significative.

### VII.3. Traçage de la mobilité et identification de sujets non locaux

Pour **identifier les individus non locaux** en archéologie, il est nécessaire de **déterminer la gamme locale de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  biodisponible** (cf. VII.3.a ; Bentley *et al.* 2004). L'estimation de la gamme locale peut être réalisée à partir de la géologie (Budd *et al.* 2004 ; Copeland *et al.* 2010), de la mesure d'échantillons actuels de sols, de sources d'eau, de plantes ou de petits animaux (Bentley *et al.* 2004 ; Evans *et al.* 2010 ; Willmes *et al.* 2013) et/ou des restes archéologiques animaux (Bentley *et al.* 2004 ; Price *et al.* 2002). En l'absence de référentiel local, la **comparaison des individus** entre eux et/ou de **différents tissus** formés à des périodes distinctes peut permettre d'identifier des schémas de mobilité.

Toutefois, l'identification de la mobilité n'est possible que si la signature géologique de la région le permet (elle doit être suffisamment hétérogène dans les environs du site) et/ou si des différences de signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  sont observées entre les dents et les os, signifiant que l'individu a passé son enfance ailleurs. En revanche, des signaux identiques ne signifient pas nécessairement qu'un individu n'a pas bougé : il a pu par exemple revenir sur le lieu de son enfance après avoir bougé au cours de sa vie ou venir d'un endroit dont la signature isotopique est similaire, bien que ce dernier cas soit plus exceptionnel.

#### VII.3.a. Estimation de la gamme locale de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Une **première estimation** de la gamme  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  d'une région particulière peut être faite en caractérisant la **géologie locale** du substrat rocheux et le Sr biodisponible dans le **sol** et les **plantes**

prélevées dans la région sur les couches géologiques correspondantes (e.g. Copeland *et al.* 2011 ; Evans *et al.* 2010 ; Janzen *et al.* 2020 ; Nehlich *et al.* 2009 ; Price *et al.* 2006 ; Washburn *et al.* 2021). Une cartographie de la signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  biodisponible en fonction du substrat géologique peut être réalisée pour avoir un aperçu de la variabilité régionale (e.g. Evans *et al.* 2010 ; Willmes *et al.* 2018). La signature des **échantillons de rivières** fournissent généralement de bonnes prédictions du  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  disponible pour les plantes et les animaux. De même, les **petits mammifères**, qui ont une aire de répartition restreinte, sont de bons indicateurs de la gamme locale (Bentley *et al.* 2004 ; Price *et al.* 2002). Toutefois, ce type d'échantillons n'est généralement pas conservé en contexte archéologique et l'analyse **d'échantillons modernes** risque d'être biaisée par l'apport de Sr exogène pouvant provenir de la **fertilisation** ou de polluants aéroportés, voire de la consommation de nourriture importée (Bentley 2006 ; Maurer *et al.* 2012).

La meilleure façon de déterminer la signature locale en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  est d'analyser des **dents d'animaux archéologiques** contemporains des sujets d'intérêt et ayant **vécu localement** (Bentley *et al.* 2004 ; Price *et al.* 2002). Cette stratégie réduit le problème de la variabilité environnementale (la signature étant moyennée sur un secteur donné), permet d'éviter la contamination par du Sr anthropogénique moderne et de minimiser l'impact de la diagénèse (l'émail des dents étant plus résistant que l'os ; cf. VII.4.). En contexte Néolithique, les **cochons** semblent de bons candidats, consommant des ressources similaires à celles des humains (souvent leurs déchets) et vivant probablement à proximité des villages (Bentley 2006). Ainsi, la gamme locale peut être évaluée à partir du rapport Sr moyen + 2SD (2 écarts-types) de **l'émail animal** considéré (Bentley *et al.* 2004). La multiplication des analyses de différents animaux des mêmes sites permet néanmoins d'avoir une vision plus globale de la signature locale et/ou environnante. Par exemple, sur le site Néolithique allemand de Vaihingen, les cochons ont la plus faible variabilité, par rapport aux caprinés et bovinés, et fournissent un bon indicateur de l'intervalle de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  local (Bentley *et al.* 2004). L'estimation de la gamme locale à partir de l'émail dentaire des animaux des mêmes sites se fait désormais couramment en contexte archéologique (lorsque le contexte le permet) pour évaluer la présence de sujets humains non locaux (e.g. Frei et Price 2012 ; Moffat 2013 ; Price *et al.* 2019 ; Whelton *et al.* 2018). À défaut de dents, le référentiel peut également porter sur l'os animal pourvu que son intégrité biologique ait été conservée (e.g. Lengfelder *et al.* 2019). Si toutefois aucun reste animal n'est retrouvé sur le site, comme ce peut être le cas en contexte funéraire strict comme par exemple à Talheim (sépulture collective Néolithique d'Allemagne; Price *et al.* 2006), la solution la plus parcimonieuse est d'utiliser la gamme isotopique du Sr biodisponible localement avec une carte géologique.

Enfin, la **combinaison des signatures en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$**  données par les **différentes sources disponibles** (cartographie du Sr biodisponible en fonction de la géologie, analyses des restes archéologiques, si possible des dents d'animaux les plus locaux, etc.) permettra d'avoir une vision la plus précise possible de la variabilité locale du Sr isotopique. Il est à noter par ailleurs que pour éviter de

surestimer le nombre de non-locaux, une estimation plus large de la gamme locale est plus conservatrice.

### VII.3.b. Comparaisons inter- et intra-individuelles

Si l'analyse de restes fauniques, botaniques ou du sol n'est pas réalisable, et si aucune cartographie géologique du Sr biodisponible n'est accessible, il reste possible d'observer les différences **entre les individus** et **entre les tissus** (formés à différentes périodes) d'un même individu, sous certaines conditions (e.g. Müller *et al.* 2003).

**La comparaison des ratios  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  au sein d'une population** peut mettre en évidence des clusters de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  corrélés à certains paramètres archéologiques. L'identification de valeurs extrêmes, au delà d'un seuil de 2 écarts-type (SD) par rapport à la moyenne, peut signaler la présence de migrants (Figure C2. 34 ; Bentley *et al.* 2003 ; Goude *et al.* 2012 ; Price *et al.* 2002). **En particulier la variance** peut être plus importante pour un groupe que pour un autre. Un tel phénomène a été observé à large échelle pour le Néolithique européen où une variance plus importante pour les femmes que pour les hommes témoigne d'une plus grande mobilité probablement associée à un système patrilocal dominant (Bentley *et al.* 2012 ; Goude *et al.* 2019) – l'origine exogène des femmes est un sujet particulièrement discuté au Néolithique (cf. Chap1.III.2.e). À l'inverse, une plus grande variabilité des signatures isotopiques du Sr chez les hommes a été enregistrée en Thaïlande à l'avènement de l'agriculture, ce qui reflète un accès plus large aux ressources pour les hommes, impliquant cette fois un système matrilocal (Bentley *et al.* 2005). La comparaison diachronique de groupes humains d'un même territoire peut également mettre en évidence des schémas de mobilité qui évoluent dans le temps, comme c'est le cas par exemple dans les Gorges du Danube où une plus forte variance à la transition Mésolithique-Néolithique indique une plus grande mobilité des humains en comparaison avec les périodes précédentes (Borić et Price 2013).

Si pendant la période de formation et de remaniement des ses tissus, l'individu a passé sa vie au même endroit et a consommé les mêmes ressources, la signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de ses tissus doit être en théorie identique. Ainsi, la mesure conjointe dans deux tissus formés à différentes périodes, comme l'os et les dents, ou plusieurs dents entre elles, permet de pister d'éventuelles modifications du Sr isotopique au cours de la vie d'un individu. Par exemple, une signature **différente entre l'os et l'email dentaire** d'un individu adulte, reflétant respectivement la fin de sa vie et son enfance, devrait indiquer un **déplacement de l'individu** entre ces deux périodes (Figure C2. 34).

Toutefois, si une différence de signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  indique généralement un déplacement, cela peut aussi refléter, dans une moindre mesure, un **changement alimentaire** avec un nouvel approvisionnement d'une partie des ressources sur un territoire distinct, mais sans changement de résidence. Par exemple, le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  peut varier lors de l'introduction dans le régime

alimentaire de la **consommation d'espèces sauvages chassées ou glanées sur un secteur voisin** dont la signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  n'est pas la même que le lieu de résidence (où sont consommées les autres ressources). La part des plantes est d'autant plus visible que leur teneur en Sr est supérieure à celle de la viande. Si un point d'eau se tarit et que les humains (et les animaux) sont contraints d'aller **s'approvisionner plus loin**, sur le long terme, une modification isotopique pourra potentiellement également être visible. Ce type de changement peut s'accompagner ou non d'un déplacement des populations sur un autre lieu de résidence. De telles possibilités devront être prises en compte lors de l'interprétation des résultats. Néanmoins, des modifications ponctuelles de ce type seront moyennées dans les tissus sur la durée de la période de formation.

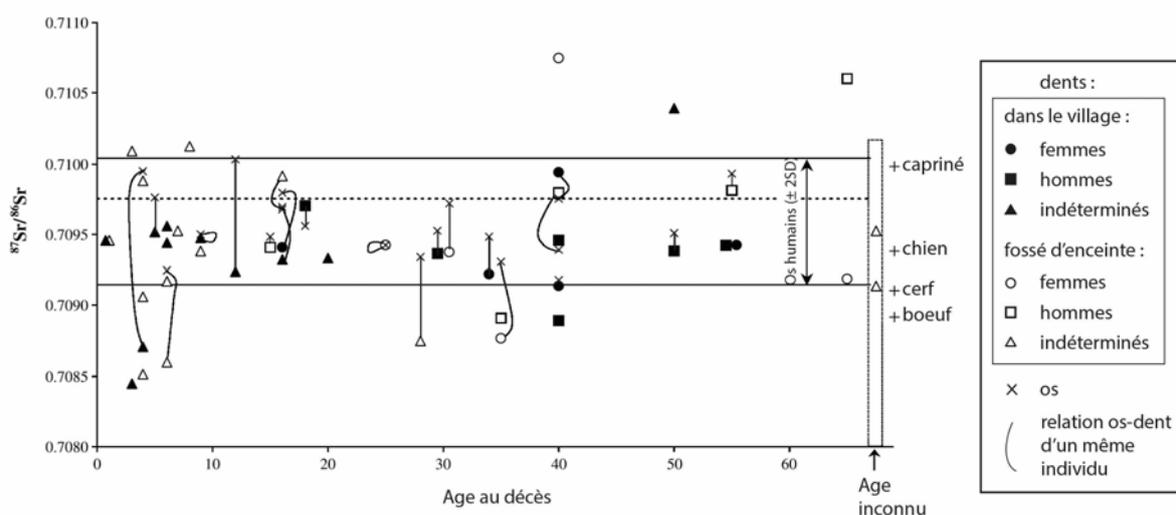


Figure C2. 34 : Isotopes du strontium dans les os et l'émail des dents des humains de Vaihingen (Néolithique, Allemagne), d'après Bentley *et al*, 2003. La gamme "locale" de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  indiquée est définie par deux écarts types par rapport à la valeur moyenne des os humains. Une ligne pointillée définie arbitrairement représente la différence entre les valeurs du fossé et celles du village. Les valeurs de quatre dents d'animaux excavées dans les niveaux LBK de Vaihingen sont également indiquées à droite du graphique. La différence la plus importante entre les os et les dents des sujets inhumés à l'extérieur du village, dans le fossé d'enceinte (symboles vides), indique une plus grande proportion de migrants parmi ces individus par rapport à ceux inhumés dans le village (symboles pleins), plus locaux. Ce résultat est corroboré par une plus grande variabilité des valeurs dans l'émail des sujets du fossé par rapport à ceux du village. Modifié d'après Bentley *et al*, 2003.

Le **traçage du signal sur un temps plus court** permet de s'affranchir du problème d'une signature moyennée. Par exemple le micro-échantillonnage ou l'ablation laser dans les dents permettent de suivre le signal  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  au cours du temps. Dans l'exemple précédent du site Néolithique de Vaihingen, l'échantillonnage multiple dans une dent de boviné permet de tracer la mobilité du bétail (Figure C2. 35) et d'identifier un phénomène de **transhumance** (Bentley et Knipper 2005). Des différences de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  le long du profil des herbivores peuvent correspondre à de légères différences dans l'acquisition de la nourriture venant de zones au  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  différent (vu la complexité de la géologie locale). Un exemple similaire de gestion mobile du bétail a pu être identifié dans la Grèce antique par l'analyse du Sr (Bishop *et al*. 2020). Ce type de variation est d'autant plus visible que l'échelle est fine et la signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de l'aire géographique est bien définie et suffisamment hétérogène (e.g. Lazzarini *et al*. 2021 ; Montgomery *et al*. 2010).

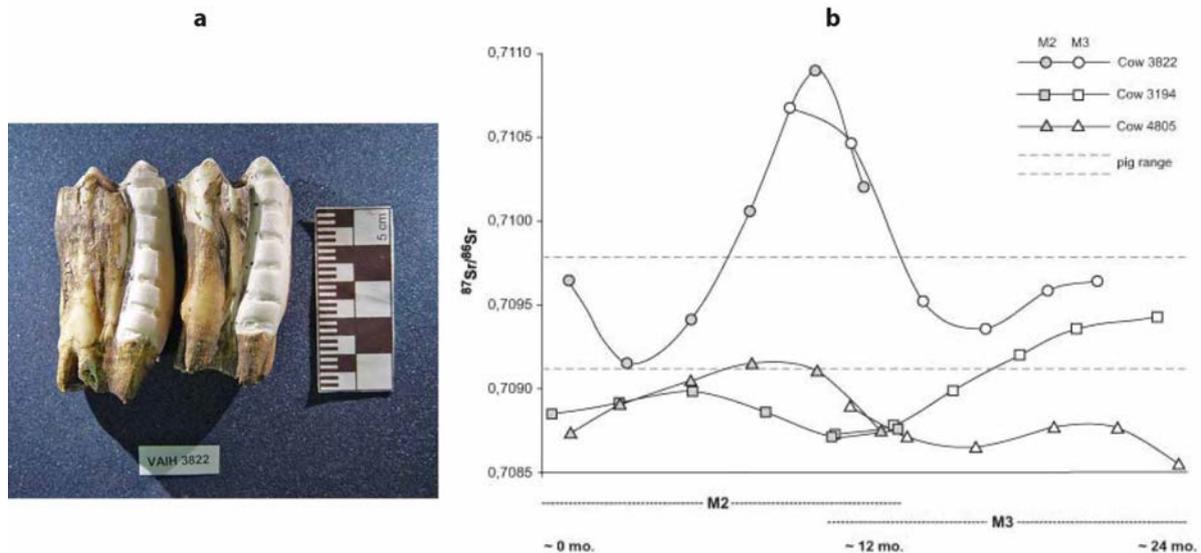


Figure C2. 35 : (a) Échantillonnage séquentiel de dents de bovins (M2 et M3 supérieures droites, échantillon 3822) provenant du site Néolithique allemand de Vaihingen et (b) courbes de valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  obtenues à partir de cet échantillonnage pour trois bovins de ce site, d'après Bentley et Knipper 2005. L'émail de la M2 se forme entre la naissance et environ 10 mois, celui de la M3 entre environ 10 mois et 2 ans. Pour chaque animal, les courbes se recourent, témoignant de la continuité des séquences dans le temps. Les lignes en pointillés délimitent la gamme de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  locale estimée à partir de l'émail dentaire des cochons du même site archéologiques. Modifié d'après Bentley *et al.*, 2004.

En archéologie, la comparaison de la signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  des os et des dents permet souvent d'identifier des migrants de façon simple, parfois même en l'absence de référentiel faunique local (e.g. Bentley *et al.* 2003 ; Goude *et al.* 2012 ; Price *et al.* 2002). Toutefois, **les os sont particulièrement sensibles à la diagenèse** et il est primordial de vérifier l'intégrité de leur signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  avant d'interpréter les résultats.

#### VII.4. Fiabilité des résultats : identifier et minimiser l'impact de la diagenèse

Les rapports biogéniques de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  sont généralement **mieux conservés dans l'émail**, de par sa structure plus dense et cristallisée et sa moindre concentration en Sr, que dans la dentine ou l'os (e.g. Chiaradia *et al.* 2003 ; Hoppe *et al.* 2003 ; Lee-Thorp et Sponheimer 2003). L'émail est donc plus souvent utilisé pour les études de Sr sur la mobilité. Il n'est toutefois pas nécessairement totalement exempt de contaminations exogènes et l'identification de la diagenèse est donc déterminante. À plus forte raison dans l'os, des pré-traitements sont possibles pour éliminer une partie, et le plus souvent une partie seulement, des contaminants (Budd *et al.* 2000). De même que pour les éléments traces, l'utilisation du laser dans ce travail pour analyser les rapports de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ne permet pas d'appliquer ces pré-traitements, qui ne seront donc pas discutés ici. Dans tous les cas de figure (avec ou sans pré-traitement), l'impact de la diagenèse reste difficile à quantifier. Il faut donc **examiner l'authenticité des mesures de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  a posteriori** et contrôler qu'elles reflètent bien celles enregistrées du vivant

des individus. Si l'identification et le nettoyage de la diagénèse sera discuté plus en détail dans la section Chap8.I, quelques éléments de compréhension sont donnés ci-après.

D'abord, la concentration en  $^{88}\text{Sr}$ , isotope le plus abondant, permet d'évaluer la composition en Sr d'un tissu. Lors des mesures par ablation laser, c'est notamment la **corrélation du  $^{88}\text{Sr}$**  avec le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (et en particulier sa variabilité) qui indique une probable contamination (Budd *et al.* 2000) – la mesure du  $^{88}\text{Sr}$ , en V, permet également de vérifier que la tension du signal était suffisante pour mesurer un ratio  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de bonne qualité (cf. Chap8). Ensuite, l'analyse combinée du Sr isotopique **avec les éléments traces** apporte un argument supplémentaire pour détecter les aires diagénétiques (corrélation du  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  avec les proxies diagénétiques – U et Mn – mentionnés dans la section VI.4.a). À notre connaissance, la recherche de ce type de corrélation a été effectuée dans seulement trois études par ablation laser et n'est pas systématique (Balter *et al.* 2012 ; Simonetti *et al.* 2008 ; Willmes *et al.* 2016).

Enfin, une bonne connaissance du contexte, par l'identification de la **gamme locale** à partir des animaux et des plantes notamment, et la mesure des valeurs du sol actuel, peuvent permettre d'identifier le Sr diagénétique. Par exemple, des échantillons de dentine plus contaminés que l'émail peuvent présenter des valeurs plus basses et homogènes, plus proches de celles du sol, que celles de l'émail (Chiaradia *et al.* 2003). Une récente étude d'A. Styring et collaborateurs (2019) a évalué le potentiel de reconstruction du signal  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans les graines carbonisées, le plus souvent retrouvées en contexte archéologiques parmi les restes végétaux. Les résultats montrent que malgré les protocoles de traitement appliqués, ce matériel ne semble pas être adapté à la définition d'une gamme locale en raison d'une trop importante sensibilité à l'incorporation de Sr exogène du sol environnant. Il est toutefois parfois possible de distinguer la provenance non locale de graines carbonisées.

## VII.5. Résumé

**Mesure du  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans la bioapatite :**

Le ratio  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  reflète l'âge et le type des roches, donc la **géologie locale** mais peut varier légèrement en fonction des environnements avec l'apport de Sr atmosphérique et des eaux souterraines et de surface.

Le **Sr biodisponible** entre dans la chaîne alimentaire et se fixe dans les tissus des consommateurs avec un **fractionnement négligeable** : le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  des tissus reflète directement la signature des ressources consommées ; il est généralement un bon **indicateur du lieu de résidence** au moment de la formation des tissus.

Les ratios  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  sont **moyennés à chaque maillon de la chaîne** et le coefficient de variation (CV) diminue en conséquence. Les plantes sont un meilleur indicateur du  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  local que le sol ; les animaux se nourrissant localement le sont d'autant plus.

**L'identification d'un signal non-local pour tracer la mobilité** des humains sur un site archéologique passe nécessairement par :

- la caractérisation de **la gamme de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  local**, à partir des **dents des animaux** archéologiques ayant vécu au plus proche des humains si possible (moyenne  $\pm 2\text{SD}$ ) – ou de la petite faune, peu mobile, contemporaine – et de la **cartographie géologique** des valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de la région étudiée,
- la **comparaison inter- et intra-individuelle** : une signature de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  différente dans l'émail de celle de la moyenne ( $\pm 2\text{SD}$ ) des os humains permet généralement d'identifier un migrant ; le traçage du  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  par micro-échantillonnage ou ablation laser dans une (ou plusieurs) dent(s) permet de suivre des épisodes de migration comme la transhumance.
- la **vérification de l'intégrité** du rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  par la mesure et l'élimination de la diagénèse.

Les **échantillons modernes** peuvent être **contaminés** par la fertilisation ou la consommation d'aliments importés.

**Variabilité du  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  :**

Le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  peut être influencé notamment par :

- **l'eau de boisson,**
- **la teneur en Sr des différents aliments** : les plus riches en Sr (comme les plantes) auront plus d'impact sur la signature isotopique du Sr,
- la consommation significative de **ressources marines.**

## VIII. Mesure des échantillons : échelles et techniques

---

Après avoir passé en revue les principes méthodologiques de l'enregistrement dans les tissus et du traçage des différents marqueurs, cette section présente le **fonctionnement théorique des techniques de mesure** utilisées dans cette étude. Si les détails techniques d'analyses, la sélection et la préparation des échantillons seront décrits dans les chapitres 3 et 4, une brève description de la nature des échantillons et de l'échelle de suivi des mesures est fournie en introduction de cette section pour comprendre le choix des techniques de mesure adaptées à chaque proxy. Cette section vise à expliquer de façon synthétique, schématique et théorique la stratégie d'échantillonnage et les principes techniques d'analyse menés dans ce travail.

### VIII.1. Introduction : nature des échantillons et échelles de suivi

Dans ce travail, tous les échantillons sont sous **forme solide** :

- les analyses de **C, N, N<sub>AA</sub> et S** s'effectuent sur le **collagène purifié et lyophilisé**.

Le collagène est extrait par diverses étapes chimiques (cf. Chap4.I.1) à partir d'un fragment d'os, de la dentine de la couronne ou d'une section de dentine coupée sur la dent entière, puis il est analysé par un spectromètre de masse isotopique (IRMS) couplé à un analyseur élémentaire (EA) pour C, N et S (cf. VIII.3), ou couplé à un chromatographe en phase gazeuse (GC) pour le N<sub>AA</sub> (cf. VIII.4).

- les analyses des **éléments traces** et du **Sr isotopique** se font par ablation laser (LA) directement sur les **dents coupées** et les **fragments d'os** (enrésiné(e)s et poli(e)s).

Le dispositif laser est couplé à un spectromètre de masse à torche plasma (ICPMS ; cf. VIII.5) et à collecteur multiple (MC) pour le Sr isotopique ou quadripôle (Q) pour les éléments traces (cf. Chap4.III. pour la préparation des échantillons et le protocole d'ablation laser).

Les mesures se font à **différentes échelles** :

- D'abord, la mesure de **C, N et S** dans le **collagène osseux et dentinaire est moyennée** sur l'ensemble de la fraction échantillonnée :
  - tout un **fragment d'os**, ciblant les dernières années de la vie de l'individu (Figure C2. 36a)
  - toute la dentine d'une **couronne** déminéralisée (on ne garde que la fraction organique), ciblant la période de formation de la couronne, selon la dent considérée (Figure C2. 36b)
  - plusieurs **sections de dentine** réalisées sur la dent entière déminéralisée (Figure C2. 36c). Cette stratégie de **micro-échantillonnage** permet d'obtenir un signal plus précis dans le temps du fait de la formation incrémentielle des dents. Chaque section constitue une moyenne et recoupe en partie le signal des sections qui l'entourent (cf. Chap4.II.1).

Ce multiple échantillonnage permet de suivre le signal enregistré à des périodes distinctes de la vie des individus (cf. III. ; Figure C2. 36).

- Ensuite, la mesure du  $N_{AA}$  se fait à partir du **collagène osseux** restant des précédentes analyses. Le collagène subit une série de traitements chimiques supplémentaires (dérivatisation) pour préparer l'analyse des **acides aminés séparément** (Figure C2. 36e).
- Enfin, l'analyse par **ablation laser** permet de doser les éléments traces et le Sr isotopique à partir d'une **infime quantité de matière** prélevée en de **nombreux points** (plusieurs centaines) **le long d'un profil** (dessiné au préalable à l'aide d'une caméra et d'un logiciel connecté ; Figure C2. 36d). Dans l'émail dentaire, ce profil (représenté par les pointillés rouges sur la figure) traverse les différents incréments apposés au cours de la formation de la dent : le profil permet donc de suivre l'évolution, sur un temps très court (quasi journalier), des éléments traces et du Sr isotopique, au cours de la période de formation de la dent analysée (cf. Chap4.III.2). Dans l'os, un profil est tracé non pour suivre le signal au cours du temps mais pour prélever la matière en différents points qui seront moyennés pour obtenir une valeur la plus proche possible du signal enregistré du vivant de l'individu (si tant est que l'intégrité du collagène osseux soit préservée).

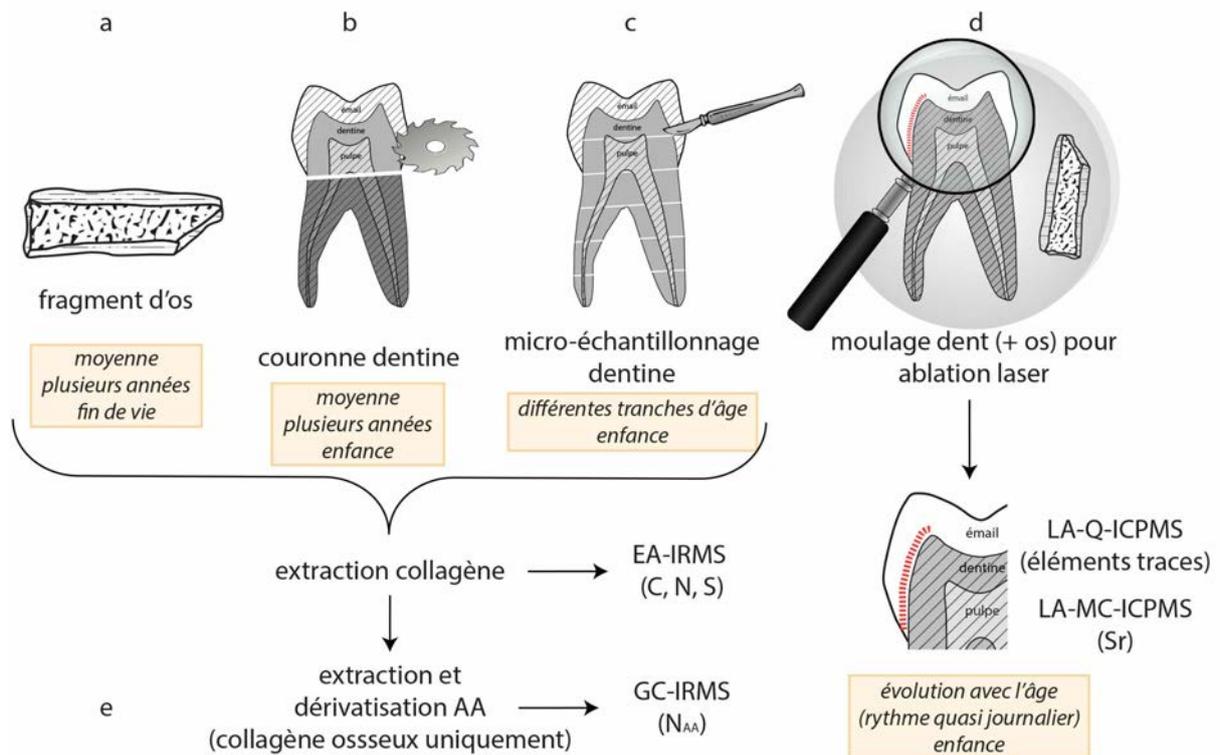


Figure C2. 36 : Schéma de synthèse des différents types d'échantillonnage et techniques de mesures associées réalisés dans cette étude. (a) analyses isotopiques de C, N et S du collagène osseux global, (b) analyses isotopiques C, N et S du collagène dentinaire global et (c) des sections incrémentielles par micro-échantillonnage, (d) analyse du Sr isotopique et des éléments traces par ablation laser dans l'émail dentaire (et l'os) et (e) analyse isotopique de l'azote des acides aminés spécifiques du collagène osseux. Les encadrés jaunes indiquent à quelle période de la vie correspond le signal enregistré, pour chaque type de prélèvement.

## VIII.2. La spectrométrie de masse (MS)

La spectrométrie de masse (MS pour *mass spectrometry*) est une technique d'analyse servant à **identifier des molécules d'intérêt** et à **caractériser leur structure chimique**. Le principe est le suivant : la molécule est ionisée en phase gazeuse et devient une molécule chargée qui sera détectée selon son **rapport  $\frac{m}{Z}$** ,  $m$  étant la masse molaire et  $Z$  la charge. Un spectromètre de masse comporte différentes parties :

- **le système d'introduction de l'échantillon** : celui-ci peut être introduit sous forme solide, liquide ou gazeuse (il sera solide dans cette étude). Il peut être couplé à une méthode séparative comme la **chromatographie en phase gazeuse (GC)** permettant d'observer séparément différentes fractions d'intérêt, comme les acides aminés du collagène.
- **la source d'ionisation** : elle passe les molécules en phase gazeuse et les ionise. L'ionisation peut être, entre autres, **électronique (EI)**, la molécule est bombardée par un faisceau d'électrons et passe sous forme ionisée), **chimique (CI)**, le transfert de charge se fait par l'introduction d'un gaz réactant, précurseur ionisé) ou par couplage avec une **torche plasma (ICP)**, couplage plasma inductif ; Figure C2. 37).

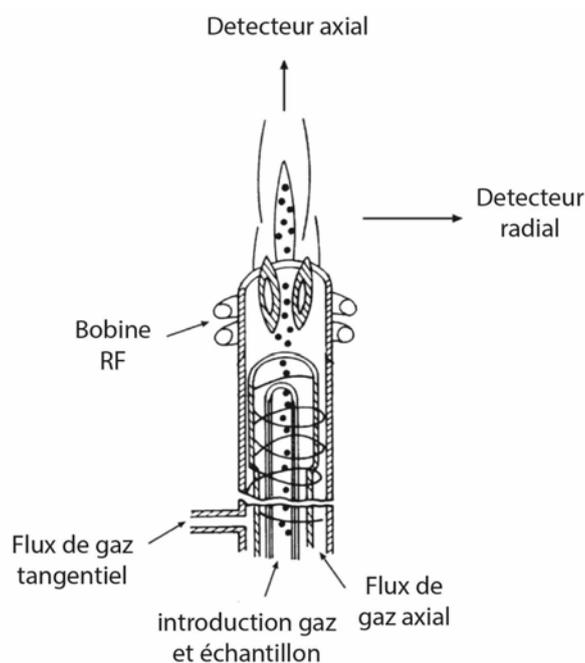


Figure C2. 37 : Schéma d'une torche ICP utilisée pour ioniser les échantillons en spectrométrie de masse. L'échantillon est chargé avec le gaz d'argon et enflammé par le chauffage radio-fréquence induit par les bobines RF. Le flux de gaz axial réagit avec les bobines RF pour produire le plasma chaud (jusqu'à 10 000 °C) et le flux de gaz tangentiel empêche la flamme de faire fondre l'enveloppe extérieure. Modifié d'après Pollard *et al.*, 2017, p41.

- **l'analyseur** : il sépare les ions selon leur rapport  $\frac{m}{Z}$ . La séparation des ions se fait notamment par leur **différence de vitesse** (séparation dans le temps en fonction du poids) ou par traversée d'un **champ magnétique** qui les fait plus ou moins dévier selon leur poids : les ions les plus lourds sont moins déviés que les plus légers. L'analyseur peut être constitué simplement d'un secteur magnétique comme c'est généralement le cas pour les IRMS ; il peut être à **secteur électromagnétique** comme pour le MC-ICP-MS (les ions sont d'abord séparés par un secteur électrostatique en fonction de leur énergie cinétique, puis par un champ magnétique ; cf. Figure C2. 40, p.186) ; ou **quadripôle** (comme le Q-ICP-MS pour l'analyse des éléments traces), c'est-à-dire constitué de 4 électrodes (barres cylindriques) dont la tension est de même potentiel et dont une paire (deux électrodes disposées face à face) est de signe (charge) positif, l'autre de signe (charge) négatif, permettant de séparer les ions selon le rapport masse/charge désiré (Figure C2. 38).

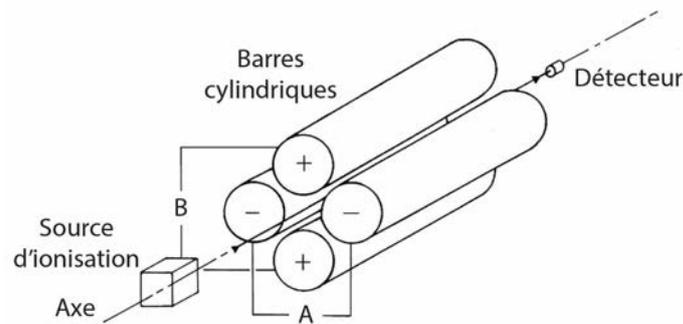


Figure C2. 38 : Schéma d'un analyseur quadripôle en spectrométrie de masse. Dans le plan formé par la paire d'électrodes négatives (A), les ions trop lourds sont déviés et heurtent les barres. Dans le plan formé par la paire d'électrodes positives (B), ce sont les ions trop légers qui sont déviés et heurtent les barres. Les ions ayant le rapport masse/charge désiré restent entre les barres et sont transmis au détecteur. D'après Pollard *et al*, 2017.

- **le détecteur** : les ions transformés en signal électrique amplifié viennent frapper une plaque métallique, le détecteur, qui **compte les ions** à l'arrivée dans un milieu sous vide. De nombreux détecteurs sont des cages de Faraday. Le détecteur peut être **multiple** (MC pour *Multi-Collector*) où plusieurs faisceaux d'ions isotopiques peuvent être détectés simultanément. Le courant est converti en différence de potentiel (en V) dont l'intensité dépend de l'abondance de l'ion d'un rapport  $m/Z$  donné. C'est la différence de voltage (la charge) qui est mesurée à l'arrivée permettant le calcul des rapports isotopiques.
- **Le système de traitement des données** : il enregistre les données, permettant d'obtenir un **spectre de masse** représentant l'abondance relative des ions (en ordonnées) en fonction de leur rapport  $\frac{m}{Z}$  (en abscisses).

### VIII.3. La spectrométrie de masse à rapport isotopique (IRMS)

La spectrométrie de masse à rapport isotopique (IRMS pour *Isotope Ratio Mass Spectrometry*) permet de mesurer l'abondance relative des différents isotopes d'un même élément dans un échantillon d'intérêt. Il peut être **couplé à un analyseur élémentaire : EA-IRMS**. Pour l'analyse **du carbone, de l'azote et du soufre**, l'échantillon (ici du collagène lyophilisé) de près d'1mg, contenu dans une capsule en étain, est introduit dans le spectromètre où il est brûlé dans un réacteur de **combustion** à très haute température ( $\approx 1000^\circ\text{C}$ ) en présence d' $\text{O}_2$  (puis dans un réacteur de réduction), ce qui provoque le dégagement de **gaz simples** comme le  $\text{CO}_2$ , le  $\text{N}_2$  ou le  $\text{SO}_2$ . Ces gaz sont entraînés par un flux d'hélium et séparés par **chromatographie** en phase gazeuse. Les échantillons gazeux sont analysés par différentiation magnétique des isotopes puis détectés (en voltage) dans les cages de Faraday. Les teneurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) et élémentaires (%C, %N, %S) sont alors **mesurées** simultanément (alternativement avec des standards pour la calibration).

### VIII.4. Le couplage de la chromatographie en phase gazeuse (GC-IRMS)

Pour des échantillons nécessitant d'être **séparés au préalable** (comme les AA du collagène), la **chromatographie en phase gazeuse** (GC pour *Gas Chromatography*) est utilisée en **couplage au spectromètre de masse**. Les échantillons rendus volatiles (par traitement chimique préliminaire ; cf. encadré) sont séparés par chromatographie en phase gazeuse avant d'être envoyés dans le four à combustion du spectromètre de masse puis analysés. Le GC-IRMS permet de mesurer par exemple la **teneur isotopique de l'azote de chaque acide aminé séparément** ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ ). On obtient ainsi les chromatogrammes complets des différents AA.

NB : Pour l'analyse des **acides aminés spécifiques**, l'échantillon de collagène a été préparé au préalable pour que les AA puissent être analysés séparément : le collagène lyophilisé a été traité chimiquement par réaction de **dérivatisation** (ajout d'un groupement fonctionnel aux AA – ici par acylation et estérification ; cf. Chap4.I.3) pour permettre son analyse en chromatographie en phase gazeuse (difficile sans dérivatisation). Ce procédé permet, par réaction chimique sur le produit à analyser (le dérivant) de synthétiser un sous-produit (le dérivé) dont les propriétés facilitent son analyse par chromatographie. Les AA dérivés sont très volatiles. Ils doivent être conservés à  $-20^\circ\text{C}$  à l'abri de la lumière, sans oxygène et sans eau. Le type de dérivatisation utilisé dans cette étude et son procédé sont décrits dans la section Chap4.I.3.

Pour vérifier l'intégrité des échantillons, une **analyse préalable par GC/MS ou GC/NPD** (le NPD est un détecteur azote-phosphore) permet d'obtenir un chromatogramme représentant le rapport m/Z en fonction du temps (Figure C2. 39). Chaque pic correspond à un AA et la structure globale (le

diagramme) doit refléter celle du collagène moderne. Cela permet d'identifier et de quantifier les AA d'un collagène avant de poursuivre l'analyse isotopique de chaque AA spécifique.

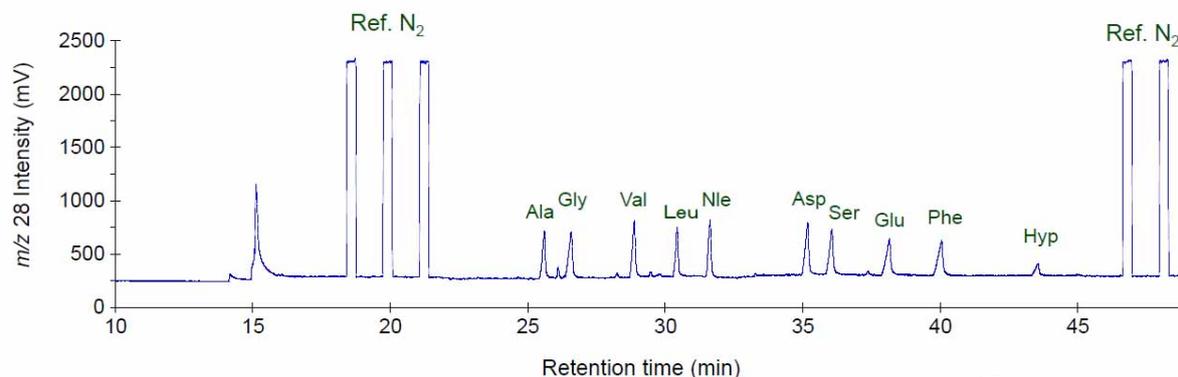


Figure C2. 39 : Exemple de chromatogramme où chaque pic représente un acide aminé séparé et analysé par GC/MS. D'après Chikaraishi, comm. pers.

## VIII.5. L'ablation laser LA-ICP-MS

### VIII.5.a. Principe instrumental

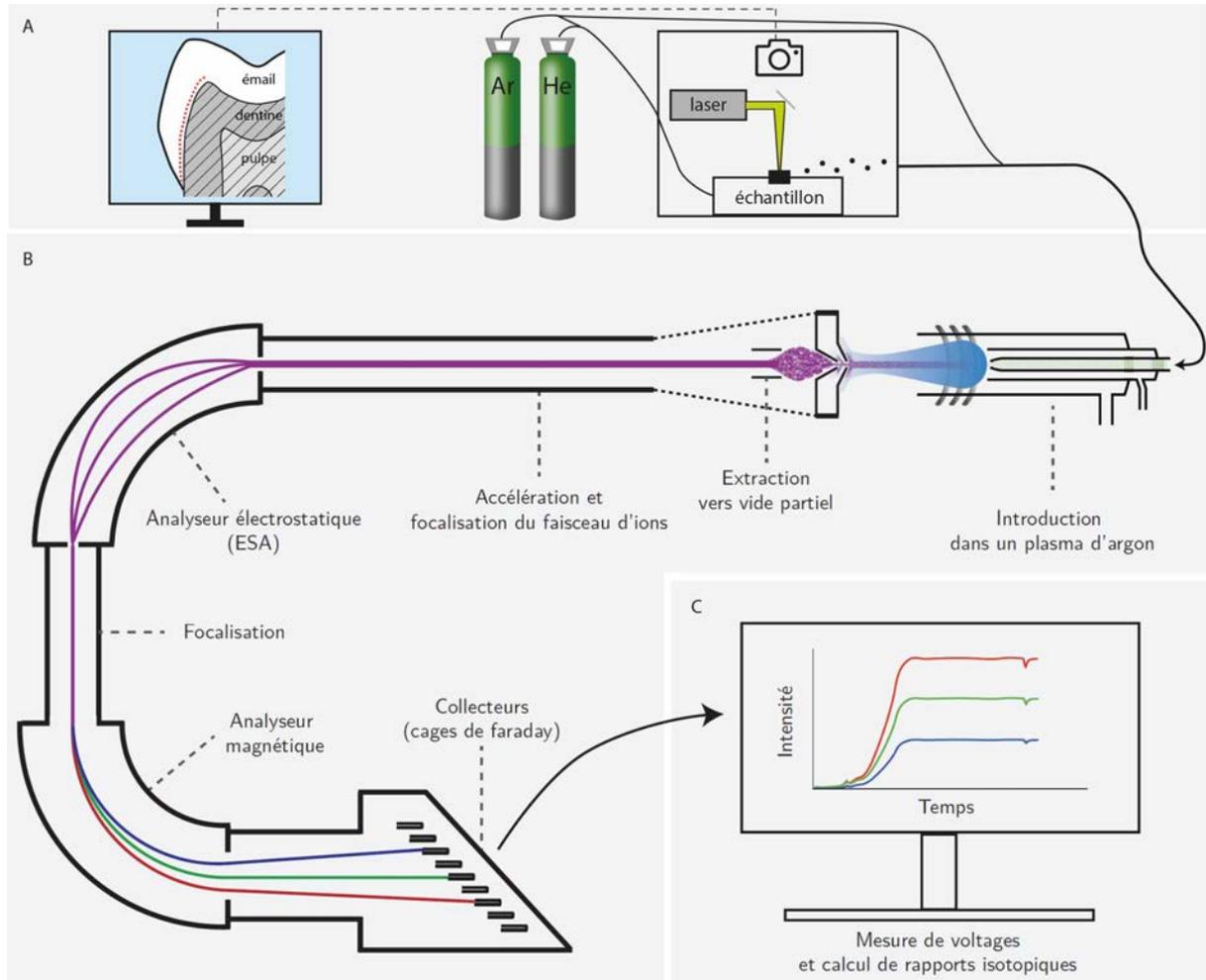
Le **dispositif laser** est couplé à un **spectromètre de masse à plasma inductif** (LA-ICP-MS pour *Laser Ablation - Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*). Le dispositif laser constitue le système d'introduction, la torche plasma la source d'ionisation (Figure C2. 40).

L'échantillon est introduit dans le rack du dispositif laser équipé d'une caméra reliée à un ordinateur. Le profil d'ablation est tracé sur l'image de l'échantillon (cf. Figure C4. 3, p.308). Un **faisceau laser** est focalisé sur la surface (lisse) de l'échantillon : au point d'impact, dit point d'ablation (quelques  $\mu\text{m}$ ), le laser désagrège la matière et la sublime en un aérosol très fin de nanoparticules. Un flux de gaz constant (d'argon) permet alors d'entraîner l'aérosol du point d'ablation au plasma de couplage. La torche plasma (gaz ionisé) va ioniser les atomes. Les ions sont ensuite injectés dans l'analyseur puis détectés par le(s) collecteur(s).

Le **spectromètre de masse couplé à un plasma inductif** (ICP-MS) permet l'analyse rapide de presque tous les éléments du tableau périodique avec une limite de détection extrêmement faible et nécessitant une infime quantité de matière. Néanmoins, certains éléments ne sont pas analysables par cette technique, comme les non-métaux (C, N, S, O, P). De plus, les échantillons sous forme solide doivent être très homogènes pour ne pas générer de dérive instrumentale.

Pour mesurer les **concentrations élémentaires** (éléments traces et majeurs), le dispositif laser est couplé à un spectromètre quadripôle (Q-ICPMS). Le détecteur du Q-ICP-MS traduit un nombre de coups par isotope et le logiciel donne la concentration de chaque élément par rapport à l'abondance

naturelle de chaque isotope. Pour mesurer les **concentrations isotopiques du Sr**, le dispositif laser est couplé à un spectromètre multi-collecteur (MC-ICPMS).



**Figure C2. 40** : Schéma illustrant le principe de fonctionnement de la technique d'ablation laser couplée à un spectromètre de masse multicollecteur à plasma inductif (LA-MC-ICP-MS). A) L'échantillon est placé dans le dispositif laser relié à un ordinateur permettant de tracer le profil à l'endroit désiré grâce à une caméra intégrée. L'échantillon est ablaté par le faisceau laser le long du profil et envoyé vers le spectromètre de masse grâce à un flux d'argon et d'hélium. B) L'échantillon passe dans la torche plasma où il est ionisé puis dans l'analyseur électromagnétique qui va séparer les ions selon leur rapport masse/charge. Ceux-là sont alors détectés par les collecteurs pour chaque isotope. C) Les courants mesurés sont traduits en tension et les ratios isotopiques sont calculés au cours du temps. Modifié d'après Martin *et al*, 2017.

### VIII.5.b. Intérêt et limites de la méthode

Intérêt :

- Tracer à une **échelle très fine** les modifications alimentaires et de mobilité d'un individu au **cours de sa vie** (e.g. Lazzerini *et al.* 2021 ; Montgomery *et al.* 2010).
- Acquérir un **très grand nombre de données** (Big Data) en un **temps limité** (une fois le processus de nettoyage automatisé) et à un **moindre coût**.
- Nécessite une **très faible quantité de matériel** (le laser permet de réaliser des prélèvements de moins de 100µm) et **moins destructif** que les analyses isotopiques traditionnelles, si ce n'est que la dent doit être coupée en deux si elle n'est pas déjà cassée (elle doit aussi parfois être incluse dans la résine mais les récentes avancées techniques permettent de s'affranchir de cette étape et de garder les échantillons dentaires propres). Néanmoins, les deux parties peuvent être réutilisées pour d'autres études : histologie, mesures isotopiques, etc.
- Caractérisation directe des **échantillons solides** sans dissolution chimique.

Limites :

- Demande des connaissances et une certaine maîtrise de la **programmation** pour traiter du Big Data.
- Les échantillons **ne peuvent subir de prétraitement** pour éliminer les éventuels composants **diagénétiques** (cela nécessiterait de pulvériser le matériel ou de le déstructurer dans l'acide). Le trempage dans l'acide acétique pour éliminer les contaminants calciques superficiels serait possible (pourvu qu'il n'endommage pas la surface lisse de l'échantillon, ce qui défocaliserait le faisceau laser et fausserait les profils ; voir par exemple Kang *et al.* 2004). Ce type de prétraitement doit être testé en réalisant des analyses par LA avant et après l'application de l'acide.
- Nécessite la mise en place d'un **protocole semi-automatisé** pour identifier *a posteriori* et supprimer les échantillons ou parties diagénétiques.
- Méthode récente et relativement expérimentale (le gros corpus analysé ici propose une approche inédite ; cf. Chap8.I) et peu de référentiels de comparaison (aucun pour le Néolithique).

### Chapitre 3. Le matériel : présentation des sites et sélection des échantillons

Tous les échantillons proviennent de **sept sites** décrits ci-après. Ils sont classés par effectif, du plus grand au plus petit, d'humains, puis de faune, analysés. Un tableau récapitulatif des principales caractéristiques de ces sites est proposé dans l'article Rey *et al.* 2019 (cf. Chap5.I, table 1). Tous localisés dans la vallée de l'Yonne dans un rayon de moins de 10 km entre le Serein et la Baulche (Figure C3. 1), ils ont été **fouillés à des périodes différentes**, certains anciennement, selon des **méthodes variables**. Ainsi l'enregistrement n'est pas homogène et certains sites ont été étudiés plus en profondeur que d'autres.

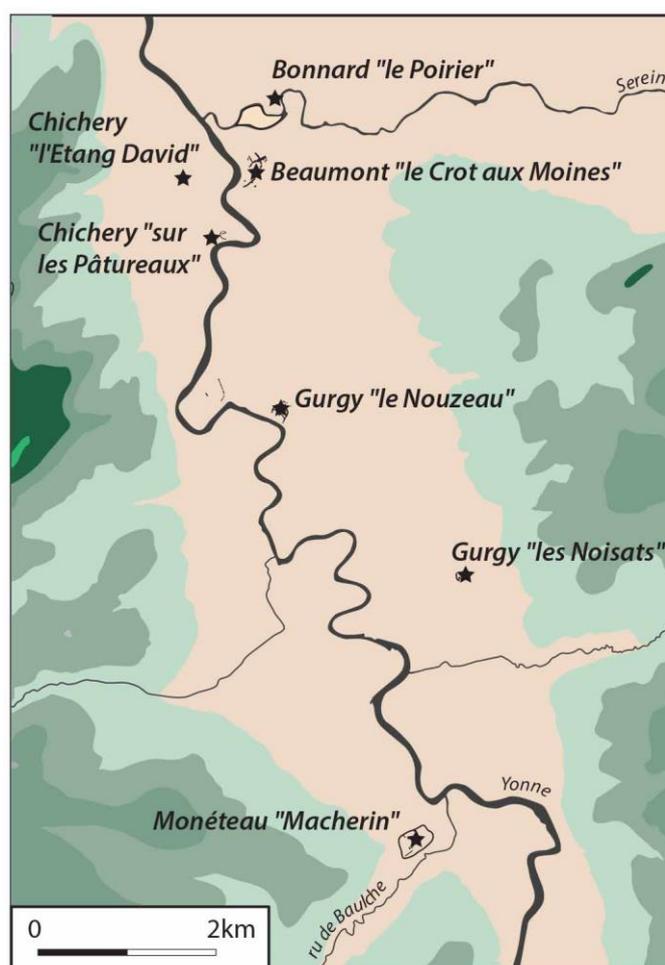


Figure C3. 1 : Localisation des sites de notre corpus d'étude dans la vallée de l'Yonne, entre le Serein et la Baulche. D'après Chambon *et al.*, 2013.

La description des gisements, que d'aucuns pourraient juger peut-être trop détaillée par certains aspects sans lien direct avec notre étude, nous semble nécessaire afin de bien connaître le contexte archéologique pour interpréter les résultats biochimiques. C'est pourquoi nous présentons, somme toute brièvement, toutes les principales thématiques de ces sites qui nous paraissent essentielles à la compréhension générale du contexte.

Nous préciserons également dans cette partie **le type d'études** (anthropologiques, génétiques) ayant porté sur le matériel d'intérêt et les éventuelles « révisions » effectuées dans le cadre de notre travail. Une section introductive présente la méthodologie d'identification et de caractérisation biologique des restes humains, pour donner les clefs de compréhension des différences d'enregistrement pouvant exister entre les sites.

En ce qui concerne la **chronologie**, un certain nombre d'incohérences ont été rencontrées dans les **datations radiocarbone** (inversions stratigraphiques, décalages chronologiques de sépultures associées et contemporaines) portant à rejeter certaines dates voire remettre en doute certains intervalles chronoculturels. Toutes les données ont été publiées antérieurement et les références sont données dans le tableau 1 de l'article Rey *et al.* 2019 (cf. Chap5.I, table 1). La Figure C3. 2 présente l'ensemble des datations réalisées sur les échantillons analysés dans cette étude (les barres horizontales) par rapport à la chronologie donnée à partir de l'ensemble des échantillons datés pour chaque secteur des sites considérés (les rectangles colorés ; l'alternance des zones blanches et grisées permet de distinguer les sites entre eux). Nous reviendrons sur cette question de la chronologie d'occupation pour chacun des sites individuellement et consacrerons une section à la discussion autour des datations (cf. Chap5.III.2).

De plus, comme nous l'avons vu dans la première partie et allons le développer dans celle-ci, la **diversité** observée dans les **objets et les pratiques funéraires**, si elle renvoie à différentes cultures alentour, ne permet généralement pas d'attribuer une culture spécifique à un site mais reflète plutôt une **composante locale propre** (Chambon *et al.* 2013). La Figure C3. 2 illustre en couleur la caractérisation culturelle dominante de chaque site en fonction également de sa chronologie. Les différents traits culturels observés dans chaque site sont discutés ci-après.

La **stratégie d'échantillonnage** au regard des paramètres bio-archéo-anthropologiques (**choix des individus et des analyses menées** sur les échantillons) sera expliquée ici pour chaque site (une synthèse est disponible dans la section Chap4.IV). Si les effectifs sont très déséquilibrés entre les sites, du fait du nombre de restes très différent retrouvé dans chacun d'eux, nous avons tenté d'échantillonner un maximum d'individus de chaque catégorie (âge, sexe, type de tombe, secteur, mobilier associé, chronologie, etc.) pour avoir une image la plus représentative possible de la variabilité générale.

Enfin, le matériel et les données issues de la littérature utilisés pour la construction d'un **référentiel local**, pour chaque proxy considéré, seront présentés puis synthétisés en fin de chapitre.

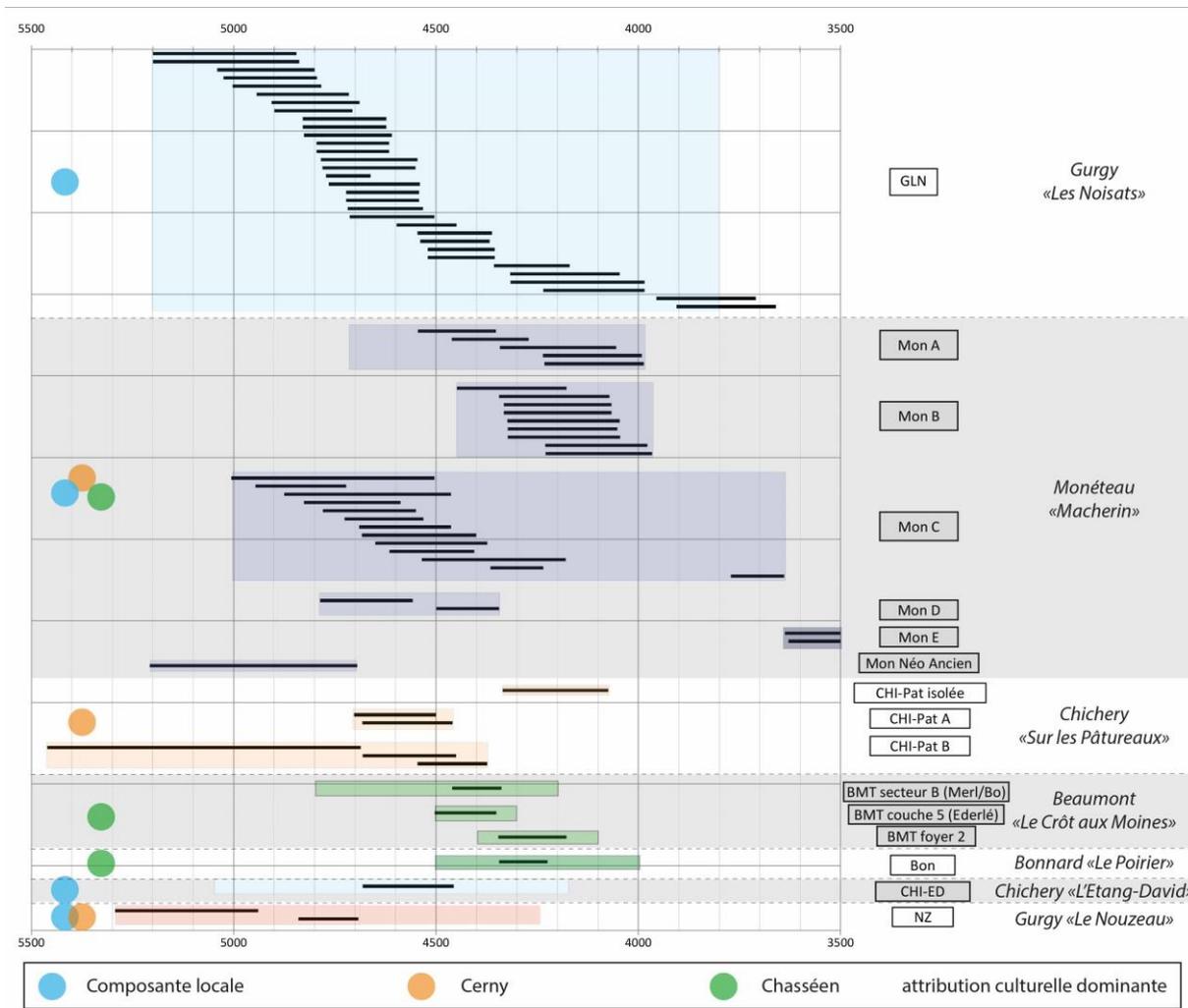


Figure C3.2 : Répartition chronologique des datations radiocarbone disponibles pour les échantillons analysés dans cette étude (barres noires horizontales) par rapport à la variation chronologique donnée par l'ensemble des datations pour chaque secteur des sites considérés (rectangles colorés) et attribution culturelle dominante des différents sites.

L'alternance des zones blanches et grisées permet de distinguer les sites entre eux. L'ensemble des données radiocarbone a été publié antérieurement (Rey *et al.*, 2019, table 1 ; Chap5.II) et les datations concernant les échantillons étudiés ici sont données en Annexe 34). Les datations ont porté sur 97 échantillons au total, dont 85 sont analysés dans ce travail.

## I. Prérequis sur l'identification biologique et l'enregistrement des données anthropologiques

De façon générale, les **études anthropologiques** ayant porté sur les restes humains des différents sites de ce corpus ne sont **pas homogènes** mais toutes de **bonne qualité**. La détermination du sexe, l'estimation de l'âge au décès, la caractérisation anthropologique (données métriques, variations anatomiques non métriques, indicateurs de stress, état sanitaire bucco-dentaire et pathologies osseuses) ont pu être étudiées ou non, enregistrées et renseignées de différentes façons, **selon les observateurs et les méthodes utilisées** et selon la **qualité des restes**. Ces informations seront précisées pour chaque site, de même que les données archéologiques et les diverses observations disponibles.

L'**identification biologique** (détermination du sexe et estimation de l'âge des individus) est primordiale pour discuter des possibles variations isotopiques et élémentaires reflétant l'alimentation et la mobilité en lien avec ces paramètres et identifier d'éventuels statuts sociaux. La **caractérisation des marqueurs génétiques et épigénétiques** tels que certaines variations anatomiques peut mettre en évidence par exemple des regroupements familiaux, au sens large, qui pourraient être corrélés à la signature biogéochimique impliquant des pratiques alimentaires communes ou des schémas de mobilité partagés entre certains groupes humains. D'autre part, les **marqueurs de stress et de l'état sanitaire bucco-dentaire et squelettiques** sont fortement corrélés à l'alimentation et aux capacités physiologiques d'assimilation des nutriments. La comparaison de ces paramètres présente donc un intérêt incontestable dans l'étude des comportements alimentaires des populations.

### I.1. Estimation et codage de l'âge au décès

En ce qui concerne l'**âge au décès**, les estimations données telles que renseignées dans les publications relatives à chaque site sont fournies dans les tableaux correspondants. À partir de ces informations, **des classes d'âge sont déterminées** pour l'analyse statistique notamment, sur la base d'un découpage couramment pratiqué (classes d'âge quinquennales et décennales ; Tableau C3. 1). Ces classes d'âge sont prises au plus large, englobant l'âge au décès estimé. Du fait de la qualité différentielle des restes et de l'estimation de l'âge, il existe de nombreux recoupements. Dans la classe des [1-9 ans], tous les individus sélectionnés dans ce travail ont plus de 2 ans pour éviter la plus forte probabilité d'un signal d'allaitement (cf. I.2).

NB : Notons toutefois que lorsqu'il aura été possible de s'affranchir de ces classes d'âge, nous observerons directement la variabilité à chaque âge (en continu), car il a été montré sur la base des pratiques funéraires que certains changements sociaux peuvent advenir au sein même de ces classes d'âge (cf. II.1.e).

âge indéterminé	?	immatures							[0-1]					
									[1-4]					
										[1-9]				
										[5-9]		[1-9]		
										[10-14]		[5-14]		
											[10-19]			
				jeunes	>15					[15-19]		[10-19]		
					>20					[20-29]		[15-29]		
				matures		>30				[30-39]		[20-39]		
					>40					[40-49]		[30-49]	[20-49]	
										[50-59]			[20-59]	

Tableau C3. 1 : Représentation des classes d'âges (en années) déterminées pour l'étude par groupe des individus. Les cellules grisées correspondent aux classes d'âge non représentées dans cette étude. Dans la classe des [1-9 ans], les sujets de moins de 2 ans ont été exclus. \*Les adultes englobent ici les individus de plus de 15 ans d'après un choix arbitraire basé sur l'observation des pratiques funéraires, contrairement à la définition de l'âge biologique (>20 ans ; cf. I.1.c).

L'estimation de l'âge au décès est basée sur le fait que l'âge biologique du squelette (croissance, maturation et sénescence) est corrélé à l'âge chronologique (âge civil) de l'individu. Ces deux âges ne sont pas strictement identiques et l'estimation de l'âge au décès se doit d'être la plus fiable possible en prenant en compte la variabilité existant au sein des populations. Bien que les méthodes d'estimation de l'âge se basent sur des référentiels modernes et que la variabilité du développement ne soit pas connue pour le Néolithique, l'utilisation de méthodes adaptées incluant l'incertitude due à la variabilité individuelle connue dans plusieurs populations permet d'estimer l'âge des sujets avec la plus grande fiabilité possible (Tableau C3. 2).

	critère	référence méthodologique	estimation de l'âge		
âge dentaire	éruption dentaire	Ubelaker, 1978	<15 ans	squelette immature	
	minéralisation dentaire	Moorrees et al, 1963a et b Demirjian et al, 1973			
	dents déciduales supérieures	Liversidge et Molleson, 2004			
âge squelettique	croissance osseuse	Sellier, 1993 ; Maresh, 1970	15-19 ans	squelette adulte	taille adulte (>15 ans)
	maturation osseuse (fusion des points d'ossification secondaires), M2 matures	Scheuer et Black, 2000 ; Ferembach et al, 79			
	maturation osseuse (derniers points d'ossification de la crête iliaque et de l'extrémité sternale de la clavicule)	Scheuer et Black, 2000; revue dans Bruzek et al, 2005	20-30 ans		
	surface sacro-pelvienne iliaque (surface auriculaire et tubérosité iliaque)	Schmitt et Broqua, 2000 ; Schmitt 2005	>30 ans, plus particulièrement >60 ans		
âge dentaire	usure dentaire (approche intra-populationnelle nécessaire)	Molnar 71 ; Bocquentin et al, 2005 ; Thomas 2011	<>30 ans et <>50 ans		

Tableau C3. 2 : Méthodes d'estimation de l'âge au décès utilisées dans ce corpus sur la base de différents critères.

### I.1.a. Estimation de l'âge des moins de 20 ans

L'estimation de l'âge au décès des individus de moins de 20 ans se fait sur la base des stades d'éruption et de minéralisation dentaire (cette dernière est privilégiée du fait de sa moindre

variabilité individuelle), de la **croissance osseuse** (mesure des os long) et de la **maturation osseuse** (observation des points d'ossification secondaire). L'estimation de l'âge des plus jeunes est meilleure, en termes de fiabilité et de précision, du fait des modifications squelettiques plus rapides et parce que nombre de facteurs, comportementaux et environnementaux notamment, n'ont pas encore d'impact significatif sur le développement.

Pour les **plus de 15 ans**, on parle d'individus de **taille adulte**. La classe des 15-19 ans inclue des individus dont le squelette est immature et qui sont souvent difficiles à distinguer des jeunes adultes (20-30 ans).

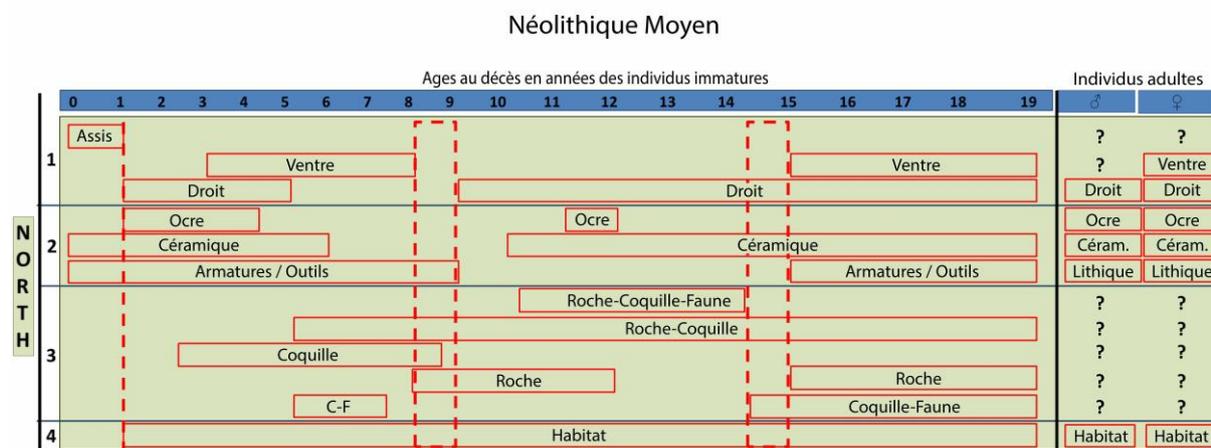
### I.1.b. Estimation de l'âge des adultes

L'estimation de l'âge des adultes est plus problématique et équivoque parce qu'elle repose principalement sur des **critères de sénescence** qui présentent une grande variabilité individuelle influencée par de nombreux facteurs (génétiques, hormonaux et sexuels, sociaux, sanitaires et environnementaux). S'il est relativement aisé d'identifier des **adultes jeunes** (moins de 30 ans) grâce aux derniers points d'ossification de la crête iliaque et de l'extrémité sternale de la clavicule et s'il est possible dans certains cas d'identifier des **individus âgés** (>50 ans ; Tableau C3. 2), l'estimation est plus délicate après 30 ans (**adultes matures**) et en l'absence de marqueurs de sénescence bien caractérisés. Des classes d'âge adulte relativement restreintes ont pu être proposées pour les sites de Gurgy « Les Noisats » et Chichery « Sur les Pâturaux » en particulier grâce à l'étude précise, fiable et adaptée au corpus réalisée par A. Thomas (voir méthodologie dans Thomas 2011, p 83 à 95). Néanmoins, dans le cadre de ce travail, si la variabilité des valeurs biogéochimiques sera évidemment observée au regard de ces estimations d'âge, la majorité des analyses se base sur la distinction adultes / non-adultes définie ci-après et sur les âges (ou classes d'âge) des moins de 15 ans essentiellement.

### I.1.c. Distinction « sociale » entre adultes et non-adultes : une limite à 15 ans

En ce qui concerne la **distinction adultes / non-adultes**, il est évident qu'elle repose sur la définition de ces termes et le choix d'un seuil basé sur le type d'âge considéré : chronologique, biologique ou social, voire une combinaison des trois. Le choix de ces critères, a fortiori arbitraire, dépend du sens que l'on souhaite mettre en exergue. Les études anthropologiques placent généralement la limite entre adultes et non-adultes à 20 ans sur la base de l'âge biologique. Si les pratiques alimentaires et la mobilité peuvent refléter le statut social des individus, il semble cohérent de fixer ce seuil en termes d'âge social ici, évidemment relié à l'âge biologique dans une population donnée, et par extension à l'âge chronologique. L'étude de M. Le Roy (2015) sur les pratiques funéraires dans le Nord de la France à partir d'un grand nombre de sites néolithiques incluant notamment Gurgy « Les Noisats » a mis en évidence des **changements dans les comportements funéraires, d'abord autour de 8-9 ans, puis autour de 14-15 ans**, reflétant vraisemblablement un changement de statut social à ces deux

périodes-là de la vie (Figure C3. 3). Sur la base de cette observation, et en tenant compte de la division entre les classes d'âge, nous considérons dans cette étude les individus de **plus de 15 ans** comme appartenant à la catégorie **des adultes**. Cette division est bien évidemment discutable, reste un choix arbitraire et pourra être réexaminée.



**Figure C3. 3 : Tableau récapitulatif des pratiques funéraires des individus immatures pour le Néolithique moyen du Nord de la France en fonction de l'âge au décès et comparé aux pratiques funéraires observées pour les adultes dans la littérature. 1 : position du corps ; 2 : mobilier funéraire associé ; 3 : bijoux ; 4 : lieu d'inhumation. Les données renseignées ici sont celles qui diffèrent des éléments communs à toutes les classes d'âge (par exemple, toutes les classes d'âge ont été identifiées en contexte sépulcral). Modifié d'après Le Roy *et al*, 2018.**

• *Point de terminologie*

Dans ce travail, la mention ">15" et "<15 ans" est généralement associée à l'usage des termes « adultes » et « immatures » lors de l'interprétation des résultats en fonction de l'âge des sujets. Néanmoins, par soucis de simplicité, nous emploierons le terme d'« immature » pour les moins de 15 ans, selon un sens « social » plutôt que biologique (le squelette des moins de 20 ans étant encore immature). Le terme d'« enfant » est préféré pour les moins de 8-9 ans (cf. Chap6.I) et le terme d'« adolescent », au sens social, se réfère de préférence aux immatures entre l'enfance et l'âge adulte, à savoir ici – et probablement pour tout le Néolithique du Nord de la France – entre 8-9 ans et 14-15 ans d'après les observations sur les pratiques funéraires de M. Le Roy (2015 ; 2018). Attention cependant à ne pas confondre : l'adolescence au sens biologique du terme se situe généralement plutôt entre 15 et 19 ans (e.g. Ferembach *et al.* 1979). Pour plus d'informations à ce sujet, voir la section II.1.d et le chapitre 6.

**I.2. Sélection des échantillons de plus de 2 ans pour limiter le signal de l'allaitement**

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, l'allaitement peut avoir un effet sur les valeurs isotopiques et élémentaires. Le but de ce travail n'étant pas de déterminer un âge au sevrage de la population, les individus de moins de 2 ans ont été écartés de l'échantillonnage afin d'éviter au maximum le signal de l'allaitement. On suppose pour le Néolithique que les enfants sont généralement sevrés autour de 2-3

ans, bien que de nombreuses situations puissent induire un sevrage différé, plus tardif (Ash *et al.* 2016 ; Goude *et al.* 2020 ; Stuart-Macadam et Dettwyler 1995). Cependant, si l'os se renouvelle assez rapidement chez les plus jeunes, il faut quand-même compter plusieurs mois avant que le signal enregistré soit tout à fait remplacé (Szulc *et al.* 2000 ; Valentin 2002). Ainsi, le signal de l'allaitement peut rester visible dans l'os plusieurs mois (voire années ?) après la fin du sevrage. Quoiqu'il en soit, il est important de garder en mémoire que ce signal peut être visible au-delà de 2 ans et la variabilité des valeurs biogéochimiques des plus jeunes sera traitée avec la plus grande prudence.

### I.3. Détermination et codage du sexe

À partir de la **puberté**, un certain nombre de changements biologiques, hormonaux notamment, entraîne l'apparition d'un **dimorphisme sexuel** touchant également le squelette. Grâce à ce dimorphisme, il est possible de déterminer avec fiabilité le sexe des individus de **plus de 15 ans** à partir de leurs ossements, pourvu que la méthode utilisée soit adaptée et fiable à plus de 95% (voir par exemple la synthèse de Bruzek *et al.* 2005).

#### I.3.a. Diagnose sexuelle primaire à partir de l'os coxal

La première approche consiste à réaliser une **diagnose sexuelle primaire à partir de l'os coxal**. Celui-ci est le seul os du squelette à présenter un dimorphisme sexuel dans toutes les populations du fait d'une adaptation fonctionnelle à la reproduction. La morphologie du bassin féminin étant adaptée à la grossesse et l'accouchement, la conformation des os coxaux diffère entre les hommes et les femmes selon diverses caractéristiques observées quelle que soit la population considérée. Les deux méthodes proposées ci-après reposent sur l'observation de caractères testés sur un large échantillon provenant de populations différentes et permettent de déterminer le sexe avec une fiabilité supérieure à 95% lorsque les critères requis sont réunis.

- *La méthode macroscopique*

Tout d'abord, la **méthode macroscopique** de J. Bruzek et collaborateurs (2002) consiste en l'évaluation visuelle de cinq caractères morphologiques bien définis et exclusifs pour chaque forme sexuelle : féminine, masculine et indéterminée (le caractère exclusif de ces observations limite la subjectivité de l'observateur). La combinaison des scores obtenus permet de déterminer un sexe dominant (au moins trois caractères sur cinq) fiable à 95%. L'observation d'au moins trois caractères attribuant le même sexe est néanmoins nécessaire pour une bonne détermination.

- *L'approche métrique probabiliste*

Ensuite, une **approche métrique probabiliste** peut être appliquée, pourvu qu'au moins un os coxal soit suffisamment bien conservé pour réaliser un minimum de mesures requises. La diagnose sexuelle

probabiliste (DSP ; Brůžek *et al.* 2017 ; Murail *et al.* 2005) propose 10 mesures de l'os coxal dont 4 au minimum sont nécessaires pour pouvoir déterminer un sexe (féminin, masculin ou indéterminé) selon un taux de probabilité. Un logiciel téléchargeable gratuitement permet de calculer ce taux de probabilité (à partir d'un algorithme fondé sur le pouvoir discriminant de chaque mesure considérée). Le sexe est déterminé, avec une fiabilité supérieure à 98% lorsque le résultat présente un taux de probabilité supérieur à 95%.

Ces deux méthodes peuvent être utilisées indépendamment (selon l'état de conservation de l'os coxal) et sont donc complémentaires. Lorsqu'elles peuvent être appliquées conjointement, la concordance des résultats augmente d'autant leur fiabilité.

#### **I.3.b. Diagnose sexuelle secondaire : une approche intra-populationnelle**

Une seconde approche est possible, lorsque l'os coxal d'un individu n'est pas suffisamment bien conservé et que la diagnose primaire s'avère infructueuse, mais elle requiert la détermination sexuelle primaire préalable d'un certain nombre de sujets et ne s'effectue qu'au sein d'une population homogène. La **diagnose sexuelle secondaire** (DSS) permet donc, selon une approche intra-populationnelle et à partir de l'étude des individus sexés en primaire, de déterminer un dimorphisme sexuel extra-coxal (à partir d'autres caractéristiques anthropométriques de leur squelette). Appliqués ensuite au reste de la population adulte non sexée, plusieurs de ces caractères sexuels secondaires permettent alors de distinguer un plus grand nombre d'hommes et de femmes (Thomas 2011, p 98). Cette méthode a été appliquée dans deux sites de ce corpus : Gurgy « Les Noisats » et Chichery « Sur les Pâturaux » par M. Cervel et A. Thomas. Elle pourrait éventuellement s'étendre à tout ou partie de ce corpus, si son homogénéité populationnelle était avérée, et ainsi déterminer le sexe d'un plus grand nombre d'individu.

#### **I.3.c. La détermination génétique**

Quelque soit son âge et le degré de son dimorphisme sexuel physique, le sexe génétique reste le même dès la conception jusqu'à la mort de l'individu et il est inscrit dans son génome. L'analyse génétique permet donc de sexer de façon certaine aussi bien les adultes que les immatures, si tant est que leur ADN soit suffisamment conservé. Une partie du corpus a été sexé génétiquement par M. Rivollat au cours de cette thèse (une partie de nos résultats étaient déjà publiés et n'ont pas tenu compte du sexe génétique) et nos résultats seront réexaminés au regard de cette récente détermination dans la section Chap10.I.2 afin d'affiner les observations obtenues à partir des sexes « squelettiques » et de confirmer ou infirmer les tendances.

### I.3.d. Homogénéisation du codage

Dans un **souci d'homogénéité** du traitement des données, notamment pour l'analyse statistique, nous avons retenu dans ce travail un seul type d'enregistrement commun à tous les sites. Ainsi, le sexe est renseigné pour les adultes de plus de 15 ans « **M** » pour masculin, « **F** » pour féminin et « **I** » pour indéterminé ; « - » pour les immatures (<15 ans), dont le sexe ne peut être déterminé autrement que par la génétique (le dimorphisme sexuel squelettique n'étant significatif qu'après la puberté ; Bruzek *et al.* 2005) ; et « ? » lorsque l'individu est d'âge inconnu ou à cheval entre l'enfance et l'âge adulte (par exemple pour la classe [10-19 ans]). Cette nomenclature est utilisée tout au long de ce travail pour l'analyse des résultats.

### I.4. Observation des autres caractéristiques anthropologiques

Les autres paramètres permettant de caractériser biologiquement une population (variations anatomiques, données métriques dont stature, indicateurs de l'état sanitaire squelettique et bucco-dentaire) ont pu être cotés dans trois sites seulement : Gurgy « les Noisats », Monéteau « Macherin » et Chichery « Sur les Pâtureaux ». Cependant, certains ne sont pas encore publiés et en cours d'étude (Gurgy), d'autres ont été observés par des intervenants différents n'ayant pas cotés exactement les mêmes caractères. Avant d'être comparées aux résultats biochimiques de ce travail, ces données nécessitent une étude globale passant par un enregistrement homogène et une analyse comparative précise entre les sites, adossée à un protocole statistique bien défini (voir par exemple Miclon 2020 ; Thomas 2011). Cette thèse ne fera donc pas l'objet d'une telle approche intégrative, à l'échelle de la microrégion, comparant les marqueurs biogéochimiques avec les indicateurs ostéologiques liés à l'organisation sociale, à l'alimentation et la santé. Néanmoins, lorsque ces informations ont été synthétisées et apportent une image particulière du fonctionnement d'un site, elles seront discutées au regard des résultats biochimiques à l'échelle de ce site (cf. Chap10).

Un regard particulier doit être porté sur la **fréquence des caries** : généralement liée à une alimentation **riche en glucides**, elle est souvent élevée (mais pas systématiquement) dans les populations d'agriculteurs consommateurs de céréales (Chamel 2014 ; Hillson 1996 ; Hillson 2001 ; Larsen 1995 ; Lillie et Richards 2000). Le tartre et plus encore le type d'usure dentaire peuvent également être indicateurs du régime alimentaire (Le Luyer 2016 ; Molnar 1971). Les **hypoplasies de l'émail dentaires** (dépressions linéaires visibles à la surface de l'émail) et autres **indicateurs de stress** (lignes de Harris, Cribra orbitalia, hyperostose poreuse) peuvent témoigner d'épisodes de sous-nutrition, d'infections ou de pathologies diverses pouvant avoir eu un lien avec l'alimentation (e.g. Polet 2013). Les hypoplasies de l'émail dentaire permettent notamment d'identifier des épisodes de stress à un moment précis de la vie des individus qui peuvent être corrélés à des modifications biochimiques mesurables entre différents tissus. Certaines **pathologies** visibles sur le squelette (rachitisme, scorbut,

goutte, maladie hyperostotique) révèlent des **carences, excès ou dysfonctionnements alimentaires** qui pourraient se répercuter dans la signature biochimique des tissus et mettre en évidence un particularisme vis-à-vis du reste de la population (*ibid.*). D'autre part, une **stature** élevée a été rapportée comme pouvant être liée, au sein d'une même population, à une forte consommation de viande, bien qu'une telle corrélation n'ait pas été démontrée expérimentalement et que cette assertion relève de la proposition uniquement (e.g. Herrscher 2003 ; Le Bras-Goude et Claustre 2009).

Par ailleurs, les **variations anatomiques** (VA), d'origine génétique ou épigénétique, sont de bons marqueurs populationnels permettant de discuter de la **distance biologique** (relations de parenté au sens large) entre deux groupes (grâce à la mesure moyenne de divergence, MMD) et ainsi d'accéder à **l'organisation spatiale** d'une nécropole (Crubezy et Sellier 1990). Au regard des indicateurs isotopiques et élémentaires, des spécificités inter-groupes peuvent être mises en évidence reflétant des pratiques partagées (alimentation, mobilité) selon l'organisation sociale d'une population (regroupements familiaux, par sexe, par catégories d'âge ou autres).

Enfin, l'observation des **marqueurs osseux d'activité** (MOA) peut révéler la pratique de certaines activités, éventuellement en lien avec les stratégies de subsistance et/ou la mobilité. C'est le cas notamment de **l'exostose auditive externe** (EAE) pouvant refléter, si ce marqueur est repéré dans une fréquence suffisante au sein d'une population, la pratique de **la pêche** en eau froide, ou tout du moins un lien étroit avec l'eau froide (Villotte et Knüsel 2016 ; Villotte *et al.* 2014). D'autres marqueurs ostéoarticulaires d'activité peuvent indiquer la pratique de **la chasse** (Villotte 2008, 2009), ou encore refléter la **division sexuelle des tâches** (Villotte *et al.* 2010 ; Villotte et Knüsel 2014).

Les informations relatives à l'enregistrement de ces variables sont données, lorsqu'elles sont disponibles, pour chaque site considéré dans les sections ci-après.

## II. Gurgy « Les Noisats » (GLN)

---

### II.1. Le site

Le site de Gurgy « Les Noisats », abrégé **GLN**, constitue **le plus gros corpus** de cette étude. Il s'agit d'une nécropole du Néolithique moyen, la plus grande connue à ce jour dans la région (128 inhumés sur 500 m<sup>2</sup>), dont la période d'occupation se situe dans la première moitié du Ve millénaire. L'indigence du mobilier et la diversité des dispositifs funéraires ne permettent pas d'attribution culturelle précise.

Le gisement se trouve sur la basse terrasse alluviale Fy, en rive droite de l'Yonne (cf. Figure C3. 1, p.188).

### II.1.a. Découverte et caractéristiques générales

Les premiers sondages réalisés en 1997 par l'AFAN (Association pour les fouilles archéologiques nationales) ont mis au jour des structures protohistoriques et gallo-romaines (enclos, tumulus et tombes de La Tène ; bâtiment gallo-romain ; Figure C3. 4). Le décapage de l'ensemble de la parcelle a révélé la présence de **sépultures néolithiques**, qui ont alors fait l'objet de fouilles programmées dirigées par C. Mordant en 2004 puis S. Rottier de 2005 à 2007 (Rottier 2006, 2007 ; Rottier *et al.* 2005).



Figure C3. 4 : Plan du site de Gurgy « Les Noisats ». DAO : S. Rottier.

L'ensemble des sépultures est réparti sur une surface de 500 m<sup>2</sup>, délimitée à l'ouest et au sud par un fossé d'enceinte, au nord par l'alignement de cinq fosses (contenant des fragments de faune brûlés de datation inconnue), et les sondages ont permis de marquer la limite nord-est de la nécropole. Dans cet espace restreint, **128 individus** ont été inhumés dans des **sépultures principalement primaires et individuelles** (on trouve également quelques sépultures doubles et quelques dépôts secondaires ont été répertoriés ; cf. Annexe A2). Au total, 134 fosses ont été dégagées et fouillées, révélant ainsi **une densité exceptionnelle de tombes**, dont le – somme toute – faible nombre de recouvrements, apparemment pas complètement aléatoires, témoigne d'une **gestion raisonnée de l'espace** avec la mise en place d'un système de marquage au sol. Un certain nombre de fosses a été arasé par les labours modernes, ne laissant qu'entrevoir une partie de ces structures. Aucun monument n'a été identifié sur la nécropole, qui est en outre notamment caractérisée par une grande diversité dans les dispositifs funéraires (structures, positions des défunts, orientations, mobilier) et aucune organisation spécifique déterminée. L'enceinte, également fouillée, n'a livré aucun élément permettant de la dater directement, si ce n'est par sa position périphérique à la nécropole.

#### II.1.a. Les dispositifs funéraires et le mobilier : comparaisons chronoculturelles

**Plusieurs types de structures sépulcrales** ont pu être identifiés d'après leur architecture interne, les indices taphonomiques et sédimentaires. Tout d'abord, certaines fosses sont très **étroites** (de moins de 70 cm de long par 50 cm de large), notamment pour les tout-petits, mais pouvant également recueillir un corps adulte particulièrement contraint (Figure C3. 5A), d'autres sont à l'inverse très **grandes**, dites « structurantes » (de plus d'1,80 m par 1,20 m de large ; Figure C3. 5C). La majorité des décompositions s'est faite en espace libre, par la fermeture en surface avec un **couvercle rigide**, et des effets de parois attestent de la présence fréquente de **contenants rigides** en matériaux périssables, (Rottier 2007). Quelques cas témoignent également de l'utilisation de **contenants souples** en matériaux périssables. Par ailleurs, certaines fosses sont « **cuvelées** » ou « coffrées », présentant une compartimentation verticale de l'espace (d'après les données stratigraphiques du remplissage) où un couvercle a pu être posé à mi-hauteur de la fosse (*ibid.*). Plusieurs sépultures présentent un surcreusement latéral, une **alcôve**, accueillant le défunt en contrebas et ménageant une surface, sorte de « banquette » pouvant servir de colonne d'accès (Figure C3. 5D).

Ce type de structure rappelle tout à fait les tombes « à niche » ou « à banquette » déjà décrites pour le RRBP (Rubané récent du Bassin parisien ; Allard *et al.* 1997 ; Thevenet 2004). Toutefois, si la banquette servait à accueillir des objets dans les tombes « à niches » danubiennes, celles des Noisats semblent plutôt constituer un espace fonctionnel ou « espace technique » tel que défini par J. Leclerc (1997), d'après S. Rottier (2007). Ces tombes à alcôve renvoient également aux cavités latérales rencontrées en Catalogne dans la culture des Sepulcros de fosa<sup>1</sup> (Bosch et Faura 2003) ou au Crès à

---

<sup>1</sup> Ce parallèle a toutefois été rediscuté par la suite (Moinat et Chambon 2007).

Béziers (Loison et Schmitt 2009), où la fermeture se fait par une dalle, à la différence de celles des Noisats qui utilisent des matériaux périssables. Un parallèle analogue peut être fait pour les sépultures en contenant rigide rencontrées aux Noisats, qui rappellent les coffres de pierre ou « cistes de Chamblandes » découverts en Suisse (Moinat 2007) et dont le « phénomène », transculturel, s'étend à l'ouest (par exemple à Pontcharaud dans le Puy-de-Dôme, Auvergne ; Loison 1998) et au sud dans la zone Pyrénéenne et nord-Pyrénéenne (Aude et Hérault, comme à Coste Rouge ou Najac pour ne citer que quelques sites ; Mahieu 1992 ; Vaquer *et al.* 2007) et jusqu'en Catalogne espagnole (Moinat et Chambon 2007 ; cf. Chap1.I.5.b). Outrepassant la question du choix du matériau, coffre de pierre ou de bois, la définition des nécropoles à Chamblandes de Ph. Chambon (2007) englobe tout à fait le site de Gurgy « Les Noisats », de même que celui, voisin, de Monéteau « Macherin » que nous aborderons plus loin (cf. III.1.b).



**Figure C3. 5 : Exemples de différents types de dispositifs funéraires (structures et position des défunts) rencontrés à Gurgy «Les Noisats». A : GLN 213, sépulture en fosse étroite sans aménagement interne (les lignes pointillées indiquent les points d'appui du squelette contre les parois du creusement), B : GLN 255, l'individu est placé sur le dos, jambes repliées sous les cuisses, C : GLN 237 A et B, sépulture double contenant deux sujets, l'un en fosse étroite en position hyper-fléchie et déposé sur son côté droit, l'autre en fosse allongée « structurante », membres inférieurs allongés et déposé sur son côté gauche, et D : GLN 202, sépulture en alcôve dont le surcreusement latéral accueille le défunt. Clichés S. Rottier.**

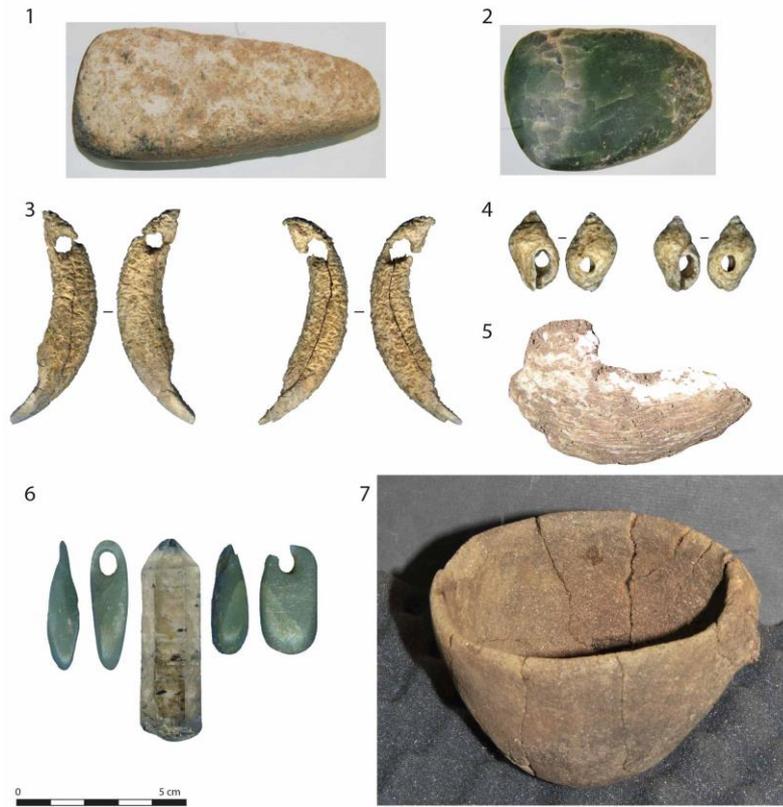
À côté de ces architectures sépulcrales particulières qui trouvent des comparaisons dans plusieurs aires culturelles en dehors de la vallée de l'Yonne, plusieurs **fosses peu aménagées** (bien qu'identifiées plutôt « à défaut »), souvent étroites, pourraient témoigner d'une spécificité locale. Ce type de tombe a également été rapporté dans les sites voisins de Chichery « L'Étang-David » et de Monéteau « Macherin » mais, bien qu'assez simple et *a priori* ubiquiste, on n'en retrouve pas d'exemple réellement comparable en dehors de la microrégion.

Au-delà de l'apparente diversité des structures funéraires, les **orientations** et la **position des défunts** varient (Figure C3. 5), avec toutefois une dominante pour une direction de la tête vers le sud ou le sud-ouest, contrairement à la tradition I (tête à l'est) définie par Ch. Jeunesse (1995; cf. Chap1.I.5.b), et une position récurrente fléchie sur le côté gauche (le degré de flexion des membres et la position du tronc et des membres supérieurs étant variables ; cf. Le Roy 2015).

La présence de **mobilier** associé aux défunts est particulièrement **rare** dans la nécropole, mais relève néanmoins d'une **diversité inédite** pour cette période. Les objets lithiques ont été étudiés par A. Augereau (INRAP/UMR 7041 ArScAn ; inédit) et l'étude de la parure a été réalisée par S. Bonnardin (Université de Nice/UMR 6130 CEPAM ; inédit). Les objets diffèrent dans leur matériau, leur forme, leur provenance et leur usage. On trouve notamment de la **céramique** – principalement des tessons dont l'association avec les squelettes est généralement incertaine et un gobelet entier –, de la **faune** – fragments d'os bruts –, des **outils lithiques** – principalement en silex tels que des burins, pics, tranchets, racloirs, armatures / pointes de flèches, lames et lamelles, mais également dans d'autres matériaux, et notamment deux haches polies dont l'une est en néphrite (jade), roche verte alpine, sur laquelle nous reviendrons – **ou en os** – poinçons – des **objets de parure** – des perles calcaires et en lignite ; des coquilles percées de pourpres (*Nucella lapillus*), de dentales (*Dentalium sp.*), de moule d'eau douce (*Unio sp.*), ainsi qu'une coquille Saint-Jacques (*Pecten maximus*) ; des dents ou os de faune (canines de suidé, *Sus scrofa*, et de carnivores, *Canis lupus ?*, incisives de castor, *Castor fiber ?*, crâches de cerf, *Cervus elaphus*) ; mais aussi des objets plus rares comme un pendentif en quartz (prisme à six faces de 6 cm de haut) accompagné de perles (pendeloques) en jadéite ou stéatite – ainsi que de **l'ocre**, parfois du **fer** sous forme de nodules ou du **manganèse**. Une meule de pierre a également été retrouvée. Quelques uns de ces objets sont illustrés sur la Figure C3. 6.

Certains assemblages sont particulièrement remarquables, par la quantité de perles constituant un collier par exemple, comme dans la structure 294 contenant pas moins de 136 dentales, ou par la **provenance de la matière première** comme la coquille Saint-Jacques, méditerranéenne ou atlantique, de la structure 248, les pourpres (*Nucella lapillus*) de la Manche ou de l'Atlantique (retrouvés dans plusieurs structures), la petite hache en roche verte alpine de la structure 302 ou encore le quartz de la structure 317, provenant vraisemblablement du massif alpin. Ces derniers attestent de l'existence de

**réseaux d'échanges à longue distance**, sans pour autant témoigner de relations culturelles soutenues entre différentes régions, les objets étant trop isolés.



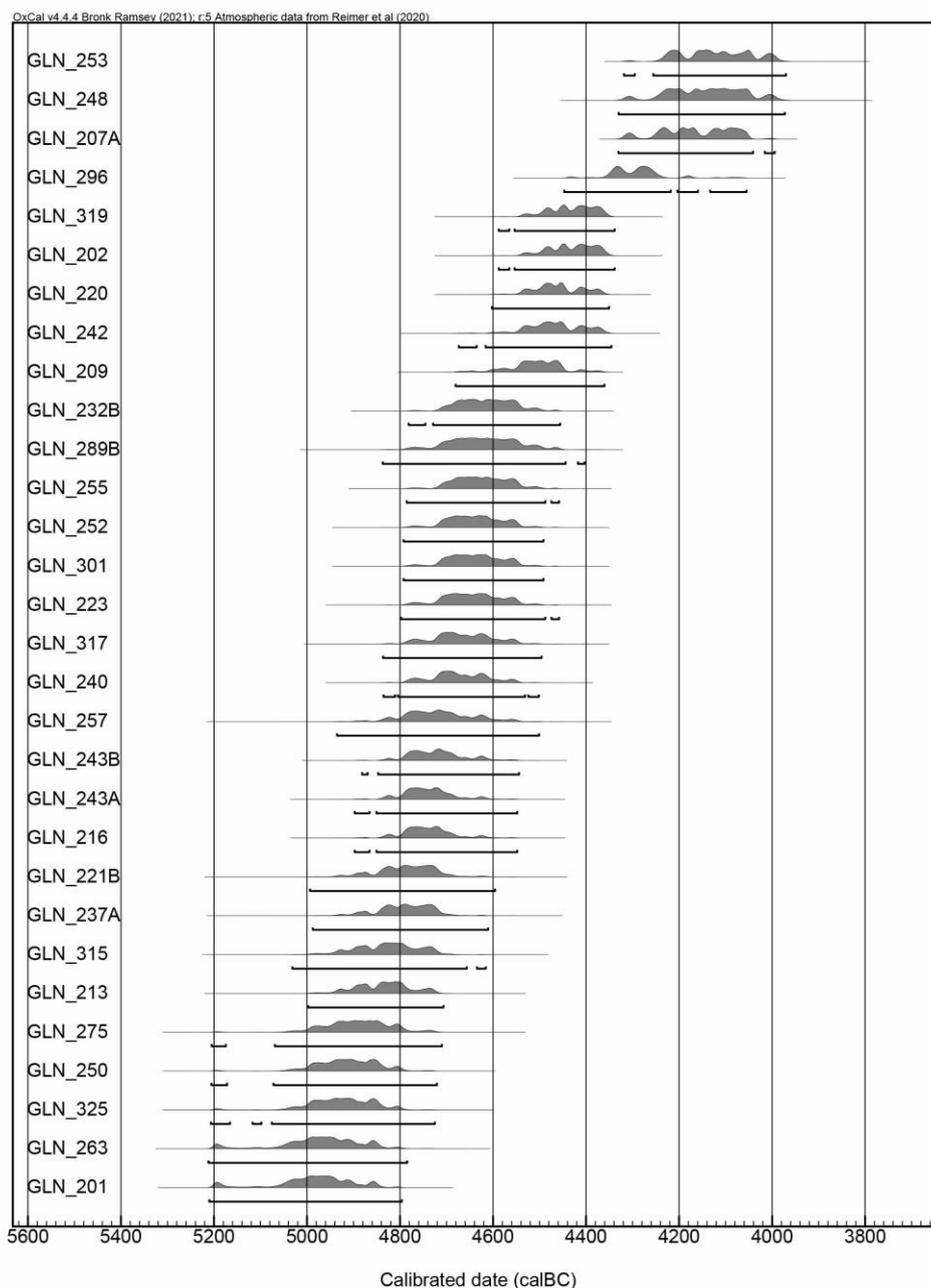
**Figure C3. 6 : Exemple de quelques objets retrouvés à Gurgy. 1 : hache polie, st. 257 (cliché L. Rey) ; 2 : hache polie en néphrite (jade alpin), st. 302 (cliché L. Rey) ; 3 : canines de suidé percées, st. 291 (cliché S. Bonnardin) ; 4 : coquilles de *Nucella lapillus* percées, st. 324 (cliché S. Bonnardin) ; 5 : crache de cerf percée, st. 324 (cliché S. Bonnardin) ; 6 : pendeloques en roche verte (stéatite ?) et cristal de roche (quartz), st. 317 (cliché S. Bonnardin) ; 7 : gobelet en céramique, st. 249 (cliché L. Rey).**

De plus, si certains objets sont ubiquistes et sont retrouvés à toutes les périodes du Néolithique, d'autres sont plus significatifs et limités dans le temps. Des **comparaisons chronoculturelles** sont trouvées parfois **très localement** uniquement dans le Néolithique moyen du Bassin parisien, comme les coquilles de *Nucella lapillus* (retrouvées notamment à Monéteau et à Balloy « Les Réaudins » ; Augereau et Chambon 2011 ; Mordant 1997) ou les chutes de burin associées au squelette (également à Monéteau et à Escolives-Sainte-Camille ; Augereau et Chambon 2011 ; Duhamel 2004). De façon générale, si le matériel est rare (on ne trouve souvent qu'un exemplaire de chaque objet dans toute la nécropole), les éléments de parure et les pièces lithiques renvoient à **différentes cultures** (RRBP, VSG, Cerny, Chasséen bourguignon, septentrional et méridional, ou encore Hinkelstein, Grossgartach ou Roessen), reflétant des influences variées.

### II.1.b. Les datations radiocarbone

Les **datations radiocarbones** réalisées sur 39 individus donnent une fourchette allant globalement de 5200 à 3800 cal BC (Figure C3. 7). Plusieurs dates sont clairement aberrantes, étant par exemple

postérieures à 3000 cal BC ou bien lorsque la structure datée est recoupée par une structure plus ancienne (cf. Annexe A3 pour voir l'histogramme de l'ensemble des datations radiocarbone). De récentes **analyses paléogénétiques** retraçant les relations de parenté sur plusieurs générations ont néanmoins permis de **réévaluer la durée d'occupation** en proposant un intervalle de **100 à 200 ans**, qui correspondrait d'après les datations à une **période d'occupation** la plus probable **comprise entre 4800 et 4500 cal BC** (Rivollat *et al.* 2021b). Ces dates sont également à considérer à la lumière des résultats obtenus dans les sites voisins et des comparaisons chronoculturelles régionales.



**Figure C3. 7 : Histogramme de répartition des principales datations radiocarbone des sépultures de Gurgy « Les Noisats » réalisées avec le logiciel libre Oxcal 4.4© Bronk Ramsey, 2021 (<https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal/>) d'après la courbe de calibration IntCal20 (Reimer *et al.*, 2020).**

### II.1.c. Les restes humains

Un certain nombre **d'analyses portant sur les restes humains** a été réalisé à différents niveaux sur ce site, offrant un panel de données relativement conséquent et plusieurs reprises des données anthropologiques ont permis de mesurer l'erreur inter-observateurs et d'obtenir un consensus confortant un grand nombre de résultats. La diversité de ces études rentre dans le cadre d'un projet de recherche plus large dirigé par S. Rottier intitulé « Diversité biologique et culturelle de l'Homme de la fin de la Préhistoire à la Protohistoire » (DHP ; projet financé par l'Université Bordeaux et le LaScArBx de 2012 à 2014 ; référence ANR-10-LABX-52).

Tout d'abord, les restes humains ont fait l'objet de différents travaux ciblés sur **l'identification et la caractérisation biologique** ainsi que l'étude des pratiques funéraires du corpus adulte d'une part, par M. Cervel (mémoire de Master recherche universitaire soutenu en 2010 à PACEA, inédit), et immature d'autre part, par L. Boullier (mémoire de Master recherche universitaire soutenu en 2010 à PACEA, inédit), puis M. Le Roy (thèse de doctorat soutenue en 2015 à PACEA). L'ensemble de la population a été réexaminé et l'étude agrémentée par l'observation de nouveaux marqueurs (DSS, VA, état sanitaire) par A. Thomas (UMR 5199 PACEA). L'identité biologique des défunts (faisant consensus) est donnée en Annexe A2 avec les références des méthodes utilisées pour la détermination du sexe et l'estimation de l'âge. Une première étude paléogénétique a également été menée dans le cadre d'un travail de mémoire de Master recherche universitaire en 2012 à PACEA (Safi inédit).

La collection a par ailleurs fait l'objet d'une étude des **marqueurs osseux d'activité** (MOA) par S. Villotte (CNRS/UMR 5199 PACEA). Malheureusement, l'état des surfaces articulaires n'a pas permis de tirer de conclusions satisfaisantes de cette étude. Il semblerait toutefois que la faible fréquence des exostoses auditives externes (EAE) n'irait pas dans le sens de **contacts réguliers avec l'eau froide**, par opposition avec ce qui est connu au Mésolithique pour des populations côtières bretonnes par exemple ou dans les gorges du Danube (Villotte *et al.* 2014). Bien qu'une fréquence élevée de ce marqueur soit souvent liée aux activités aquatiques (pêche, baignade), un faible taux d'EAE n'exclue *a priori* pas la pratique de la pêche dans certaines conditions (e.g. pêche occasionnelle, protection des oreilles, population décédée jeune avant de développer la pathologie ; Villotte et Knüsel 2016). Au-delà des activités mêmes de pêche, c'est le rapport à l'eau plus généralement qui est interrogé ici (*ibid.*).

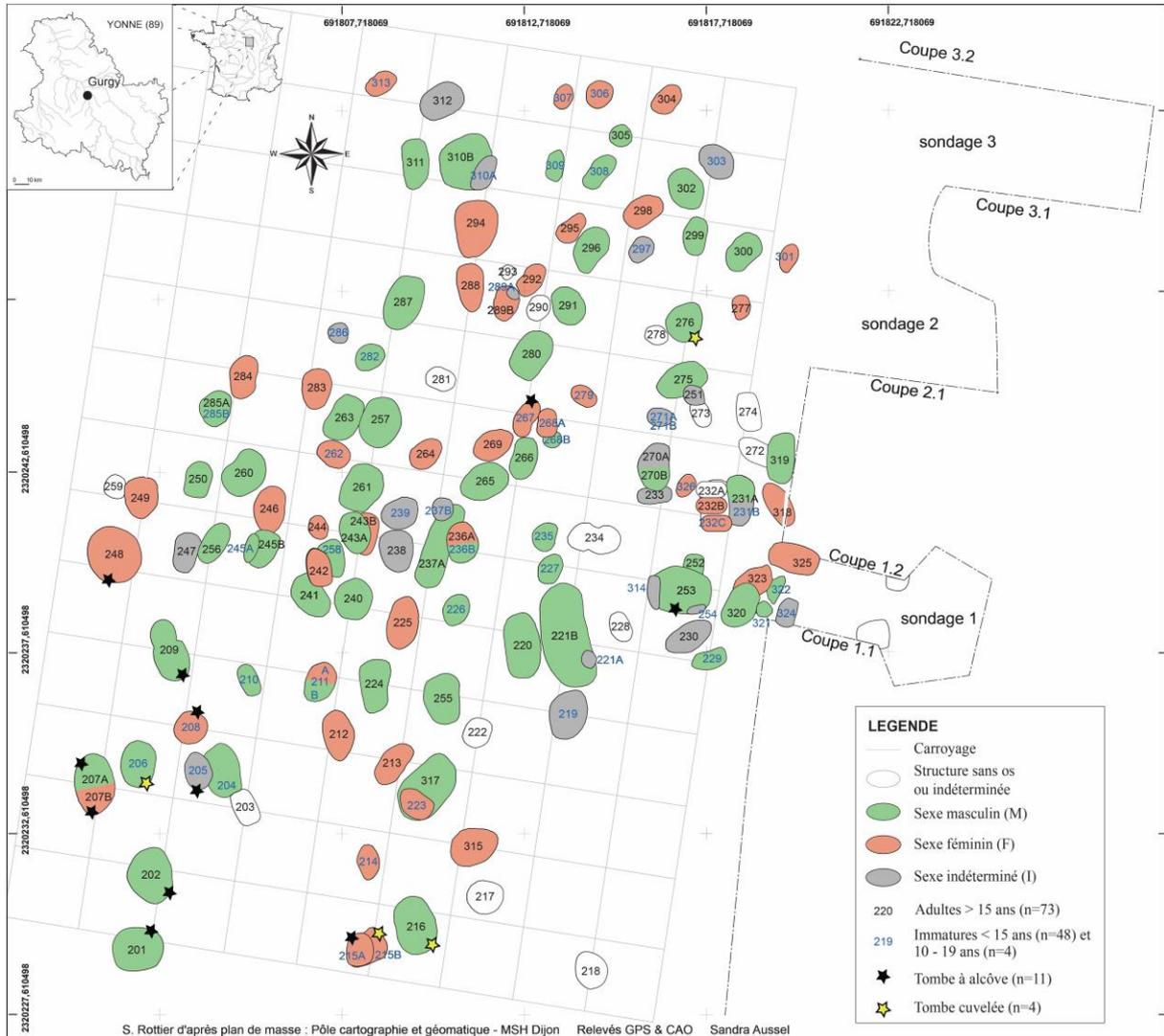
D'autre part, **trois autres travaux de thèse** réalisés à PACEA comptaient ce site parmi les plus importants de leur corpus. Le premier a porté sur **l'analyse spatiale** de la nécropole par système d'information géographique (SIG) et le **traitement funéraire spécifique des individus immatures** (Le Roy 2015). Ce travail a par exemple révélé le traitement funéraire particulier des enfants entre 8-9 et 14-15 ans, et le fait que seuls les moins de 8 ans sont inhumés en association avec un adulte, d'ailleurs presque exclusivement avec des hommes. Le second était spécialisé sur la **microstructure**

**interne des dents** : M. Le Luyer (2016) a caractérisé les stades de minéralisation dentaire, mesuré l'usure occlusale et étudié la morphométrie externe (mesures externes et variations anatomiques non métriques) et interne (mesures des proportions des tissus dentaires et caractérisation de l'épaisseur de l'émail par analyse  $\mu$ CT). Ces analyses ont servi notamment à identifier des **proximités biologiques** entre les individus au sein de la nécropole de Gurgy (Le Luyer *et al.* 2016). Le troisième résidait sur la **caractérisation génétique** (haplogroupes et haplotypes mitochondriaux) de la population afin d'étudier les phénomènes de migration des groupes néolithiques et l'organisation sociale interne au site mettant en évidence notamment un **système de type patrilocal** (Rivollat 2016). Par suite de ce dernier travail, une série d'analyses génétiques additionnelles a permis de compléter l'image obtenue en procurant de nouvelles informations sur le **sexe génétique** (détermination du sexe des immatures et de plusieurs adultes préalablement sexés anatomiquement ou indéterminés) et sur les **relations de parenté** (Rivollat *et al.* 2021a, 2021b, en préparation). La qualité des données obtenues a fourni une base idéale pour la création inédite d'un **arbre généalogique** particulièrement détaillé sur sept générations. Plusieurs de ces résultats sont donnés en Annexe A2.

#### **II.1.d. Recrutement des individus inhumés, répartition spatiale, organisation sociale**

L'ensemble de ces travaux a apporté une variété d'éléments pour mieux **caractériser cette population**, installée au sein d'un **cadre chronoculturel complexe**. Le difficile rattachement à une culture en particulier induit une méconnaissance de la population elle-même : qui sont les personnes inhumées à Gurgy ? Comment se situait ce groupe au sein du tissu local et comment s'organisait-il en interne ? De façon subsidiaire, quel lien pouvait-il entretenir avec les structures monumentales Cerny et a contrario avec les nécropoles non monumentales de cette culture ? **L'étude du recrutement** montre des effectifs proches de ceux d'une population naturelle, sans sélection particulière en fonction de l'âge au décès ou du sexe. Il semble malgré tout exister une faible représentation des sujets périnataux (décédés avant la naissance, mort-nés ou morts dans le premier mois de vie) et un nombre plus important d'enfants entre 1 et 6 ans (Boullier inédit ; Le Roy 2015 ; Le Roy *et al.* 2013). L'étude de **l'état sanitaire** n'a révélé aucune pathologie infectieuse ou dégénérative ; les indicateurs de stress osseux et autres pathologies de surface ne sont malheureusement pas souvent observables. Les cas d'arthrose sont compris dans la variabilité connue pour cette période et les lésions carieuses semblent également dans la variabilité pour le Néolithique (malgré une mauvaise conservation). Une synthèse des données doit encore être réalisée pour mesurer les effectifs et interpréter statistiquement les résultats (il en est de même pour les hypoplasies de l'émail dentaire, le tartre, l'étude des VA, des MOA et plus généralement tous les indicateurs de stress et de l'état sanitaire, ainsi que la stature). L'attrition dentaire semble globalement plutôt avancée, bien qu'elle aussi semble *a priori* comprise dans les proportions généralement admises au Néolithique. De plus,

l'analyse des microstructures dentaires a mis en évidence une **très grande homogénéité dans la population** (Le Luyer *et al.* 2016).



**Figure C3. 8 : Plan de la nécropole Néolithique de Gurgy « Les Noisats ».** Sont indiqués le sexe des individus (détermination anthropologique et/ou génétique) par la couleur des sépultures, la catégorie d'âge (adulte de plus de 15 ans, écrit en noir, ou immature de moins de 15 ans, écrit en bleu) et les structures de tombes particulières, à alcôve (étoile noire) ou cuvelée (étoile jaune). Aucune organisation particulière n'est visible, hormis les tombes à alcôve regroupées au sud-ouest de la nécropole.

En termes **d'organisation spatiale**, aucune répartition par âge ou par sexe n'a été relevée dans la nécropole et les dispositifs funéraires sont plutôt bien répartis sur le site et entre les différentes classes biologiques, hormis les sépultures à alcôves, majoritairement regroupées au sud-ouest (mais pas uniquement ; Figure C3. 8). D'après **l'étude des pratiques funéraires**, nous l'avons évoqué, il existe des **disparités en fonction de l'âge**, reflétant une évolution du statut social (Figure C3. 9). Par exemple, les immatures de moins de 7 ans ont pu être inhumés avec de l'ocre mélangé au sédiment (sans contact avec le corps), les immatures de 8 à 13 ans ne présentent pas d'ocre dans leur sépulture, et à partir de 14 ans, l'ocre a pu être déposé directement au contact du corps (Le Roy 2015). Associé à d'autres paramètres funéraires, cela pourrait illustrer un changement des pratiques funéraires en lien

avec le **statut social des vivants**. Cette différenciation montre l'intérêt d'observer la variabilité des marqueurs à chaque âge et non pas uniquement entre les classes d'âge quinquennales : les changements apparaissent ici au milieu des intervalles et peuvent en chevaucher plusieurs. Il est d'autre part primordial de considérer que le changement d'un statut social peut ne pas advenir à une date anniversaire (chronologique) précise mais plutôt selon la phase de maturation biologique et/ou sociale de l'enfant ou adolescent ; l'âge de la puberté par exemple est variable et peut conditionner/déterminer une telle transition sociale (e.g. Bickle et Fibiger 2014 ; Eccles 1999). Ces considérations seront discutées dans la section Chap6.I.

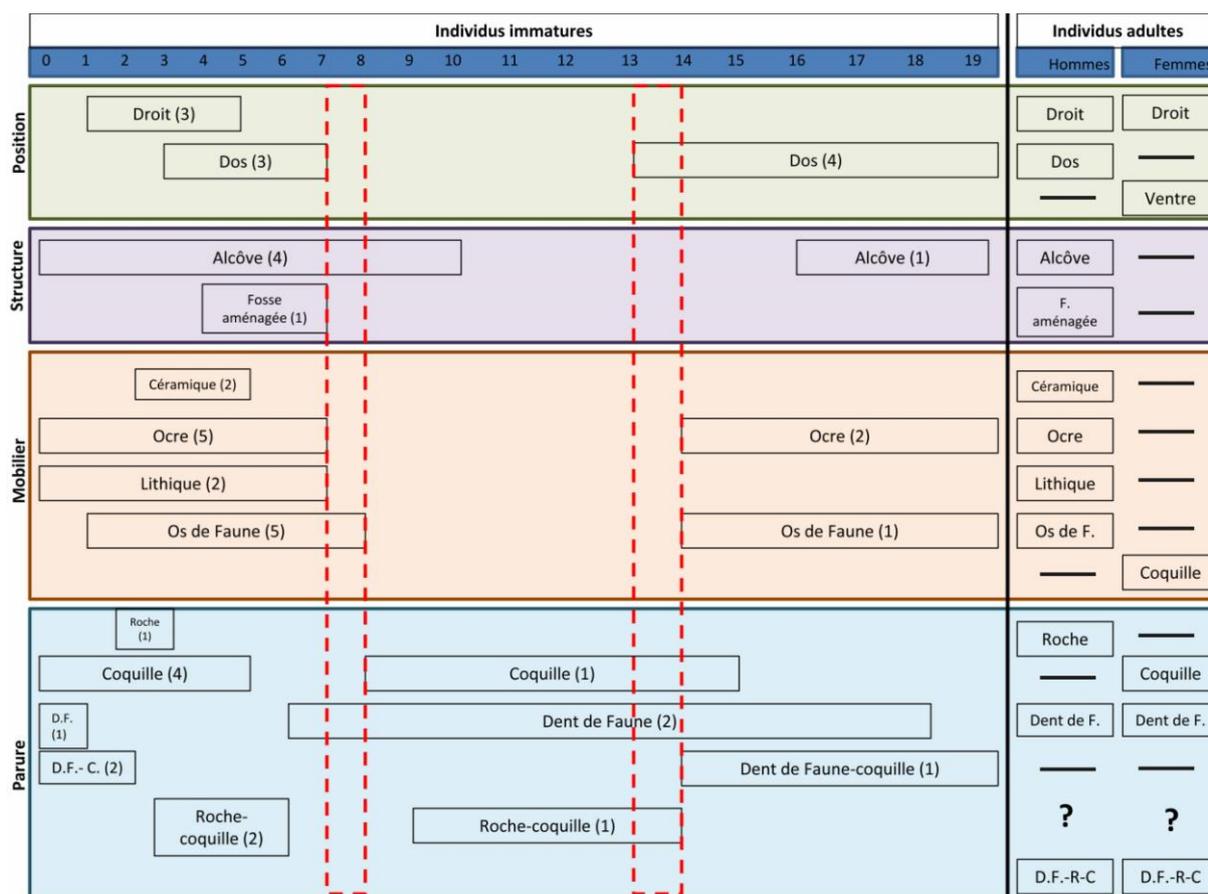


Figure C3. 9 : Répartition des dispositifs funéraires et du mobilier de Gurgy « Les Noisats » par âge et par sexe illustrant un changement dans les pratiques funéraires autour de 7-8 ans puis de 13-14 ans. Le nombre d'individus immatures concernés est indiqué entre parenthèses, les traits signifient que seulement quelques exemples ont été observés au maximum, les « ? » indiquent qu'il n'a pas été possible d'identifier une telle association. Modifié d'après Le Roy 2015.

D'autre part, tous les individus de **plus de 15 ans** semblent avoir eu accès aux mêmes traitements, bien que l'on observe certaines tendances plutôt partagées par les femmes (notamment, la parure en coquillage est plutôt associée au sexe féminin, mais elle l'est aussi au sexe masculin), d'autres par les hommes (une plus grande proportion d'outils lithiques est retrouvée associée aux hommes). En particulier, les « colliers » constitués d'un grand nombre d'éléments sont généralement retrouvés avec des femmes (GLN 208, 212, 294) ou une petite fille (GLN 214) alors que les deux haches polies accompagnent des hommes (GLN 257, 302). La parure constituée des pendeloques en roche verte et

du cristal de roche (quartz) est associée à un homme dans une grande fosse (« structurante » ; GLN 317) : sa rareté est-elle un symbole de richesse ? À l'inverse, l'homme GLN 221B inhumé dans une des plus grandes fosses de la nécropole et qui semble occuper une place centrale, n'a livré aucun mobilier hormis deux tessons de céramiques. La signature isotopique et élémentaire de ces deux individus pourra être observée avec attention pour tenter de déceler d'éventuelles distinctions en lien avec un possible statut particulier. Par ailleurs, aucun lien avec la chronologie n'a été mis en évidence dans l'organisation spatiale de la nécropole, mais l'imprécision et le doute jeté sur plusieurs datations (en remettant peut-être en cause un plus grand nombre) masque certainement la structure réelle du site.

Si les données archéoanthropologiques n'ont pas permis de comprendre l'organisation interne du site, on observe néanmoins des **regroupements de tombes** entre individus, quel que soit leur âge ou leur sexe (cf. Chap5.II, Fig. 8 et Chap10.I.4). Ces regroupements, renforcés par les données dentaires ayant révélé une proximité biologique entre plusieurs de ces individus, pourraient indiquer des rassemblements par noyaux familiaux ou selon des relations sociales particulières. Notamment, les récentes données génétiques semblent permettre d'établir une cartographie plus précise en lien avec la généalogie et les relations de parenté (Rivollat *et al.* 2021a, 2021b, en préparation). L'apport des données biogéochimiques sera d'un intérêt tout particulier sur cette question compte tenu de la place que peut avoir l'alimentation au sein d'entités « socio-familiales » distinctes. Les indicateurs de mobilité spécifiques pourront également refléter de possibles schémas partagés au sein de ces regroupements sociaux ou familiaux.

## II.2. Le matériel sélectionné

### II.2.a. État de la collection

Les restes osseux sont dans l'ensemble **assez mal conservés**. D'abord, une partie des tombes a été arasée par les labours modernes, détruisant plusieurs squelettes (certaines tombes ont même pu disparaître intégralement, c'est d'ailleurs l'une des hypothèses avancées pour expliquer l'absence des tout-petits sur la nécropole, qui auraient pu être inhumés dans des fosses moins profondes). Ensuite, les restes osseux sont assez fragmentaires et plusieurs observations n'ont été possibles que sur le terrain, les ossements étant trop détériorés pour permettre de relever ces informations en laboratoire (tout particulièrement les mesures). D'autre part, les surfaces osseuses sont souvent très abimées par de nombreuses **traces de radicelles** ayant attaqué le périoste parfois en profondeur, ce qui limite une grande partie des observations (Figure C3. 10). Des **concrétions calcaires** s'ajoutent quelquefois à l'effet des racines, contribuant d'autant à la mauvaise préservation des restes. Néanmoins, les os, et à plus forte raison les dents, semblaient suffisamment bien conservés pour envisager l'analyse de leur composition biochimique (la conservation apparente n'est généralement pas liée à la bonne

préservation des constituants biochimiques). Le matériel, stocké à l'ostéothèque de Pessac (Gironde), a été mis à disposition par S. Rottier.



Figure C3. 10 : Surface osseuse d'un fragment de diaphyse fémorale prélevé à Gurgy « Les Noisats » abîmée par des traces de radicules. Photographie : L. Rey.

#### II.2.b. Sélection des individus et type d'échantillonnage

Une partie du matériel avait été échantillonnée dans le cadre de notre mémoire de Master recherche (soutenu en 2013, inédit) qui présentait l'analyse isotopique préliminaire du carbone et de l'azote du collagène osseux de 42 sujets humains et 1 échantillon de bovidé de Gurgy « Les Noisats » (cf. Chap5.I). Dans ce travail de thèse, nous avons augmenté ce corpus pour le porter à **95 humains** (95 os et 34 dents) et **21 animaux** (18 os et 8 dents).

- *Les humains*

Parmi les **humains**, nous avons sélectionné 71 adultes (>15 ans) sur 75 au total dans la nécropole, 23 immatures (<15 ans) sur 47 au total et 1 sujet dont l'âge est compris entre 10 et 19 ans sur 6 au total. Parmi les adultes, on compte 20 femmes, 31 hommes et 20 individus de sexe indéterminé : la totalité des individus sexés a donc été échantillonnée.

Pour chaque individu, au moins **un fragment d'os** a été échantillonné (Tableau C3. 3). Pour 34 individus, **une dent** a aussi été prélevée afin d'obtenir un **double signal** correspondant à **la fin de la vie (os)** et à **l'enfance (dent)**. Le choix de cette dent a porté sur la **deuxième molaire permanente (M2)** en priorité afin de cibler **un signal entre 2,5 et 16 ans** ( $\pm 0,5$  ans, d'après AlQahtani *et al.* 2010 ; cf. Chap2.III.4.a). C'est la seule dent dont la formation et la minéralisation débutent à un âge où l'individu n'est probablement plus allaité (ou presque plus) et se terminent juste après 15 ans, âge supposé de transition sociale correspondant au passage à l'âge adulte. L'analyse de la **couronne seule**, qui termine sa minéralisation autour de 8,5 ans, cible donc la période **comprise entre 2,5 et 8,5 ans** ( $\pm 0,5$  ans) avant les probables changements de statut social identifiés à travers les pratiques funéraires. Le dosage de sa composition isotopique et élémentaire permettra donc de retracer l'alimentation et la mobilité de l'individu pendant cette période-là de l'enfance.

NB : Ce corpus a conditionné le choix des mêmes dents pour les autres sites.

ID	sexe	sexe génét	âge au décès	classe d'âge	os	dent
GLN 201	M	M	16-18	15-19	femur G	
GLN 202	M	M	20-49	20-49	femur D	M2infG
GLN 206	-	M	3,5-7	1-9	BCF	
GLN 207A	M	M	>30	>30	femur D	M1supD
GLN 207B	F	F	>20	>20	femur G	M1supG
GLN 208	-	F	3-6	1-9	tibia	
GLN 209	M	M	20-49	20-49	femur G	
GLN 210	-	M	7-12	5-14	tibia	M2infG
GLN 211A	-	F	3-7	1-9	tibia	
GLN 211B	-	M	6-10	5-14	tibia	
GLN 212	F	F	20-29	20-29	femur G	M2infG
GLN 213	F	F	15-29	15-29	tibia	
GLN 214	-	F	3,5-7	1-9	femur	
GLN 215A	-	F	4-8	1-9	femur G	
GLN 215B	-	F	8-14	5-14	femur G	M2infG
GLN 216	M	M	>30 (>50*)	>50	femur G	M2infD
GLN 220	M	M	20-59	20-59	femur D	M2infG
GLN 221B	M	M	>30	>30	femur G	M2supG
GLN 223	-	F	4-7	1-9	femur G	
GLN 224	I	M	>20	>20	femur G	
GLN 225	F	F	>30	>30	femur G	M2supG
GLN 227	-	M	3-6	1-9	femur	
GLN 229	?	M	12-19	10-19	tibia	
GLN 231A	M	M	>20	>20	femur G	M2infD
GLN 231B	-		3-6	1-9	femur	
GLN 232B	F	F	20-59	20-59	femur G	
GLN 232C	-	F	2-6	1-9	femur	
GLN 236A	F	F	>20	>20	femur D	M2supG
GLN 237A	M	M	20-49	20-49	femur G	M2supD
GLN 238	I		>20	>20	femur	
GLN 240	M	O	20-49	20-49	femur D	
GLN 241	M	M	20-49	20-49	tibia	M2supD
GLN 242	F	F	>30	>30	femur	
GLN 243A	M	M	>30	>30	femur G	M2supG
GLN 243B	F	F	>20	>20	femur D	M2supD
GLN 245A	-	M	2-6	1-9	femur	
GLN 245B	M	M	>40	>40	femur	
GLN 246	F	F	>40	>40	femur	
GLN 248	I	F	>40	>40	femur G	M2supG*
GLN 249	I	F	>20	>20	femur D	M2supG
GLN 250	M	M	>20	>20	femur	M2supD
GLN 251	I		>20	>20	tibia	
GLN 252	M		>30	>30	tibia	
GLN 253	M	M	20-59	20-59	femur G	
GLN 254	-		4-8	1-9	humerus	
GLN 255	M	M	>30	>30	femur	
GLN 256	I	M	>50	>50	tibia	
GLN 257	M	M	>30 (<50*)	>30	femur D	M2supD*

ID	sexe	sexe génét	âge au décès	classe d'âge	os	dent
GLN 260	I	M	>20	>20	tibia	
GLN 261	I	M	>20	>20	femur	
GLN 262	-	F	4-7	1-9	femur	
GLN 263	I	M	>20	>20	femur G	
GLN 264	F		15-29	15-29	tibia	M2supG*
GLN 265	M	M	>30	>30	femur G	
GLN 266	M	M	>20	>20	femur G	
GLN 268B	-	M	7-13	5-14	femur D	
GLN 269	I	F	>20	>20	femur D	M2supD
GLN 270A	I		>20	>20	tibia	
GLN 275	M	M	>20	>20	femur	
GLN 276	M	M	>20	>20	tibia	M2infG
GLN 277	I	F	15-29	15-29	femur D	M2infD*
GLN 280	M	M	20-49	20-49	femur	
GLN 283	F		>20	>20	femur	
GLN 284	F	F	>20	>20	femur	M2supD
GLN 285A	I	M	>15	>15	femur	M2infG
GLN 286	-		4,5-11,5	5-14	femur	
GLN 287	I	M	>15	>15	tibia	
GLN 288	I	F	15-29	15-29	femur	
GLN 289B	F	F	>30	>30	tibia G	M2supG
GLN 291	M	M	>30	>30	femur	
GLN 292	F		20-29	20-29	femur	M2supD*
GLN 294	M	F	>20	>20	femur	M2infD
GLN 295	F		>20	>20	femur G	
GLN 296	M		>30	>30	femur D	
GLN 298	I	F	>20	>20	femur	
GLN 299	F	M	>20	>20	tibia	
GLN 300	M	M	>40	>40	tibia	M2supG
GLN 301	-	F	6-12	5-14	femur	M2infG
GLN 302	M	M	>50	>50	femur G	M2supD
GLN 304	F		>15	>15	femur	
GLN 305	I	M	>20	>20	femur	
GLN 306	-	F	8-15	5-14	tibia	
GLN 308	-	M	9-14	5-14	tibia	
GLN 310A	-		3-5	1-9	femur	
GLN 310B	I	M	>20	>20	tibia D	
GLN 311	I	M?	>20	>20	femur	
GLN 312	I		>20	>20	femur	
GLN 313	-	F	4-7	1-9	femur	
GLN 315	F	F	>20	>20	femur G	M2supD
GLN 317	M	M	>30	>30	femur G	M2infG
GLN 319	M	M	>30	>30	tibia	
GLN 320	M		20-59	20-59	femur G	
GLN 323	F		>30	>30	femur G	
GLN 325	F	F	20-39	20-39	femur G	
GLN 326	-	F	2-5	1-9	femur	

Tableau C3. 3 : Liste des individus humains de Gurgy "Les Noisats" sélectionnés dans ce travail et os et dents échantillonnées. \*la dent a été scannée. Le sexe est noté M (masculin), F (féminin) et I (indéterminé) pour les adultes, noté "-" pour les immatures de moins de 15 ans, et "?" pour les individus d'âge indéterminé ou à cheval entre l'enfance et l'âge adulte.

Dans deux cas seulement (GLN 207A et 207B), aucune M2 n'était disponible et la première molaire permanente (M1) a donc été sélectionnée. Dans ce cas, le signal tracé dans la couronne (seule partie analysée, nous le verrons) correspond à la période comprise entre 4,5 mois ( $\pm$  4 mois) et 3,5 ans ( $\pm$  0,5 ans ; AlQahtani *et al.* 2010).

Les dents isolées ont été prélevées en priorité (pourvu qu'elles soient rattachées avec certitude à l'individu ciblé). Elles sont presque toutes matures ; leur stade de maturité est précisé dans le Tableau

C3. 4. Nous avons privilégié les dents les mieux conservées, si possible **indemnes de toute atteinte pathologique et le moins usées possible**. Toutefois, certaines comportaient des degrés plus ou moins avancé d'usure occlusale et/ou de lésions carieuses (Tableau C3. 4). Lorsqu'aucune autre M2 en meilleur état n'était disponible nous avons choisi de prélever des dents atteintes malgré tout et de traiter les résultats avec précaution. Le choix de la M2 a primé sur celui de l'état sanitaire pour garder un signal homogène dans le temps (éviter les possibles influences de ces atteintes sur la composition biochimique) plutôt que de sélectionner une autre dent formée à une période différente. Lorsqu'une M2 avait été micro-scannée au préalable (dans le cadre de la thèse de doctorat de M. Le Luyer, 2016) et qu'elle était disponible, celle-ci a été sélectionnée en priorité, quelque soit son degré d'usure ou d'atteinte pathologique, afin de conserver un maximum d'informations avant sa destruction. Dans le cas où toutes les M2 présentaient un état similaire, les molaires supérieures ont été préférées pour homogénéiser le signal et s'accorder avec les analyses réalisées par M. Le Luyer sur la microstructure dentaire.

En outre, toutes les **informations visuelles** (VA, usure occlusale, stade de minéralisation, caries, hypoplasies, parodontose, tartre) et **métriques** ont été recueillies et cotées d'après les méthodes proposées dans les travaux relatifs énoncés précédemment (Annexe A4 ; les observations et mesures redondantes pourront servir à calculer l'erreur inter-observateur) et les dents ont été **photographiées**. Lorsque cela était possible, nous avons **prélevé le tartre dentaire** (cf. encadré ci-après) par soucis de sauvegarde du matériel et d'analyses futures. De même, nous avons réalisé des **empreintes de la surface occlusale** pour l'étude de la texture des micro-usures dentaires (le protocole d'analyse et une partie des résultats sont présentés et discutés dans la section Chap9.I). Une liste des prélèvements de tartre et d'empreintes de la surface occlusale est donnée en Annexe A5 et Annexe A6 pour l'ensemble du corpus.

Id	Prélèvement		Caries (Bocquentin 2003) <sup>1</sup>			Usure (Molnar 1971) <sup>2</sup>			Usure (Smith 1984) <sup>2</sup>			Tartre (Brothwell 1965) <sup>1</sup>			stade de maturation (Dermirjian et al 1973)
	dent prélevées	localisation prélèvement	situation (c/col/r)	face (O/M/D/V/L)	sévérité (0/1/2/3)	degré	direction	forme	degré	situation	face (O/M/D/V/L)	sévérité (0/1/2/3)	situation	face (O/M/D/V/L)	
202	M2 inf G	isolée	col	M	3	3	34	2	3						H
207A	M1 sup D	isolée			0	4	24	2	4						H
207B	M1 sup G	isolée			0	3	5	2	3						H
210	M2 inf G	isolée			0	1			1						E
212	M2 inf G	isolée			0	2	1	1	2				c	D	H
215B	M2 inf G	isolée			0	1			1						F
216	M2 inf D	in situ	col	V	1?	6	34	4	7			col	DL-L-D	1	H
220	M2 inf G	in situ			0	2	34	2	2			c	DL	1	H
221B	M2 sup G	isolée	col	L	1?	2	24	2	3					0	H
225	M2 sup G	isolée	col	M	1	2	1	1	2			col	D	1	H
231A	M2 inf D	isolée	col	D	1?	4	34	2	4 ou 5					NO	H
236A	M2 sup G	isolée	col	M	1	4	25	2	5					0	H
237A	M2 sup D	isolée			0	4	24	3	5			col	MV-M	2	H
241	M2 sup D	isolée	col	MD (traversante) + L	3	2	24	6	3					0	H
243A	M2 sup G	isolée			0	5	25	3	6			col-r	periph	1	H
243B	M2 sup D	isolée	col	D	2	3	24	2	3					0	H
248	M2 sup G scannée	isolée			0	2	24	2	2					0	H
249	M2 sup G	isolée	col	D	1	3	24	2	4					0	H
250	M2 sup D	isolée			0	3	24	2	4					0	H
257	M2 sup D scannée	isolée			0	3	24	2	3					0	H
264	M2 sup G scannée	isolée			0	2	24	2	2			c	M	1	H
269	M2supD	isolée													H
276	M2 inf G	isolée			0	4	3	2	4			col	M-L	1	H
277	M2 inf D scannée	isolée	c	L	1?	2	1	1	2					0	NO
284	M2 sup D	isolée	col	M	1	3	6	1?	2					0	H
285A	M2 inf G	isolée			0	2	34	2	2					0	H
289B	M2 sup G	isolée			0	2	24	2	2					0	H
292	M2 sup D scannée	isolée			0	2	24	2	2			c	V-D	1	H
294	M2 inf D	isolée	col	M	1?	4	34 (peu oblique, racines courbes)	2	4					0	H
300	M2 sup G scannée	isolée	col	D	2	5	24	2	6					0	H
301	M2 inf G	isolée			0	1			1					0	F
302	M2 sup D	isolée	col;col	M;D	1,3?	2	24 (très)	2	3			col	MV	1	H
315	M2 sup D	in situ			0	3	35	2	3			col	M	1	H
317	M2 inf G	in situ	col	D	1?	4	34	2	4			col	L	3	H

Tableau C3. 4 : Tableau de synthèse des principales caractéristiques dentaires des échantillons de Gurgy « Les Noisats » analysés dans ce travail. <sup>1</sup>d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Bocquentin 2003 et Brothwell 1965), <sup>2</sup>d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Smith 1984) et M. Le Luyer (2016 ; d'après Molnar 1971 et Smith 1984).

#### Prélèvement du tartre en prévision d'analyses ultérieures

Les prélèvements de tartre dentaire ont été réalisés en partie au laboratoire LAMPEA – UMR 7269 (Aix-en-Provence) et au laboratoire PACEA – UMR 5199 (Bordeaux) d'après le protocole couramment suivi par R. Power (Plant Foods laboratory du Max Planck Institute for Evolutionary Anthropology - MPI-EVA, Leipzig, Allemagne; Power *et al.* 2018), sur les conseils pratiques de D.-C. Salazar-Garcia (Université de Cap Town, Afrique du Sud).

Le tartre a été prélevé sur les dents sélectionnées pour l'analyse biochimique (ainsi que cinq dents supplémentaires non coupées ni utilisées dans ce travail) lorsqu'il était bien visible et présent en quantité suffisante, après avoir photographié et noté la face atteinte et la sévérité. Les prélèvements totalisent **32 échantillons**, tous sites confondus (Annexe A6). Ils ont été effectués en portant charlotte et gants ; le plan de travail a été désinfecté entre chaque prélèvement à l'acétone ; le matériel, jetable ou non, a été désinfecté avant chaque utilisation.

Les dents ont été délicatement brossées à sec avec une brosse à dent jetable et/ou stérilisée à l'eau distillée bouillante, puis séchée, pour déloger les contaminants. Le tartre a ensuite été prélevé avec un scalpel (lame à usage unique préalablement désinfectée à l'acétone) et déposé sur du papier de pesée plié en deux, lui-même posé sur une feuille de papier aluminium. Les fragments de tartre recueillis sur le papier plié ont ensuite été placés dans un tube de microcentrifugation Eppendorf labellisé au préalable pour chaque échantillon. Lorsque cela a été possible, nous avons réalisé un premier prélèvement dit « de nettoyage » pouvant contenir d'éventuels contaminants et qui servira alors d'échantillon témoin et un second prélèvement dit « propre ». Dans deux cas (GLN 292 et Mon 04-110), le dépôt pouvait s'apparenter plutôt à des concrétions (présence de sédiment en grande quantité et dépôt réparti sur toute la couronne) et le résultat devra être interprété avec prudence.

Les tubes sont stockés au laboratoire PACEA – UMR 5199 dans l'attente d'analyses ultérieures qui seront réalisées dans le cadre du projet collectif de recherche « WomenSOFar - Histoires de vie et place des femmes chez les premiers agropasteurs. Perspectives bioarchéologiques dans le contexte préhistorique français et méditerranéen » dirigé par G. Goude (CNRS/UMR 7269 LAMPEA).

**Pour l'os**, la grande majorité des échantillons a été prélevée sur la partie corticale de la **diaphyse fémorale** afin d'homogénéiser le signal (tous les os ne se remodelant pas à la même vitesse), à défaut sur une diaphyse d'os long (tibia ou humérus dans un cas) et pour un individu sur un fragment de bloc cranio-facial (BCF), les os longs étant trop dégradés (voir catalogue, Annexe C). Dans la mesure du possible, les échantillons ont été prélevés sur des **fragments déjà cassés** ne comportant pas de marqueur spécifique (pas d'insertion musculaire ni relief diagnostique, surface articulaire ou possible zone de variation anatomique) ou **prélevés à la mini-scie circulaire Dremel©** dans une zone exempte de tout intérêt ostéoarchéologique. Chaque fragment a été photographié et pesé (3 g maximum).

• *La faune*

Afin de comparer les résultats isotopiques et élémentaires des humains à ceux **d'animaux locaux et contemporains**, plusieurs échantillons de faune retrouvés à Gurgy « Les Noisats » ont été prélevés. Certains proviennent de fosses ne comprenant aucun reste humain (à vocation a priori non sépulcrale), d'autres ont été trouvés en association avec les défunts (Tableau C3. 5). On décompte parmi eux les restes de 9 bovinés, 3 caprinés, 7 suidés et 2 cervidés. La détermination a été réalisée avec l'aide de J.-B. Mallye, archéozoologue (CNRS/UMR 5199 PACEA) et sur la base des planches couramment utilisées en archéozoologie (Barone 1976 ; Prat 1970-1975 ; Zeder et Pilaar 2010). Pour 5 individus (2 bovinés et 3 suidés), il a été possible de prélever un fragment de mandibule associé à une dent incluse. Pour les autres, seul un fragment osseux ou une dent isolée ont été échantillonnés.

À l'instar des humains, le **choix de la dent** s'est porté préférentiellement sur des **molaires**, sans toutefois pouvoir faire la distinction entre première ou deuxième, voire troisième, dans la plupart des cas. Quoi qu'il en soit, le calendrier de croissance dentaire varie selon l'espèce et une même dent ne correspond pas à la même période de vie chez deux espèces différentes (cf. Chap2.III.4.b). Le signal devra donc considérer le possible allaitement de ces individus. Par ailleurs, **l'âge au décès** de ces spécimens n'a pas toujours pu être estimé avec précision, généralement désigné sous les termes d'adulte ou jeune, sevré ou non. Ainsi, l'os a parfois également pu enregistrer le signal de l'allaitement pour les plus jeunes. Cette possibilité sera prise en considération lors de l'interprétation des résultats.

ID	ID archéo	espèce	âge au décès	os	dent
GLN F0		boviné		mandib	
GLN F1	près de 234 (sep)	boviné		diaph os long	
GLN F2	236-237-1 (sep)	capriné		diaph os long	
GLN F3	253-5 (sep)	boviné		mandib	M1ou2infD
GLN F4	275-1 (sep)	boviné	adulte	mandib	M1ou2infG
GLN F5	38-3	cervidé	adulte	femur	
GLN F6	38-6	suidé	jeune (sevré ?)	mandib	M1 ou M2infG
GLN F7	38-13	suidé		mandib	M1 inf D
GLN F8	38-14	suidé		coxal	
GLN F9	38-19	suidé		mandib	M1infD
GLN F10	38-sol 1	suidé	jeune	mandib	
GLN F11	38-sol 2	boviné	adulte > 24-30 mois	MT	
GLN F12	60-15	suidé		humerus	
GLN F13	60-26	capriné	adulte	humerus	
GLN F14	60-34	boviné	adulte	coxal	
GLN F15	60-35	boviné	jeune sevré (12-36	femur	
GLN F16	60-36	cervidé	adulte	MT	
GLN F17	60-42	suidé		humerus	
GLN F18	38-sans n°	capriné	adulte		M3supD
GLN F21	227-2 (sep)	boviné	jeune sevré		M3supG
GLN F23	285-5 (sep)	boviné	adulte		MinfD

Tableau C3. 5 : Liste des animaux de Gurgy "Les Noisats" sélectionnés dans ce travail et os et dents échantillonnées.

• *Synthèse*

Au total, **116 individus humains et animaux** (113 os et 42 dents) ont été prélevés dans le cadre de ce travail, représentant le corpus le plus important de notre étude et également **le plus important pour tout le Néolithique français** à ce jour. Les effectifs sont résumés dans le Tableau C3. 6.

GLN	effectif total	effectif individus sélectionnés				total os	total dents
		total	prélèvement os + dent	prélèvement os seul	prélèvement dent seule		
<b>humains</b>	<b>128</b>	<b>95</b>	<b>34</b>	<b>61</b>	-	<b>95</b>	<b>34</b>
adultes F	20	20	10	10	-	20	10
adultes M	31	31	16	15	-	31	16
adultes I	24	20	1	19	-	20	1
imm. (<15 ans)	47	23	3	20	-	23	3
[10-19 ans]	6	1	-	1	-	1	-
<b>faune</b>	<b>NR</b>	<b>21</b>	<b>5</b>	<b>13</b>	<b>3</b>	<b>18</b>	<b>8</b>
bovinés	NR	9	2	5	2	7	4
caprinés	NR	3	-	2	1	2	1
suidés	NR	7	3	4	-	7	3
cervidés	NR	2	-	2	-	2	-
<b>TOTAL</b>		<b>116</b>	<b>39</b>	<b>74</b>	<b>3</b>	<b>113</b>	<b>42</b>

Tableau C3. 6 : Tableau de synthèse de l'échantillonnage des sujets humains et animaux de Gurgy "Les Noisats" par rapport à l'effectif total sur le site. NR = non renseigné.

### II.2.c. Des analyses complémentaires sur le matériel archéologique

En parallèle des analyses biochimiques menées dans ce travail (et de l'analyse complémentaire des micro-usures dentaires), nous avons souhaité aller plus loin dans la démarche de recherche de relations avec l'extérieur et de caractérisation de la population en interrogeant plus avant la place et le rôle d'objets particuliers que sont les haches en roche tenaces et la fabrication de la céramique. L'étude additionnelle de ces objets a été engagée en collaboration avec divers intervenants et fera l'objet d'une publication dans la monographie du site.

D'une part, afin de déterminer **l'origine potentielle des haches** retrouvées à Gurgy « Les Noisats » et éventuellement de les rattacher à un contexte connu de circulation de ce type d'objets, des photographies en haute définition des haches ont été envoyées à P. Pétrequin (CNRS/MSHE C.-N. Ledoux et Université de Bourgogne-Franche-Comté) pour un premier examen et avis préliminaire. En parallèle, les haches ont été analysées par spectrométrie Raman à Bordeaux (PACEA) par A. Queffelec (UMR 5199 PACEA) afin d'en déterminer la composition minéralogique. Les résultats sont présentés dans la section Chap9.II.

D'autre part, dans le but de déterminer la composition des **terres utilisées pour la fabrication des vases** retrouvés à Gurgy « Les Noisats » ainsi que **leur provenance** et de les comparer aux résultats

obtenus pour les sites voisins (cf. *infra*), nous avons sollicité les compétences d'A. Queffelec (PACEA – UMR 5199) pour la réalisation des lames minces et de F. Convertini (INRAP/UMR 7269 LAMPEA) pour l'analyse pétrographique. Les **lames minces** ont été réalisées sur **trois tessons de céramiques** (hors bords et motifs) provenant de la structure 60 et appartenant à trois individus différents d'après l'étude de la céramique réalisée par K. Meunier (INRAP/UMR 7041 ArScAn). Les tessons ont été inclus dans la résine avant d'effectuer les coupes dans l'épaisseur de la céramique de sorte à observer les bords intérieur et extérieur du récipient sur une longueur d'environ 4cm. Les lames minces ont ensuite été envoyées à Aix-en-Provence (UMR 7269 LAMPEA) à F. Convertini pour **l'analyse pétrographique**. Celle-ci a été conduite en suivant les mêmes protocoles que pour les sites voisins (voir par exemple Augereau et Chambon 2011 ; Chambon *et al.* 2009). Les résultats et l'apport de ces analyses à notre travail sont présentés dans la section Chap9.III.

### II.3. Synthèse et questionnements spécifiques au site

#### Gurgy « Les Noisats » (GLN)

Deuxième plus grosse nécropole connue en France à cette période, maillage très dense des sépultures et gestion raisonnée de l'espace. Occupation principale entre 4800 et 4500 cal BC.

Dispositifs funéraires diversifiés : alcôves, coffres et/ou contenants rigides (et souples), fosses cuvelées et fosses peu aménagées. Position fléchée gauche + variabilité. Peu de mobilier, très diversifié. → Aucune attribution culturelle précise mais nombreuses influences : spécificité locale ?

Pas de structuration particulière de la nécropole en fonction des paramètres biologiques et funéraires (hormis les tombes à alcôve principalement au sud-ouest).

Regroupements de tombes, apparente structuration dans l'espace par relations familiales/sociales

Quelques sépultures remarquables de par leur taille ou leur mobilier associé (GLN 221B, 237A, 317)

#### **Principaux questionnements abordés dans ce travail :**

Caractérisation du type de régime alimentaire :

- Quelle position par rapport à la faune locale ?
- Est-il possible de quantifier les proportions relatives de protéines animales vs. végétales ?
- Comparaison avec le Néolithique européen ? Comparaisons régionales et avec les autres sites de ce corpus ?

Identification de mobilité ?

À l'échelle intra-site :

- Variabilité globale de la population : homogénéité/diversité ?
- Identification de spécificités individuelles en lien avec le statut social (GLN 221B, 237A, 317 ou autres) ?
- Corrélation avec les pratiques funéraires (dispositifs, mobilier) ?
- Différences entre les sexes ?
- Structuration par âge ? Existe-t-il un changement visible vers 7-8 ans et après 14 ans ?
- Regroupements par groupes, noyaux familiaux ?

### III. Monéteau « Macherin » (Mon)

---

#### III.1. Le site

Monéteau « Macherin » représente le deuxième plus gros site de ce corpus et constitue à ce jour la plus importante nécropole française associée à du matériel **chasséen** et d'ailleurs la seule dans la moitié nord de la France. Les occupations néolithiques ont fait l'objet de la publication d'une monographie dirigée par A. Augereau et Ph. Chambon (2011). Le site compte **63 inhumations** réparties en **plusieurs groupes** sur une surface de plus de 10 hectares non entièrement fouillée.

C'est le gisement le plus méridional du micro-territoire. Il se situe à quelques encablures du Ru de Baulche, sur la moyenne terrasse de la vallée de l'Yonne Fx, à moins d'un kilomètre du cours de la rivière actuelle (cf. Figure C3. 1, p.188).

#### III.1.a. Découverte et caractéristiques générales

Le site est connu depuis les années soixante-dix par la présence d'une **enceinte Néolithique**, qui a ensuite été repérée dans les années quatre-vingt par photographie aérienne, en même temps qu'une nécropole protohistorique, lors des prospections de J.-P. Delor (UMR 5594). **Plusieurs opérations de fouilles** (préventives et programmées) ont ensuite été menées : en 1999 et 2001 aux lieudits « Sur Macherin » et « Sous Macherin » dirigées par A. Augereau (INRAP/UMR 7041 ArScAn), puis en 2002 sur une petite parcelle du premier lieu-dit, dirigée par Ph. Chambon (INRAP/UMR 7041 ArScAn), et enfin en 2004 au lieu-dit « Rue de Bonn » dirigée par C. Tristan (INRAP ; Figure C3. 11). Une série de diagnostics a complété l'image de l'emprise du gisement.

À ce jour, **la fouille n'est pas terminée**, un terrain agricole et plusieurs hangars (n'entamant a priori pas les vestiges souterrains) se trouvent dans l'espace enclos par l'enceinte Néolithique. Néanmoins, les différentes campagnes de fouilles ont d'ores et déjà mis au jour **plusieurs secteurs et phases d'occupation du site**, lui octroyant un caractère polymorphe. On compte notamment un **village néolithique ancien** constitué de maisons de type danubien dont les plans sont fort bien préservés – il représente le seul village de l'Yonne de cette période fouillé sur une si grande surface – et ayant livré une sépulture isolée ; une **enceinte palissadée** donc, attribuée au Néolithique moyen Chasséen et encerclant un espace de 10 hectares environ ; une **nécropole** du même horizon chronoculturel, dont nous parlerons dans cette étude ; mais également des structures éparses de la fin du Néolithique, une nécropole de l'âge du Fer et des vestiges gallo-romains, que nous n'aborderons plus par la suite (Figure C3. 11). D'autre part, les tracés de paléochenaux traversent le site, et de nombreuses irrégularités géologiques et topographiques rendent parfois la lecture des structures difficile.

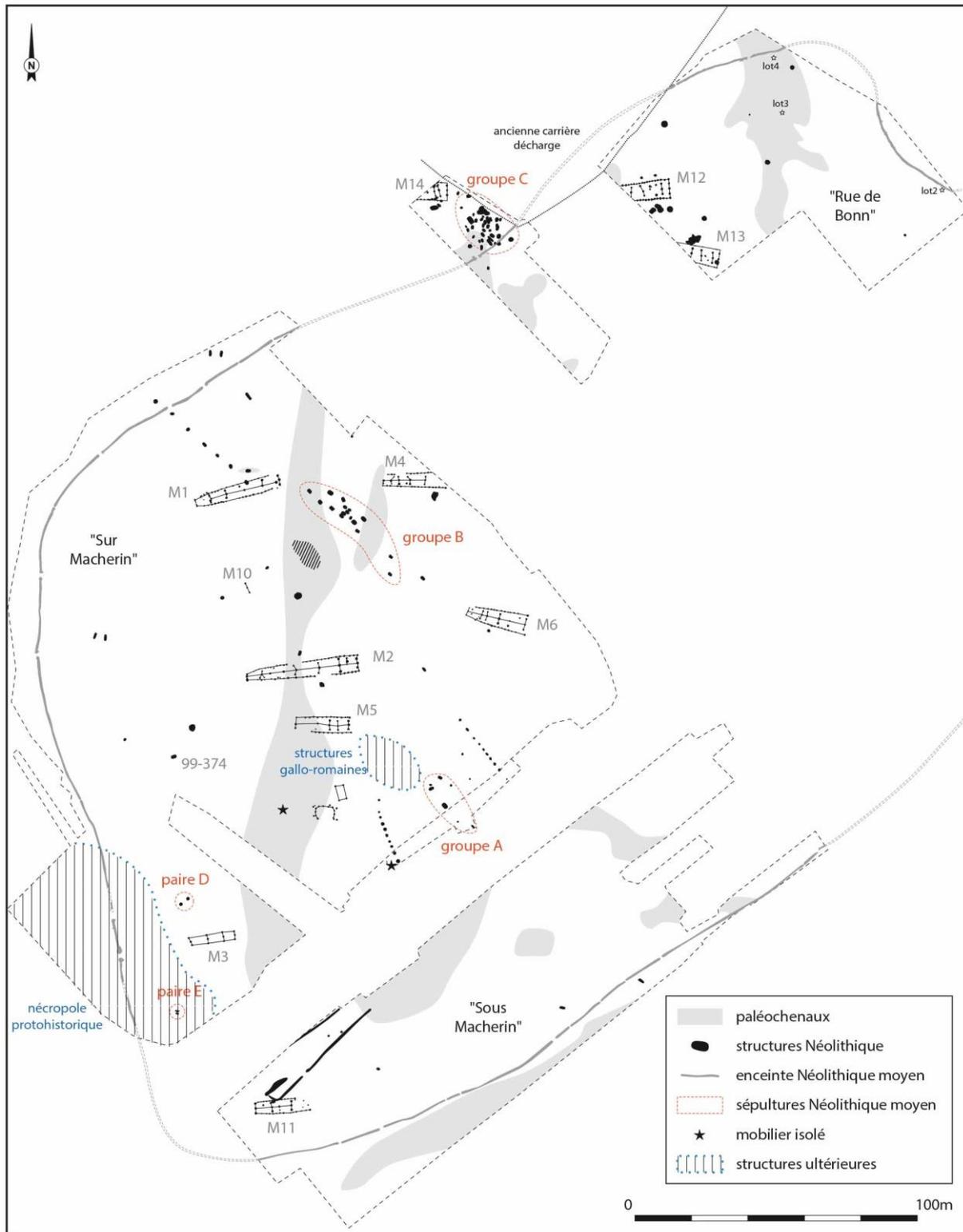


Figure C3. 11 : Plan du site de Monéteau « Macherin ». Les groupes de sépultures du Néolithique moyen sont indiqués en rouge, la sépulture du Néolithique ancien est indiquée en gris, de même que les maisons (M1 à M14) de la même période. La localisation de la nécropole protohistorique et des structures gallo-romaines est indiquée en bleu (zones hachurées). Modifié d'après Augereau et Chambon 2011.

- *Le village du Néolithique ancien et la sépulture 99-374*

Le **village du Néolithique ancien** représente le seul village de l'Yonne de cette période fouillé sur une si grande surface. Il compte au moins 11 bâtiments de type danubien, complets ou partiels, orientés globalement est-ouest. Plusieurs sont de plan trapézoïdal et au moins deux maisons sont de plan naviforme (M1 et M2) – fait relativement rare dans la région – dont l'une est particulièrement imposante (40 m de long ; Figure C3. 11). Le type d'architecture et le mobilier retrouvé dans les fosses associées placent l'occupation de ces maisons plutôt vers **la fin du VSG**, n'excluant toutefois pas une occupation plus longue, sur toute la séquence VSG.

À 40 m environ de l'une de ces maisons (M5) a été retrouvée **une sépulture isolée (Mon 99-374)** datée d'une phase **plus ancienne que le village**. Deux dates radiocarbones permettent de proposer un intervalle commun compris entre 4880 et 4810 cal BC, qui correspond à la **transition entre le Rubanée et le VSG**. À titre de comparaison avec le corpus du Néolithique moyen, nous avons **échantillonné l'individu (un homme adulte)** inhumé dans cette sépulture. Celui-ci se trouve, très bien conservé, en position fléchie sur le côté gauche dans une fosse étroite, peut-être dans un contenant souple en matériau périssable (vêtement ?) et/ou recouvert d'un couvercle. Il a été enterré avec deux crânes de suidés et une lame de silex, ne permettant aucun rapprochement chronoculturel convenable avec d'autres sépultures connues pour le Néolithique ancien ou moyen européen. L'examen de son squelette a notamment révélé de nombreuses caries et quelques atteintes ostéologiques dont un bec de perroquet et des facettes d'accroupissement (Augereau et Chambon 2011, p35-36).

- *L'enceinte du Néolithique moyen*

De forme globalement elliptique et irrégulière, **l'enceinte palissadée** a été partiellement fouillée (250 m sur environ 650 m de tronçons explorés) et en partie reconstituée grâce aux photographies aériennes. La palissade, simple, a sans doute été doublée par endroits. Certaines parties ont été entièrement vidées à la pelle mécanique, permettant de mettre au jour la disposition des trous de poteau (espacés d'environ 1 m les uns des autres) et de recueillir la majorité du mobilier archéologique ; d'autres ont été fouillées à la main en raison des structures attenantes rendant le passage d'engin inaccessible. Des **interruptions dans le tracé** accompagnées d'élargissement de la palissade marquent certainement les **entrées**, de 2 m de large environ et disséminées de façon irrégulière le long de l'enceinte. D'après la profondeur des trous de poteau et leur rythme d'implantation, la palissade pouvait s'élever sur 1,2 à 4 m de haut pour enclore un espace de près de 10 ha. Pour construire une telle structure, particulièrement imposante pour la période, il a été estimé que l'équivalent d'une forêt de 15 à 30 ha a dû être abattu (Augereau et Chambon 2011, p. 368-369). Ces observations montrent à quel point l'homme commence à prendre sa place dans le paysage avec

une **exploitation croissante du milieu**, dans le but précisément de « **marquer** » le territoire par des enclos de palissades entourant plusieurs hectares.

Sur le rare mobilier recueilli (principalement des éclats de silex, des tessons de céramique et quelques ossements de faune), quelques éléments céramiques sont typiques du **Chasséen ancien bourguignon** et rappellent des spécimens rencontrés à Bonnard, en contexte funéraire, ainsi qu'à Beaumont et Chassey (Augereau et Chambon 2011). La datation de plusieurs charbons de bois place la période d'occupation de l'enceinte vers 4300-4000 cal BC, c'est-à-dire **postérieure à la nécropole**, ou au moins au **groupe C** (cf. *infra*), dont plusieurs sépultures sont d'ailleurs recoupées par l'enceinte. En revanche, certaines caractéristiques céramiques se rapportent à celles des **sépultures du groupe B**, vraisemblablement plus récentes (notamment des coffres, cf. *infra*), bien que les pâtes ayant servi à leur fabrication diffèrent (si ce n'est pour des raisons chronologiques, peut-être pour leur usage différentiel : domestique ou funéraire ?).

Par ailleurs, un segment d'enceinte à l'intérieur de la précédente pourrait être antérieur ou contemporain de cette dernière, servant peut-être à partitionner l'espace. Finalement, l'association de(s) l'enceinte(s) avec la nécropole reste à déterminer, de même que sa fonction, mais il est possible qu'une partie de la nécropole (excepté le groupe C ?) ait pu fonctionner en même temps que l'enceinte. Sur la surface enclose connue, les indications de vestiges à vocation domestique sont rares voire absentes pour le Néolithique moyen, mais une vaste zone reste encore à découvrir.

- *La nécropole du Néolithique moyen*

La nécropole est divisée en **trois groupes distincts** de sépultures, d'inégale composition et distants d'une centaine de mètres les uns des autres, ainsi que de **deux paires de sépultures isolées** (Figure C3. 11). Deux groupes sont compris à l'intérieur de l'enceinte (groupe A et B), de même que les paires isolées (paire D et E), le troisième groupe est à l'extérieur (groupe C). Si l'organisation de cette nécropole semble ne pas reposer uniquement sur la chronologie, le groupe C est daté d'une phase antérieure aux autres et ses datations coïncident assez bien avec la période d'occupation principale de Gurgy « Les Noisats » (cf. Figure C3. 2, p.190). Le mobilier associé aux sépultures de cette nécropole permet de les rattacher majoritairement au Chasséen. Toutefois, plusieurs caractéristiques funéraires (ou chronologiques) renvoient également à d'autres horizons culturels, conférant à la nécropole une composante relative aux spécificités locales de la microrégion. Nous présentons ci-après un bref aperçu de la composition des différents groupes de sépultures (d'après Augereau et Chambon 2011), dans la mesure où nos analyses porteront sur chacun d'eux, avant d'en éclaircir les paramètres funéraires et culturels.

Le **groupe A** compte 5 sépultures contenant 7 inhumés (Figure C3. 12). Il est encadré par deux alignements quasi parallèles de fosses (de fonction indéterminées) équidistants de la sépulture 99-548 (la seule tombe en coffre). Ces alignements pourraient indiquer l'existence d'un monument funéraire

bâti autour de cette sépulture, mais aucun élément ne permet de conclure à ce sujet et les fosses ne semblent pas correspondre à des trous de poteaux. D'autres structures éparses sont associées aux sépultures. L'orientation des inhumations varie autour de l'axe est-ouest (tête dirigée vers l'est ou le sud-est majoritairement). Les défunts reposent en position fléchie sur leur côté gauche dans des fosses de taille et d'aménagement variables (cf. III.1.b).

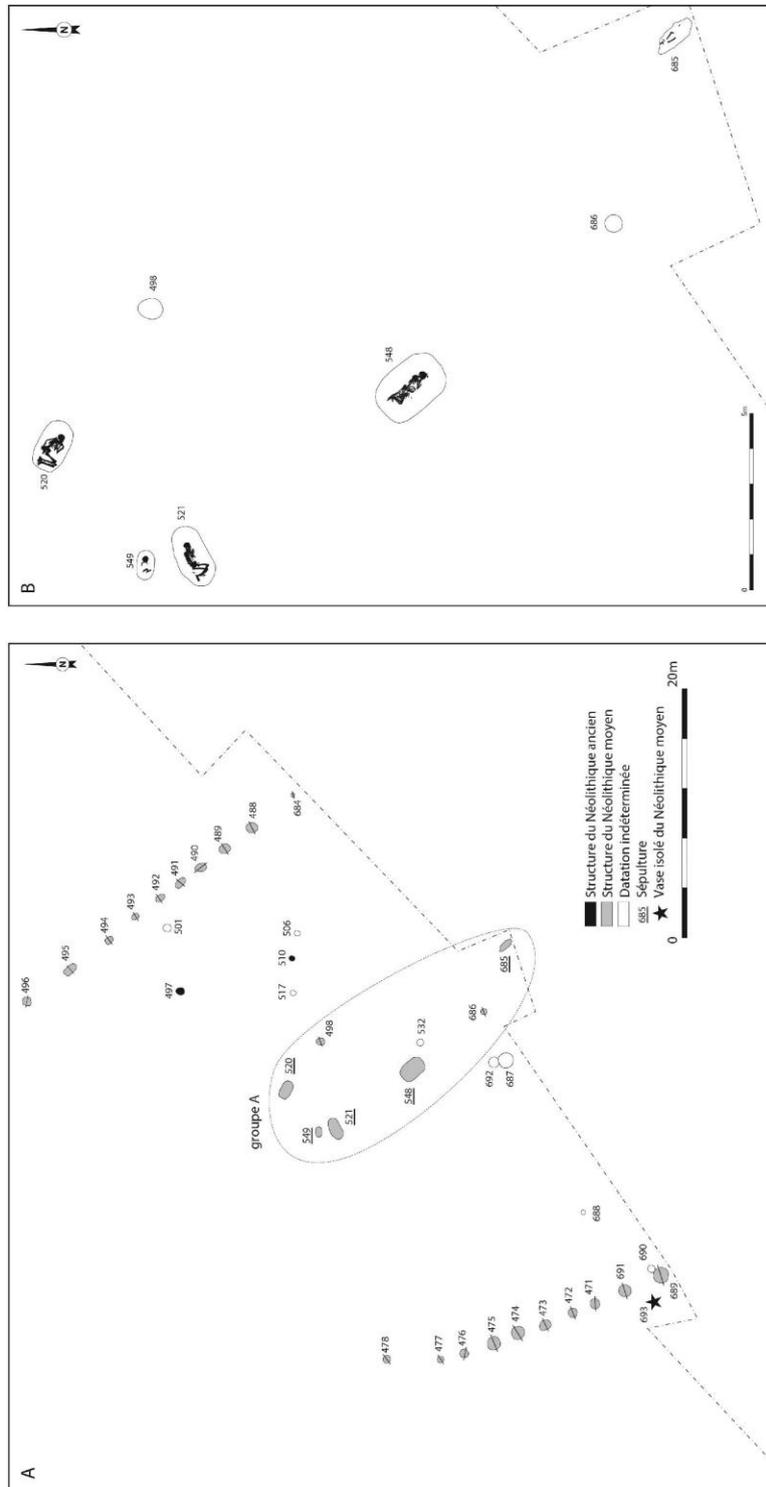


Figure C3. 12 : Plan de l'ensemble des structures (A) et détail des sépultures (B) du groupe A de Monéteau « Macherin ». Modifié d'après Augereau et Chambon 2011.

Le **groupe B** comprend 17 sépultures, dont 2 incertaines (Figure C3. 13). Un alignement de fosses rappelant ceux du groupe A est identifié dans le prolongement nord-ouest de ce groupe et suivant la même orientation que les inhumations, mais son association avec les sépultures n'est pas certifiée : le matériel retrouvé dans les fosses indique que l'alignement est probablement postérieur aux sépultures. Du point de vue des dispositifs funéraires, ce groupe constitue le plus homogène de la nécropole. Les individus sont déposés dans des coffres (lorsque la structure a pu être déterminée), repliés sur leur côté gauche et orientés la tête au sud-est principalement (avec des variantes allant jusqu'à la tête au nord-est).



Figure C3. 13 : Plan des sépultures du groupe B de Monéteau « Macherin ». Modifié d'après Augereau et Chambon 2011.

Le **groupe C** est le plus restreint dans l'espace (200 m<sup>2</sup>) et aussi le plus dense, comprenant 29 fosses sépulcrales au moins, recueillant 36 individus (10 structures supplémentaires étant de probables fosses à inhumations et 6 lots d'ossements brûlés répartis dans plusieurs fosses indéterminées s'ajoutent au décompte total de restes de ce groupe ; Figure C3. 14). Les squelettes de ce secteur sont

particulièrement mal conservés. Ce maillage dense de sépultures (rappelant celui des Noisats avec qui le groupe C partage également la fourchette de datations) compte toutefois peu de recoupements indiquant que les tombes devaient être signalées en surface. Peu de structures lui sont associées, mais les limites de décapage du secteur n'ont pas été retrouvées et il se peut qu'un certain nombre de sépultures se trouve encore en dehors de ces limites ou ait été détruit. Les individus sont inhumés en position fléchie sur leur côté gauche, la tête globalement orientée vers le sud ou le sud-est. Ce groupe rassemble tous les types de structures funéraires existant sur la nécropole.

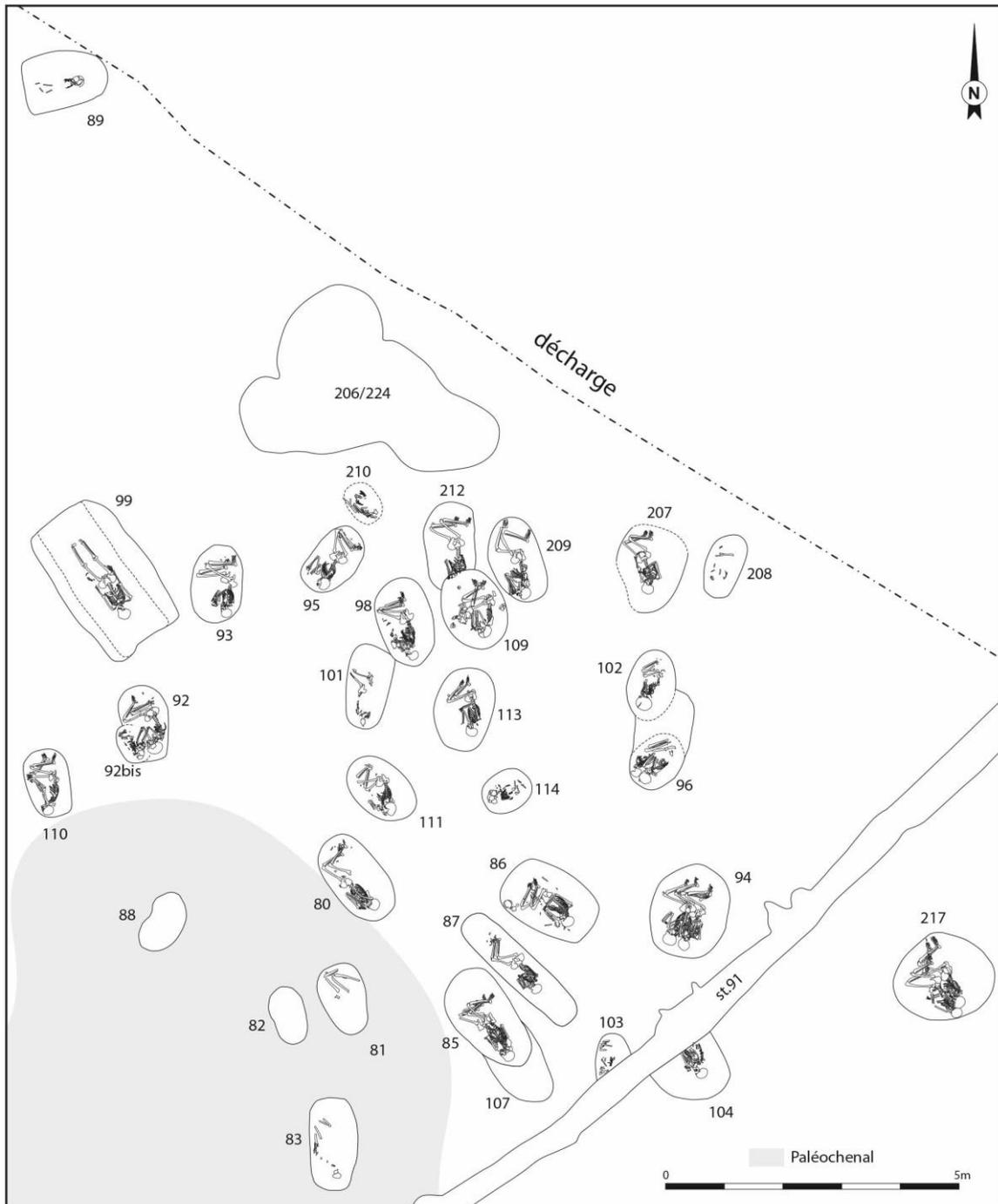


Figure C3. 14 : Plan des sépultures du groupe C de Monéteau « Macherin ». Modifié d'après Augereau et Chambon 2011.

La **paire D** se trouve à une centaine de mètres à l'ouest du groupe A et comprend deux individus dans des fosses très érodées, de telle sorte qu'elles pourraient être le reliquat d'un groupe plus important, à l'image des groupes A à C (Figure C3. 15). L'orientation des individus varie autour d'un axe de direction de la tête globalement vers l'est. Les deux sujets adultes étaient probablement repliés, membres fléchis sur leur côté gauche, bien que le tronc de l'un d'eux (99-241) montre qu'il repose sur le dos (résultant peut-être de l'affaissement du cadavre lors de la décomposition).

La **paire E** n'est pas associée à la nécropole de façon certaine, les datations indiquant une phase plus récente, entre 3640 et 3360 cal. BC. Une sépulture contenant deux individus face à face, repliés sur leur côté droit et gauche respectivement et orientés tête à l'ouest (Figure C3. 15), se trouve à l'emplacement de la nécropole de l'âge du Fer. La structure a été fouillée lors d'une campagne dirigée par J.-P. Guillaumet (CNRS/UMR 6298 ArTeHis) en 2000. Les deux inhumés sont un homme adulte (00-05) et un enfant ayant entre 4 et 8 ans (00-15), ce dernier reposant probablement dans un coffre en matériau périssable.

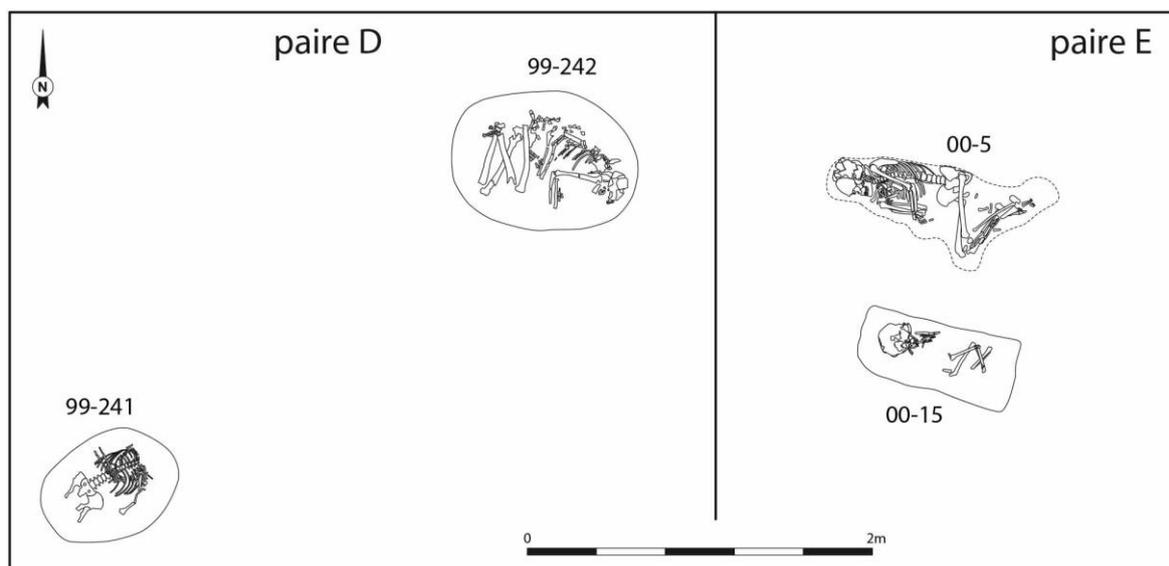
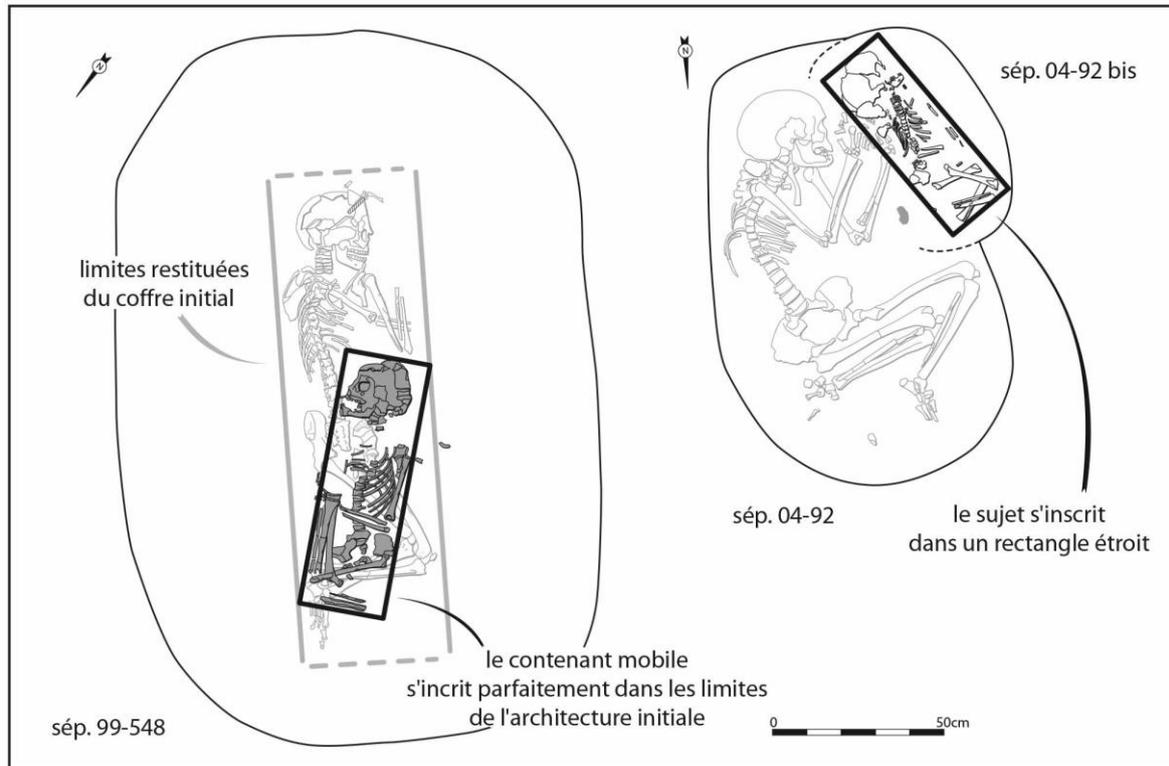


Figure C3. 15 : Plan des sépultures des paires D et E de Monéteau « Macherin ». Modifié d'après Augereau et Chambon 2011.

#### III.1.b. Les dispositifs funéraires et le mobilier de la nécropole du Néolithique moyen : comparaisons chronoculturelles

À l'instar de la nécropole de Gurgy « Les Noisats », les **dispositifs funéraires de la nécropole de Monéteau sont variés** (Annexe A7). On compte des **fosses étroites** et d'autres plus **larges**, les premières sont généralement simplement couvertes en surface ou par un contenant souple (une enveloppe ?), les plus larges pouvant accueillir un **coffre** (cf. *infra*) ou un **contenant rigide en matériau périssable** (peut-être uniquement pour le haut du corps dans certains cas), parfois même un contenant rigide mobile (de type cercueil) étant inséré à l'intérieur d'un coffre (Figure C3. 16). Des **contenants souples** peuvent également être envisagés. Enfin, si la très grande majorité des individus

est inhumée en **position fléchie sur le côté gauche**, on trouve également des individus (au moins trois : 02-685 pour le groupe A, 04-89 et 04-99 pour le groupe C) **allongés sur le dos, membres étendus**, dans un double dispositif de **type « Balloy »** : le corps est déposé dans un contenant rigide mobile de type « cercueil » lui-même inséré dans une architecture interne de type « coffrage » de grande dimension (jusqu'à 2,30 m de long ; Augereau et Chambon 2011 ; Figure C3. 17).



**Figure C3. 16 : Exemple de structures comportant des contenants rigides mobiles en matériaux périssables retrouvés à Monéteau « Macherin » ; sépultures 99-548 et 04-92. DAO : Ph. Chambon ; d'après Augereau et Chambon 2011.**

Les sépultures de type Balloy sont retrouvés dans le Bassin parisien uniquement en **contexte Cerny** (Chambon *et al.* 2009), mais aucun élément de mobilier ici n'a pu être rattaché avec certitude à cette culture. On trouve en revanche de la céramique chasséenne, une coquille *Unio* perforée typique du **contexte Mittelneolithikum alsacien** – dans lequel on retrouve également des sépultures de type Balloy – et deux chutes de burins assimilables à celles retrouvées dans la nécropole monumentale Cerny d'Escolives-Sainte-Camille, plus au sud dans la vallée de l'Yonne, comprenant elle-aussi ce type de sépultures (Duhamel 2004). Ces arguments ont invité Ph. Chambon à proposer un rapprochement de ces sépultures à « une tradition nord-orientale [rhénane], bien distincte du Chasséen » (Augereau et Chambon 2011, p.250). Dans le micro-territoire traité ici, d'autres sépultures de type Balloy ont été retrouvées à **Chichery « Sur les Pâturaux »**, rattaché au Cerny (cf. IV.1.b).

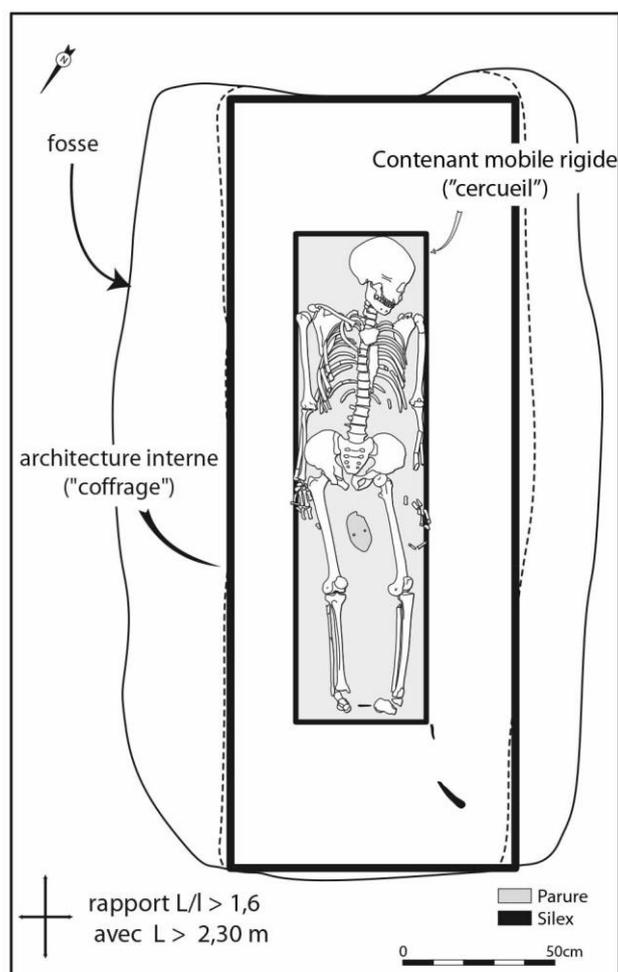


Figure C3. 17 : Exemple de sépulture de type Balloy retrouvées à Monéteau « Macherin » ; sépulture 04-99. DAO : Ph. Chambon ; d'après Augereau et Chambon 2011.

Par ailleurs, **les coffres** constituent la grande particularité de Monéteau. Une étude micro-morphologique des colonnes sédimentaires réalisée par J. Watez (INRAP/UMR 5140) indique que ces derniers étaient probablement construits **en bois et terre, façon torchis**. Des **vases** (écuelles carénées) sont dans plusieurs cas associés à ces coffres. Ils devaient être déposés sur le couvercle en surface (sans contact avec le défunt) et permettent de relier ces tombes au Chasséen. Comme nous l'avons vu précédemment pour Les Noisats, ces coffres rappellent les cistes de Chamblandes (cf. II.1.b) : ils ont possiblement été construits sur le modèle des constructions en dalle de l'arc alpin et du centre ouest. La nécropole de Monéteau est d'ailleurs même qualifiée de **nécropole Chamblandes** (Chambon 2007, p84) du fait de la densité des sépultures, de leur orientation majoritaire, de la position des défunts (fléchie sur le côté gauche en exclusivité<sup>2</sup>, hormis seulement les trois sépultures de type Balloy et l'individu de la paire E plus récent), et bien sûr de la présence de coffres.

**Le mobilier** mis au jour dans les sépultures de la nécropole est lui-aussi assez varié (Annexe A7), plutôt abondant, renvoyant à différentes cultures, dont le Chasséen et le Cerny principalement. Pour la

<sup>2</sup> La position exclusive des membres inférieurs fléchis sur le côté gauche ne trouve de parallèle que dans la sphère Chamblandes pour tout le Néolithique ancien et moyen européen (Augereau et Chambon 2011).

**céramique** (étude K. Meunier), on retrouve dans les trois groupes des fragments ou de rares objets entiers de deux catégories uniquement : des bouteilles et des coupes carénées rattachées au chasséen principalement, parfois au Cerny (certains éléments évoquent également le groupe de Chambon et le Montbolo, ainsi que le Roessen et l'Épi-Roessen). L'analyse pétrographique en lames minces de plusieurs céramiques permet d'identifier l'origine des matériaux utilisés (par exemple des argiles alluvionnaires composées de roches du Morvan) ainsi que la nature des dégraissants<sup>3</sup> employés (chamotte, os brûlé et sable). Cette étude, réalisée par F. Convertini, a notamment mis en exergue l'utilisation d'os brûlé comme dégraissant, inhabituel en contexte chasséen et reflétant plutôt un héritage Cerny ou du groupe de Chambon (Augereau et Chambon 2011, p. 297).

Soixante quatorze **pièces lithiques** (étude A. Augereau) ont été retrouvées en association avec 52 sépultures : essentiellement des outils en silex (lames et éclats bruts, racloirs et grattoirs, relativement communs, mais aussi tranchets et armatures de flèche au façonnage plus élaboré), ainsi qu'une hache en roche tenace (éclogite alpine, associée à une femme adulte ; Mon 04-113, groupe C). Les éléments les plus communs sont répartis dans les trois groupes (bien qu'à une fréquence déséquilibrée ou une position relative par rapport au défunt variable) mais aucun tranchet ni armature de flèche n'a été retrouvé dans le groupe C. C'est par ailleurs dans ce groupe qu'a été découverte la petite hache en roche alpine, confirmant le lien avec l'arc alpin et les coffres de Chamblandes. Les nécropoles Chamblandes suisses ne comptent d'ailleurs généralement pas d'outils lithiques (tranchets et armatures de flèches) associés aux défunts.

Seulement deux sépultures dans toute la nécropole ont livré des **outils en matière dure animales** ou MDA (bois de cerfs, os ou dents ; étude I. Sidéra, CNRS/UMR 7055 Préhistoire et Technologie). Il s'agit d'un **poinçon** en os et d'un crochet s'apparentant à un **hameçon** réalisé dans l'émail d'une canine de suidé, probablement associé à la pêche en eau douce mais n'ayant vraisemblablement pas été utilisé (fonction votive ? ; Mon 99-521 ; Figure C3. 18).

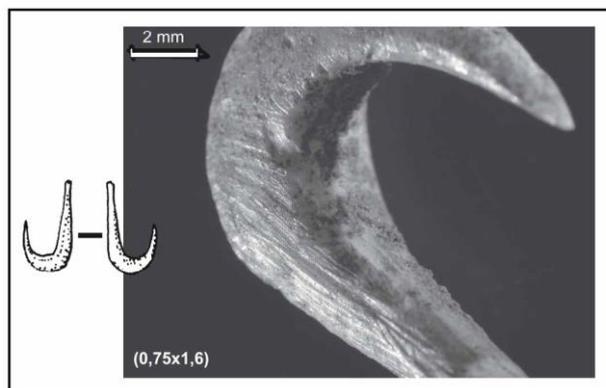


Figure C3. 18 : Hameçon retrouvé dans la sépulture 99-521 de Monéteau « Macherin ». Photographie et dessin : I. Sidéra ; d'après Augereau et Chambon 2011.

<sup>3</sup> Les dégraissants sont les inclusions de matériaux apportées par l'homme aux terres afin de participer à la structure finale d'une céramique.

La **parure** (étude S. Bonnardin) est principalement constituée de minuscules perles circulaires en calcaire, en lignite ou en jais, de coquilles percées ou non (*Unio*, spondyle, *Nucella lapillus*, dentale et coquille Saint-Jacques non retouchée), de pendentifs en canines de suidés, incisive de castor et crache de cerf mais aussi de façon plus spectaculaire un pendentif en schiste en forme de chouette (04-217) et un autre en os en « griffe d'ours » (04-114). De même qu'à Gurgy, les coquilles de *Nucella lapillus* (et de spondyle) provenant du registre marin et ramassés à l'état frais indiquent la **circulation lointaine des matières premières** (s'ajoutant à l'origine alpine de la hache). L'ensemble des éléments de parure permet de proposer diverses affinités culturelles, avec le Chasséen septentrional et de Chassey et le Cerny notamment, mais également avec le Chasséen méridional, la culture catalane des Sepulcros de fosa, l'arc alpin et le domaine Chamblandes, les traditions nord-orientales (sphère rhénane, Normandie et Alsace notamment) et les cultures régionales des périodes précédentes (RRBP, VSG). Enfin, certains objets ne trouvent pas d'équivalents directs dans d'autres contextes ; le décor « en cupules » du pendentif en forme de chouette par exemple rappelle uniquement les cupules réalisées sur un objet de la tombe de Bonnard « Le Poirier » (Augereau et Chambon 2011 ; cf. VI.1.c).

On trouve également de **l'ocre** associé à trois individus et des **molettes à main** en grès.

**NB : L'attribution au chasséen** n'est proposée que sur la base du **matériel céramique**, associés aux coffres qui occupent une place prépondérante dans la nécropole. Néanmoins, le Chasséen n'est pas défini par ses pratiques funéraires, encore moins dans la région, et d'après les auteurs, une attribution prématurée ne saurait être justifiée. La proposition d'une arrivée précoce du Chasséen dans la région a maintes fois été soulevée, avec celle de l'origine méridionale ou non du Chasséen et le site de Monéteau rentre parfaitement dans ce débat. Quoi qu'il en soit, Monéteau trouverait son parallèle le plus proche dans le Chasséen de Chassey issu du site éponyme. Par ailleurs, si l'influence du Cerny est également visible à travers certains éléments de mobilier et si le site se trouve dans l'aire de répartition de cette culture (allant jusqu'à Escollives-Sainte-Camille au sud), les sépultures type Balloy seraient plutôt d'obédience rhénane ici, soulignant le parallèle déjà mis au jour par certains objets. Sur le plan des pratiques funéraires, les modalités rencontrées à Monéteau ne ressemblent pas à ce qui est connu au Néolithique ancien et moyen dans le Bassin parisien. En revanche, plusieurs éléments trouvent écho très localement dans les sites voisins de la vallée (position et orientation des corps en général, coffres aux Noisats et à Bonnard, sépultures type Balloy à Chichery « Sur les Pâturaux », fosses peu aménagées aux Noisats et à Chichery « L'Étang David », mobilier chasséen analogue à Beaumont et mobilier Cerny analogue au Nouzeau) renouvelant la proposition d'une **spécificité locale de cette microrégion aux multiples influences culturelles** (Augereau et Chambon 2011).

#### III.1.c. Les datations radiocarbone de la nécropole

Les datations radiocarbone (AMS) ont été réalisées sur 33 individus des trois groupes et des deux paires (38 mesures au total ; Figure C3. 19). L'étude a été menée par Ch. Oberlin (CNRS/UMR 5138

Archéométrie et archéologie). Quatre échantillons de collagène ne présentaient pas les critères de conservation requis et doivent être rejetés : 04-83, 04-212 (une autre datation obtenue par méthode conventionnelle offre une date fiable pour cet individu), 00-05 et 00-15 (Augereau et Chambon 2011, p339-351). D'après les recoupements pour chaque groupe et les tests statistiques du Chi<sup>2</sup> effectués, les auteurs obtiennent :

- pour le **groupe A**, une période d'occupation vraisemblablement postérieure à 4400 cal BC (voir 4350 cal BC approximativement, si on exclue les sujets 99-548A et 99-549 afin d'obtenir une série compatible et représentative d'un même évènement archéologique – le cas de la tombe 99-548 est discuté parce qu'elle occupe une place centrale dans ce groupe) ;
- pour le **groupe B**, l'ensemble des dates couvrent l'intervalle commun entre 4350 et 4050 cal BC, plus précisément entre 4220 et 4170 cal BC et constituent un ensemble homogène (coffres) ;
- pour le **groupe C**, les données sont plus problématiques. En excluant la date de la seule sépulture certifiée en coffre 04-86, les dates sont statistiquement compatibles et représentent un même évènement archéologique, globalement situé autour de  $4700 \pm 300$  cal BC. Il existe une inversion de stratigraphie entre 04-109 et 04-212 mais elle ne remet pas forcément en doute l'ensemble de la datation du groupe. Ce dernier semble donc bien antérieur aux deux précédents. Cependant, un tel écart entre le groupe C et les deux autres groupes est difficilement envisageable d'après les auteurs, compte tenu d'un certain nombre d'éléments cohérents entre les groupes qui témoigneraient d'une occupation sinon contemporaine, au moins continue ou partiellement simultanée. La typologie des coffres notamment, qui se retrouvent dans tous les groupes, et leur contemporanéité avec les sépultures type Balloy, sont autant d'arguments avancés en faveur d'une occupation plus tardive du groupe C (Augereau et Chambon 2011). Les auteurs proposent de rejeter l'ensemble des datations de ce groupe qui leur paraît douteux.
- Les **sépultures en coffres** des trois groupes ont fourni des dates qui se recoupent approximativement entre 4350 et 4250 cal BC.

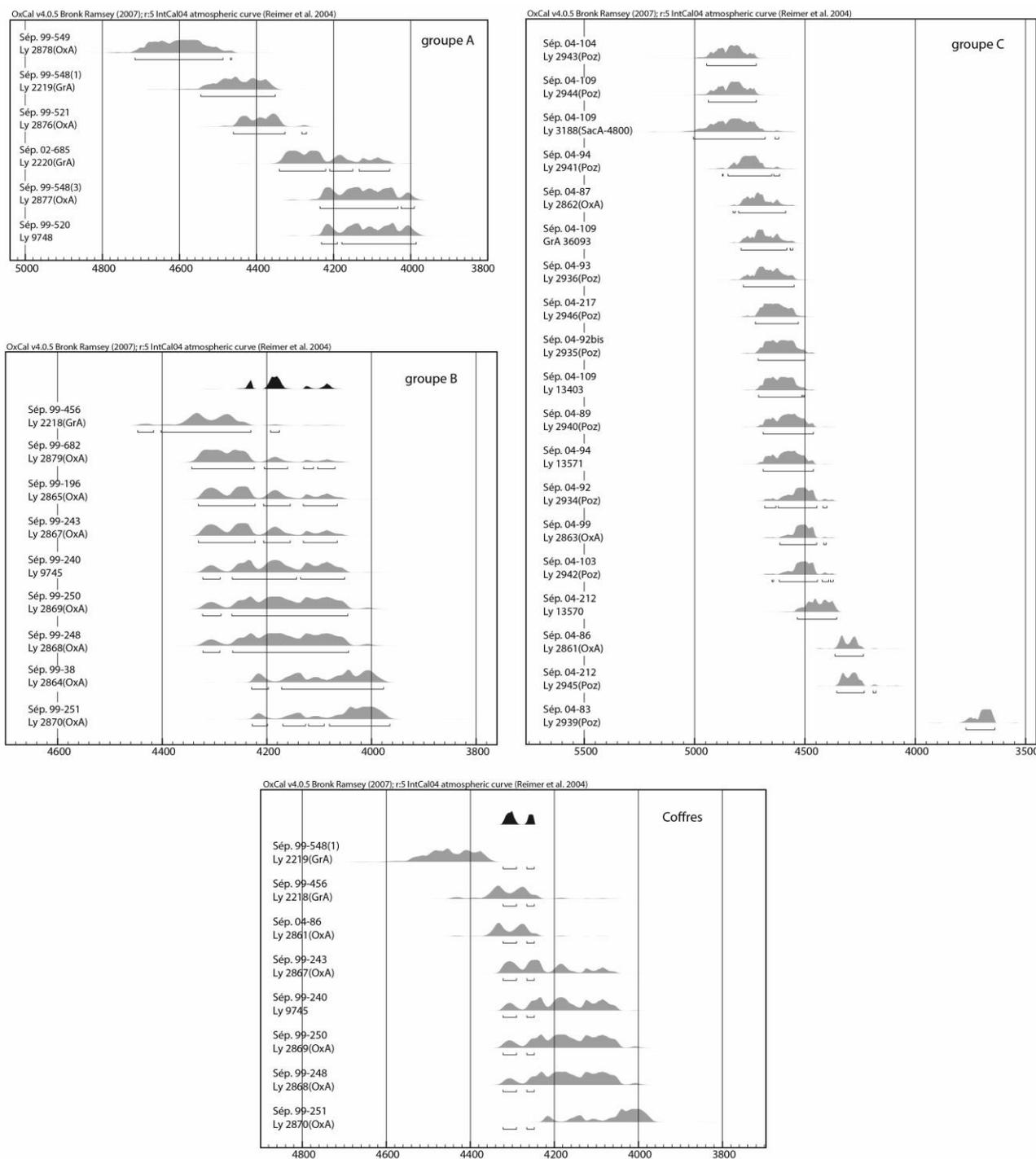


Figure C3. 19 : Histogramme de calibration des dates de la nécropole de Monéteau « Macherin », réalisée avec le logiciel libre Oxcal 4.0.5© Bronk Ramsey, 2007. Modifié d'après Augereau et Chambon 2011.

### III.1.d. L'étude des restes humains

L'analyse anthropologique, particulièrement complète et bien documentée, a été réalisée par S. Thiol (INRAP/UMR 5594 ArTeHis) et est publiée dans la monographie (Augereau et Chambon 2011, p. 259-289). Elle comprend l'identification biologique (détermination du sexe et estimation de l'âge par les méthodes citées précédemment entre autres) et la caractérisation (état sanitaire osseux et dentaire, VA, stature) des individus.

- *Retour sur l'enregistrement de l'âge et du sexe à partir des données disponibles*

Dans un souci **d'homogénéisation de l'enregistrement** des informations biologiques **entre les différents sites**, nous avons passé en revue les données disponibles pour chaque individu afin de définir des catégories et classes d'âge cohérentes sur la base des mêmes critères observés pour tous les sites.

Concernant **la détermination du sexe**, nous avons retenu les informations F, M et I pour les sujets de plus de 15 ans et ajouté les mentions « ? » et « - » pour les individus d'âge indéterminé et les immatures (<15 ans) respectivement (Annexe A7). Seules les méthodes de détermination retenues dans cette thèse (Bruzek 2002 ; Murail *et al.* 2005) sont indiquées dans la base de données (Annexe A7), parfois accompagnées d'une observation, notamment relative au nombre de caractères observés pour la « méthode Bruzek » (3 sont généralement nécessaires pour déterminer à plus de 95% de fiabilité le sexe). Le mauvais état de conservation des os coxaux n'a dans plusieurs cas pas permis d'observer plus d'un ou deux caractères de la méthode morphologique (« Bruzek ») ni de réaliser les mesures suffisantes pour la DSP. Nous avons marqué le sexe de ces individus d'une \* afin de suivre les critères – et uniquement ceux là – retenus pour les autres sites considérés dans cette thèse (cf. I). Néanmoins, l'observation de **caractères « sexuels » secondaires** particulièrement marqués (comme par exemple le relief sus-orbitaire proéminent ou le processus mastoïde hyper-développé) a pu aider l'auteure à conforter/étayer une attribution sexuelle dans plusieurs cas. Pour autant, si ces caractères s'avèrent bien représenter un dimorphisme sexuel dans la majorité des cas, il a été démontré qu'ils sont également variables d'une population à l'autre et nous n'en faisons pas mention dans ce tableau. Il serait intéressant de savoir si la DSS mise en place par A. Thomas pour GLN et CHI-Pat pourrait être appliquée à cette population. Quoi qu'il en soit, un regard particulier sera porté sur les individus marqués d'une \* afin de voir s'il n'existe pas d'incohérence apparente entre les résultats biogéochimiques et les sexes proposés.

En ce qui concerne **l'estimation de l'âge**, nous avons attribué une classe d'âge (telles que définies précédemment) à chaque individu sur la base des informations disponibles (passées en revue individuellement) et selon l'observation des critères les plus parcimonieux. Conformément à la méthodologie appliquée à Gurgy « Les Noisats » et Chichery « Sur les Pâtureaux », les intervalles considérés pour ces classes d'âge peuvent être larges, privilégiant la fiabilité à la précision. Les principales méthodes d'estimation (celles retenues dans cette thèse) sont données en Annexe A7. **L'âge au décès des immatures** a été estimé sur la base de l'éruption dentaire (Ubelaker 1978), en général toujours accompagné d'une description de caractères de maturation osseuse et/ou dentaire, parfois également complété par d'autres méthodes sur la croissance osseuse (Stloukal et Hanáková 1978) ou la maturation (Birkner 1980) que nous ne mentionnons pas ici (toutes les données sont disponibles dans Augereau et Chambon 2011).

Pour **les individus de plus de 15 ans**, l'indication « taille adulte » nous a enjoint à proposer la classe large [>15 ans]. Les mentions « jeune adulte » et « adulte » indiquant l'attribution respective aux classes [20-30] et [>20 ans] sont parfois rapportées à cette même classe d'âge [>15 ans] lorsque les critères de maturation indiqués ne nous ont pas permis d'estimer une classe d'âge avec plus de précision selon les critères retenus pour les autres sites, toujours dans un souci d'homogénéité du traitement des données. Nous classons les « jeunes adultes » 99-250, 04-95, 04-98B et 04-212 parmi les [15-19 ans] sur la base des critères de maturation donnés et parce que l'indication « ado » ou « grand ado » a également été rencontrée pour ces individus. L'indication « adulte mature », indiquant généralement un sujet de plus de 30 ans, a parfois été simplement rapportée à la classe [>20 ans] d'après les critères de maturation trouvés (pour concorder aux classes attribuées pour les autres sites). Les « adultes âgés » (correspondant selon notre classification aux plus de 50 ans) ont été identifiés sur la base de critères de sénescence tels que le degré de résorption des sutures crâniennes, les PAM résorbées ou la forte présence d'arthrose. Ces critères ne sont pas retenus dans cette thèse (en accord avec la méthodologie développée par A. Thomas) du fait de leur importante variabilité individuelle et leur origine multifactorielle. Les individus « âgés » ont ainsi été ramenés à [>30 ans] ici car l'attribution à la classe [>50 ans] a été définie à partir du degré d'usure dentaire à l'échelle intra-populationnelle ou de la surface sacro-pelviennes-iliaque (cf. Tableau C3. 2, p.192). En tout état de cause, les âges estimés à Monéteau selon les critères retenus et décrits par S. Thiol seront également croisés directement avec les résultats biogéochimiques (c'est-à-dire en s'affranchissant des classes d'âge) lors de l'étude intra-site. La précision des informations relatives à l'état de santé et de sénescence des squelettes permettant de surcroît d'accéder à un niveau d'observation plus fin au cas par cas.

- *Caractérisation biologique de la population*

L'étude de **l'état sanitaire** recense pour chaque individu les foyers d'arthroses (de nombreux cas sont présentés indiquant la pratique d'une activité physique intense dès l'enfance et une probable division sexuelle des tâches), les pathologies traumatiques et infectieuses (quelques fractures et périostites ont été relevées) et pour la sphère bucco-dentaire, le degré d'usure (de 1 à 5), le nombre de caries et de pertes ante-mortem résorbées et les dents atteintes. Les types d'usure et de caries ne sont pas renseignés. Les données quantitatives sont dans la variabilité connue pour le Néolithique. Aucun dépôt de tartre n'a été décelé sur 20 arcades observées.

L'observation des **variations anatomiques non métriques** a mis en évidence l'existence, au sein de l'ensemble de la population, de 3 caractères crâniens, 3 caractères dentaires et 10 post-crâniens qui sont comparés entre les groupes pour tenter d'identifier des ressemblances et rapprochements biologiques ou à l'inverse des groupes bien différenciés. Si aucun sous-groupe spécifique n'a pu être

mis en évidence, les résultats de cette étude semblent indiquer certaines similitudes entre les groupes reflétant tout du moins un environnement commun.

L'étude de la **stature**, évaluée d'après la méthode de M. Trotter et G.C. Gleser (1952), a mis en évidence des sujets relativement petits (entre 149 et 172 cm, mais dans la variabilité connue pour le Néolithique), avec un faible dimorphisme sexuel (la stature masculine est particulièrement basse) et ce dans tous les groupes sans distinction significative. Bien que le déterminisme de la stature soit multifactoriel (génétique, environnemental, comportemental), l'homogénéité relevée ici entre les groupes souligne une fois encore une certaine cohésion de l'ensemble de la population de Monéteau. D'autre part, il est proposé que le faible dimorphisme sexuel de la stature, à côté de retards de croissance enregistrés chez certains immatures, puisse être le fait d'un problème d'accès à une nourriture suffisante. Néanmoins, compte tenu de la grande variabilité populationnelle et individuelle de ces paramètres (stature et calendrier de croissance), ces données doivent être comparées à un plus grand nombre d'échantillons à l'échelle régionale et extrarégionale, et corroboré à d'autres indicateurs. Si l'analyse biochimique peut difficilement répondre à cette question (sauf situations extrêmes), elle peut être abordée dans le cadre de comparaisons avec les sites voisins, de comparaisons inter-individuelles intra-site et surtout de comparaisons dans le temps à l'échelle intra-individuelle (dans le cas de modifications saisonnières par exemple).

### III.1.e. Recrutement des individus inhumés, répartition spatiale, organisation sociale

Au total, la nécropole du Néolithique moyen dénombre à ce jour 62 individus inhumés dans 53 sépultures avérées. Le déséquilibre d'effectif entre les groupes permet difficilement de comparer le recrutement au sein de chacun d'eux, qui plus est en raison du faible nombre d'individus identifiés biologiquement dans les groupes A et B. Néanmoins, toutes les catégories biologiques – hommes, femmes et enfants au sens large – sont représentées dans les trois groupes (Figure C3. 20). Pour le **groupe C** en particulier (le seul à fournir un effectif suffisamment conséquent pour une analyse pertinente), l'étude du recrutement a montré un **manque des enfants de moins de 5 ans** et une **surreprésentation des femmes** par rapport aux hommes, en comparaison aux données attendues pour une population de village, à savoir une population naturelle pré-jennérienne (cf. Augereau et Chambon 2011, p. 264). Les limites de la nécropole n'étant pas connues, il est possible qu'une partie de la population ait été enterrée en dehors de l'espace fouillé, ou bien qu'elle ait reçu un traitement différent (inhumé ailleurs, selon d'autres modalités ne permettant pas de retrouver ces sépultures voire ayant conduit à leur destruction par exemple). En l'état actuel des choses, rien ne permet de conclure. Rappelons par ailleurs que plusieurs fosses du groupe C ont livré des ossements brûlés. D'autre part, la majorité des immatures retrouvés sur le site et en particulier dans le groupe C a été inhumé en

association avec des adultes (Figure C3. 20). Si une sectorisation de la nécropole a eu lieu, elle se basait vraisemblablement sur d'autres critères que l'âge et le sexe (*ibid.*).

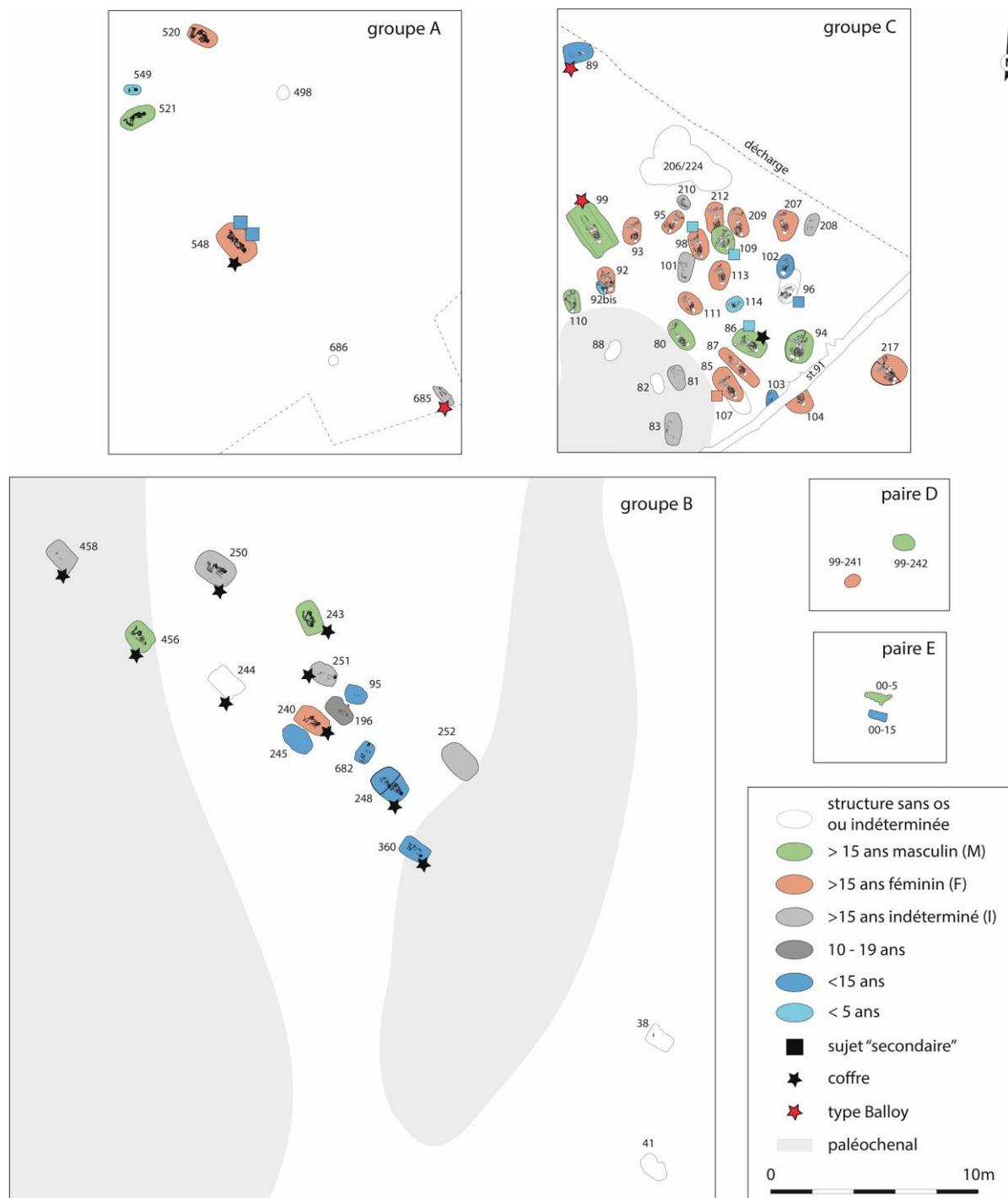


Figure C3. 20 : Répartition spatiale par âge et par sexe des individus de Monéteau « Macherin » pour chaque groupe de sépultures. Les sujets considérés comme principaux - par opposition aux « sujets secondaires » - sont ceux situés au centre de la fosse, ou au fond. Modifié d'après Augereau et Chambon 2011.

La **caractérisation anthropologique** des défunts n'a mis en évidence aucune distinction entre les groupes sur la base des variations anatomiques ou de l'état sanitaire squelettique et bucco-dentaire (cf. III.1.d). En ce qui concerne les **pratiques funéraires**, il existe quelques variations entre les groupes

mais également une certaine cohésion, notamment par la présence des coffres dans chacun d'eux qui partagent la même facture (fosse rectangulaire à parois droites et bords arrondis, de proportions similaires), de surcroît généralement accompagnés d'une céramique chasséenne déposée en surface. Tous les individus à l'exception de ceux des sépultures Balloy reposent membres fléchis sur leur côté gauche et les mêmes orientations se retrouvent dans tous les groupes, bien que celles du groupe C soient plus variables, à l'image de l'ensemble des caractéristiques funéraires.

Le **groupe C** est en effet **le plus hétérogène**, réunissant tous les types de tombes (et en particulier les coffres et le type Balloy). Quatre sous-groupes peuvent être identifiés sur la base des orientations (SE, SSE, S et SSO) – l'orientation SE-NO, formant une bande dans le groupe C, est commune aux trois groupes. D'autre part, les tombes du groupe C peuvent être **associées par paires** sur la base de l'orientation et la proximité, voire sur le type de tombe et la position de l'inhumé. On peut ainsi proposer neuf paires : 04-94 / 04-217, 04-80 / 04-85, 04-86 / 04-104, 04-207 / 04-208, 04-209 / 04-212, 04-98 / 04-109, 04-81 / 04-82, 04-92bis / 04-110 et 04-89 / 04-99 (Figure C3. 21). Parmi ces associations, sept comportent des individus identifiés biologiquement : une paire de sépultures « Balloy » associe un homme (04-99) avec un immature (99-89), une autre réunit deux femmes (209-212) et les cinq autres réunissent un homme et une femme. Il sera intéressant de rechercher des affinités particulières entre ces associations au niveau biochimique.

Le groupe C est aussi celui qui exclue dans son **mobilier funéraire** les flèches et les tranchets. Les **fosses peu aménagées** comportent moins de mobilier que les autres, notamment que les coffres et les types Balloy, particulièrement bien dotés. On retrouve ce trait dans les fosses peu aménagées de Chichery « L'Étang David » et Gurgy « Les Noisats ». En revanche on trouve dans ce groupe du **mobilier « remarquable »** par son origine ou sa facture (hache en roche alpine, *Nucella lapillus*, pendentif zoomorphe et « griffe d'ours »).

Dans tous les groupes, on constate qu'il n'y a **pas de distinction hommes/femmes ou adultes/immatures** : toutes les catégories ont pu jouir de tous les **types de tombes** ou de **mobilier**. **Quelques tendances** ont toutefois été décelées. Deux femmes ont été inhumées avec des molettes à main (comme c'est généralement le cas dans des contextes similaires et notamment à Gurgy « Les Noisats » où une meule de pierre est associée à une femme). Parure et accessoires en MDA sont plutôt l'apanage des hommes (et des enfants), de même que les flèches et tranchets, symbolisant peut-être la sphère sauvage (voir la symbolique du chasseur développée par I. Sidéra, 2003) ; exception faite de la hache alpine retrouvée dans la tombe de la femme 04-113, ce qui est particulièrement inédit pour le Néolithique où ce genre de hache est habituellement un symbole masculin (Pétrequin *et al.* 2012 ; Pétrequin et Jeunesse 1995). Cette femme compte par ailleurs des perles en coquille de *Nucella lapillus* d'origine lointaine, tout comme la hache, ce qui pourrait avoir une signification particulière ?

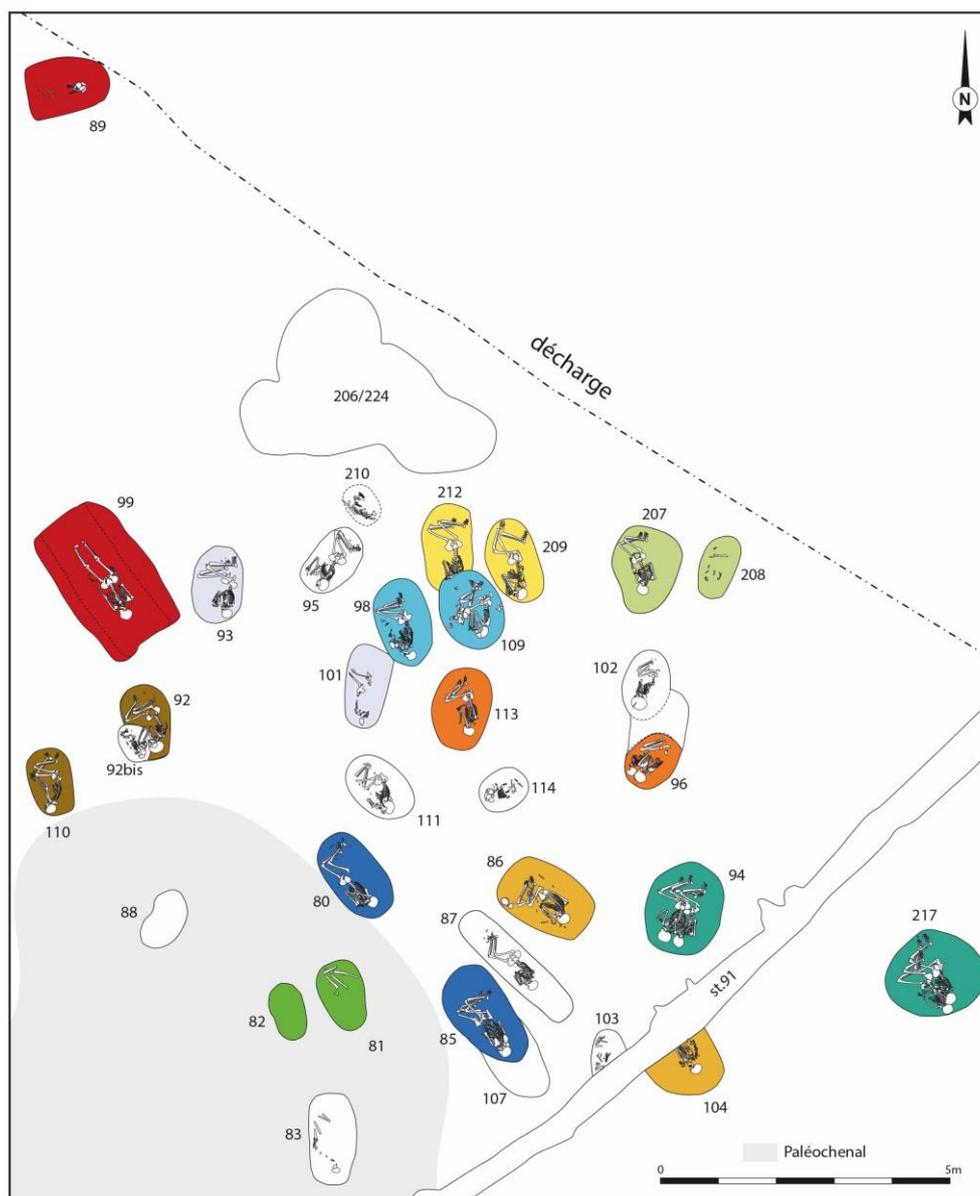


Figure C3. 21 : Proposition d'associations de sépultures par paires partageant des traits funéraires (type de structure ou orientation) et/ou une grande proximité spatiale. Groupe C de Monéteau « Macherin ». Modifié d'après Augereau et Chambon 2011.

Il existe une opposition entre la parure féminine et masculine, tant sur le plan quantitatif que qualitatif. La **parure en coquillage** est plutôt associée aux femmes (et aux enfants pour *Nucella lapillus*, bien que la perforation ne soit pas identique), les **pendentifs en défense de suidés** ne sont retrouvés qu'avec des hommes et des enfants (ceux des enfants se distinguent toutefois de ceux des hommes parce qu'ils sont sur lame et non sur défenses entières comme les adultes), les **minuscules perles** sont associées aux hommes et aux enfants. Si les objets de parure sont retrouvés dans **tous les types de tombes sans distinction majeure**, les tombes en coffre en comptent un plus grand nombre.

Au-delà de ces tendances, **certaines tombes sont plus « richement » pourvues** que d'autres ou occupent une place particulière au sein de leur groupe, selon le même schéma que celui observé à Gurgy « Les Noisats » et quelque soit le sexe ou l'âge des sujets. Nous l'avons vu, la **femme 04-113**

est inhumée avec une hache en roche tenace d'origine alpine (en plus de perles en *Nucella*, dentale et calcaire et d'une molette à main) et elle occupe une position centrale dans le groupe C. Dans le même groupe, **04-86** est la seule sépulture en coffre avéré et **04-99 est un homme** dans une sépulture type Balloy contenant notamment une applique biforée en coquille de moule d'eau douce et 2 chutes de burins en silex (assimilables à celles retrouvées dans la nécropole monumentale Cerny d'Escolives-Sainte-Camille). Le groupe C accueille également un **enfant (04-114)** enterré avec le pendentif en « griffe d'ours » plutôt exceptionnel. Le groupe B quant à lui est le plus homogène mais on signale par exemple deux individus associés à une « riche » parure en termes quantitatifs : un grand nombre de minuscules perles pouvant constituer un collier (**99-243** et **99-248A**). Enfin pour le groupe A, la sépulture **99-548** occupe une position centrale par rapport aux alignements qui pourraient constituer un dispositif monumental autour de cette tombe (la fonction des fosses alignées reste indéfinie et ne semble pourtant pas correspondre à des trous de poteaux). Il s'agit d'une tombe à étage et en coffre contenant notamment un poinçon en MDA et un vase caréné. La première inhumation est celle d'une femme qui pourrait avoir fondé le groupe A. L'interprétation de ses datations (les plus anciennes du groupe) est toutefois sujette à caution du fait d'un écart trop important avec le reste des inhumations et en particulier avec 99-548C, dernier individu déposé dans cette tombe triple, dont les dates ne se recoupent pas. Ces particularités pourraient bien refléter un statut spécial au sein des groupes, que l'analyse biochimique pourra éventuellement étayer.

Pour finir, la question se pose de considérer **une seule et même nécropole ou plusieurs séparées**. Si les datations du groupe C n'ont pas convaincu l'équipe ayant étudié le site, leur position semble aller dans le sens d'une seule nécropole subdivisée en plusieurs ensembles dont il reste à comprendre l'organisation. C'est la cohérence des dispositifs funéraires, en particulier des coffres qui semblent avoir une place fondamentale à Monéteau, qui les mène à cette conclusion toutefois non définitive.

### III.2. Le matériel sélectionné

#### III.2.a. État de la collection

Le matériel humain est dans l'ensemble **plutôt mal conservé**. Son état de conservation est donné pour chaque individu en Annexe A7. À l'instar des restes de Gurgy « Les Noisats », de nombreuses traces de radicelles sont visibles à la surface de l'os et plusieurs squelettes sont très fragmentaires. La collection est conservée au dépôt État de Passy, une annexe de l'INRAP, dans l'Yonne, sous la responsabilité du Service Régional d'Archéologie de Bourgogne.

#### III.2.b. Sélection des individus et type d'échantillonnage

Sur 63 humains exhumés à Monéteau, nous en avons échantillonné 53, provenant de tous les groupes. En particulier, la totalité des hommes et femmes de plus de 15 ans ont été sélectionnés, de même que

tous les sujets des sépultures isolées (paires D et E, sépulture du Néolithique ancien). Une synthèse est proposée en fin de section.

Pour tous les individus sélectionnés, au moins un fragment d'os a été prélevé (53 au total), généralement sur la corticale diaphysaire d'un fémur ou d'un tibia, voire d'un humérus dans 2 cas et sur un fragment cortical du bloc crânio-facial dans 1 cas (Tableau C3. 7). Pour 13 de ces individus, une M2 a également été prélevée. Le choix s'est logiquement porté sur la M2 pour correspondre au signal ciblé à Gurgy « Les Noisats » et obtenir un traçage homogène à travers les différents sites. Il sera le même pour tous les sites. Les modalités de prélèvement sont les mêmes que pour Gurgy « Les Noisats » (cf. II.2.b).

Toutes les dents ont été photographiées, mesurées et les observations présentées pour GLN ont été enregistrées ici selon les mêmes principes (Annexe A8). Le tartre a été prélevé et les surfaces occlusales ont fait l'objet d'empreintes pour l'étude de la micro-usure lorsque cela était possible (Annexe A5 et Annexe A6). Certaines dents comportaient des caries ou une usure particulièrement marquée que nous avons tout de même prélevées dans un souci d'homogénéité du signal temporel. Ces données sont renseignées dans le Tableau C3. 8, en même temps que leur stade de minéralisation.

**Aucun échantillon de faune** n'a pu être prélevé pour ce site, comme les seuls restes fauniques présents constituent le mobilier : d'une part il n'est pas souhaitable de sacrifier ces éléments, d'autre part le taux de probabilité qu'ils proviennent d'animaux locaux et contemporains, et à plus forte raison consommés, est inconnu.

ID	groupe	sexe	âge au décès	classe d'âge	os	dent
Mon 04-94A	C	M	mature	>30	femur	M2supD
Mon 04-94B	C	M	âgé	>30	tibia	M2supD
Mon 04-95	C	F	jeune adulte	15-19	tibia	
Mon 04-96A	C	-	4-8	1-9	humerus	
Mon 04-96B	C	I	mature	>30	femur	
Mon 04-98B	C	F	jeune adulte	15-19	tibia	
Mon 04-99	C	M	âgé	>30	femur	M2supD
Mon 04-101	C	?	indet	indet	femur	
Mon 04-103	C	-	5-9	5-9	femur	
Mon 04-104	C	F*	jeune adulte	>15	humerus	M2supD
Mon 04-109	C	M*	mature	>20	tibia	
Mon 04-110	C	M*	mature	>30	tibia	M2supG
Mon 04-111	C	F*	mature	>20	tibia	
Mon 04-113	C	F	mature	>30	femur	
Mon 04-207	C	F	mature	>30	femur	
Mon 04-208	C	I	15	15-19*	femur	
Mon 04-209	C	F*	mature	>20	femur	
Mon 04-210	C	I	adulte	>15	femur	
Mon 04-212	C	F*	jeune adulte	15-19	tibia	
Mon 04-217A	C	F	âgé	>30	tibia	
Mon 04-217B	C	F*	mature	>30	tibia	M2supD
Mon 99-241	D	F	adulte	20-39	femur	
Mon 99-242	D	I	mature	>20	femur	
Mon 00-05	E	M	jeune adulte	15-29	tibia	M2supG
Mon 00-15	E	-	4-8	1-9	femur	
Mon 99-374	NA	M*	adulte	>30	tibia	M2infD

ID	groupe	sexe	âge au décès	classe d'âge	os	dent
Mon 02-685	A	I	taille adulte	>15	femur	
Mon 99-520	A	F	mature	>20	tibia	M2supD
Mon 99-521	A	M	mature	20-39*	femur	M2infG
Mon 99-548A	A	F*	adulte	>15	femur	M2supD
Mon 99-548B	A	-	9-13	5-14	femur	
Mon 99-548C	A	-	5-7	5-9	BCF	
Mon 99-38	B	I	jeune adulte	>15	tibia	
Mon 99-196	B	?	indet	10-19	femur	
Mon 99-240	B	F	mature	>30	femur	M2supG
Mon 99-243	B	M	15-18	15-19	tibia	
Mon 99-248A	B	-	10-12	10-14	femur	
Mon 99-248B	B	-	6-8	5-9	femur	
Mon 99-250	B	I	jeune adulte	15-19	tibia	
Mon 99-251	B	I	adulte	>20	femur	
Mon 99-360	B	-	10-14	10-14	tibia	
Mon 99-456	B	M	adulte	>20	femur	
Mon 98-682	B	?	ado	10-19	tibia	
Mon 04-80	C	M	mature	>30	tibia	
Mon 04-81	C	I	adulte	>20*	tibia	
Mon 04-83	C	I	jeune adulte	>15	femur	
Mon 04-85A	C	F	mature	>30	femur	
Mon 04-85B	C	F*	mature	>30	tibia	
Mon 04-86B	C	M*	mature	>30	tibia	
Mon 04-87	C	F	jeune adulte	>20	femur	M2infG
Mon 04-89	C	-	4-6	1-9	tibia	
Mon 04-92	C	F	mature	>30	tibia	
Mon 04-93	C	F	mature	>30	tibia	

Tableau C3. 7 : Liste des individus de Monéteau "Macherin" sélectionnés dans ce travail et os et dents échantillonnées. Le sexe est noté M (masculin), F (féminin) et I (indéterminé) pour les adultes, noté "-" pour les immatures de moins de 15 ans, et "?" pour les individus d'âge indéterminé ou à cheval entre l'enfance et l'âge adulte. Une \* indique les déterminations du sexe ou estimations de l'âge incertaines d'après les critères méthodologiques retenus dans cette thèse (voir Annexe A7).

Id	Groupe	Prélevement		Caries (Bocquentin 2003) <sup>1</sup>			Usure (Molnar 1971) <sup>2</sup>		Usure (Smith 1984) <sup>2</sup>	Tartre (Brothwell 1965) <sup>1</sup>			stade de maturation (Dermirjian et al 1973)	
		dent prélevées	localisation prélevement	situation (c/col/r)	face (O/M/D/V/L)	sévérité (0/1/2/3)	degré	direction		forme	degré	situation (c/col/r)		face (O/M/D/V/L)
99_520	A	M2 sup D	in situ			0	4	24	3	5	r/col	p	2	H
99_521	A	M2 inf G	in situ			0	3	34	3	3	col	p	1	H
99_548A	A	M2 sup D	in situ			0	2	1	1	1	c	M	1	H
99_240	B	M2 sup G	in situ			0	3	24	2	3	col+r	MV+L	1	H
04_87	C	M2 inf G	isolée			0	2	34	1	2	c	DM	1	H
04_94A	C	M2 sup D	isolée	c/col	M (+D?)	3	4	24	2	4			0	H
04_94B	C	M2 sup D	isolée	c	M	2	3	24	2	3	col	L	1	H
04_99	C	M2 sup D	isolée			0	4	24	3	5	c	M	1?	NO
04_104	C	M2 sup D	isolée			0	4	21	4	4	c	p	1	H
04_110	C	M2 sup G	isolée			0	5	24	3	6	r	V	2	H
04_217B	C	M2 sup D	in situ	col	D (+M?)	3	4	24	2	5	col	V	1	H
00_05	E	M2 sup G	isolée			0	2	1	1	1			0	H
99_374	NA	M2 inf D	in situ			0	5	34	3	6	col	p	1	H

Tableau C3. 8 : Tableau de synthèse des principales caractéristiques dentaires des échantillons de Monéteau « Macherin » analysés dans ce travail. <sup>1</sup>d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Bocquentin 2003 et Brothwell 1965), <sup>2</sup>d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Smith 1984) et M. Le Luyer (2016 ; d'après Molnar 1971 et Smith 1984).

• Synthèse

Le Tableau C3. 9 récapitule le nombre d'individus et d'échantillons sélectionnés pour tout le site et pour chacun des groupes individuellement, par âge et par sexe.

Mon	effectif total	effectif individus sélectionnés				total os dents
		total	prélèvement t os + dent	prélèvement t os seul	prélèvement t dent seule	
<b>humains</b>	<b>63</b>	<b>53</b>	<b>13</b>	<b>40</b>	<b>-</b>	<b>53</b>
adultes F	19	6	13	-	-	19
adultes M	12	7	5	-	-	12
adultes I	12	-	9	-	-	9
imm. (<15 ans)	17	9	-	9	-	9
indét.	3	4	-	4	-	4

Mon (groupe A)	effectif total	effectif individus sélectionnés				total os dents
		total	prélèvement t os + dent	prélèvement t os seul	prélèvement t dent seule	
<b>humains</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>-</b>	<b>6</b>
adultes F	2	2	-	-	-	2
adultes M	1	1	-	-	-	1
adultes I	1	-	1	-	-	1
imm. (<15 ans)	3	2	-	2	-	2
indét.	-	-	-	-	-	-

Mon (groupe B)	effectif total	effectif individus sélectionnés				total os dents
		total	prélèvement t os + dent	prélèvement t os seul	prélèvement t dent seule	
<b>humains</b>	<b>15</b>	<b>11</b>	<b>-</b>	<b>11</b>	<b>-</b>	<b>11</b>
adultes F	1	1	-	-	-	1
adultes M	2	-	2	-	-	2
adultes I	5	3	-	3	-	3
imm. (<15 ans)	5	3	-	3	-	3
indét.	2	2	-	2	-	2

Mon (groupe C)	effectif total	effectif individus sélectionnés				total os dents
		total	prélèvement t os + dent	prélèvement t os seul	prélèvement t dent seule	
<b>humains</b>	<b>36</b>	<b>31</b>	<b>7</b>	<b>24</b>	<b>-</b>	<b>31</b>
adultes F	15	15	3	12	-	15
adultes M	7	7	4	3	-	7
adultes I	5	5	-	5	-	5
imm. (<15 ans)	8	3	-	3	-	3
indét.	1	1	-	1	-	1

Mon (isolées)	effectif total	effectif individus sélectionnés				total os dents
		total	prélèvement t os + dent	prélèvement t os seul	prélèvement t dent seule	
<b>humains</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>-</b>	<b>5</b>
adultes F	1	1	-	1	-	1
adultes M	2	2	2	-	-	2
adultes I	1	1	-	1	-	1
imm. (<15 ans)	1	1	-	1	-	1
indét.	-	-	-	-	-	-

Tableau C3. 9 : Tableau de synthèse de l'échantillonnage des sujets humains de Monéteau "Macherin" par rapport à l'effectif total sur le site et pour chaque groupe séparément.

### III.3. Synthèse et questionnements spécifiques au site

#### Monéteau « Macherin » (Mon)

Village néolithique ancien + 1 sépulture

Nécropole Néolithique moyen (associée à l'enceinte ?) :

- sépultures divisées en 3 groupes (A, B et C) + 2 paires de sépultures
- affinités avec le Chasséen (céramique) et « Chamblandes » (coffres) + Cerny / sphère rhénane (type Balloy ?)
- diversité des dispositifs funéraires : fosses peu aménagées, coffres, type Balloy, positions et orientations variables, mobilier diversifié, plutôt Chasséen/Cerny → composante locale ?
- pas de différenciation anthropologique entre les groupes.
- quelques différences dans les pratiques funéraires entre les groupes mais surtout caractéristiques communes (plusieurs dispositifs se retrouvant dans chaque groupe)
- groupe B plus homogène et plus récent ?
- groupe C plus dense et plus ancien ? similitude avec GLN. Association de tombes par paires ?
- identification de tombes « fondatrices » ou ayant une place particulière (e.g. Mon 99-548, 04-113, 04-86, 04-99) ?

#### **Principaux questionnements abordés dans ce travail :**

Caractérisation du régime alimentaire et identification de mobilité ?

- Quelle est la variabilité inter et intra-groupe ? Peut-on identifier des spécificités entre les groupes ?
- Corrélation avec les types de tombes, en particulier les coffres, les types Balloy et les fosses peu aménagées ? avec le mobilier « remarquable » ?
- Observe-t-on des différences entre les sexes et en fonction de l'âge ?
- Existe-t-il des spécificités individuelles en lien avec un statut social particulier ?
- Au sein du groupe C, peut-on identifier des similitudes entre les sous-groupes ou les paires proposées ?
- Quelles comparaisons peut-on effectuer avec les résultats biochimiques des sites voisins ou plus lointains ? selon les affinités culturelles ?

## IV. Chichery « Sur les Pâturaux » (CHI-Pat)

---

### IV.1. Le site

La nécropole de Chichery « Sur les Pâturaux » abrégée ici CHI-Pat constitue le troisième corpus humain le plus important de cette étude si l'on considère le nombre de sépultures (13 sur 600m<sup>2</sup> ; l'effectif d'analyses est plus important à Beaumont mais se compose de restes épars dont l'identification biologique est plus que lacunaire). Le site, **fouillé anciennement** et attribué au Cerny, a fait l'objet d'une **réétude récente** aboutissant à une **publication collective** dirigée par Ph. Chambon (2010). La nécropole n'a probablement pas été entièrement mise au jour, ses limites ne sont pas connues. Les sépultures sont disposées en deux alignements sans qu'aucun monument ne soit attesté, contrairement à ce qui est connu dans cette culture.

Le gisement est situé sur la rive gauche de l'Yonne, à 800m au sud de la confluence avec le Serein, sur la terrasse alluviale la plus récente (Fz), à 85m d'altitude sur un microrelief (cf. Figure C3. 1, p.188).

#### IV.1.a. Découverte et caractéristiques générales

Le site a été fouillé pour la première fois en 1981 par J.-L. Tainturier, puis en 1983 et 1984 par J.-P. Delor, mettant au jour 13 sépultures et 27 fosses sur une surface décapée de 600m<sup>2</sup> (Figure C3. 22). La nécropole se trouve à quelques encablures (moins de 150m) d'une enceinte à fossé interrompu du Néolithique moyen qui avait été repérée par prospection aérienne mais n'a encore jamais été fouillée. Sur l'emprise de la nécropole, aucun lien strict n'a pu être établi avec des structures domestiques.

Les treize sépultures sont réparties en **deux alignements** (A et B ; cf. Figure C3. 25, p.251) suivant globalement la même orientation nord-ouest / sud-est et **une sépulture isolée** (sépulture 1) suivant la même orientation mais se distinguant des autres à plusieurs niveaux (cf. IV.1.b). Toutes les informations archéologiques et biologiques relatives aux sépultures sont disponibles en Annexe A9. Les tombes sont essentiellement individuelles et contiennent les restes de 15 sujets, dont un sujet périnatal – 3bis – est associé à la tombe 3, tout en lui restant indépendant, et une incinération – 10bis – est associée à la tombe 10 (les restes brûlés sont également disjoints du sujet sous-jacent).

Le mobilier et les dispositifs funéraires renvoient principalement à **l'horizon Cerny** (cf. IV.1.b), mais contrairement à ce qui est connu pour cette culture, **aucun monument** funéraire n'est attesté à Chichery « Sur les Pâturaux ». Si la comparaison avec les structures monumentales de type Passy est tentante (alignement de tombes de type Balloy, mobilier Cerny ; cf. IV.1.b), plusieurs arguments permettent de l'exclure formellement (Chambon *et al.* 2010). En outre, plusieurs caractéristiques

funéraires s'intègrent facilement dans le **contexte local** rappelant des traits observés dans les sites voisins.

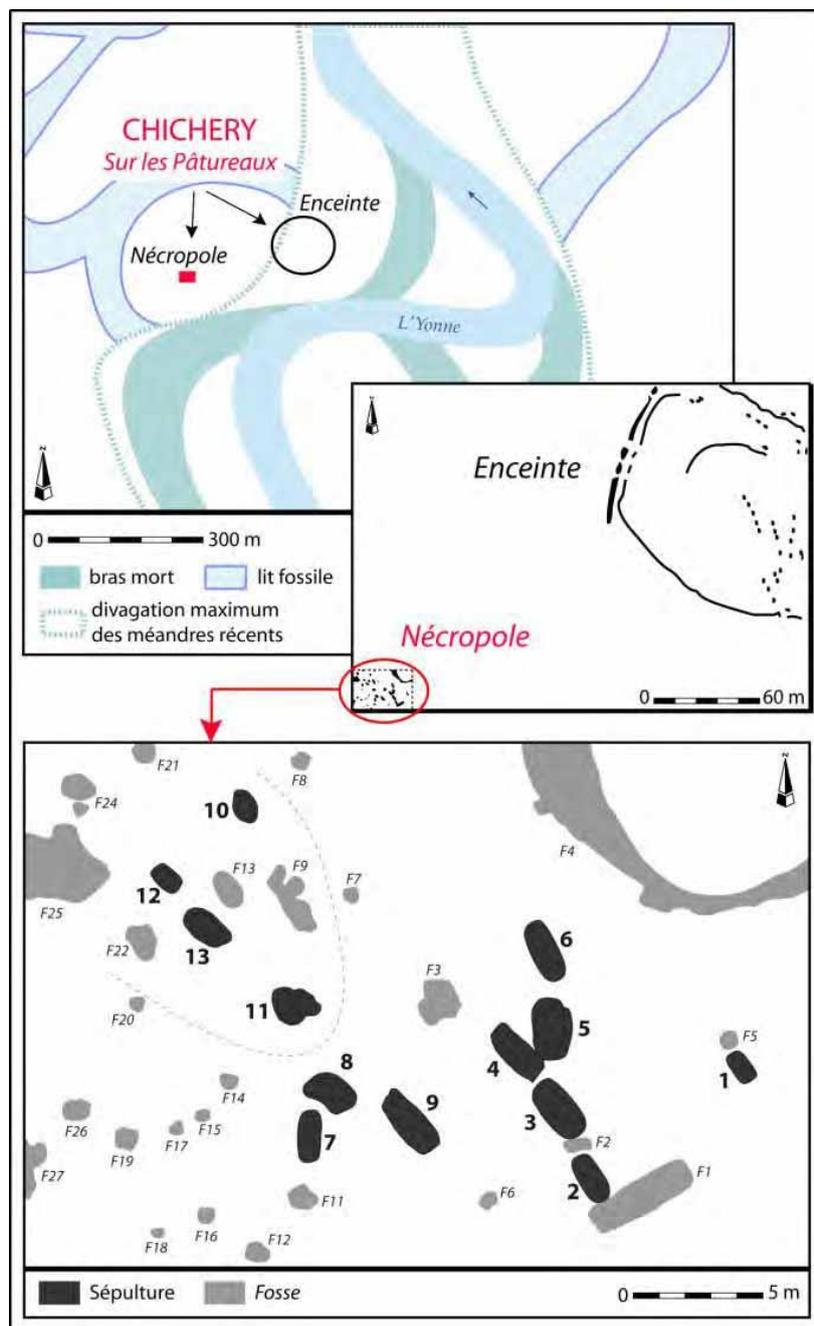


Figure C3. 22 : Localisation et plan de la nécropole de Chichery « Sur les Pâturaux ». D'après Thomas 2011.

#### IV.1.b. Les dispositifs funéraires et le mobilier : comparaisons chronoculturelles

À l'exception du sujet 1 et de l'incinération, les dispositifs funéraires s'apparentent au **type Balloy** : les sujets sont **allongés sur le dos** dans des fosses de dimensions et morphologies variables mais dépassant généralement 2m et allant jusqu'à 3m de long (Figure C3. 23). Les analyses taphonomiques et sédimentaires ont mis en évidence la présence de **contenants rigides mobiles** parfois insérés dans des structures de type **coffrage**, sans toutefois pouvoir certifier du caractère systématique de cette

pratique du fait des conditions de conservation de ces structures. Les orientations des fosses et des corps sont globalement dans l'axe NO-SE mais la direction de la tête peut être opposée : certains ont la tête au NO, d'autres au SE (avec une variabilité s'étalant jusqu'à l'axe nord-sud). Dans le Bassin parisien, le type Balloy renvoie sans nul doute à **l'horizon Cerny**, mais la situation de l'Yonne propose également un parallèle avec **les cultures du Bassin rhénan** : du Hinkelstein, en Alsace, au Roëssen, dont l'étape finale chevauche le début du Cerny, en passant par tout le Mittelneolithikum (cf. Chap1). Les orientations rencontrées à CHI-Pat, de même que les datations anciennes (cf. IV.1.c), soulignent le lien avec la sphère rhénane (Chambon *et al.* 2010). Dans la région, une comparaison peut être trouvée dans la nécropole non monumentale de Vignely « La Porte aux Bergers » (Chambon *et al.* 2018).

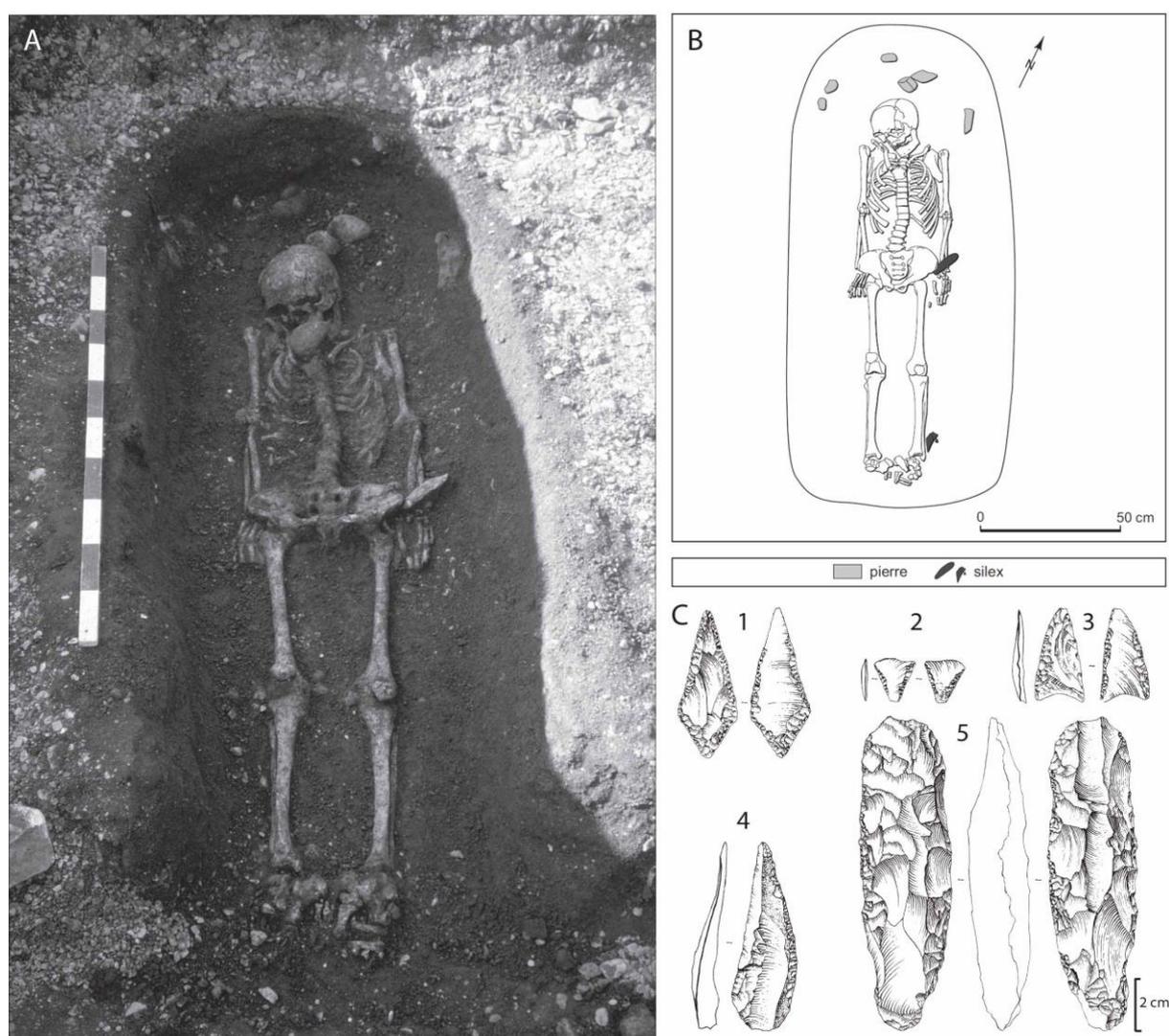


Figure C3. 23 : Exemple de la sépulture 2 de Chichery « Sur les Pâtureaux » : (A) photographie, (B) plan redressé et (C) objets lithiques (1-3 = armatures de flèches, 4 = racloir, 5 = pic-ciseaux). Cliché : J.-L. Tainturier ; relevé : Ph. Chambon ; dessin : D. Molez ; d'après Chambon *et al.*, 2010.

La **sépulture 1**, isolée, diverge des autres dispositifs. Bien qu'elle ait été partiellement détruite par les labours modernes, il est possible de restituer la position initiale du sujet, replié sur son côté gauche, et

vraisemblablement installé dans une fosse couverte. Aucun mobilier n'a été retrouvé en association avec les ossements. Cette sépulture rappelle, par la position et l'orientation du défunt ainsi que l'absence de mobilier, les sépultures des sites voisins de Chichery « L'Étang David », Monéteau « Macherin » et Gurgy « Les Noisats ».

Les **restes incinérés** rappellent, eux, ceux retrouvés à Monéteau entre autres (ainsi qu'à Balloy, Gron et Passy dans l'horizon Cerny), mais leur caractère laconique et l'absence d'éléments représentatifs propres rattachés à ces ossements ne permet pas d'aller plus avant dans l'interprétation de ces dépôts.

Pour l'ensemble de la nécropole, le mobilier est assez indigent. Il ne comprend **pas de céramique** hormis quelques tessons dans le remplissage, caractéristiques du groupe Cerny (étude par K. Meunier), **pas de parure ni aucun objet en MDA**, contrairement aux sites voisins de la vallée (GLN, CHI-ED ou Mon). En particulier, l'absence totale d'industrie osseuse renvoie uniquement La Noue Fenard à Vignely. Seules des **pièces lithiques** ont été retrouvées en association avec les défunts (étudiées par A. Augereau). Il s'agit principalement **d'armatures de flèches** et **d'outils en silex** (pics-ciseaux, racloir, lames et quelques éclats), et **l'absence de tranchets** dénote une spécificité inhabituelle pour la région. La techno-typologie des objets retrouvés renvoie essentiellement au **Cerny** mais propose également un parallèle (bien que dans une bien moindre mesure) avec le Chasséen de Chassey et le Chasséen méridional. Les éléments remarquables (pics-ciseaux) sont associés uniquement à deux sépultures, un homme et un enfant. Une **étude tracéologique** menée par J.-F. Gibaja Bao (Universidade do Algarve, Portugal et CSIC, Espagne) a montré que, lorsqu'il a été possible d'analyser les objets, dans l'ensemble fortement altérés, certains ont été utilisés pour diverses activités (décharnement, coupe de peaux ou de végétaux, grattage de peau et de matières dures animales) alors que d'autres n'ont jamais servis ou ont été réaffûtés avant d'être déposés avec les corps.

#### IV.1.c. Les datations radiocarbone

Les datations ont été réalisées sur les ossements de sept individus (Figure C3. 24 ; Annexe A9). Cinq dates sont cohérentes et placent l'occupation **entre 4700 et 4350 cal BC** (Chambon *et al.* 2010). La sépulture 4 présente des dates antérieures à 4680 cal BC mais la faible quantité de collagène et le fort écart-type incitent à remettre en doute la fiabilité de cette mesure. La sépulture 1 propose, elle, une datation plus récente, environ 4350-4050 cal BC, qui n'est pas incohérente avec le reste des données qui placent cette sépulture à la marge de la nécropole. De façon générale, les datations obtenues à Chichery « Sur les Pâturaux » paraissent anciennes en comparaison des autres sépultures Cerny de la région (Thomas 2011).

L'homogénéité apparente des dispositifs sépulcraux et l'implantation générale des tombes (absence de recoupements) suggèrent une occupation assez courte de la nécropole (du moins pour les deux

alignements A et B). L'intervalle de recouvrement des cinq datations les plus proches indique une période de 50 ans (4550-4500 cal BC) sans qu'il soit possible de conclure sur ce point.

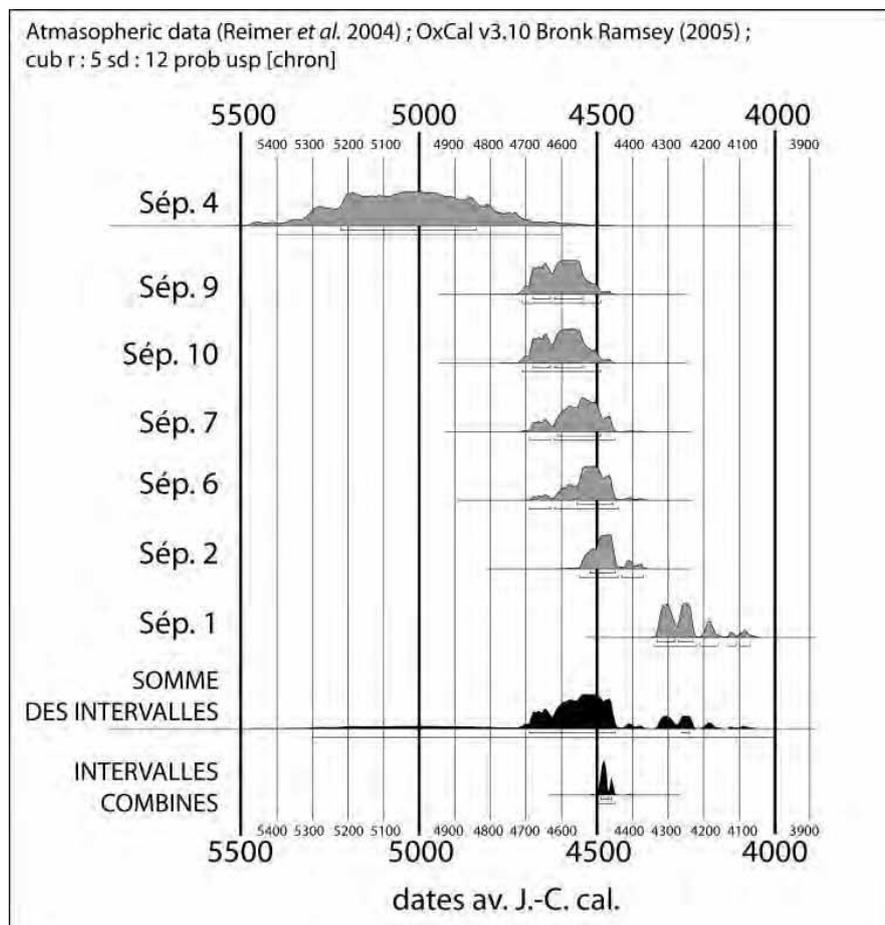


Figure C3. 24 : Histogramme de calibration des dates de la nécropole de Chichery « Sur les Pâtureaux », réalisée avec le logiciel libre Oxcal 3.10© Bronk Ramsey, 2005. D'après Thomas 2011.

#### IV.1.d. L'analyse des restes humains : identification et caractérisation de la population

L'identification et la caractérisation biologique des individus inhumés à Chichery « Sur les Pâtureaux » ont été réalisées par A. Thomas dans le cadre de sa thèse de doctorat (2011) plus largement menée sur l'ensemble du corpus Cerny. Les méthodes de détermination du sexe et d'estimation de l'âge au décès sont données en Annexe A9 et l'enregistrement des données est celui que nous avons suivi dans ce travail. Toutes les catégories biologiques sont représentées (hommes, femmes et enfants) ; le recrutement de la population sera discuté plus avant dans la section IV.1.e.

L'étude de la **morphologie** (stature, robustesse, capacité crânienne) a été réalisée à titre descriptif essentiellement et discutée à l'échelle interpopulationnelle dans le corpus Cerny. Publiée en détail (Chambon *et al.* 2010 ; Thomas 2011) et ne présentant aucun caractère particulier pour le contexte concerné, elle ne sera pas présentée ici. Notons simplement qu'elle a révélé un dimorphisme entre les

hommes et les femmes, globalement une stature autour de 1m50 à 1m60 pour une femme et deux hommes respectivement (en moyenne) et une robustesse plus importante pour les hommes.

**L'état sanitaire** est globalement bon (excepté pour l'individu 1 sur lequel nous reviendrons) : l'usure dentaire est assez faible, les lésions carieuses et les atteintes parodontales peu nombreuses, les dépôts de tartre modérés voire nuls. En ce qui concerne les atteintes osseuses, peu d'arthrose et de rares cas d'enthésopathies ont été mesurés. Les indicateurs de stress sont également très limités : huit sujets présentent au moins une hypoplasie révélant une période de stress entre 2,5 et 5 ans, mais une seule *cribra orbitalia* légère a été observée et aucune hyperostose poreuse. En revanche, **l'individu 1** se démarque une fois encore avec une usure dentaire particulièrement marquée et plusieurs atteintes pathologiques probablement liées à un âge avancé (arthrose rachidienne importante avec ostéophytes, deux caries, légère parodontose, hypoplasies et cal osseux).

L'étude des **VA non métriques** crâniennes, post-crâniennes et dentaires a permis d'observer un certain nombre de récurrences ou d'absences caractéristiques, en dépit de la conservation différentielle des squelettes, permettant de discuter d'éventuels regroupements spatiaux en lien avec les relations de parenté (cf. IV.1.e).

#### **IV.1.e. Recrutement des individus inhumés, répartition spatiale, organisation sociale**

L'ensemble des études effectuées à Chichery « Sur les Pâturaux » fournit autant d'éléments pour discuter de l'organisation spatiale de la nécropole. Tout d'abord, bien que la nécropole n'ait probablement pas été fouillée dans son intégralité et que l'étude du recrutement funéraire ne soit en l'état peut-être pas représentative voire faussée par un effectif incomplet, celle-ci montre un schéma proche de celui attendu pour une population archaïque naturelle et ne révèle aucune sélection par âge ou par sexe au sein de ce petit ensemble funéraire. En revanche, la composition des deux groupes est inégale et la disposition des sépultures ne semble pas aléatoire.

Alors que le **groupe A** accueille **principalement des sépultures de jeunes** (5 individus ont moins de 15 ans, un sujet a entre 15 et 19 ans, le dernier a plus de 20 ans), le **groupe B** contient **principalement des adultes** des deux sexes (deux femmes et deux hommes), un sujet périnatal (moins d'un mois) associé à la femme de la sépulture 3 et un enfant (Figure C3. 25). D'autre part, les sujets du **groupe B** suivent tous **la même orientation** (direction de la tête au NO ou au N) alors que ceux du groupe A sont inhumés dans des directions opposées et des orientations plus variables. Enfin, le groupe B rassemble **la majorité des objets retrouvés sur le site en association avec les défunts**, dont des éléments dit « remarquables » par leur nombre et leur nature : pics-ciseaux et armatures de flèches associés aux sujets 2 et 5. À l'inverse, un seul dépôt funéraire associé à l'enfant CHI-Pat10 a été identifié pour le groupe A. Les instruments « remarquables » partagés par les sujets 2 et 5 dans le

groupe B semble témoigner d'un statut particulier de l'enfant CHI-Pat5 qui, bénéficiant d'un traitement similaire à l'homme CHI-Pat2, lui aurait permis d'accéder au groupe B visiblement réservé aux adultes.

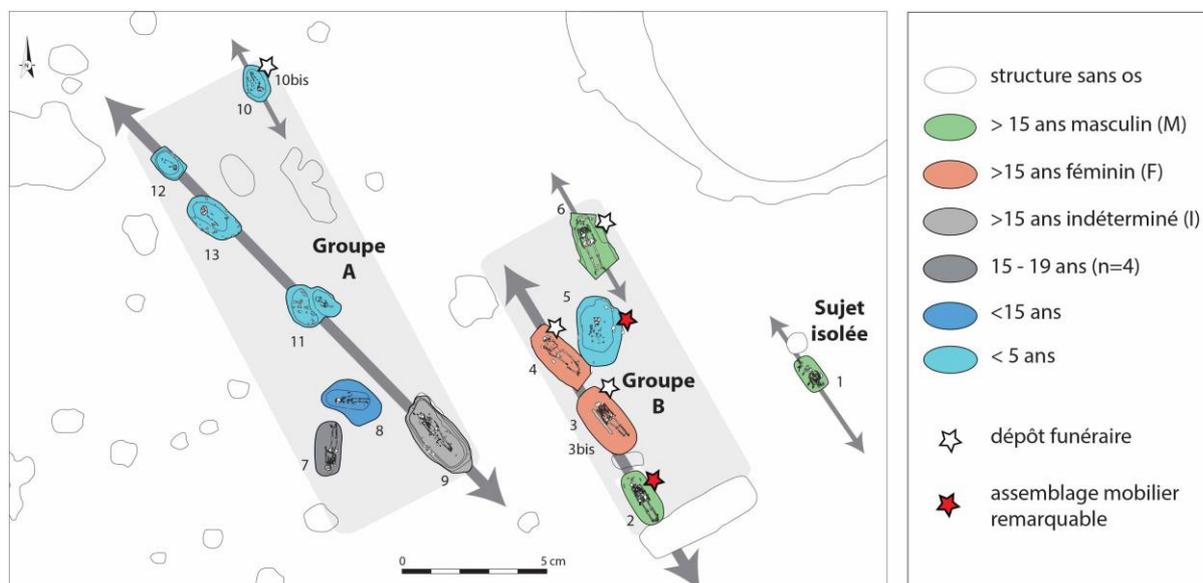


Figure C3. 25 : Répartition spatiale des inhumés de Chichery « Sur les Pâtureaux » en fonction de l'âge, du sexe et du mobilier funéraire. D'après Thomas 2011.

Par ailleurs, la recherche de **caractères « rares » parmi les VA** observées dans la nécropole, partagées par au moins deux individus indépendamment de l'âge et du sexe, ont permis de mettre en évidence des **rapprochements au sein des groupes** témoignant des liens de parenté (Figure C3. 26). L'absence de caractère partagé n'indique en aucun cas l'absence de lien de parenté.

En outre, la **sépulture 1** se trouve isolée à l'est des autres tombes, suivant globalement la même orientation NO-SE : elle pourrait initier un troisième alignement et plaide en faveur d'une continuité de l'occupation. D'autres sépultures sont peut-être présentes au-delà des limites de décapage. Les datations, le dispositif funéraire et jusqu'à l'état sanitaire et les VA de cet individu le démarquent du reste des sépultures de la nécropole.

La caractérisation biochimique des sujets fournira, nous l'espérons, de nouveaux éléments de discussion pour comparer ces groupes entre eux, peut-être mieux comprendre la place de l'individu 1 au sein de la nécropole voire la position de l'ensemble des sujets dans le contexte chrono-culturel local et régional.

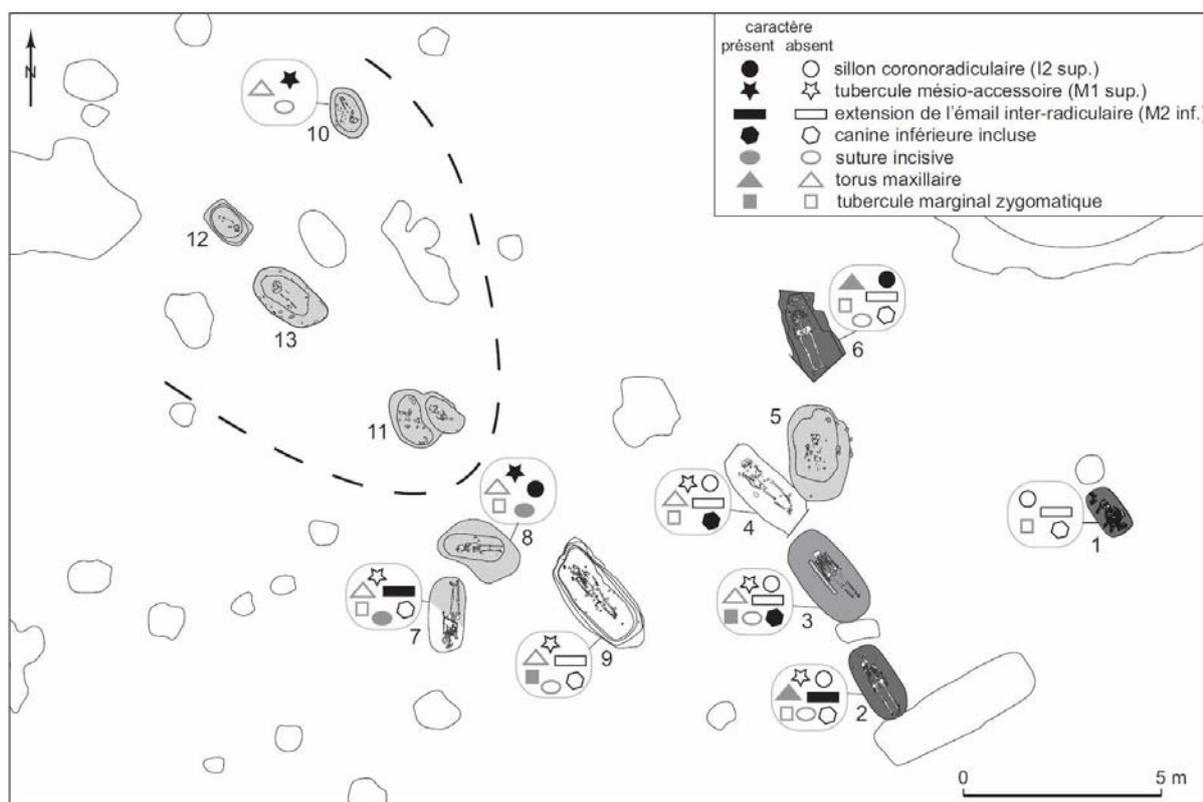


Figure C3. 26 : Répartition des variations anatomiques non métriques sélectionnées au sein de la nécropole de Chichery « Sur les Pâturaux » pour discuter des rapprochements entre individus. La cotation de la présence aussi bien que de l'absence de ces caractères permet de ne pas confondre les statuts « non observé » et « non observable ». DAO : A. Thomas ; d'après Chambon *et al.*, 2010.

## IV.2. Le matériel sélectionné

### IV.2.a. État de la collection

L'état de conservation est assez variable. Certains squelettes sont parfaitement bien conservés, d'autres très fragmentés voire quasiment détruits, d'autres encore ont été perdus (Annexe A9). Le matériel est stocké au dépôt de Passy (Yonne) sous l'autorité du Service Régional d'Archéologie de Bourgogne.

### IV.2.b. Sélection des individus et type d'échantillonnage

Nos analyses portent sur les deux groupes ainsi que sur la sépulture isolée. Au total, nous avons échantillonné presque tous les sujets de plus de 15 ans (sauf un de sexe indéterminé) et un enfant (5-9 ans) parmi les 7 mis au jour, les autres ayant probablement moins de 2 ans ou ayant été perdus. Pour les 8 individus sélectionnés, un **fragment d'os cortical** a été prélevé sur la diaphyse fémorale – ou tibiale dans deux cas ainsi que sur le crâne dans un cas (Tableau C3. 10). Pour 6 individus **une dent (M2)** a été prélevée en plus de l'os pour tracer un double signal (cf. II.2.b).

Pour connaître les modalités de prélèvement, voir le protocole décrit pour Gurgy « Les Noisats » (cf. II.2.b). Comme précédemment, les données dentaires observées sont présentées en Annexe A10. Les dents prélevées ne présentent aucune carie mais sont assez usées : l'usure est cotée et présentée dans le Tableau C3. 11, en même temps que leur stade de minéralisation. Nous avons prélevé le tartre de 5 dents et réalisé des emprunts occlusales de 6 dents (dont l'individu 6 qui n'a pas été analysé dans ce travail ; Annexe A5 et Annexe A6).

ID	groupe	sexe	âge au décès	os	dent
CHI-Pat 1	isolée	M	>30	tibia ?	M2infG
CHI-Pat 2	B	M	30-39	fémur G	M2infD
CHI-Pat 3	B	F	30-49	fémur G	M2supG
CHI-Pat 4	B	F	>25 (<50*)	tibia D	M2supG
CHI-Pat 6	B	M	30-39	fémur D	
CHI-Pat 7	A	I	15-19	fémur D	M2infD
CHI-Pat 8	A	-	5-9	fémur D	
CHI-Pat 9	A	I	>20 (<50*)	crâne	M2supG

**Tableau C3. 10 : Liste des individus de Chichery "Sur les Pâtureaux" sélectionnés dans ce travail et os et dents échantillonnées. Le sexe est noté M (masculin), F (féminin) et I (indéterminé) pour les adultes, noté "-" pour les immatures de moins de 15 ans, et "?" pour les individus d'âge indéterminé ou à cheval entre l'enfance et l'âge adulte.**

Id	Prélèvement		Caries (Bocquentin 2003) <sup>1</sup>	Usure (Molnar 1971) <sup>2</sup>			Usure (Smith 1984) <sup>2</sup>	Tartre (Brothwell 1965) <sup>1</sup>			stade de maturation (Dermirjian et al 1973)
	dent prélevées	localisation prélèvement	sévérité (0/1/2/3)	degré	direction	forme	degré	situation (c/col/r)	face (O/M/D/V/L)	sévérité (0/1/2/3)	
CHI-Pât 2	M2 inf D	in situ	0	3	34	2	4	c	M/D/L	1	H
CHI-Pât 3	M2 sup G	isolée	0	2	24	1	2-3	col (+ c ?)	L (+ MD ?)	1	NO
CHI-Pât 4	M2 sup G	isolée	0	2	74	1	2	c	MD	1	H
CHI-Pât 7	M2 inf D	in situ	0	2	1	1	1	c/col	D	1	H
CHI-Pât 9	M2 sup G	in situ	0	2	24	2	2	c	V/M	1	H

**Tableau C3. 11 : Tableau de synthèse des principales caractéristiques dentaires des échantillons de Chichery « Sur les Pâtureaux » analysés dans ce travail. <sup>1</sup>d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Bocquentin 2003 et Brothwell 1965), <sup>2</sup>d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Smith 1984) et M. Le Luyer (2016 ; d'après Molnar 1971 et Smith 1984).**

- *Synthèse*

Un résumé de l'échantillonnage par âge et par sexe par rapport aux effectifs totaux est donné dans le Tableau C3. 12.

CHI-Pat	effectif total	effectif individus sélectionnés				total os	total dents
		total	prélèvement t os + dent	prélèvement t os seul	prélèvement t dent seule		
<b>humains</b>	<b>15</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	-	<b>8</b>	<b>6</b>
adultes F	2	2	2	-	-	2	2
adultes M	3	3	2	1	-	3	2
adultes I	3	2	2	-	-	2	2
imm. (<15 ans)	7	1	-	1	-	1	-

Tableau C3. 12 : Tableau de synthèse de l'échantillonnage des sujets humains de Chichery "Sur les Pâturaux" par rapport à l'effectif total.

### IV.3. Synthèse et questionnements spécifiques au site

#### Chichery « Sur les Pâturaux » (CHI-Pat)

Petit ensemble funéraire rattaché au Cerny mais pas de monument.

13 sépultures sur deux alignements (groupes A et B) + 1 sépulture isolée.

Tombes de type Balloy (Cerny / sphère rhénane). Objets lithiques renvoyant essentiellement au Cerny, mais absence de parure et d'outils en MDA (exceptionnel pour cette culture). → composante locale ?

Les datations indiquent une période antérieure au Cerny. Lien chasséen local ?

Structuration des tombes par âge (groupe A + jeunes), par mobilier (groupe B + "riche"), par liens de parentés (VA).

#### Principaux questionnements abordés dans ce travail :

Caractérisation du régime alimentaire et identification de mobilité ?

- Variabilité entre les groupes ? en fonction de l'âge ? Spécificité de l'individu 1 ?

- Corrélation avec les caractéristiques anthropologiques (VA notamment) et identification de schémas spécifiques en fonction des relations de parenté identifiées ou des regroupements de sépultures ?

- Différences entre les sexes ?

- Corrélation avec le mobilier « remarquable » ?

- Quelle position et quel schéma par rapport aux sites voisins de la microrégion ? par rapport aux sites Cerny ? plus largement au contexte Néolithique ?

## V. Beaumont « Le Crot aux Moines » (BMT)

---

### V.1. Le site

À l'inverse des sites précédents, le gisement de Beaumont n'a pas de vocation funéraire. Il est principalement constitué d'une (ou plusieurs) enceinte(s) et de diverses structures rattachées au Chasséen. La position du site, à l'extrémité nord de l'aire de répartition du Chasséen bourguignon, à mi-chemin entre le Chasséen méridional et septentrional, lui confère une importance particulière pour « *l'interprétation du phénomène de diffusion du Chasséen sur le territoire français* » (Garmond et Sidéra à paraître). Les fouilles anciennes et incomplètes du gisement ont fourni des données inégales, reprises dans le cadre d'un travail collectif et multidisciplinaire ayant mené à la publication d'une **monographie**, à laquelle nous avons participé, sous la direction de J.-P. Delor et N. Garmond (*ibid.*). Les surfaces encloses dans les enceintes sont estimées couvrir une superficie d'au moins 10 ha.

Le gisement est situé en rive droite de l'Yonne, au sud de la confluence de l'Yonne avec le Serein, sur la terrasse la plus récente (cf. Figure C3. 1, p.188).

#### I.1.a. Découverte et contexte de recherche

Le site a été découvert en 1975, dans une carrière d'exploitation de granulats. Diverses opérations de prospection et fouilles de sauvetage se sont ensuivies sous la conduite de plusieurs archéologues non professionnels. En 1976, plusieurs pièces ont été collectées par M. Colombet, l'exploitant de la carrière. Deux ans plus tard, une petite partie du gisement (le secteur B) a été fouillée de façon minutieuse (mais parfois difficile à resituer) par l'abbé Merlange de 1978 à 1980 puis par C. Bodechon à partir de 1981 (Figure C3. 27). Ce secteur restreint a livré un matériel néolithique abondant qui a été relevé en trois dimensions à l'aide d'un carroyage et marqué, permettant de replacer précisément les objets sur plan mais comportant quelques incohérences. L'autre partie, le secteur A, a été fouillée en parallèle par J.-P. Delor et C. Pellet en 1979 et 1980 de manière extensive et suivant une méthodologie plus proche des standards actuels. Sur ce secteur, constituant le plus important décapage, le mobilier a été ramassé par structure mais pas toujours marqué. De 1978 à 1980, R. Ederlé a procédé dans la zone Nord à une prospection pedestre et un ramassage de surface du mobilier céramique et lithique, réalisant des relevés schématiques.

La diversité des approches et de l'enregistrement des données, pourtant d'une grande précision à cette époque, a nécessité une reprise méticuleuse de la documentation ancienne, par ailleurs éparpillée avec les collections. J.-P. Delor, aujourd'hui décédé, a dirigé l'étude collective du site jusqu'à sa transmission à N. Garmond (UMR 7041 ArScAn, Protohistoire européenne).

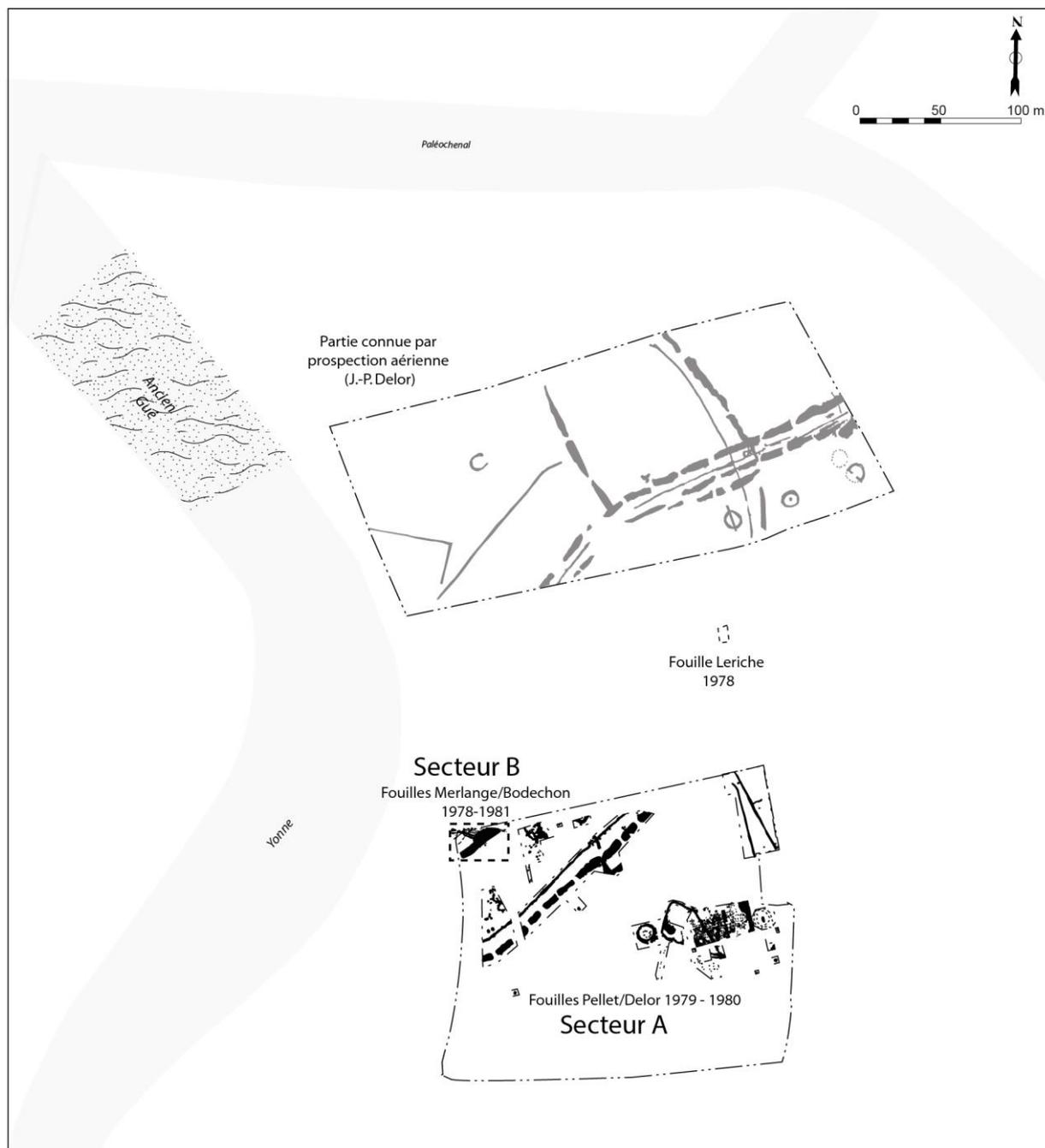


Figure C3. 27 : Plan du site de Beaumont « Le Crot aux Moines ». DAO N. Garmond ; d'après Garmond et Sidéra à paraître.

### I.1.b. Les différentes structures, par secteur

L'étude des structures a été réalisée par A. Supryk dans le cadre d'un travail de Master 2 (Université de Dijon, inédit) dirigé par N. Garmond.

- *Secteur A (fouille Pellet/Delor) :*

Le secteur A compte différentes structures attribuées au Chasséen (Figure C3. 28) :

- une **enceinte** à fossés interrompus doublée d'une palissade et comportant une entrée en chicane, au lieudit « Toussac » ;
- un **habitat circulaire**, à savoir une structure circulaire atypique identifiée par des trous de poteaux (murs en torchis et toit végétal ?), comportant un mobilier lithique indéniablement chasséen que les datations sur ossements confirment – elle est à l'extérieur de l'emprise des enceintes au nord, mais bien en relation avec elles ;
- des **structures de combustion** attribuées et datées du Chasséen, de fonction inconnue et recoupées par d'autres fosses – le « foyer 2 » a livré un os humain –, en dehors de l'emprise des enceintes, près de l'habitat circulaire ;
- d'autres vestiges, de l'âge du Bronze notamment.

- *Secteur B (fouille Merlange/Bodechon) :*

Ce secteur comporte **deux fosses A et B** (Figure C3. 29) ayant livré un abondant mobilier céramique, lithique et osseux. Elles constituent probablement des portions d'enceinte à fossés interrompus et sont doublées d'une palissade (fosses MBF 5 et 6).

- *Secteur Nord (prospection aérienne Delor et pedestre Ederlé) :*

La Zone Nord a uniquement fait l'objet de prospections aérienne (Delor) et pedestre (Ederlé) avec ramassage de surface d'un abondant mobilier attribué au Néolithique moyen, probablement chasséen ; elle doit encore être fouillée. Les prospections ont permis d'identifier **deux ou trois enceintes** avec palissades, qui pourraient être le prolongement de l'enceinte du secteur B, et **des structures circulaires** pouvant être des bâtiments rattachés aux enceintes. Ce secteur comprend les couches IV et 5 ayant livré des vestiges.

### V.1.a. Le mobilier : comparaisons chronoculturelles et organisation spatiale

L'effectif important du mobilier céramique, lithique et en MDA a permis la réalisation d'études approfondies et de comparaisons chronoculturelles pertinentes. La diversité des objets et l'étude de leur répartition dans les différentes structures a également permis d'accéder à l'organisation spatiale du site, et même de proposer un phasage chronologique des occupations. Si les objets en matière dure animale sont présentés ici, la faune non retouchée sera présentée dans une section séparée pour aborder les questions alimentaires en particulier.

L'étude de **la céramique** a été réalisée par K. Meunier pour l'analyse typologique, C. Colas (INRAP/UMR 7041 ArScAn) pour les caractéristiques techniques et F. Convertini pour l'analyse pétrologique. Le mobilier céramique, très fragmenté, provient principalement du secteur B (fosses A et B) avec 1473 tessons constituant 40 individus déterminables et de l'enceinte semi-circulaire du secteur

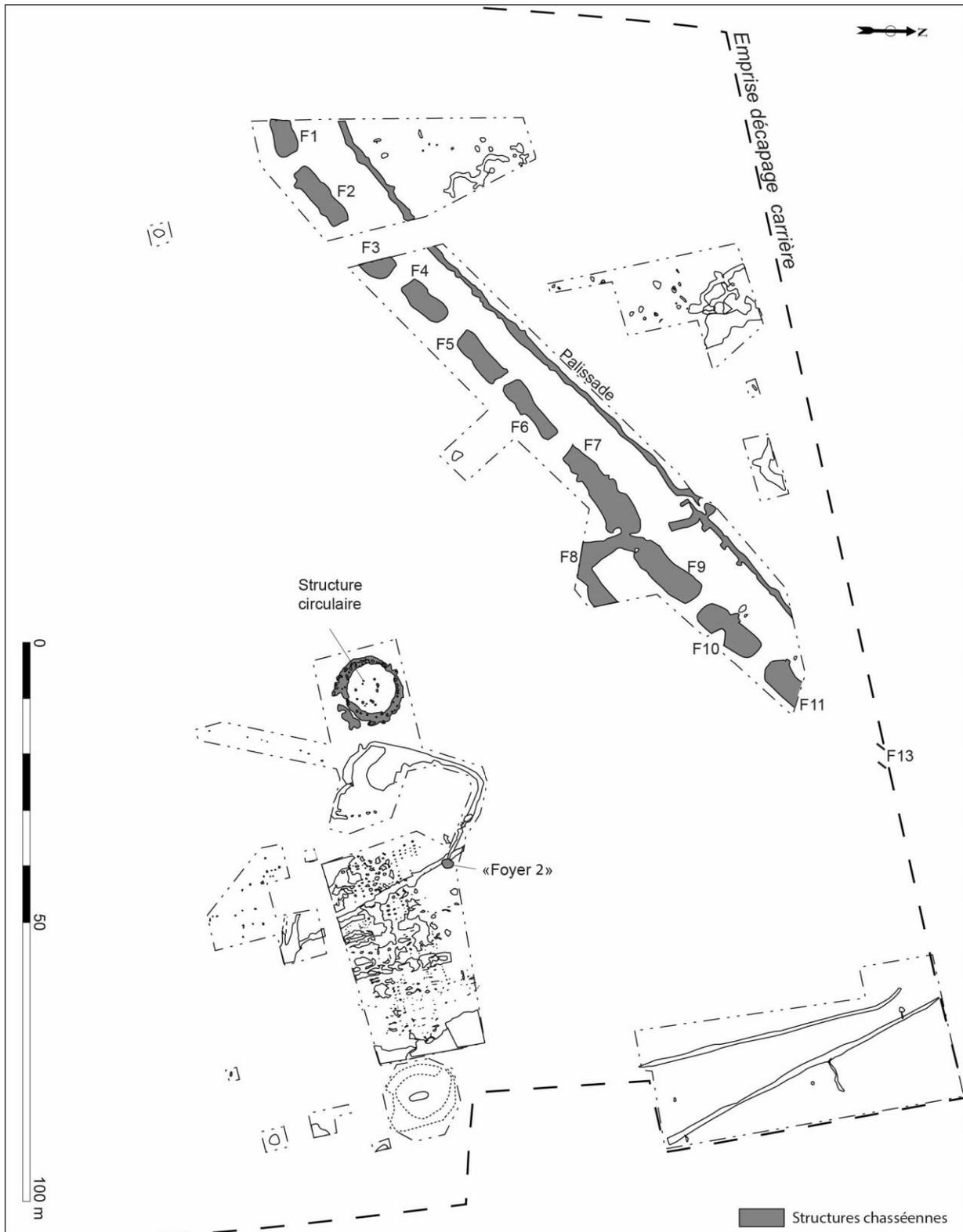


Figure C3. 28 : Plan du secteur A de Beaumont « Le Crot aux Moines ». DAO N. Garmond ; modifié d'après Garmond et Sidéra à paraître.

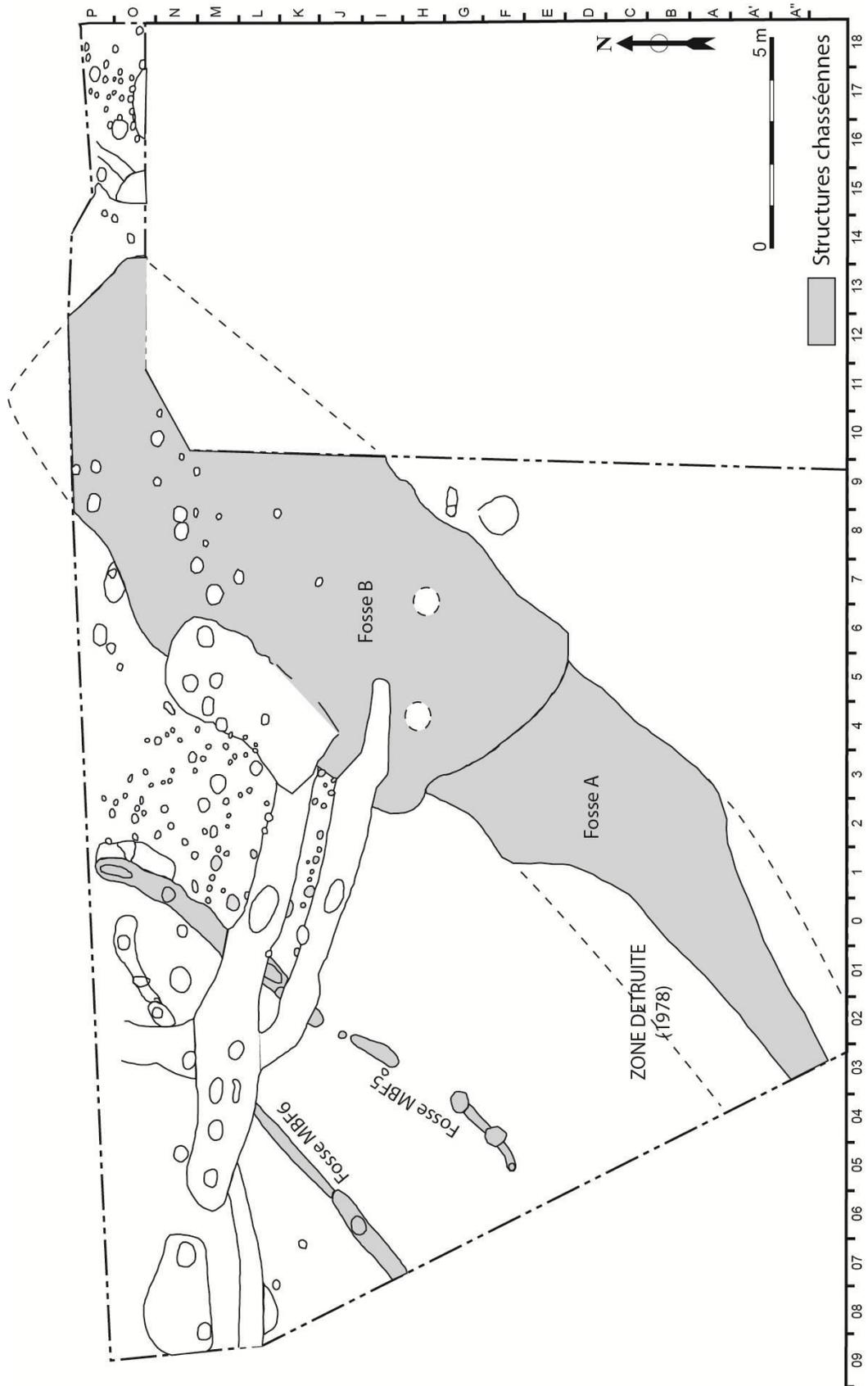


Figure C3. 29 : Plan du secteur B de Beaumont « Le Crot aux Moines » illustrant les deux fosses principales A et B. DAO N. Garmond ; d'après Garmond et Sidéra à paraître.

A (Pellet/Delor) avec 252 tessons représentant 5 individus. Avec entre autres ses coupes carénées et bouteilles typiques, il renvoie **principalement au Chasséen**, aussi bien septentrional que méridional par différents aspects reflétant la position intermédiaire de Beaumont entre ces deux sphères culturelles, et présente des affinités particulières avec le site de Chassey-le-Camp.

La céramique de Beaumont constitue d'ailleurs le corpus de référence pour le Chasséen de l'Yonne. Quelques liens avec la culture antérieure du Cerny ont aussi été mis en évidence, interrogeant les **relations entre le Cerny et le Chasséen**. La collection révèle également quelques spécificités techniques propres à Beaumont, comme par exemple l'utilisation quasi systématique de **dégraissant osseux**, parfois en association avec d'autres inclusions anthropiques (on retrouve quelques cas similaires à Monéteau et à Bonnard), qui pourrait caractériser l'arrivée ancienne du Chasséen dans l'Auxerrois. D'autre part, toutes les étapes de fabrication sont très soignées. L'analyse pétrographique indique que les argiles utilisées pour la fabrication de ces poteries proviennent essentiellement des **terres alluviales de la vallée de l'Yonne**, très localement mais en contexte parfois extérieur à Beaumont indiquant la **circulation d'objets** (matière première ou vase ?), et probablement du **massif du Morvan** dans quelques cas.

**L'industrie lithique**, étudiée par N. Garmond, rattache clairement le site au Chasséen, à travers plus de 3500 pièces issues du secteur B, des fosses de l'enceinte du secteur A et de la structure circulaire. Le mobilier comprend notamment des armatures de flèches, grattoirs, burins, tranchets, lames et éclats en silex (essentiellement régional), mais aussi une armature de flèche en silex orangé importé, deux haches, dont une en dolérite importée à l'état finie du Massif armoricain ou du Massif central, et quelques esquilles en quartz hyalin provenant des Alpes. Ce dernier matériau est plutôt rare dans l'Yonne ; il a également été repéré à Monéteau et Chassey-le-Camp, plus récemment à Gurgy « Les Noisats ». La présence de **matériaux et objets importés** indique une **circulation et des échanges parfois sur de longues distances**. Par ailleurs, le corpus lithique est indéniablement attribué au **Chasséen de Chassey**, avec quelques différences toutefois. Néanmoins, le site est largement ouvert aux influences extérieures comme le montrent certaines caractéristiques évoquant les **sphères septentrionales et méridionales** du Chasséen mais aussi le Cerny ou le Michelsberg. Les 420 outils en contexte représentent la sphère domestique et rappellent le matériel découvert à Monéteau et Bonnard mais la rareté du macro-outillage (nous y reviendrons) évoque une fonction particulière du site. Au demeurant, il est possible de proposer **un phasage des occupations du site** : les fosses A et B du secteur B seraient plus anciennes appartenant à un Chasséen typiques avec des influences Cerny ; l'enceinte du secteur A et la structure circulaire seraient plus récentes, attribuées à un Chasséen apparenté avec le début du Michelsberg (les datations viendront confirmer ce phasage ; cf. V.1.d). D'autre part, la surreprésentation de burins et tranchets dans la **structure circulaire**, de même que la rareté de la céramique, suggérerait une **fonction artisanale** plutôt qu'une unité d'habitation. Au final, le mobilier lithique permet de situer l'occupation chasséenne de Beaumont entre la fin du Cerny-

Barbuise et le début du groupe de Noyen, à savoir **entre 4500 et 4000 avant J.-C.**, en accord avec les datations radiocarbone (cf. V.1.d). La proximité des assemblages avec ceux de Bonnard et Monéteau permettrait d'envisager que les occupants des enceintes de Beaumont aient pu être enterrés dans ces sites voisins.

Seuls quelques **outils de mouture** ont été retrouvés sur le site (étudiés par C. Hamon ; CNRS/UMR 7041 ArScAn) mais leur indigence et leur mauvais état de conservation renseignent peu sur leur utilisation.

Les **outils et la parure en MDA** ont été étudiés par I. Sidéra et A. Legrand-Pineau (USR 3225 – MSH René Ginouvès). Ils proviennent essentiellement du secteur B et sont composés d'outils pointus et tranchants, de perles (dont une sur une vertèbre de poisson), d'une ébauche de crochet rappelant celui de Monéteau (bien que les crochets ne soient pas rares au Néolithique moyen) ainsi que de restes de fabrication et autres objets indéterminés. Ces objets ont été utilisés d'après les traces d'usure et ont pu servir à la préparation et la couture des peaux, à la vannerie ou au tissage. Aucun objet en bois de cerf n'a été découvert mais les outils en os et sur dent s'intègrent bien dans l'univers Chasséen, rappelant une fois encore ceux de Monéteau et de Chassey-le-Camp. Les techno-types rencontrés suggèrent un savoir-faire micro-régional.

### V.1.b. Les datations radiocarbone

Plusieurs datages ont été réalisés sur des **ossements humains et animaux** provenant de différents secteurs et sur un **fragment de charbon** issu du centre de la fosse du secteur B. Ce dernier a donné un intervalle compris entre 4712 à 4442 cal BC. L'ensemble des datations est visible sur la Figure C3. 30 (données inédites, Garmond et Sidéra à paraître). Ces dates ont permis de confirmer le phasage chronologique des différents secteurs proposé sur la base de l'industrie lithique notamment : le secteur B serait plus ancien (phase 1) que le secteur A (phase 2).

Parmi les **ossements humains** analysés, un échantillon ne contenait pas suffisamment de collagène (n°4), un autre renvoie à l'âge du Bronze (n°6), les derniers renvoient à différentes phase du Néolithiques (n°1, 2, 3, 5, 7 et 8 – tous sauf le n°8 ont été sélectionnés dans ce travail pour l'analyse biochimique ; cf. Figure C3. 30).

NB : Il est à noter que pour les besoins de notre étude, tous les échantillons de Beaumont sélectionnés ont été renommés par des codes de laboratoire : de BMT H1 à H15 pour les humains et de BMT F1 à F48 pour la faune (les correspondances sont disponibles en Annexe A11 ; cf. V.2.b).

L'échantillon **n°5** (BMT H11 dans cette étude, secteur A, S13.AII.gh78) est le plus ancien (début du Néolithique moyen : 4682-4457 cal BC), ensuite viennent les **n°1, 2 et 7** (BMT H3, H8 et H13, secteur B, couche 5 Ederlé et secteur indéterminé respectivement) indiquant le troisième quart du V<sup>e</sup>

millénaire (environ 4500-4320 cal BC), puis l'échantillon n°3 (BMT H10, foyer 2, secteur A) de la fin du Ve millénaire (4346-4177 cal BC). Le n°8 enfin, est plus récent, empiétant sur le début du IV<sup>e</sup> millénaire (4236-3986 cal BC).

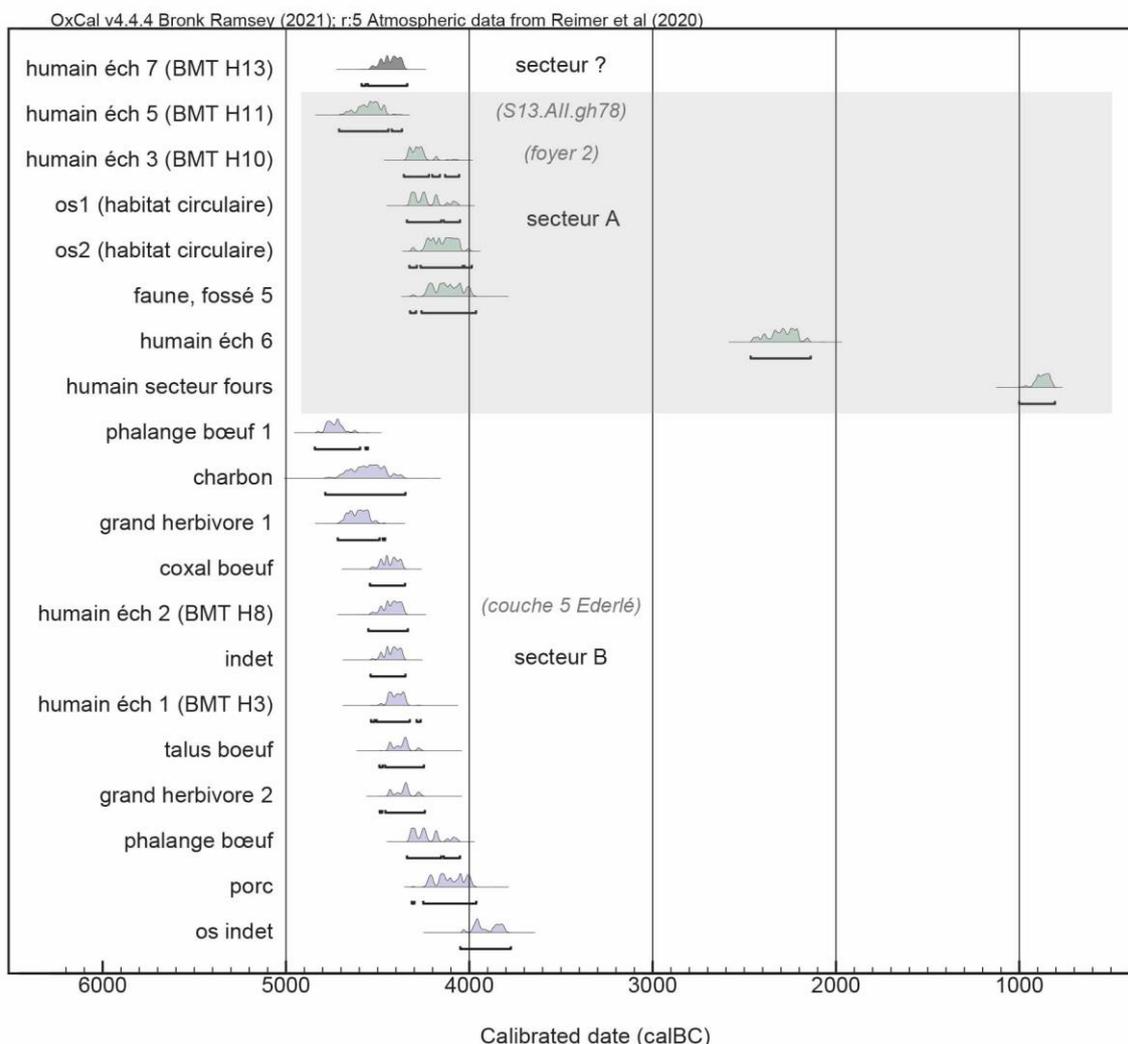


Figure C3. 30 : Histogramme de calibration des dates de Beaumont « Le Crot aux Moines » par secteur, réalisée avec le logiciel libre Oxcal 4.4© Bronk Ramsey, 2021. D'après les données de Garmond et Sidéra à paraître. La couche S13.All.gh78 n'est pas rattachée à la même phase que les autres structures du secteur A. Les indications entre parenthèses « BMT H3 à 13 » correspondent aux codes des échantillons humains analysés dans ce travail.

### V.1.c. L'étude des restes humains : état des lieux

L'étude des restes humains a été réalisée par J.-G. Pariat (Service Départemental d'Archéologie du Val d'Oise, UMR 7041). L'ensemble de la collection a été réexaminé (un tri systématique parmi les restes de faune a permis d'isoler quelques ossements humains supplémentaires) et l'enregistrement revu, numérisé, les plans vectorisés.

Au total, la série se compose de **140 ossements complets, fragmentés ou à l'état d'esquilles attribués au Néolithique**. Ils sont de qualité très variable et proviennent pour la plupart des

interventions de surface de M. Colombet et R. Ederlé, sans indication de provenance. Une autre partie provient des fouilles Pellet/Delor du fossé d'enceinte et seulement 41 restes sont issus des fouilles Merlange/Bodechon du secteur B, dont la plupart sont repérés sur les plans. Parmi ceux-là, 28 ont pu être réexaminés et 23 repérés sur plan.

**L'âge au décès** a pu être estimé dans certains cas à partir du stade de maturation osseuse (Scheuer et Black 2000) par J.-G. Pariat. Nous avons élargi les classes d'âge pour mieux répondre aux exigences méthodologiques retenues dans notre étude (cf. Annexe A11). De plus, nous avons déterminé les deux dents échantillonnées et estimé un âge à partir de la méthode de S.J. Al Qhatani et collaborateurs (2010). La dent BMT H14 (échantillon archéologique n°20) était totalement formée (stade Ac) correspondant à un âge supérieur à 14 ans selon les estimations les plus larges. La racine de la dent BMT H15 (échantillon archéologique n°29) était cassée aux 2/3 permettant d'assurer un stade minimum R<sub>1/2</sub> correspondant pour la M2 à un âge supérieur à 10 ans selon les estimations les plus larges. Ces estimations correspondent à l'âge moyen estimé d'après la méthode de C.F.A Moorrees et collaborateurs (1963).

Compte tenu des conditions d'exhumation des vestiges (importants remaniements dus aux travaux de la gravière ayant donné lieu au sauvetage des vestiges, conditions d'enregistrement et site partiellement fouillé), la série n'est vraisemblablement pas représentative de l'ensemble de la « population » ensevelie. Néanmoins, J.-G. Pariat a pu identifier **un minimum de 7 individus** (NMI de fréquence, d'exclusion par âge et par chronologie) – nous en avons échantillonné cinq, deux étant perdus (cf. V.2.b). Il apparaît que la majorité des ossements dont l'âge a pu être estimé appartient à des **adultes**. Au moins **un « enfant » et un « adolescent »** ont pu être identifiés (la précision de l'âge n'est pas indiquée). Le taux de représentation des restes très bas indique qu'**une faible partie des corps est représentée**.

**L'étude de la répartition spatiale** des restes humains dans le secteur B montre que l'ensemble des vestiges se trouvaient exclusivement dans les fosses A et B, en majorité dans la fosse B, et mélangés aux autres restes (céramique, faune, pierres et charbon), ce qui témoigne de la **nature détritique de l'assemblage**. Les blocs crânio-faciaux sont légèrement surreprésentés mais leur capacité de fragmentation et leur facilité de détermination sont telles que cela n'est pas surprenant dans ce contexte. En revanche, **les membres supérieurs sont totalement absents** alors même que l'on trouve des éléments de la cage thoracique (vertèbres et côtes) et que les membres inférieurs sont bien représentés. Quelques **liaisons ostéologiques et appariements** ont pu être effectués suggérant que des **portions de cadavres en partie décomposés** ont pu être déposés, dans la fosse B notamment. D'après le stade de maturation osseuse observé (Scheuer et Black 2000) **quatre sujets dans le secteur B** ont pu être identifiés : un adulte, un adulte jeune, un adolescent et un enfant.

Une **trace de découpe** réalisée sur os « frais » a été observée sur un **fémur d'enfant** (face antérieure, extrémité distale), ce qui est peu courant en contexte Chasséen septentrional, mais pas exceptionnel (Pariat 2007). Elle indique peut-être la volonté de désarticuler le genou, sans plus d'éléments de compréhension de ce geste. Des comparaisons de ce type de pratiques peuvent aussi être trouvées sur la façade atlantique (Boulestin *et al.* 1996). Quoi qu'il en soit, la présence de restes humains en contexte de rejet domestique interroge (cf. Pariat 2016).

Nous citerons en conclusion J.G. Pariat : « *la présence de restes humains associés à des comblements de fossé d'enceinte néolithique est récurrente, notamment sur les sites chasséens du nord de la France (Debut et Masset 1991). À Beaumont, au moins sept sujets sont représentés par au moins un reste pour environ 700 ans d'occupation. Rien ne permet de connaître les choix qui ont conduit au dépôt des restes de ces individus sur le site. Par contre, ils ont abouti à une mise à l'écart de la nécropole communautaire, à une époque et dans un secteur (Serein/Baulche) où il existe des ensembles funéraires contemporains de l'enceinte (Chambon et al. 2013).* » (dans Garmond et Sidéra à paraître ; voir aussi Pariat 2016).

L'analyse biochimique permettra de replacer ces individus dans le contexte local du point de vue des pratiques alimentaires et peut-être d'identifier des comportements distincts, pour les sujets retrouvés à Beaumont, par rapport à ceux qui ont été mis au jour en contexte funéraire. Les attentes sont grandes quant à ces résultats.

#### V.1.d. La faune

L'étude des restes osseux animaux a été menée par L. Paleau dans le cadre d'un mémoire universitaire de Master 2 (Université de Dijon, inédit). Elle a pour but d'appréhender les **pratiques alimentaires** et l'origine des ressources carnées des néolithiques de Beaumont à travers l'identification des espèces sauvages et domestiques et leur fonction (recherche de viande ou de matière première, pour les outils par exemple, pour les ressources chassées, ou production de viande, de lait ou mixte pour les ressources d'élevage). À ce jour, le gisement a livré presque 7000 restes (dont presque 3000 identifiés) pour un poids total de 58 kg, répartis dans tous les secteurs et structures. Il existe néanmoins des différences entre les secteurs A et B en termes de nombre de restes déterminés (189 contre 2623 respectivement) comme de proportions des espèces. Ces différences pourraient indiquer des fonctions diverses entre les structures des deux secteurs.

Le **secteur B** est le mieux représenté avec une plus grande diversité d'espèces et une meilleure conservation osseuse. Les **animaux domestiques sont largement majoritaires** avec 88% des os déterminés comprenant du bœuf principalement, puis du porc, quelques caprinés et 4 chiens. Les traces de découpes et les courbes d'abattage indiquent que **l'exploitation du bœuf domine** (à plus de 80% en termes de poids de viande et abats d'après la définition de J.-D. Vignes, 1988) pour la

production mixte de viande et de lait, peut-être aussi pour la force de travail. L'exploitation laitière pourrait être particulièrement importante si l'on en croit le profil d'abattage plus important pour les jeunes de moins de 2 ans (abattage « post-lactation » : les veaux sont maintenus en vie pour déclencher l'éjection du lait dans le pis jusqu'à leur sevrage) et des bêtes de réforme entre 4 et 9 ans, alors que les bovinés tués pour la viande entre 2 et 4 ans sont moins nombreux. Vient ensuite la production de **viande de porc**, dans une moindre mesure. Les cochons peuvent être abattus jeunes pour la recherche de viande tendre. Les **caprinés sont moins présents** et vraisemblablement élevés pour leur viande et leur lait, ainsi que pour leur toison potentiellement. Les **chiens** n'ont a priori pas été consommés (aucune trace de découpe n'a été relevée) et ont peut-être été utilisés pour la chasse du petit gibier ou la garde des troupeaux entre autres activités. Leur jeune âge (trois ont environ 4 mois, le dernier a plus d'1,5 an) ne permet pas d'en savoir plus quant à leur possible rôle aux côtés des humains.

Les **ressources chassées** sont très minoritaires mais ont certainement complété et varié l'alimentation, en plus de leur probable rôle symbolique. Le **cerf** est la principale espèce représentée, suivie du **sanglier** et du **chevreuil**, portant des traces de décarnisation de l'os. D'autres espèces sont représentées, comme le **lièvre**, les **oiseaux** (une oie et un merle notamment) et le **poisson** (30 os de brochet et cyprinidés), dont les proportions suggèrent qu'elles aient pu être capturées régulièrement. La pêche notamment, est envisagée comme supplément des autres ressources. L'attribution stratigraphique des restes ichtyologiques semble toutefois incertaine et ne permet pas de certifier que ces poissons soient strictement contemporains des chasséens. De même, des restes de chevaux ont été retrouvés mais pourraient être postérieurs aux occupations chasséennes. Enfin, d'autres espèces comme le **castor**, le **renard** et **autres petits gibiers** ont été retrouvés dans ce secteur et ont pu faire l'objet d'une chasse ponctuelle, pour leur consommation, leur fourrure ou leur peau. Un hérisson et un rongeur s'ajoutent au décompte des espèces mais sont probablement intrusifs au vu de leur position stratigraphique (proche de la surface ou indéterminée).

NB : Parmi ces vestiges, tous n'étaient pas marqués et il ne nous a de toute façon pas été possible d'accéder à la base de données faunique en temps voulu. Ainsi, nous avons dû procéder à une nouvelle identification sur place – et a posteriori pour déterminer le NMI en présence avec l'aide de deux archéozoologues (cf. V.2.b) – et seules les espèces domestiques et quelques restes de cervidés ont pu être échantillonnés. Les restes de poissons en particulier, identifiés par Benoit Clavel (CRAVO et UMR 7209 AASPE), n'ont pas été trouvés.

Le **secteur A** est moins bien défini du fait d'un effectif plus faible et d'une assez mauvaise conservation des ossements (nombreuses traces de radicelles notamment) empêchant d'observer toute trace de découpe en surface. Il est néanmoins possible de voir que les **espèces domestiques** sont encore plus **prépondérantes** que dans le secteur B, avec seulement deux restes de cerf appartenant à la sphère sauvage. L'élevage est représenté par le bœuf, le porc et les caprinés, et les profils d'abattage,

bien que peu pertinents du fait des petits effectifs, pourraient indiquer une gestion plutôt tournée vers la production bouchère.

La comparaison de ces données avec plusieurs sites régionaux suppose que Beaumont ne se départ pas des traditions généralement observées au Néolithique moyen dans la moitié nord de la France.

### V.2. Le matériel sélectionné

#### V.2.a. État de la collection

Aujourd'hui, l'ensemble de la collection a été réunie au dépôt de Passy (Yonne) et se trouve sous l'autorité du Service Régional d'Archéologie de Bourgogne. Compte tenu des conditions d'enfouissement (os épars dans les fossés d'enceintes, mélangés à la faune et autres vestiges, et diversité des structures ayant livré des restes), des conditions d'exhumation (profonds remaniements, ramassage de surface par divers intervenants) puis de stockage des restes avant leur rassemblement au dépôt de Passy, l'état des ossements est relativement bon bien que très fragmenté. Notamment, les radicelles ont laissé peu de traces sur les surfaces osseuses.

#### V.2.b. Sélection des individus et type d'échantillonnage

L'Annexe A11 recense la totalité des individus sélectionnés pour les analyses biochimiques et en présente les principales caractéristiques archéologiques. Au total, **15 humains** et **46 animaux** ont été sélectionnés parmi tous les secteurs (Tableau C3. 13). L'échantillonnage osseux pour l'analyse du collagène est décrit dans la publication (cf. Chap10.IV.1) et reporté ci-après. À celui-ci nous avons ajouté la sélection de plusieurs dents, 2 pour les humains et 18 pour les animaux. Il n'a pas toujours été possible de réaliser un double prélèvement sur os et sur dent pour un même individu, les restes étant isolés. Seules les mandibules et fragments de maxillaires animaux ont pu faire l'objet d'un double prélèvement.

secteur \ espèce	humains	bovinés	caprinés	suidés	cervidés
secteur B	8	8	5	10	3
secteur A Toussac	2	-	-	-	-
secteur A foyer 2	1	-	-	-	-
secteur A - s13 78 A II gh	1	-	-	-	-
couche IV	-	2	2	1	-
couche 5 Ederlé	1	4	3	2	1
habitat circulaire	-	1	2	2	-
indéterminé	2	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>4</b>

Tableau C3. 13 : Nombre d'individus sélectionnés par espèce et par secteur du site de Beaumont "Le Crot aux Moines".

- *Les humains*

Parmi les humains, **13 individus** ont fait l'objet d'un **prélèvement osseux**, **2** d'un **prélèvement dentaire** (M2). Les restes étant isolés, aucun individu n'a pu faire l'objet d'un double échantillonnage osseux et dentaire. D'autre part, seuls les humains dont l'attribution au Néolithique est fiable ont été sélectionnés. Aucun reste humain ne provient de l'habitat circulaire ni de la couche IV (Tableau C3. 13). Le Tableau C3. 14 résume les échantillons humains sélectionnés.

ID	groupe	sexe	âge au décès	os	dent
BMT H1	secteur B - fossé B	?	9-10 ans	fémur G	
BMT H2	secteur B - fossé B	?	adulte	fémur D	
BMT H3	secteur B - fossé B	?	adulte jeune	fémur G	
BMT H4	secteur B - fossé B	?	adulte ?	tibia D	
BMT H5	secteur B - fossé B	?	adulte	VT	
BMT H6	secteur B - fossé A	?	adulte ?	côte D	
BMT H7	secteur B	?	adolescent	côte D	
BMT H8	couche 5 Ederlé	?	adulte	BCF	
BMT H9	secteur A - Toussac	?		côte	
BMT H10	secteur A - foyer 2	?		BCF	
BMT H11	secteur A - s13 78 A II gh	?	adulte	côte	
BMT H12	secteur -	?	adulte	humérus D	
BMT H13	secteur ? - ?	?	adulte	MT4 G	
BMT H14	secteur B	?	>14 ans		M2supD?
BMT H15	secteur A - Toussac	?	>10 ans		M2infG

**Tableau C3. 14 : Liste des échantillons humains de Beaumont "Le Crot aux Moines" sélectionnés dans ce travail.**

Pour les prélèvements osseux, « [...] les échantillons humains (notés de H1 à H13) ont été sélectionnés en collaboration avec J.-G. Pariat, qui a mené l'étude anthropologique des ossements, de manière à représenter un maximum de sujets ou d'ensembles osseux pouvant appartenir à des individus différents (fig. 156). Les sujets 1, 2, 3, 4 et 7 identifiés précédemment ont été sélectionnés (échantillons H1, H3, H10, H11 et H13 ; les sujets 5 et 6 ayant été perdus). Les échantillons H2, H4 et H5 représentés par un fémur, un tibia et une vertèbre ayant été retrouvés dans la même zone du fossé B (carrés N10, N11 et P11) ont été sélectionnés pour tenter de savoir si on pouvait les différencier de sujets déjà identifiés, sur la base des résultats isotopiques. Les échantillons H6 à H9 et H12 ont, eux, été sélectionnés parce qu'ils proviennent de secteurs différents des autres. Le but est de savoir s'il existe des variations isotopiques entre les secteurs et éventuellement, ici encore, d'individualiser de nouveaux sujets sur la base des résultats isotopiques. » (L. Rey dans Garmond et Sidéra à paraître ; cf. Chap10.IV.1).

À ces échantillons s'ajoutent **deux dents** (échantillons H14 et H15). Il s'agit de deux **deuxièmes molaires permanentes (M2)** appartenant à **deux individus distincts** qui ne peuvent toutefois être rattachées ou différenciées des individus précédemment identifiés pour les prélèvements osseux. Ces

dents proviennent des secteurs B et A-Toussac, respectivement, sans plus de précision. Bien qu'elles ne puissent être individualisées avec certitude par rapport aux sujets représentés par un fragment osseux, elles ont été échantillonnées dans le but d'obtenir un signal « représentatif du site » pour la mesure du strontium isotopique et des éléments traces par ablation laser dans l'émail (cf. Chap4.IV). Le but n'est pas de tracer un double signal individuel ici, pour comparer l'enfance et l'âge adulte, mais bien d'avoir des données de comparaison pour replacer le site par rapport aux autres sites du corpus quant aux proxies mesurables uniquement dans l'émail dentaire.

Les **modalités de prélèvements** suivent le protocole mis en place pour le site de Gurgy « Les Noisats » : prélèvement de la corticale, hors zone diagnostique, si possible sur une extrémité cassée ou en ouvrant une « fenêtre » dans la diaphyse d'un os long à la Dremel©. À la différence des sites précédents, nous n'avons pas pu choisir le type d'os prélevé.

Les **dents** ont été photographiées. L'observation des VA, de l'état sanitaire et du stade de minéralisation, ainsi que les mesures ont été réalisées et toutes les données sont disponibles en Annexe A12. Les principales informations sont résumées dans le Tableau C3. 15. Pour la dent H14, nous avons prélevé le tartre et réalisé une empreinte occlusale pour l'étude future de la micro-usure dentaire (Annexe A5 et Annexe A6).

Id	Prélèvement		Caries (Bocquentin 2003) <sup>1</sup>			Usure (Molnar 1971) <sup>2</sup>			Usure (Smith 1984) <sup>2</sup>	Tartre (Brothwell 1965) <sup>1</sup>			stade de maturation (Dermirjian et al 1973)
	dent prélevées	localisation prélèvement	situation (c/col/r)	face (O/M/D/V/L)	sévérité (0/1/2/3)	degré	direction	forme	degré	situation (c/col/r)	face (O/M/D/V/L)	sévérité (0/1/2/3)	
BMT H14	M2supD?	isolée			0	?	?	?	1	c/col	VD	1	H
BMT H15	M2infG	isolée	c	V	2	2	36	1	1			0	NO

**Tableau C3. 15 : Tableau de synthèse des principales caractéristiques dentaires des échantillons de Beaumont « Le Crot aux Moines » analysés dans ce travail. <sup>1</sup>d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Bocquentin 2003 et Brothwell 1965), <sup>2</sup>d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Smith 1984) et M. Le Luyer (2016 ; d'après Molnar 1971 et Smith 1984).**

- *La faune*

« Les restes animaux ont été sélectionnés de manière à n'échantillonner que des individus bien différenciés par espèce et par secteur, c'est-à-dire de sorte à n'échantillonner qu'une seule fois le même individu (en supposant qu'un même individu ne puisse être retrouvé dans deux secteurs séparés). Pour ce faire, un NMI a été déterminé sur la base de l'espèce, du secteur, de l'âge et du format, sur la base du travail de Ludivine Paleau (ce volume) et avec l'aide de Jean-Baptiste Mallye (UMR 5199-PACEA) et Pierre Magniez (UMR 7269-LAMPEA) pour la détermination des restes non marqués. » (L. Rey dans Garmond et Sidéra à paraître ; cf. Chap10.IV.1).

La sélection compte **15 bovinés, 12 caprinés, 15 suidés et 4 cervidés** répartis sur les différents secteurs mais aucun reste ne provient de l'enceinte ni des foyers du secteur A (cf. Tableau C3. 14,

ID	groupe	espèce	âge au décès	os	dent
BMT F1	secteur B - fossé B	suidé		humérus G	
BMT F2	secteur B - fossé A	boviné		talus G	
BMT F3	secteur B - fossé A	suidé	adulte	humérus G	
BMT F4	secteur B - fossé B	suidé	tout jeune	humérus D	
BMT F5	secteur B - fossé B	suidé		humérus D	
BMT F6	secteur B - fossé A	capriné	juvénile < 50-55 mois	tibia D	
BMT F7	secteur B - fossé B	suidé	adulte	humérus G	
BMT F8	secteur B - fossé A	boviné		talus D	
BMT F9	secteur B - fossé B	boviné		talus G	
BMT F10	secteur B - fossé A	capriné	adulte	ulna G	
BMT F11	secteur B - fossé B	cervidé		talus G	
BMT F12	secteur B - fossé B	boviné		talus D	
BMT F13	secteur B - fossé B	suidé		humérus G	
BMT F14	secteur B - fossé A	cervidé		talus D	
BMT F15	secteur B - fossé B	capriné	adulte	ulna G	
BMT F16	secteur B - fossé B	capriné		crâne	
BMT F17	couche IV	boviné		MTC G	
BMT F18	couche IV	capriné	adulte jeune	mandibule D	M1infD
BMT F19	couche IV	capriné	entre 12-40 mois	humérus G	
BMT F20	couche IV	suidé		tibia G	
BMT F21	couche 5 Ederlé	boviné	jeune < 24-30 mois	MTT D	
BMT F22	couche 5 Ederlé	boviné	adulte	MTT G	
BMT F23	couche 5 Ederlé	boviné	adulte	MTT D	
BMT F24	couche 5 Ederlé	boviné		mandibule D	M1infD
BMT F25	couche 5 Ederlé	cervidé		radius D	
BMT F26	couche 5 Ederlé	capriné	adulte	mandibule	M2infG
BMT F27	couche 5 Ederlé	capriné	jeune adulte	mandibule	d4infD
BMT F29	couche 5 Ederlé	suidé	adulte	MTT III G	
BMT F30	couche 5 Ederlé	suidé	adulte	humérus D	
BMT F31	habitat circulaire	boviné	adulte	talus	
BMT F32	habitat circulaire	capriné	<1 an	mandibule	M1infG
BMT F33	habitat circulaire	suidé	jeune adulte	radius	
BMT F34	habitat circulaire	suidé		tibia	
BMT F35	secteur B	boviné	adulte		M3supG
BMT F36	secteur B - fossé B	boviné	adulte		M1ou2infD
BMT F37	secteur B - fossé A	boviné	adulte		P4supG
BMT F38	secteur B - fossé A	boviné	jeune < 1an non sevré	mandibule	M1infD
BMT F39	secteur B - fossé A	cervidé	adulte		P3infG
BMT F40	secteur B	capriné	adulte		M1ou2supG
BMT F41	secteur B - fossé A	suidé	adulte	maxillaire D	M2supD
BMT F42	secteur B - fossé A	suidé	adulte	mandibule G	M2infG
BMT F43	secteur B	suidé			M3supG
BMT F44	secteur B - fossé A	suidé	juvénile	maxillaire D	M1supD
BMT F45	couche IV	boviné			M3infD
BMT F46	couche 5 Ederlé	capriné		?	MsupD
BMT F48	habitat circulaire	capriné	adulte		M3infG

Tableau C3. 16 : Liste des échantillons animaux de Beaumont "Le Crot aux Moines" sélectionnés dans ce travail.

p.267). Ces derniers n'étant pas marqués ni triés par secteur, il ne nous a pas été possible d'en prélever en étant sûr de leur attribution stratigraphique. Les restes d'autres espèces ont également échappé à notre sélection du fait de l'absence de marquage et de tri d'une partie des vestiges déterminés. Le Tableau C3. 16 présente tous les échantillons animaux prélevés à Beaumont.

Une **majorité d'os** a été prélevée : **38** au total pour toutes les espèces animales échantillonnées, provenant du secteur B, de la couche IV, de la couche 5 prospectée par Ederlé et de l'habitat circulaire. Dans **10 cas**, il a été possible de prélever **une dent associée à l'os** mandibulaire ou maxillaire appartenant à un même individu. En supplément, **8 dents isolées** et identifiées comme appartenant *a priori* à des individus différents des précédents ont également été prélevées, pour obtenir un maximum de mesures du strontium isotopique et des éléments traces à partir de l'émail dentaire pour ce site et afin d'avoir un corpus faunique de comparaison pour l'ensemble du corpus local (les échantillons de faune provenant des autres sites étant plus rares voire inexistant).

De même que pour la faune de Gurgy « Les Noisats » (cf. II.2.b), nous avons privilégié le prélèvement sur des molaires lorsque cela a été possible mais d'autres dents ont aussi été échantillonnées et représentent **différentes périodes de la vie de ces animaux** (Annexe A11). Le signal de l'allaitement pourra donc être visible dans certains cas et devra être pris en considération lors de l'interprétation des résultats. L'âge estimé correspondant aux échantillons dentaires analysés est donné dans le Tableau C8. 7 (cf. Chap8.II.6).

- *Synthèse*

Le Tableau C3. 17 synthétise le nombre d'individus représentés par l'échantillonnage et le nombre de restes osseux et dentaires concernés.

BMT	effectif total	effectif individus sélectionnés				total os	total dents
		total	prélèvement os + dent	prélèvement os seul	prélèvement dent seule		
humains (indét.)	NR	15	-	13	2	13	2
<b>faune</b>	<b>NR</b>	<b>46</b>	<b>10</b>	<b>28</b>	<b>8</b>	<b>38</b>	<b>18</b>
bovinés	NR	15	2	9	4	11	6
caprinés	NR	12	5	5	2	10	7
suidés	NR	15	3	11	1	14	4
cervidés	NR	4	-	3	1	3	1
<b>TOTAL</b>	<b>NR</b>	<b>61</b>	<b>10</b>	<b>41</b>	<b>10</b>	<b>51</b>	<b>20</b>

Tableau C3. 17 : Tableau de synthèse de l'échantillonnage des sujets humains et animaux de Beaumont "Le Crot aux Moines". Le nombre total d'individus pour l'ensemble des structures est "non renseigné" (NR).

### V.3. Synthèse et questionnements spécifiques au site

#### **Beaumont « Le Crot aux Moines » (BMT)**

Fouille ancienne et documentation inégale.

Enceinte et diverses structures rattachées au Chasséen « de Chassey » sur la base du mobilier céramique et lithique. Pas de vocation funéraire. Restes humains épars dans les fossés d'enceinte, mélangés au reste du matériel détritique.

Secteur A (Pellet/Delor) : enceinte, habitat circulaire (ou unité artisanale), structures de combustion  
→ plus récent (phase 2) ?

Secteur B (Merlange/Bodechon) : fosses A et B, contenant la majorité du matériel  
→ plus ancien (phase 1) ?

Assemblage faunique indiquant la prédominance de la sphère domestique et la prépondérance des bovins (production bouchère et laitière, déséquilibre entre les secteurs) puis celle du porc et enfin l'exploitation (mixte ?) des ovicaprins.

#### **Principaux questionnements abordés dans ce travail :**

Caractérisation du régime alimentaire : place des différentes espèces animales dans le régime des humains ? Identification de la consommation de poisson ? de produits laitiers ?

Les animaux ont-ils une signature différente de ceux des autres sites révélant une gestion différente de l'élevage ? des environnements variés ?

Existe-il des différences entre les secteurs témoignant de fonctions particulières ou phases distinctes ?

Quelle est la place des humains (relativement à la faune) par rapport à ceux des autres sites inhumés en contexte funéraire ? Ont-ils eu accès aux mêmes ressources localement ou viennent-ils d'ailleurs ?

Existe-il des similitudes avec les autres sites à affinité chasséenne (Mon et Bon) ? Quels parallèles avec les sites à affinité Cerny ? Existe-il des comparaisons extra-régionales ou ce site s'inscrit-il dans le schéma local ?

## VI. Bonnard « Le Poirier » (Bon)

### VI.1. Le site

Le petit ensemble funéraire de Bonnard « Le Poirier », anciennement et partiellement fouillé, comprend au moins deux sépultures dont une « à étage » recueillant **quatre individus adultes superposés**, probablement déposés successivement dans un coffre sur lequel avait été déposé à deux reprises (pour deux inhumations) un vase contenant du mobilier au niveau des pieds des défunts. Cette sépulture en **coffre**, rappelant la tombe 99-548 de Monéteau, est attribuée au **Chasséen**. La reprise récente de l'étude de Bonnard fait l'objet d'une publication en cours (voir Chambon *et al.* 2009), à laquelle nous avons collaboré (Chambon *et al.* en préparation-a).

Le site de Bonnard, le plus au nord de la microrégion, est localisé sur l'autre rive du Serein (au nord) par rapport à Beaumont (cf. Figure C3. 1, p.188).

#### VI.1.a. Découverte et contexte d'étude

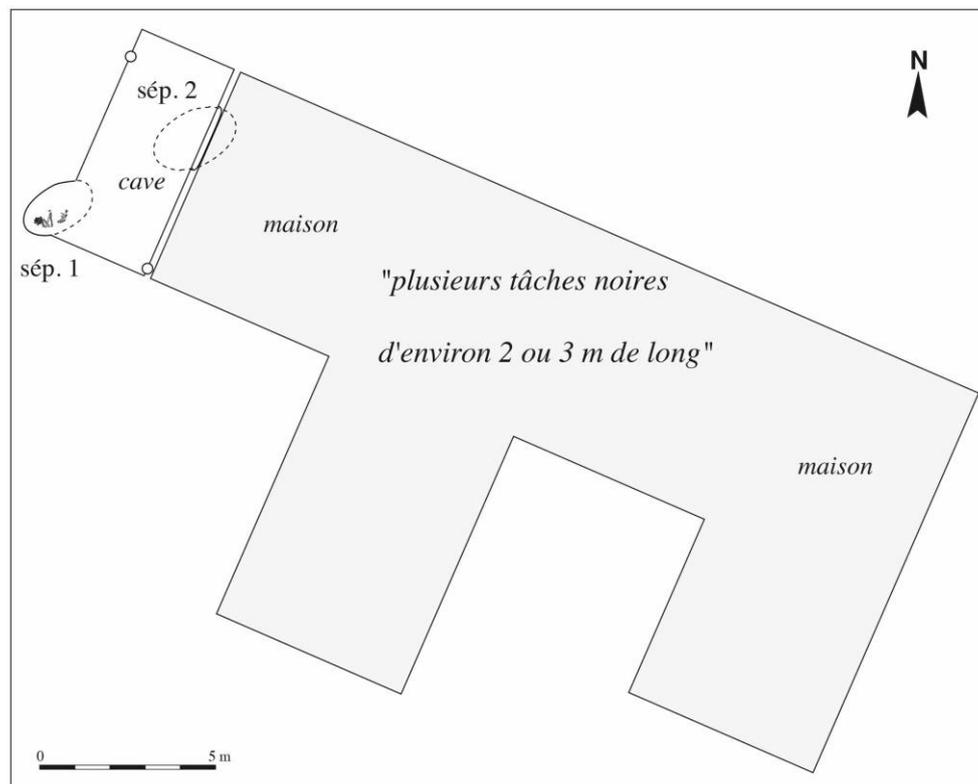


Figure C3. 31 : Plan du site de Bonnard « Le Poirier ». DAO : Ph. Chambon ; d'après Chambon *et al.*, 2009.

Le gisement a été découvert en 1987 à l'occasion du creusement d'une cave chez un particulier qui a conduit à la fouille, par l'Abbé Merlange, de deux (ou trois ?) sépultures et quatre fosses et trous de poteaux (Figure C3. 31 ; Merlange et Poulain 1991). La reprise de la documentation, d'excellente

qualité pour l'époque, s'est toutefois avérée fastidieuse et une partie des ossements n'a pas été retrouvée. En l'état, il semblerait que le site comporte plusieurs autres fosses, sans doute sépulcrales et préservées, sous la maison (elles auraient été identifiées lors de la construction de celle-ci). Les restes humains ont été étudiés à l'époque par T. Poulain. La présence de quatre sujets dans une même fosse avait valu au site l'appellation de sépulture collective, attribuée à une phase finale du Chasséen (Seine-Oise-Marne). Une reprise de la documentation par C. Kowalyk-Mahr (Université Paris 1) dans le cadre d'un Master 2 universitaire en 2007 (inédit) et plus généralement par Ph. Chambon propose une réévaluation de l'ensemble du gisement.

### VI.1.b. Les sépultures de Bonnard

- *La sépulture 1 « à étage »*

La sépulture 1 constitue la structure principale du gisement et revêt un caractère particulièrement original. Elle contient **quatre sujets adultes** ayant été déposés successivement les uns par-dessus les autres, en quatre temps (Figure C3. 32). Ces derniers sont généralement séparés les uns des autres par une couche de sédiment et plusieurs ont été perturbés par des interventions humaines liées au fonctionnement de la sépulture. La restitution des gestes, si elle n'est pas simple, a néanmoins permis aux auteurs de proposer un enchaînement de **réouvertures successives de la tombe** pour y déposer les nouveaux arrivants. La première inhumation était probablement insérée dans un **coffre**, sur lequel devait être disposé un vase en céramique contenant du mobilier « en offrande ». Ce vase, une **écuelle carénée** typique du Chasséen bourguignon (cf. VI.1.c), a été retrouvé renversé au niveau des pieds, son contenu en dessous. On observe le même phénomène au niveau des ossements du troisième inhumé : un vase contenant du mobilier (cf. VI.1.c) a basculé au niveau des jambes.

Les quatre sujets ont la tête au nord-est, trois reposent repliés sur leur côté gauche, un (le troisième inhumé) sur son côté droit (Annexe A13). Cette sépulture s'apparente sans aucun doute à une « tombe à étage » telle que définie par Ph. Chambon et J. Leclerc (2007, p291). L'étude taphonomique indique plusieurs recreusements de la fosse, avec un dérangement du deuxième individu lors du dépôt du 3<sup>e</sup> inhumé, indiquant que la tombe n'avait probablement pas encore été remblayée sur le sujet 2 à ce moment-là. Les sujets 1 et 3 n'ont pas été dérangés par les néolithiques lors des inhumations successives. Un possible 5<sup>e</sup> sujet dont il ne resterait qu'un pied, arasé par les labours modernes (le 4<sup>e</sup> étant déjà passablement endommagé par les labours), pourrait avoir été déposé ensuite. Cependant, la position de ces ossements par rapport à la sépulture est inconnue et il n'est aujourd'hui pas possible de se prononcer à ce sujet.

Un parallèle évident peut être fait avec la **sépulture 99-548 de Monéteau**, sépulture à étage présentant un coffre et une coupe carénée au niveau des pieds du défunt. La présence d'un coffre pour la première inhumation, ainsi que la position fléchie sur le côté gauche, rappelle le phénomène « Chamblandes ».

Cette inhumation s'intègre vraisemblablement dans une nécropole plus grande. Le matériel chasséen retrouvé souligne sa parenté avec Monéteau.

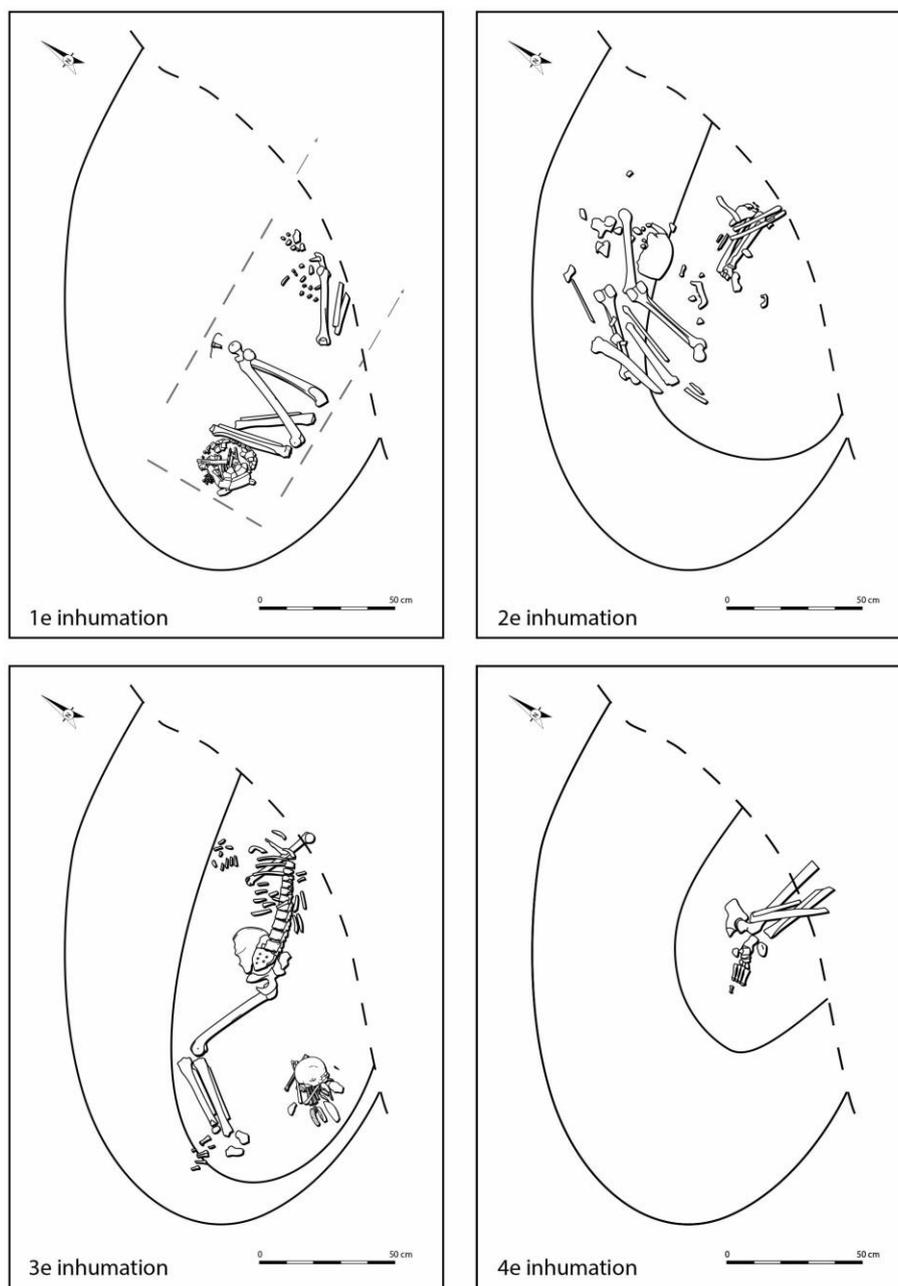


Figure C3.32 : Sépulture 1 de Bonnard « Le Poirier ». DAO : Ph. Chambon ; d'après Chambon *et al*, 2009.

- *La sépulture 2 : « petite fosse près de la maison »*

Les données concernant la deuxième sépulture, connue sous le nom de « Petite fosse près de la maison », sont plus limitées. Si A. Merlange évoque les restes d'au moins trois sujets, T. Poulain qui les a étudiés ne mentionne que **deux individus**. Il ne nous est parvenu qu'un fémur et deux dents, ces dernières appartenant à deux sujets différents. Les relevés indiquent que cette tombe se trouve dans le même axe que la précédente, toutes deux alignées selon une composante nord-est/sud-ouest. Les informations relatives à cette sépulture s'arrêtent là.

- *Une troisième sépulture ?*

Les textes parlent d'une fosse « côté clôture jardin » contenant trois sujets, mais il n'est pas possible de savoir s'il s'agit de la sépulture 1 ou d'une autre fosse. D'après l'étude de T. Poulain reprise par C. Kowalyk, il pourrait s'agir d'individus adultes représentés par 3 mandibules partiellement conservées. La possible confusion avec les deux autres fosses ne doit pas être écartée.

### VI.1.c. Le mobilier et les comparaisons chronoculturelles

Le mobilier a été étudié par K. Meunier, F. Convertini, A. Augereau et S. Bonnardin. Il comprend essentiellement **deux vases en céramique** associés aux **inhumations 1 et 3** de la **sépulture 1**, dans lesquels étaient initialement déposés, en toute vraisemblance, **27 et 17 pièces lithiques** respectivement, ainsi que des **éléments de parure** (Annexe A13).

**Le mobilier céramique** comprend deux vases, une écuelle carénée et un gobelet à inflexion (Figure C3. 33), dont les pâtes proviennent (d'après l'origine de la terre et des inclusions) de la vallée de l'Yonne. L'auteur précise que la première provient, à l'état fini, du secteur de Monéteau. L'utilisation d'os brûlé comme dégraissant (additionné de chamotte pour la première) rappelle les vases de Monéteau et Beaumont, témoignant peut-être d'un héritage Cerny et indiquant ainsi une étape ancienne du Chasséen. Ce mobilier suggère d'attribuer sinon le site, au moins la sépulture, au Chasséen de Chassey. Le lien avec Beaumont, à moins d'un kilomètre sur l'autre rive du Serein, est particulièrement patent.

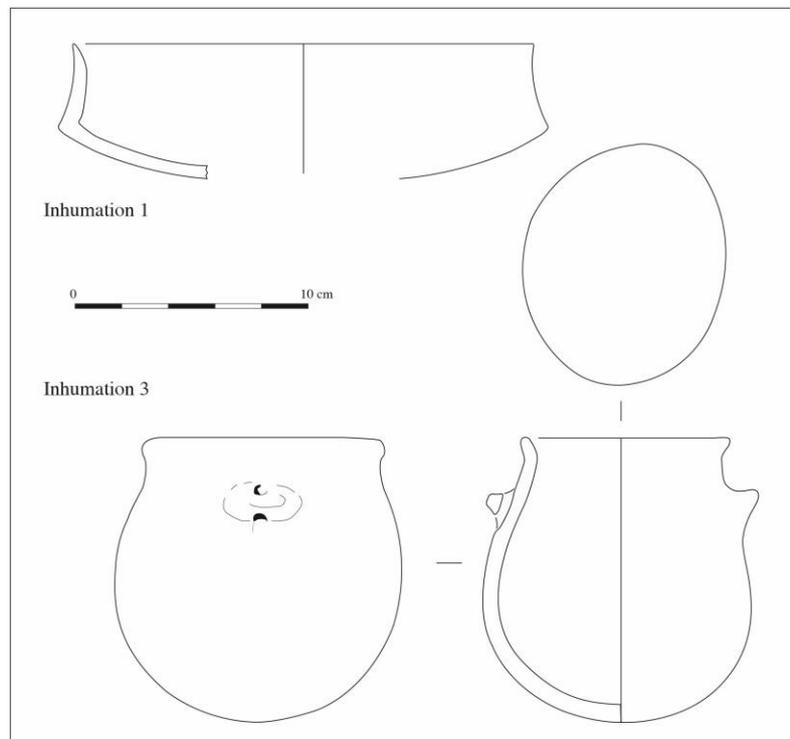


Figure C3. 33 : Proposition de reconstitution du mobilier céramique retrouvé en association avec les défunts de la sépulture 1 de Bonnard «Le Poirier». DAO : K. Meunier, d'après Chambon *et al*, 2009.

Le **mobilier lithique** compte près d'une cinquantaine de pièces en silex local (nombreuses lames et éclats, un grattoir, un racloir, une possible chute de burin), principalement réparties entre les deux inhumations. Si leur composition diffère (beaucoup de lames associées à la première inhumation, beaucoup d'éclats associés à la troisième), tous les objets sont relativement ubiquistes, avec peu d'outils finis. Ce type de mobilier est retrouvé dans tout le Néolithique moyen, mais l'assemblage rappelle particulièrement ceux de la vallée et peut être comparé avec le mobilier retrouvé très localement à BMT, GLN et CHI-Pat, mais aussi à Escollives-Sainte-Camille, Gron et Passy. Contrairement aux sites voisins néanmoins, aucune pièce « remarquable » n'a été retrouvée à Bonnard.

L'étude de l'**industrie en matière dure animale** est en cours (I. Sidéra).

**Les éléments de parure** étaient certainement déposés dans les vases et non sur les corps des défunts, reflétant davantage une offrande qu'une réelle parure funéraire. D'une part, trois **défenses de suidés** étaient associées aux deux inhumations (1 et 3). Deux étaient perforées, dont une décorée avec des cupules de perforation, rappelant le pendentif en forme de chouette retrouvé à Monéteau. Si les défenses de suidé sont généralement associées aux hommes, comme c'est le cas à Monéteau, le sexe des défunts de Bonnard n'est pas connu (cf. VI.1.e). Ce type de dépôt est assez fréquent dans la région – on en rencontre à GLN et Mon, et il est typique des cultures rhénanes – mais le décor en cupules est tout à fait inédit. D'autre part on trouve des **coquilles littorines**, un gastéropode marin provenant de la Manche ou de l'Atlantique. Reste à établir si elles proviennent du contact avec une population voisine ou si la population elle-même s'est déplacée (quelle serait l'étendue des déplacements ?). La perforation indique qu'elles ont été portées, probablement brodées sur un vêtement. Ces coquilles constituent dans le Néolithique ancien une parure plutôt féminine, mais elles sont inconnues en contexte néolithique moyen, que ce soit dans la sphère domestique ou funéraire.

#### VI.1.d. Les datations radiocarbone

Trois datations ont été effectuées : deux sur le premier et le dernier inhumés de la sépulture 1, indiquant un intervalle compris largement entre 4500 et 4000 cal BC voire au-delà, l'autre sur un os de la sépulture 2, révélant un intervalle allant de 4344 à 4224 cal BC (Figure C3. 34). En supposant que l'écart entre le premier individu déposé dans la sépulture 1 et le dernier soit relativement limité dans le temps, il est pertinent de considérer que la tombe en coffre de Bonnard ait fonctionné **aux alentours de 4350 cal BC** voire dès le début du 44<sup>e</sup> siècle, en accord avec les dates de la sépulture 2 et celles des coffres de la nécropole voisine de Monéteau.

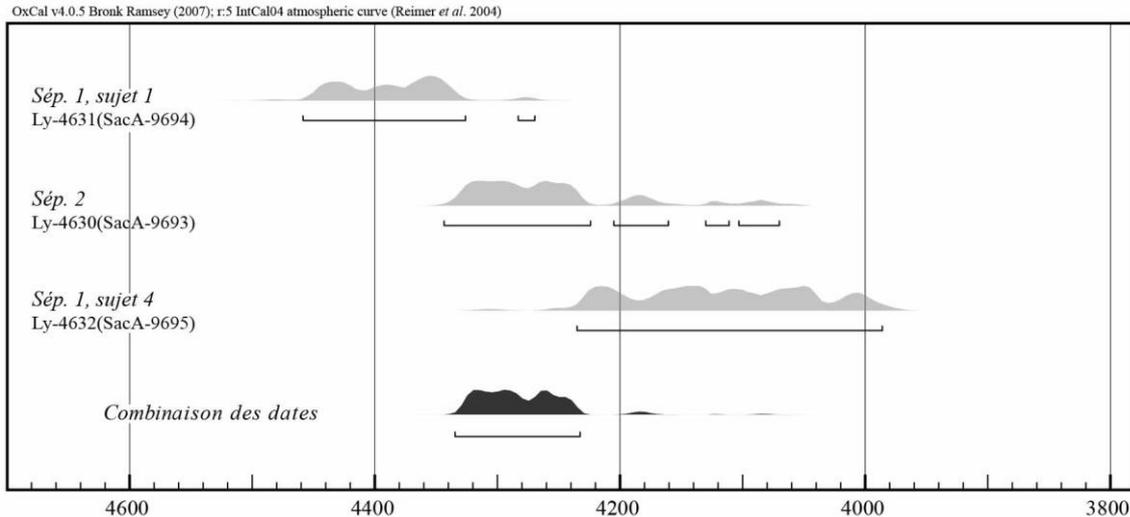


Figure C3. 34 : Histogramme de calibration des dates de Bonnard « Le Poirier » réalisé avec le logiciel libre Oxcal 4.0.5© Bronk Ramsey, 2007. D'après Chambon *et al.*, 2009.

### VI.1.e. L'identité des humains : une révision

Les méthodes récentes d'identification biologique n'ont pas permis de déterminer le sexe des individus de la **sépulture 1** précédemment définis comme des femmes par leur caractère gracile essentiellement. Pour ce qui est de l'estimation de l'âge, la maturation osseuse indique qu'il s'agit d'individus adultes, sans autre précision. Pour la **sépulture 2**, nous avons procédé à une estimation *a minima* à partir des seules molaires retrouvées d'après la méthode de S.J. Al Qhatani et collaborateurs (2010) : les dents en présence indiquent qu'il s'agit d'un individu de plus de 20 ans pour le premier (PFPM i1 : la M3 est mature et particulièrement usée) et de plus de 15 ans pour le second (PFPM i2 : la M2 est mature mais non usée). La caractérisation anthropologique de ces sujets s'arrête là.

## VI.2. Le matériel sélectionné

### VI.2.a. État de la collection

La conservation des ossements est plutôt médiocre. Les squelettes sont mal représentés voire perdus (Annexe A13). Tout le matériel humain est stocké au dépôt de Passy (Yonne) sous l'autorité du SRA de Bourgogne.

### VI.2.b. Sélection des individus et type d'échantillonnage

Dans ce travail, nous avons échantillonné **les trois individus disponibles de la sépulture 1** dont seuls le squelette infra-crânien a été retrouvé, ainsi qu'**un os et une dent de la sépulture 2**, dont l'attribution au même individu ou non n'est pas déterminable (Tableau C3. 18). Les prélèvements osseux concernent trois fémurs et un tibia, la dent est une deuxième molaire permanente (M2). Le protocole de prélèvement suit les recommandations décrites pour Gurgy « Les Noisats » (cf. II.2.b).

ID	groupe	sexe	âge au décès	os	dent
Bon Poirier 1	sépulture 1	I	ad	femur G	
Bon Poirier 2	sépulture 1	I	ad	femur G	
Bon Poirier 4	sépulture 1	I	ad	tibia	
Bon PFPM	sépulture 2	?		femur G	
Bon PFPM i2	sépulture 2	?			M2supG

Tableau C3. 18 : Liste des individus de Bonnard "Le Poirier" sélectionnés dans ce travail et os et dents échantillonnées.

La dent a été photographiée et les marqueurs de l'état sanitaire dentaire ont été cotés tels que précédemment, de même que les VA et le stade de maturation (Annexe A12). Les données principales (stade de minéralisation, caries, usure) sont présentées dans le Tableau C3. 19. Une empreinte occlusale a été réalisée sur la dent sélectionnée (Bon PFPM i2) et également sur une M3 appartenant à l'autre individu (Bon PFPM i1 ; Annexe A5 et Annexe A6).

Id	Prélèvement		Caries (Bocquentin 2003) <sup>1</sup>			Usure (Molnar 1971) <sup>2</sup>			Usure (Smith 1984) <sup>2</sup>	Tartre (Brothwell 1965) <sup>1</sup>			stade de maturation (Dermirjian et al 1973)
	dent prélevée	localisation prélèvement	situation (c/col/r)	face (O/M/D/V/L)	sévérité (0/1/2/3)	degré	direction	forme	degré	situation (c/col/r)	face (O/M/D/V/L)	sévérité (0/1/2/3)	
Bon PFPM i2	M2supG	isolée	c	O	1	2	24	1	2			0	H

Tableau C3. 19 : Tableau de synthèse des principales caractéristiques dentaires des échantillons de Bonnard « Le Poirier » analysés dans ce travail. <sup>1</sup>d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Bocquentin 2003 et Brothwell 1965), <sup>2</sup>d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Smith 1984) et M. Le Luyer (2016 ; d'après Molnar 1971 et Smith 1984).

### VI.3. Synthèse et questionnements spécifiques au site

#### Bonnard « Le Poirier » (Bon)

Fouille ancienne et certaines données perdues.

Sépulture 1 « à étage » (4 individus déposés successivement) et sépulture PFPM (2 individus)

Attribution au Chasséen (coffres, céramique) rappelant le site en vis-à-vis de BMT et le site de Monéteau (tombe 99-548 en particulier)

Assemblage de mobilier et pâte céramique évoquant le Cerny → composante locale ?

#### **Principaux questionnements abordés dans ce travail :**

Quelle est la place des humains par rapport à ceux de BMT, de Mon (Mon 99-548 en particulier) et des autres sites de la microrégion ?

Existe-il une similitude particulière entre les sujets de la sépulture 1 ? et avec la sépulture 2 ?

Ont-ils été mobiles ?

## VII. Chichery « L'Étang David » (Chi-ED)

---

### VII.1. Le site

L'ensemble funéraire de Chichery « L'Étang David », comme le précédent, a été fouillé anciennement et reste probablement incomplet (Chambon *et al.* 2009 ; Chambon *et al.* 2013). Les dispositifs funéraires et l'indigence du mobilier rappellent les nécropoles de Gurgy « Les Noisats » et Monéteau « Macherin », associant à l'Étang David une composante culturelle plutôt locale. La documentation mentionne 18 sépultures, dont les squelettes sont en grande partie perdus (nous analyserons deux sujets dans ce travail), sur une surface de 25 m<sup>2</sup>. Les limites n'étant pas connues, le site s'étend probablement bien au-delà et pourrait rivaliser avec les nécropoles citées plus haut. Une monographie à laquelle nous participons, est en cours de publication (Chambon *et al.* en préparation-b).

Le gisement, bordé au nord par la gravière et à l'est par la dépression d'un ancien lit de l'Yonne, se trouve au cœur de la « plaine de Bassou », sur la basse terrasse alluviale de l'Yonne (cf. Figure C3. 1, p. 188).

#### VII.1.a. Découverte et contexte d'étude

L'exploitation d'une gravière a révélé le site en 1959. Plusieurs opérations se sont succédé dès lors pour tenter de sauver quelques sépultures. Les données recueillies sont compilées en Annexe A14 et la Figure C3. 35 propose un plan général des sépultures, mais les raccords entre les plans issus des différentes fouilles ne sont pas certains. La première intervention a eu lieu en 1959 : R. Kapps fait état de onze sépultures (K1 à K11) repérées sur plan. Les trois premières n'ont fait l'objet d'aucune observation, quelques photos et plans agrémentent une brève description des suivantes, mais aucun squelette n'a été retrouvé. En 1965, J. Rigaud a fouillé trois sépultures supplémentaires (R1 à R3), dont les squelettes n'ont pas non plus été retrouvés. Deux croquis et quelques éléments descriptifs ont été récupérés. Enfin, les données les plus complètes proviennent de la fouille de C. Pellet, conduite entre 1972 et 1975.

#### VII.1.b. Les dispositifs funéraires et le mobilier : comparaisons chronoculturelles

La majorité des sépultures découvertes à ce jour, bien qu'elles soient pour partie arasées, semble avoir été faites en **fosse étroites, peu aménagées**, sans doute couvertes au vu des déplacements ostéologiques observés (indiquant une décomposition en espace vide pour la plupart). Celles-ci sont toutes individuelles. Ce type de structure rappelle tout à fait celles de Gurgy « Les Noisats » et Monéteau « Macherin ». Par ailleurs, deux sépultures (P6 et P7) pourraient être interprétées comme des **tombes à alcôve**, d'après les croquis et descriptions de C. Pellet, renvoyant à nouveau à la

nécropole voisine des Noisats. Celles-ci renferment chacune deux individus, dont au moins trois sur les quatre sont des enfants. De façon générale, la position des corps et les orientations varient quelque peu, notamment parmi les sépultures K1 à K11, mais tous les sujets semblent être inhumés en position repliée, parfois même très contrainte, majoritairement sur leur côté gauche (avec une fluctuation au niveau du tronc entre la position dorsale et ventrale), deux sur leur côté droit. Fait inédit à l'Étang David, des **traces de feu** (galets brûlés, charbon) ont parfois été repérées au fond de la fosse ou dans le remplissage. Aucune comparaison possible actuellement ne permet d'expliquer ces traces. De **l'ocre** est également signalé dans plusieurs sépultures. De plus, deux structures associées aux sépultures ont été décrites par C. Pellet (pour la première fois en France). Ces structures circulaires rappellent celles rencontrées à Monéteau mais leur fonction est inconnue. Si les fosses à alcôve renvoient plutôt au **RRBP**, les fosses étroites peu aménagées pourraient correspondre à l'horizon **Cerny**, en accord avec les dates (cf. VII.1.c) mais on ne trouve aucun matériel significatif pouvant l'attester.

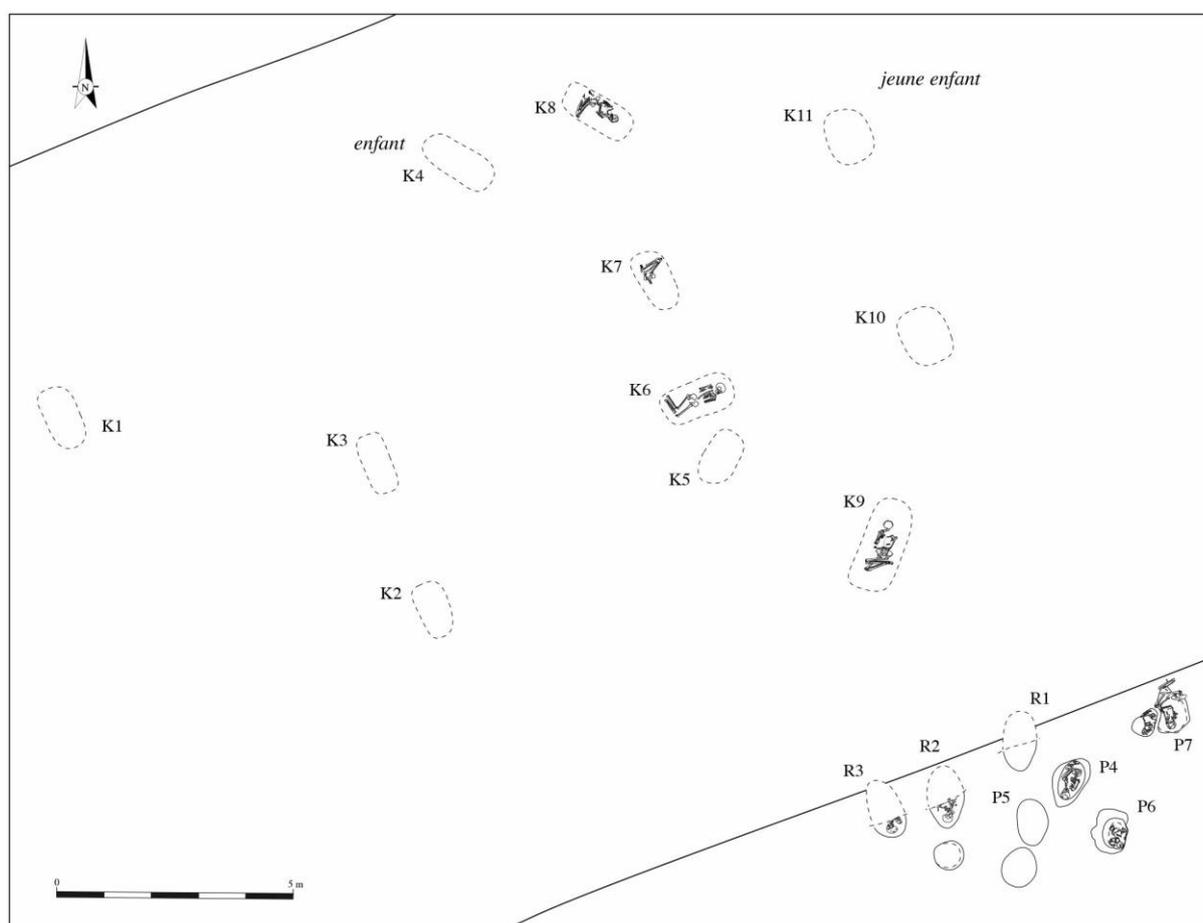


Figure C3. 35 : Plan de la nécropole de Chichery « L'Étang David ». DAO : Ph. Chambon.

Hormis quelques tessons et débris lithiques retrouvés dans le remplissage, la documentation ne mentionne **aucun mobilier associé aux défunts, sauf pour deux sépultures, R2 et P7**, ayant livré un grand nombre d'**éléments de parure** (et peut-être un grattoir avec R2). Un probable collier (perdu) dans la sépulture R2 était composé d'une valve d'amande de mer *Glycymeris* (anciennement

*Pectunculus*) et 3 coquilles de pourpres *Nucella lapillus* (anciennement *Purpura lapillus*). Un autre collier retrouvé dans la sépulture P7 était constitué de 142 perles circulaires en calcaire et une coquille de *Nucella lapillus*. Les coquilles, d'origine marine, de même que le calcaire probablement originaire du sud-est de la France, indiquent que les objets ont **parcouru de longues distances**. Lorsqu'elles ont pu être observées, aucune trace d'usure n'indique que les perles ont été portées du vivant des individus mais elles pouvaient constituer un élément de parure funéraire, notamment pour l'individu P7a pour qui l'association au corps semble être confirmée. Les perles en calcaires ressemblent fortement à celles mises au jour à Gurgy « Les Noisats », de même que les coquilles de *Nucella lapillus* de la sépulture R2, qui se retrouvent en association avec des perles calcaires dans les deux sites. Le reste du mobilier trouverait plutôt des affinités avec le Néolithique ancien pour les autres coquilles de *Nucella lapillus* (de la sépulture P7) ou encore avec le Cerny, le Grossgartach et le Rössen pour la valve de *Glycymeris*, avec toutefois des spécificités propres à l'Étang David.

Quelques pièces lithiques ont été ramassées en surface, presque aucune en association avec les sépultures. Ces objets (grattoir, tranchet et autres objets retouchés de facture banale et très mal conservés) renvoient à différentes phases d'occupations du Mésolithique au Néolithique moyen, peut-être au Néolithique ancien.

### VII.1.c. Les datations radiocarbone

Plusieurs datations ont été effectuées sur les ossements des sujets P6 (par C. Pellet), P4 et P7b récemment (Figure C3. 36). La faible quantité de collagène disponible pour P7 incite à considérer cette date avec prudence. En considérant les trois dates, on obtient un intervalle compris **entre 4700 et 4500 cal BC**. Cet intervalle est légèrement plus récent en excluant P7. Ces résultats sont en accord avec une occupation au cours du **début du Néolithique moyen**. Elles couvriraient grosso modo la même période que Gurgy « Les Noisats » et le groupe C de Monéteau.

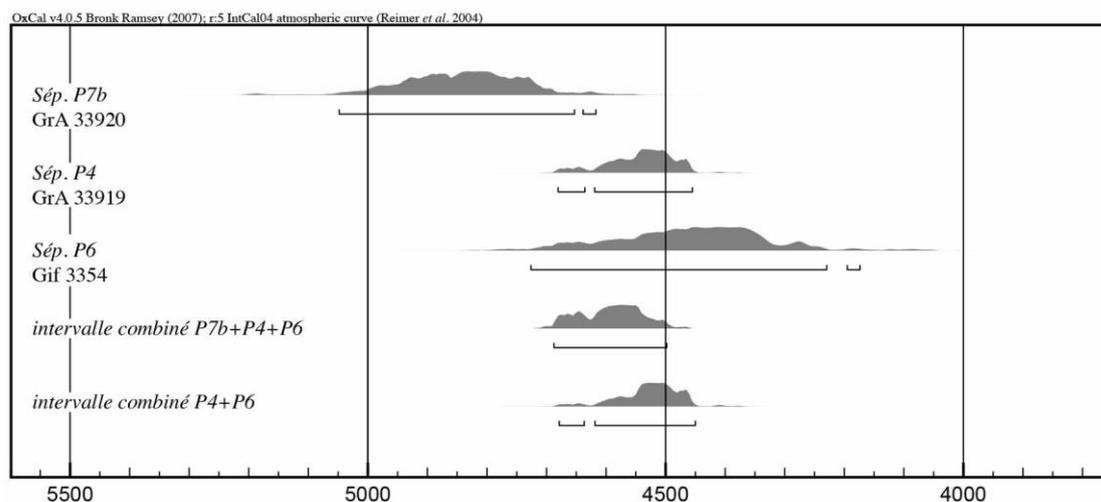


Figure C3. 36 : Histogramme de calibration des dates de Chichery « L'Étang David » réalisé avec le logiciel libre Oxcal 4.0.5© Bronk Ramsey, 2007. D'après Chambon *et al.*, en cours.

### VII.1.d. L'analyse individuelle des humains, une relecture

Si C. Pellet avait déterminé un sexe et estimé un âge pour la plupart des sujets fouillés, l'avancée des méthodes actuelles appelle à vérifier ces informations. Lorsque les restes n'ont pas été retrouvés, le **réexamen des squelettes** par Ph. Chambon s'est basé pour partie sur les descriptions anciennes qui semblent les plus fiables, photos à l'appui. L'estimation de l'âge au décès des squelettes retrouvés a été effectuée à partir du calendrier de l'éruption dentaire (Ubelaker 1978), de la croissance et de la maturation osseuse (Maresh 1970 et Moorrees *et al.* 1963 ; Annexe A14). Nous avons ici élargi les classes d'âge pour correspondre à la méthodologie appliquée dans ce travail. Aucun sexe n'a pu être déterminé.

### VII.1.e. Répartition spatiale et ampleur du site

En l'état actuel des connaissances, il ne semble **pas possible de rattacher avec certitude les deux ensembles** K1 à K11 d'une part et R1 à P7 d'autre part à une même période d'occupation.

Le **premier groupe** (K1 à K11) n'a livré aucun élément permettant de le rattacher à une période plus précise du Néolithique moyen. De plus, les sépultures de ce groupe sont disposées selon un **maillage beaucoup moins dense** que le second et présentent des caractéristiques **plus variables** (orientations et position des corps notamment). Il n'est de ce fait pas possible de déterminer si l'ensemble des sépultures du gisement constitue une seule et même nécropole d'abord, et ensuite si le site a livré tous ses vestiges ou si une partie a été détruite ou reste à découvrir (notamment au sud-est du gisement). L'étude du recrutement ne serait pas pertinente en l'état mais on peut néanmoins constater que ce groupe K1 à K11 semble regrouper adultes et enfants.

Dans le **deuxième ensemble**, R1 à P7, les sépultures sont **plus proches** les unes des autres et partagent des **caractéristiques similaires** : orientation des fosses et des corps majoritairement nord-sud, têtes dirigées vers le sud, positions fléchies sur le côté gauche. Si les trois sujets mis au jour par J. Rigaud semblent de taille adulte, la majorité des sujets de la fouille de C. Pellet apparaît **immature**. Deux sépultures à l'extrémité sud-est du gisement se trouvent être de probables tombes à **alcôves** (P6 et P7), rappelant le regroupement des mêmes structures dans le coin sud-ouest de la nécropole voisine de Gurgy « Les Noisats ».

En définitive, si l'ampleur du site de l'Étang David n'est pas connue, on peut raisonnablement supposer que l'on soit en présence, à l'instar des Noisats et de Macherin, d'une **nécropole plus importante restant à découvrir**. Les auteurs responsables de la révision de ce gisement emploient d'ailleurs le terme de « nécropole » pour caractériser cet ensemble.

## VII.2. Le matériel sélectionné

### VII.2.a. État de la collection

De l'ensemble des squelettes décrits, très peu d'ossements sont parvenus jusqu'à nous et souvent en assez mauvais état (Annexe A14). Ces derniers sont stockés au dépôt de Passy (Yonne) sous la responsabilité du SRA de Bourgogne.

### VII.2.b. Sélection des individus et type d'échantillonnage

Parmi les squelettes ou éléments de squelettes retrouvés, nous n'avons échantillonné que ceux supposés avoir plus de 5 ans. Lors de l'échantillonnage, un doute subsistait quant à l'âge de l'enfant P7b (moins de 3 ou 5-9 ans, confirmé plus tard entre 5 et 9 ans). Il n'a donc pas été échantillonné.

Ainsi, nous avons prélevé un fragment de fémur du sujet P4 ainsi qu'un fragment de maxillaire et une dent (M2) du sujet P5 (Tableau C3. 20).

ID	ID archéo	sexe	âge au décès	os	dent
CHI-ED 4	P4	-	8,5-13,5	fémur G	
CHI-ED 5	P5	?	9,5-18 ?	maxillaire	M2supG

Tableau C3. 20 : Liste des individus de Chichery "L'Étang-David" sélectionnés dans ce travail et os et dents échantillonnés.

Comme précédemment, nous avons photographié les dents, observé et coté les caractères sanitaires, les VA et le stade de maturation (Annexe A12). Les principaux renseignements sont fournis dans le Tableau C3. 21. Aucun prélèvement de tartre ni empreinte occlusale n'a été réalisé sur ces dents.

Id	ID archéo	Prélèvement		Caries (Bocquentin 2003) <sup>1</sup>	Usure (Molnar 1971) <sup>2</sup>			Usure (Smith 1984) <sup>2</sup>	Tartre (Brothwell 1965) <sup>1</sup>	stade de maturation (Dermirjian et al 1973)
		dent prélevée	localisation prélèvement	sévérité (0/1/2/3)	degré	direction	forme	degré	sévérité (0/1/2/3)	
CHI-ED 5	P5	M2 sup G	in situ (os cassé)	0	1	1	1	1	0	G

Tableau C3. 21 : Tableau de synthèse des principales caractéristiques dentaires des échantillons de Chichery « L'Étang-David » analysés dans ce travail. <sup>1</sup>d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Bocquentin 2003 et Brothwell 1965), <sup>2</sup>d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Smith 1984) et M. Le Luyer (2016 ; d'après Molnar 1971 et Smith 1984).

### VII.3. Synthèse et questionnements spécifiques au site

#### Chichery « L'Étang David » (CHI-ED)

Fouille ancienne et majorité des squelettes perdus (sur 18 sépultures sur 25 m<sup>2</sup>). Limites de site inconnues → grande nécropole incomplète ? Deux ensembles de sépultures distincts ?

Seulement deux individus (moins de 20 ans) échantillonnés.

Les fosses non aménagées et l'indigence du mobilier rappellent les nécropoles des Noisats et de Monéteau (groupe C) → composante locale ? Les datations de ces trois ensembles coïncident.

#### Principaux questionnements abordés dans ce travail :

Quelle est la place de ces deux jeunes par rapport aux humains des autres sites ? à GLN et Mon C en particulier ?

Ces deux sujets ont-ils des valeurs similaires ?

### VIII. Gurgy « Le Nouzeau » (NZ)

---

#### VIII.1. Le site

Le site du Nouzeau à Gurgy est une **enceinte Cerny** contenant quelques restes humains et animaux épars, à laquelle sont **associées deux sépultures primaires** côte à côte et quasiment identiques (notre analyse des humains ne portera que sur ces deux sépultures). Le site a été fouillé récemment et a fait l'objet d'un rapport final d'opération détaillé mais inédit (Meunier 2007). La position géographique de cette enceinte et son attribution culturelle au Cerny documente particulièrement le lien entre le Chasséen et le Cerny. La présence de restes humains dans un fossé interrompu et de deux sépultures interroge la relation entre enceinte et funéraire. Néanmoins, la faible quantité de mobilier retrouvé sur le site et son caractère largement ubiquiste ne permet pas d'aller très loin dans la discussion.

Le gisement est situé à 50 m du cours actuel de l'Yonne, rive droite, entre deux paléochenaux et sur la basse terrasse alluviale Fy (il s'agit d'alluvions calcaires et siliceuses constituées principalement de graviers, de sables et de galets ; cf. Figure C3. 1, p.188).

#### VIII.1.a. Découverte et caractéristiques générales

Le site, dont au moins deux enceintes « superposées » de type Néolithique moyen avaient été repérées au préalable en prospection aérienne et diagnostiquées suite à une demande d'exploitation de gravière en 2004, a été fouillé en 2005 sous la direction de K. Meunier.

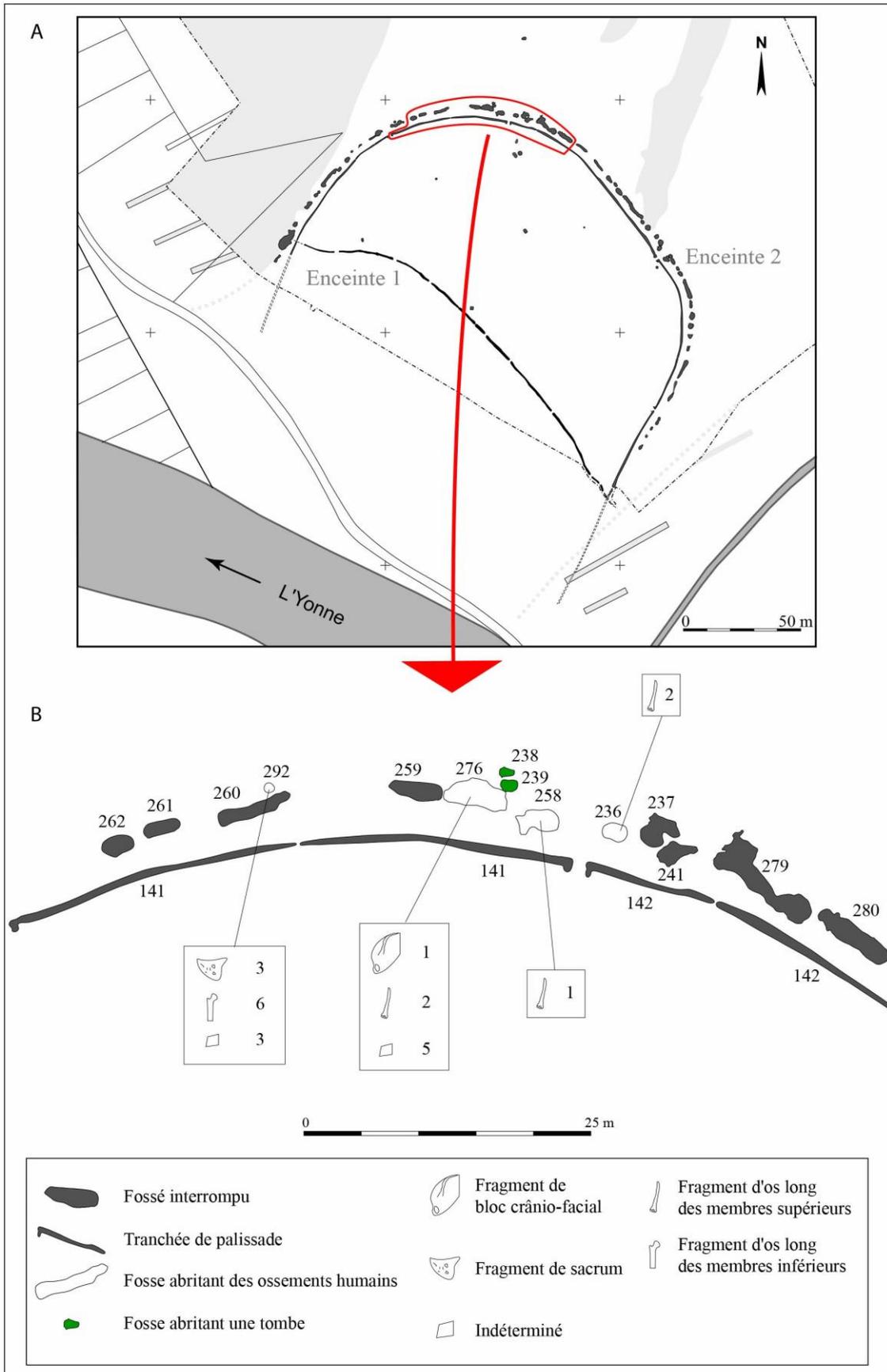


Figure C3. 37 : (A) Plan général des structures du Néolithique moyen de Gurgy "Le Nouveau" et (B) localisation des structures renfermant des ossements humains. Modifié d'après Meunier 2007.

La surface décapée couvre plus de 9 hectares et les deux enceintes ont été en grande partie fouillées (Figure C3. 37). **La plus vaste (enceinte 2)** est composée d'un fossé continu (simple palissade), doublé à l'extérieur d'un fossé interrompu (une cinquantaine de fosses irrégulières). Des interruptions dans la palissade, doublées de trous de poteaux à l'intérieur de l'enceinte, marquent les entrées en plusieurs endroits, certaines en des points stratégiques. **La plus petite (enceinte 1)** recoupe la première et comporte un unique fossé de palissade. À l'intérieur de la surface enclose, d'environ 2,5 hectares, se trouvent des fosses isolées, certaines liées à la combustion. Dans ces dernières, probablement associées à l'occupation du Néolithique moyen, ont été retrouvés principalement des blocs de granit et de grès brûlés. Quatre charbons ont été datés, indiquant pour la plupart une période cohérente avec la séquence Cerny et le Chasséen (cf. VIII.1.e). Le site a livré globalement très peu de matériel (céramique, lithique, faunique et humain ; cf. VIII.1.b), réparti entre les enceintes et les fosses isolées. En outre, deux sépultures ont été mises au jour au contact de la palissade au niveau d'une entrée de l'enceinte 2, dont la position indique qu'elles seraient également attribuables au Néolithique moyen (cf. VIII.1.d).

Globalement, Le Nouzeau peut être mis en relation avec les enceintes voisines de Monéteau et de Beaumont, et plus loin avec celle de Villeneuve-la-Guyard « Prépoux ». La question de la chronologie entre les deux enceintes reste ouverte (cf. VIII.1.e).

#### VIII.1.b. Le mobilier : comparaisons chronoculturelles

L'étude typo-technologique de la **céramique** a été réalisée par K. Meunier, l'analyse pétrographique par F. Convertini. Moins de 700 tessons ont été recueillis sur tout le site, dont les quelques éléments caractéristiques (décorations et dégraissant à l'os et chamotte) ont permis une attribution des enceintes et des fosses isolées à **l'horizon Cerny**. Si certaines caractéristiques peuvent perdurer jusqu'au début du Néolithique moyen II, renvoyant inmanquablement au Chasséen, voire au groupe de Chambon, on ne trouve pas au Nouzeau de tessons carénés typiques du Chasséen ni de bords ourlés comme à Beaumont ou à Chassey. Quelques affinités avec L'Épi-Rössen et le Michelsberg peuvent être relevées (dégraissant végétal par exemple).

**L'industrie lithique** (étudiée par S. Cary ; INRAP) n'est guère plus florissante, avec un peu plus de 900 pièces dans tout le site, essentiellement des éclats et quelques outils (grattoirs, burins, armatures de flèches, tranchets et autres objets retouchés), présentant peu de caractères discriminants culturellement. La matière première est presque exclusivement du silex local et le matériel peut être rattaché au Cerny ou au Chasséen de Chassey, principalement.

Le **macro-outillage** quant à lui est caractérisé par des fragments de blocs bruts ou d'outils, en granit et grès local, provenant presque tous des fosses de combustion (étude C. Hamon). Le réemploi de meules

entières dans les structures de combustion à l’intérieur des enceintes rappelle le site Cerny de Balloy « Les Réaudins ».

### VIII.1.c. La faune

La faune retrouvée au Nouzeau, étudiée par L. Bedault (UMR 7041 ArScAn) dans le cadre d’une thèse de doctorat à l’Université Paris 1 (2012), est **particulièrement pauvre** et provient, de façon dispersée, des deux enceintes, en particulier des fosses bordant la plus grande. Sur 49 ossements seulement, 31 ont pu être déterminés et ils sont **très mal conservés** (altérations calcaires et traces de radicelles en profondeur), empêchant toute tentative d’estimation de l’âge et de courbes de mortalité.

Les espèces identifiées sont **principalement domestiques** (environ 60%) avec une **écrasante majorité de bovinés** (13 restes), 4 restes de **caprinés** et seulement 1 reste de **porc**. Les **espèces sauvages** représentent environ 30% du spectre faunique avec 6 restes de **cerfs** (dont 3 fragments de ramure), 2 restes **d’aurochs** et 2 de **sanglier**.

Le cas des aurochs doit être spécifié cependant, parce qu’il s’agit de deux **chevilles osseuses d’aurochs mâles**, relevant peut-être d’un dépôt intentionnel sans qu’il soit possible de l’attester. Ce type de dépôt est exceptionnel pour le Cerny. La plus proche analogie pourrait être vue dans le cas de dépôt de bucranes de bovins, domestiques cette fois, retrouvés à Balloy « Les Réaudins » en association avec de la céramique, mais la comparaison s’arrête ici. Au Nouzeau, aucun autre matériel n’est associé à la faune. Finalement, l’indigence de celle-ci ne permet pas vraiment d’aborder la question de l’économie de subsistance, ni de discuter de la fonction du site. Sa nature détritique ou intentionnelle n’est pas non plus connue.

### VIII.1.d. Les restes humains

- *Les os épars*

Bien que notre étude ne porte pas sur ces échantillons, il nous paraît nécessaire d’en dire un mot. Étudiés par J.-G. Pariat, les restes humains épars sont au nombre de 23, répartis dans quatre fosses voisines de la grande enceinte 2 (Figure C3. 37). Non loin des deux sépultures identifiées, ces ossements ne sont a priori pas dans un contexte sépulcral et seraient plutôt de nature détritique, mélangés à d’autres vestiges (céramiques et lithiques). Les datations ne permettent pas d’associer ces restes aux sépultures, mais le caractère douteux des dates de ces dernières n’exclut peut-être pas une certaine contemporanéité (cf. VIII.1.e).

Nonobstant leur mauvais état de conservation, aucune trace d’origine anthropique ou animale n’a été observée à leur surface. Sur **15 os déterminés** (8 esquilles restent indéterminées), on ne rencontre que des fragments de fémur, d’humérus, d’os coxal et de bloc crânio-facial, tous adultes, reflétant un important déséquilibre entre les parties anatomiques. Ces ossements appartiendraient à au moins deux

individus (NMI global), voire quatre si l'on considère les structures individuellement (NMI cumulé). Deux appariements ont pu être identifiés entre un fémur droit et un fémur gauche dans une fosse, et entre un humérus droit et un humérus gauche dans une autre. D'après l'auteur, « *on peut raisonnablement supposer que chacune de ces fosses renferme les restes d'un seul individu* ».

L'interprétation de ces dépôts, qu'ils soient intentionnels ou non, est délicate. Il est possible que les corps se soient décomposés ailleurs et que ces restes aient été, dans un second temps, soit piégés dans le remplissage, soit apportés par l'homme (dépôt secondaire) mais l'hypothèse d'une décomposition sur place est également valable. Malgré les déficits importants observés, des cadavres ou portions de cadavres ont pu se décomposer in situ et, après une durée d'exposition prolongée à l'air libre (certains présentent un aspect lessivé pouvant refléter une telle exposition), être fortement perturbés voire détruits par toute une série d'évènements (animaux, eau, etc.). Ils ont également pu faire l'objet de réinterventions intentionnelles par l'homme (prélèvements, vidanges). Leur localisation, regroupés dans une même zone non loin des sépultures, serait en faveur d'un dépôt intentionnel, qu'il soit primaire ou secondaire.

Si des restes humains dispersés ont également été retrouvés à Beaumont en contexte Chasséen, l'attribution du Nouzeau au Cerny pourrait octroyer à ceux-là un caractère tout à fait original, pour peu qu'ils soient rattachés à la même phase d'occupation, mais les datations ne permettent pas de l'établir (cf. VIII.1.e).

NB : Bien que nous n'ayons pas sélectionné ces restes dans le cadre de ce travail (pour cause d'un budget d'analyses limité ; nous avons dû faire un choix), il serait intéressant de doser leur composition biochimique pour les replacer dans le contexte du site et de la région, ainsi que de les comparer aux résultats obtenus pour les deux sépultures.

- *Les sépultures*

L'étude des deux sépultures 238 et 239 a été conduite par Ph. Chambon (Annexe A15). Toutes deux individuelles, dans des fosses côte à côte de format similaire, elles sont étrangement ressemblantes et très bien superposables (l'auteur évoque une sorte de « mise en scène »), laissant même supposer qu'elles aient été simultanées (Figure C3. 38). Les deux sujets, des **hommes adultes** présentant des caractères plutôt jeunes, reposent exactement dans la même position, **repliée**, les membres inférieurs fléchis sur leur **côté gauche**, le tronc à plat en face dorsale, les membres supérieurs légèrement fléchis, la **tête à l'est** et le regard tourné vers le sud. Aucun mobilier ne leur est associé. Si l'espace de décomposition ne peut être identifié clairement pour le premier individu, le second s'est en toute vraisemblance décomposé dans un espace vide, mais l'auteur exclu l'enveloppe souple et le contenant rigide mobile, optant plutôt pour l'hypothèse d'une fosse aménagée, sans le certifier.

La **grande similitude** entre les deux inhumés invite l'auteur à envisager, certes avec prudence, non seulement leur simultanéité, mais également que l'un des deux ne soit pas mort « naturellement ». La proximité avec les autres restes humains épars peut également être soulignée, sans toutefois aller plus avant dans les interprétations. De plus, la contemporanéité des sépultures avec l'enceinte (et avec les restes humains dispersés), si elle est supposée par leur position vis-à-vis de cette dernière, n'a pas été démontrée par les datations, difficilement interprétables. L'analyse biochimique de ces individus est fort attendue et nous espérons y trouver des éléments de réponse.

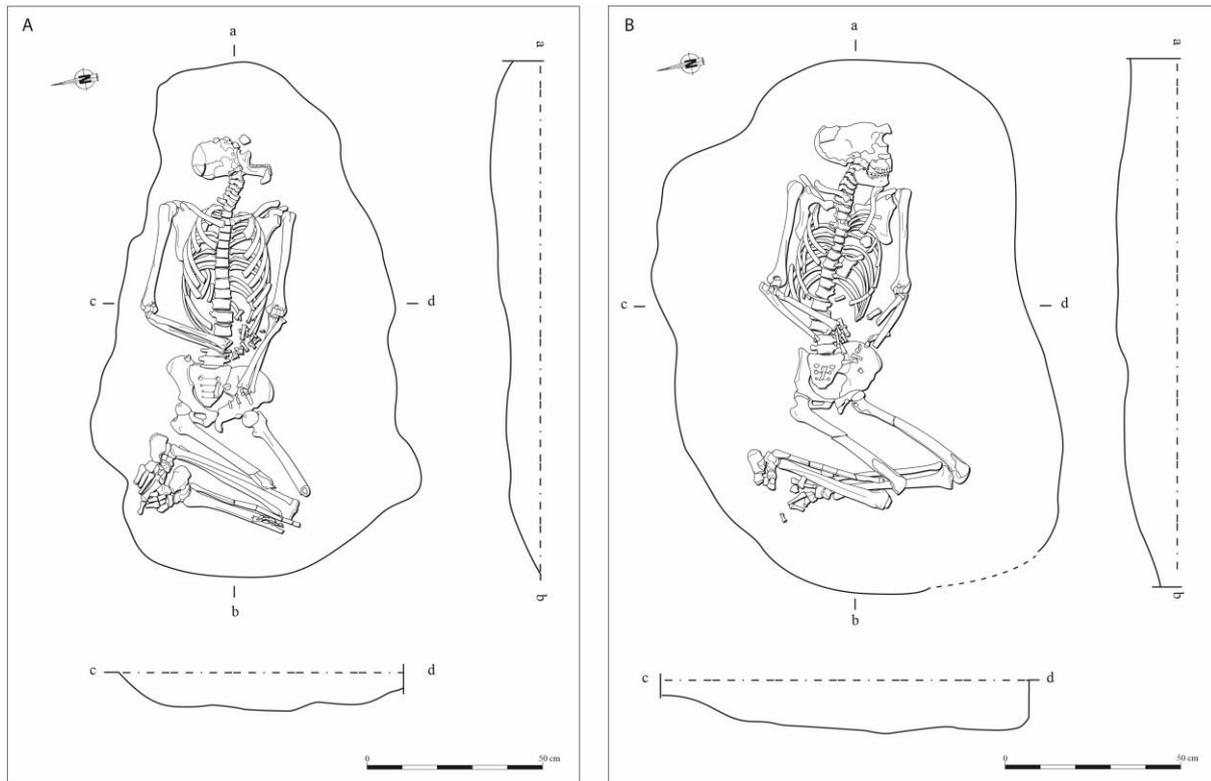


Figure C3. 38 : Plans et coupes des sépultures 238 (A) et 239 (B) de Gurgy « Le Nouveau ». DAO : Ph. Chambon ; d'après Meunier 2007.

#### VIII.1.e. Les datations radiocarbone

Plusieurs datations radiocarbone ont été réalisées sur des charbons de bois et des ossements, animaux et humains, provenant des deux enceintes et des structures de combustion (Tableau C3. 22). Pour **l'enceinte 1**, deux échantillons (un os animal et un charbon de bois) datés indiquent un intervalle identique : 4651 - 4449 cal BC correspondant au **début du Cerny**. La **palissade de l'enceinte 2** a été datée à partir d'un os animal et d'un charbon de bois et indique un intervalle similaire, quoique légèrement plus ancien : 4791 - 4488 cal BC.

localisation	échantillon	structure	datation (cal BC)	correspondance chronoculturelle
enceinte 1	charbon de bois	st. 82	4651 - 4449	début du Cerny
enceinte 1	cheville osseuse aurochs	st. 247	4651 - 4449	début du Cerny
enceinte 2 - palissade	os animal	palissade	4791 - 4596	début du Cerny
enceinte 2 - palissade	charbon de bois	palissade	4686 - 4488	début du Cerny
enceinte 2 - fossé interrompu	os animal	st. 133	4584 - 4372	Cerny
enceinte 2 - fossé interrompu	os animal	st. 157	4353 - 4244	Chasséen ?
enceinte 2 - fossé interrompu	os humain	st. 236	4897 - 4715	Néolithique ancien
enceinte 2 - fossé interrompu	os humain	st. 292	4997 - 4800	Néolithique ancien
enceinte 2 - sépulture	os humain	st. 238	5293 - 4939	Néolithique ancien
enceinte 2 - sépulture	os humain	st. 239	4840 - 4692	Néolithique ancien
structure de combustion	?	st. 175	?	horizon Cerny
structure de combustion	?	st. 357	?	horizon Cerny

Tableau C3. 22 : Datations radiocarbone des échantillons des différentes structures de Gurgy « Le Nouzeau » (Meunier 2007).

En revanche, l'image est **plus compliquée pour les fosses extérieures bordant l'enceinte 2**. D'une part, deux **ossements animaux** datés indiquent une **période plus récente** (4584 - 4244 cal BC) qui s'intègre à la séquence Cerny, voire au Chasséen, mais les deux intervalles ne se recoupent pas. D'autre part, deux **ossements humains** dispersés dans le fossé interrompu ont été datés et indiquent une **période plus ancienne** correspondant au Néolithique ancien (4997 - 4715 cal BC) ; les intervalles se recoupant à peine. Ce résultat irait dans le sens d'un remaniement ou de perturbations de ces dépôts, réenfouis dans le fossé interrompu ultérieurement à leur « inhumation ». Ces dates sont à mettre en parallèle avec celles des deux sépultures, reflétant elles aussi le Néolithique ancien mais posant un certain nombre de problèmes.

D'une part, **les intervalles des deux sépultures ne se recoupent pas**, ce qui n'est pas en adéquation avec leur grande similitude qui milite en faveur d'une contemporanéité, voire d'une simultanéité. La première (238) indique 5293 - 4939 cal BC, la seconde (239) indique 4840 - 4692 cal BC, renvoyant plutôt au Néolithique ancien (VSG). Ce résultat invite à considérer, sinon les deux, au moins l'une de ces dates comme probablement incorrecte. D'autre part, le fait que **ces dates indiquent une période plus ancienne que l'enceinte**, renvoyant plutôt au VSG, ne coïncide pas avec l'interprétation archéologique des structures. En particulier, la typologie des sépultures ne répond pas aux standards connus pour le VSG, et encore moins leur situation hors contexte d'habitat. En effet, les sépultures VSG sont jusqu'à ce jour exclusivement rencontrées au sein des aires d'habitats et le décapage

extensif du Nouzeau excluant toute trace d’habitat sur le site ne va pas dans ce sens. L’absence de mobilier dans ces tombes ne permet pas d’étayer la discussion. Une comparaison peut être recherchée avec la sépulture 99-374 de Monéteau « Macherin » (datée entre 5207 et 4695 cal BC, voire 4881 et 4812 cal BC), mais aucun élément déterminant ne permet de rapprocher strictement ces sépultures. Par ailleurs, la proximité de ces deux tombes avec l’entrée de l’enceinte supporterait plutôt l’hypothèse d’une contemporanéité de ces structures. La limite la plus récente pour les sépultures indique 4692 cal BC, ce qui est compris dans l’intervalle de datation de la palissade de l’enceinte 2 (4791 - 4488 cal BC). Même en considérant le seul échantillon de charbon de bois de la palissade de l’enceinte 2 daté d’une période postérieure à 4686 cal BC, les dates de la sépulture 239, antérieures à 4692 cal BC, ne sont pas si éloignées. D’autre part, si les fosses interrompues semblent plus récentes que la palissade d’après le matériel faunique, elles ont pu intervenir dans un deuxième temps et déranger les restes humains. Quoi qu’il en soit, l’interprétation de ces résultats doit être considérée avec une grande prudence.

NB : Les nouvelles analyses du collagène réalisées dans ce travail permettront peut-être d’apporter des renseignements supplémentaires, si ce n’est à l’interprétation de la chronologie des occupations, au moins, peut-être, sur la qualité du collagène et sur la fiabilité des datations. La mesure des concentrations élémentaires du C, N et S permettent d’identifier de possibles contaminations et dégradations du collagène, de même que le rendement d’extraction de celui-ci, qui n’est pas mentionné avec les datations (cf. Chap5.III.2).

Enfin, les datations réalisées dans les **structures de combustion** indiquent une période similaire à celles de l’enceinte correspondant à l’**horizon Cerny**.

## VIII.2. Le matériel sélectionné

### VIII.2.a. État de la collection

L’état de conservation des ossements humains et animaux est plutôt mauvais. Nous l’avons vu, les restes fauniques sont peu nombreux, très fragmentés et plutôt abîmés par l’érosion calcaire et les traces de radicelles. D’autre part, si les squelettes humains des deux sépultures sont assez bien représentés (bien qu’une partie ait été arasée par la pelle mécanique lors du décapage), l’os est particulièrement friable.

L’ensemble de la collection du Nouzeau se trouve au dépôt de Passy, sous la responsabilité du SRA de Bourgogne.

### VIII.2.b. Sélection des individus et type d'échantillonnage

- *Les humains*

Les **deux sépultures** ont fait l'objet de **prélèvements doubles osseux et dentaire** (Tableau C3. 23). Suivant le protocole décrit pour Gurgy « Les Noisats » (cf. II.2.b), nous avons échantillonné un fragment cortical de **fémur** et une **deuxième molaire permanente** pour les deux individus.

ID	espèce	sexe	âge au décès	os	dent
NZ H238	humain	M	>20	fémur D	M2infG
NZ H239	humain	M	>20	fémur D	M2supG

Tableau C3. 23 : Échantillons humains de Gurgy "Le Nouveau" sélectionnés dans ce travail. M = sexe masculin.

Les dents ont été photographiées et ont fait l'objet de la cotation des caractères dentaires comme précédemment (Annexe A12). Les principales informations sont renseignées dans le Tableau C3. 24. Pour la dent de l'individu NZ H238, le tartre a été prélevé et une empreinte de sa surface occlusale a été réalisée (Annexe A5 et Annexe A6).

Id	Prélèvement		Caries (Bocquentin 2003) <sup>1</sup>	Usure (Molnar 1971) <sup>2</sup>			Usure (Smith 1984) <sup>2</sup>	Tartre (Brothwell 1965) <sup>1</sup>			stade de maturation (Dermirjian et al 1973)
	dent prélevée	localisation prélèvement	sévérité (0/1/2/3)	degré	direction	forme	degré	situation (c/col/r)	face (O/M/D/V/L)	sévérité (0/1/2/3)	
NZ H238	M2infG	isolée	0	3 ?	34	1	2	c	MD	1	H
NZ H239	M2supG	in situ (os cassé)	0	2	1	1	2			0	H

Tableau C3. 24 : Tableau de synthèse des principales caractéristiques dentaires des échantillons de Gurgy « Le Nouveau » analysés dans ce travail. <sup>1</sup>d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Bocquentin 2003 et Brothwell 1965), <sup>2</sup>d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Smith 1984) et M. Le Luyer (2016 ; d'après Molnar 1971 et Smith 1984).

- *La faune*

Parmi les vestiges fauniques déterminés, nous avons échantillonné les **restes osseux** d'un **boviné**, un **capriné** et un **suidé** pour les espèces domestiques, ainsi qu'un **cervidé** et deux **aurochs** (chevilles osseuses) pour la sphère sauvage (Tableau C3. 25). En supplément, nous avons échantillonné la seule dent disponible : une **incisive de porc**. L'âge des animaux n'ayant pu être estimé, les résultats devront être interprétés avec prudence quant au signal possible de l'allaitement.

ID	espèce	sexe	âge au décès	os	dent
NZ F1	boviné		>3,5	fémur	
NZ F2	capriné		NR	MT	
NZ F3	suidé		NR	fémur	
NZ F4	cervidé		NR	radius	
NZ F5	aurochs	M	NR	chev. oss.	
NZ F6	aurochs	M	NR	chev. oss.	
NZ F7	suidé		NR		I inf

Tableau C3. 25 : Liste des échantillons animaux de Gurgy "Le Nouveau" sélectionnés dans ce travail. chev. oss. = cheville osseuse. NR = non renseigné.

### VIII.3. Synthèse et questionnements spécifiques au site

#### Gurgy « Le Nouveau » (NZ)

Double enceinte Cerny. Peu de mobilier, quelques restes humains et animaux épars. Affinités avec le Chasséen (mobilier) → composante locale ? Les datations de ces trois ensembles coïncident.

Regroupement des restes humains et sépultures dans une même zone.

Deux sépultures semblables, datations problématiques.

#### **Principaux questionnements abordés dans ce travail :**

Quelle est la position des animaux et des humains au sein de la variabilité locale (microrégion) ?

Existe-il des similitudes avec les autres enceintes et en particulier entre la faune du NZ et celle de BMT ? avec les autres sites Cerny, et en particulier entre les humains de NZ et ceux de CHI-Pat ?

La signature des humains des deux sépultures est-elle similaire ?

Peut-on voir un lien entre la qualité du collagène et les problèmes de datation ?

## IX. Construction du référentiel local (végétal, faunique terrestre et aquatique)

### IX.1. Le référentiel alimentaire

Afin de comparer les résultats obtenus pour les humains avec ceux des ressources potentiellement consommées, il est nécessaire d'établir un référentiel de base. Pour **les animaux**, les données obtenues conjointement aux humains sur les grands mammifères sauvages et domestiques des mêmes sites offrent un bon référentiel local et contemporain. Toutes les données sont disponibles dans les articles Rey *et al.* en révision ; Rey *et al.* 2019 ; Rey *et al.* 2022 (cf. Chap5.II, Chap7.I, Chap8.I). En

revanche, aucun reste végétal n'a été retrouvé sur ces sites, ni aucun reste de poisson n'a été livré en association avec les couches stratigraphiques concernées.

En particulier, les **restes de poisson** découverts à Beaumont ne sont pas certifiés néolithiques et n'ont de ce fait pas été échantillonnés. Néanmoins, leur analyse ultérieure permettrait d'approcher les valeurs attendues pour les poissons d'eau douce dans la région, pour autant qu'elle exclue toute contamination possible et indique les valeurs attendues pour la période préindustrielle. Par ailleurs, un **protocole spécifique** est nécessaire à l'extraction du collagène de poisson, trop souvent mal conservé, pour le dosage isotopique (e.g. Guiry *et al.* 2016 ; Lebon *et al.* 2016 ; Sealy *et al.* 2014 ; Szpak 2011 ; Tsutaya *et al.* 2018). Un nouveau protocole d'extraction a notamment fait l'objet d'un travail de Master 2 à l'université Pierre et Marie Curie, Paris (Borgès inédit) sous la direction de B. Clavel et E. Dufour, prenant part à un programme plus large permettant, à terme, « *d'établir une véritable cartographie des territoires de pêches, de remédier à la pauvreté actuelle des données sur l'acquisition et la régression de ces derniers et d'améliorer nos connaissances sur les activités halieutiques, domaine de l'histoire quotidienne encore trop méconnu* » (Clavel 2017, p. 26). L'analyse de plusieurs restes de poisson retrouvés dans des sites néolithiques du Bassin parisien (voir Clavel 2009 ; Clavel et Arbogast 2007) est prévue dans le cadre de ce programme de recherche, mais aucun résultat n'a encore été publié. En outre, la mise au jour de restes ichtyologiques sur les sites archéologiques est particulièrement indigente, notamment parce qu'elle nécessite des stratégies de fouille et de prélèvements adaptées à la conservation médiocre des os de poisson par rapport aux mammifères et à leur plus petite taille (Clavel 2017). En l'absence de restes néolithiques accessibles dans la région et de données déjà publiées, nous avons procédé à un inventaire des résultats isotopiques disponibles à plus large échelle dans des contextes antérieurs et couvrant un secteur plus étendu comprenant la France (exit la zone méditerranéenne et la façade atlantique), l'Allemagne et la Belgique. De récentes analyses isotopiques de l'azote dans les acides aminés spécifiques réalisées sur des échantillons néolithiques en Turquie, en complément de l'analyse isotopique du carbone et de l'azote du collagène global, ont également été prises en compte dans notre référentiel afin de multiplier les données. Toutes les références et les données considérées sont présentées en annexe de l'article Rey *et al.* en révision (Annexe B4, Table A4). Le référentiel aquatique est particulièrement discuté dans la section Chap7.I. Pour les valeurs d'éléments traces Sr/Ca et Ba/Ca, très peu de données sont disponibles pour les périodes anciennes et, à notre connaissance, aucune pour l'Europe occidentale. Si la question du poisson est discutée dans la section Chap2.VI.3.d et Chap8.II.5.b, notre référentiel n'inclut aucune valeur d'élément trace.

En ce qui concerne **les plantes**, une revue de la littérature a également mené à la construction d'un référentiel végétal pour le Néolithique suprarégional. Toutes les informations sont disponibles dans la section Chap7.I. Nous en proposons une synthèse en français ci-après. Comme il a été démontré que l'homme ne consommait pas les mêmes plantes que les herbivores (Bogaard *et al.* 2017), nous avons

préférée considérer, pour les isotopes de C et de N, les valeurs végétales mesurées sur d'autres sites issus d'un contexte similaire (Allemagne néolithique ; Styring *et al.* 2017 ; cf. encadré) plutôt que nos valeurs locales d'herbivores en soustrayant l'enrichissement trophique (qui correspondraient aux valeurs du fourrage). À l'inverse, pour le S, les valeurs des plantes ont été estimées à partir de la faune domestique, comme suggéré par R. Fernandes et collaborateurs (2015), puisque le rapport isotopique de S est très variable avec l'environnement et qu'il n'y a pas de fractionnement entre la proie et le consommateur (Nehlich 2015 ; Tanz et Schmidt 2010).

#### **Des valeurs de plantes en Europe ?**

Si quelques restes végétaux ont été retrouvés en contexte Néolithique, très peu ont fait l'objet d'analyses isotopiques et élémentaires. Pour l'Europe, on compte les données ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) d'A. Bogaard et collaborateurs (2013), reprises pour l'Allemagne par A. Styring et collaborateurs (2017 et 2014). Toutes les références et les données considérées sont présentées en annexe de l'article Rey *et al.* en révision (Annexe B4, Table A5). Un article récent propose les premières données isotopiques pour le Néolithique français : bien qu'il porte sur le sud de l'Hexagone dont le climat différent de celui du nord ne permet pas de comparaisons pertinentes, il offre une image intéressante sur la diversité des pratiques agricoles (Gavériaux *et al.* sous presse). Pour le nord de la France, les seules données disponibles concernent la période de l'âge du Fer et l'époque romaine (Aguilera *et al.* 2018), pour lesquelles les stratégies agricoles (fertilisation intensive notamment) empêchent également les comparaisons avec notre contexte. Pour compléter le tableau, des données sont disponibles pour l'âge du Bronze en Suisse (Varalli *et al.* 2021), et l'Antiquité du sud de la France (Alagich *et al.* 2018), mais les mêmes conclusions s'imposent concernant la gestion des sols et des cultures. Ces données ne peuvent donc pas être utilisées dans notre contexte.

Pour les données isotopiques de **l'azote dans les acides aminés**, seules des estimations peuvent être réalisées. Ainsi, nous avons utilisé la valeur  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  estimée par A. Styring et collaborateurs (2015) pour le site néolithique allemand de Vaihingen. Comme les plantes archéologiques ne contiennent pas suffisamment d'AA, la valeur  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  est estimée à partir de la comparaison de leur  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  mesuré et de la différence connue entre le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  et le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  des grains de céréales modernes. Dans le cas présent, cela revient à soustraire 0,5 ‰ aux valeurs de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  des graines carbonisées de Vaihingen. Cela donne une estimation très approximative, faute de mieux, basée sur des valeurs végétales d'un autre contexte combinées à une valeur  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{bulk-Glu}}$  approximative basée sur des échantillons modernes (également d'autres contextes) et elle n'est donnée qu'à titre indicatif. En outre, la valeur  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  des plantes est estimée à partir de la valeur  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  moyenne des humains et des animaux domestiques des échantillons analysés dans cette étude moins l'enrichissement trophique théorique de 0,4 ‰ (à savoir  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}} \approx 11,2 (\pm 1,7) - 0,4 \approx 10,8 \pm 1,7$  ‰) selon les recommandations d' A. Styring et collaborateurs (2015). Cette valeur est la même que celles estimées pour Vaihingen (*ibid.*). Nous renvoyons ici à la

base de données disponible en Annexe B4, Table A5 et Table A6. La Figure C2. 22, p. 140 montre l'étendue de la variabilité connue pour le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  des végétaux.

Pour les **éléments traces**, les seules données disponibles à notre connaissance sont celles publiées par J.H. Burton et T.D. Price (1990) et la synthèse de S. Peek et M.T. Clementz (2012) sur des échantillons modernes issus d'autres contextes géographiques (cf. Figure C2. 28 et Chap2.VI.3.b). En l'absence de données plus locales et contemporaines, ce corpus est utilisé à titre de comparaison des ordres de grandeurs pour l'interprétation des résultats Sr/Ca.

#### IX.2. Contexte géologique et détermination de la gamme locale de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Tous les sites de notre corpus sont situés le long de la vallée de l'Yonne, dans **une aire encadrée** par deux grandes unités géologiques distinctes : au nord-ouest, les **plaines sédimentaires du Bassin parisien**, au sud-est, les **hauts plateaux du Massif du Morvan**, petite région montagneuse localisée à l'extrémité nord-est du Massif Central (Figure C3. 39 et version numérique agrandissable en Annexe N1 ; légende en Annexe A16). L'Yonne prend sa source dans les tourbières du Morvan et se jette dans la Seine. Cette position confère à la microrégion **un contexte géologique complexe aux signatures  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variées**, dans le sol et les plantes. Une estimation de la gamme de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  locale a été établie à partir des valeurs de la base de données IRHUM (Willmes *et al.* 2013) : les échantillons de sol et de plantes considérés sont compris dans un rayon de 100 kilomètres autour des sites (Figure C3. 40). Les moyennes et écart-types des valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  sont compilées dans le Tableau C3. 26 pour chaque couche géologique régionale et montre la grande variabilité des valeurs. Les **valeurs de plantes** seront préférentiellement utilisées ici, comme elles reflètent une moyenne plus pertinente du Sr biodisponible que celles du sol (Bentley 2006 ; cf. Chap2.VII.3.a). Dans une étude plus récente, M. Willmes et collaborateurs (2018) ont cartographié les *isoscapes* de Sr pour toute la France à partir des unités géologiques (Figure C3. 41). Si la gamme semble d'abord homogène dans tout le Bassin parisien à l'échelle géologique, une observation plus fine permet de nuancer cette apparente homogénéité.

Les sites sont localisés principalement dans la **plaine alluviale du Quaternaire** (couche q3 ; Figure C3. 40), constituée de sables et graviers ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{plantes}} \text{ q3} \approx 0.708$ ). Juste à côté, en s'éloignant de la rivière, se trouve la couche c1 du **Crétacé inférieur** composée d'argiles, de sables et de grès ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{plantes}} \text{ c1} \approx 0.710$ ). En aval et toujours à proximité des sites se trouve le plateau du Sénonais (couche c2 du **Crétacé supérieur**,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{plantes}} \text{ c2} \approx 0.709$ ) avec de la craie et des marnes crayeuses. Quelques dizaines de kilomètres plus loin, dans le **plateau sédimentaire** du Bassin parisien, se trouvent les couches pq1, e et g, principalement composées de sables, d'argiles et de graviers, avec une signature  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  légèrement plus élevée ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{plantes}} \text{ pq1 et e} \approx 0.709$  et  $0.713$  respectivement). Par endroits **émergent les couches m et q2**, sur lesquelles les plantes présentent un rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

autour de 0,714. En amont vers le massif du Morvan, on retrouve le plateau et les **formations jurassiques** de l'Auxerrois avec des calcaires ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{plantes}}$  des couches j3 à j1 de 0,708 à 0,715 approximativement ; croissant de j3 à j1). Puis le massif du Morvan avec des **roches plutoniques et volcaniques** comme les granites et les gneiss présente une signature  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  nettement plus élevée ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{plantes}}$  des couches 15 à 18, bk et h3  $\approx$  0,714-0,719).

Ainsi, en considérant un rayon de 10-15 km autour des sites, qui pourrait représenter les milieux directs d'approvisionnement alimentaire, la zone comprend les couches **q3, q2, c1, c2 et j3**. Selon les données IRHUM compilées dans le Tableau C3. 26, la gamme correspondante du rapport isotopique de Sr biodisponible peut être d'environ **0,7075 à 0,7145**. Si l'on considère de façon plus restreinte les seules couches q3 et c1, la gamme locale se réduit à l'intervalle allant de 0,7081 à 0,7102. Une fois pris en compte ces rapports, très variables, de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  biodisponibles dans la région, il sera nécessaire de caractériser la gamme locale de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  à l'échelle des sites à partir des échantillons archéologiques animaux et humains.

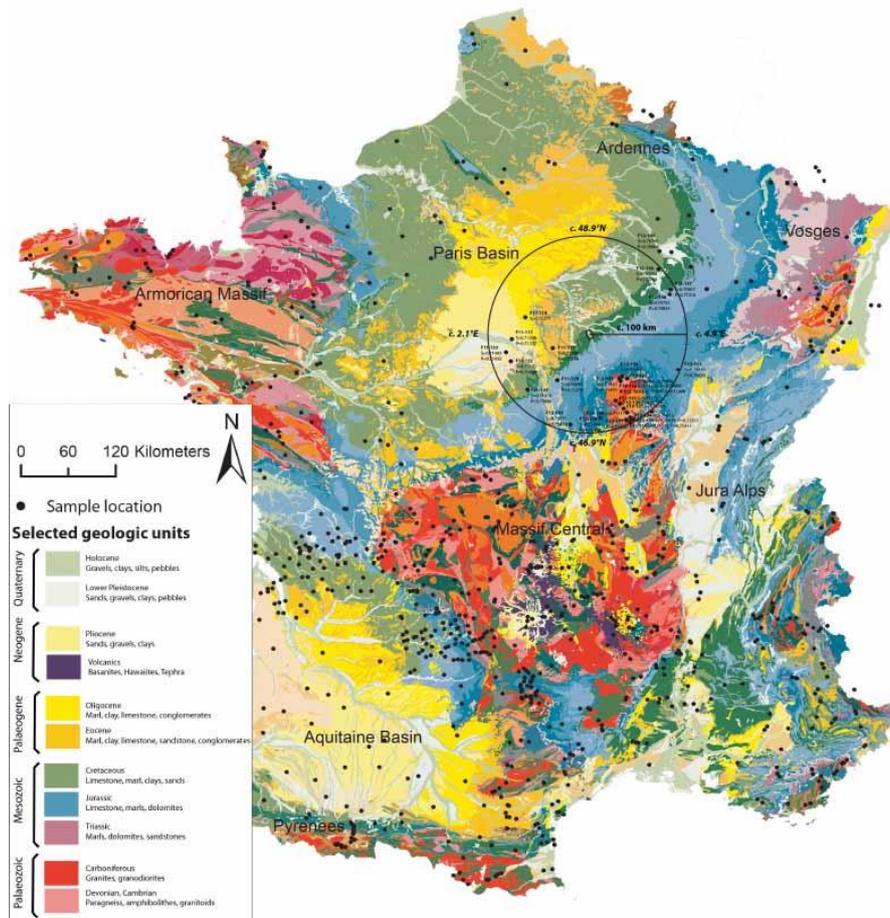


Figure C3. 39 : Carte de France (Géoportail) illustrant les principales unités géologiques et la localisation des sites de notre corpus dans la vallée de l'Yonne entourés d'un rayon de 100 km dans lequel sont indiqués les prélèvements Sr de la base de données iRhum (Willmes *et al*, 2013) utilisés comme valeurs de référence dans ce travail.

La zone d'intérêt (cercle) est détaillée page suivante (Figure C3. 40). Cette figure est disponible en version numérique (Annexe N1) permettant un grossissement interactif de la zone d'intérêt (la légende est disponible en Annexe A16).

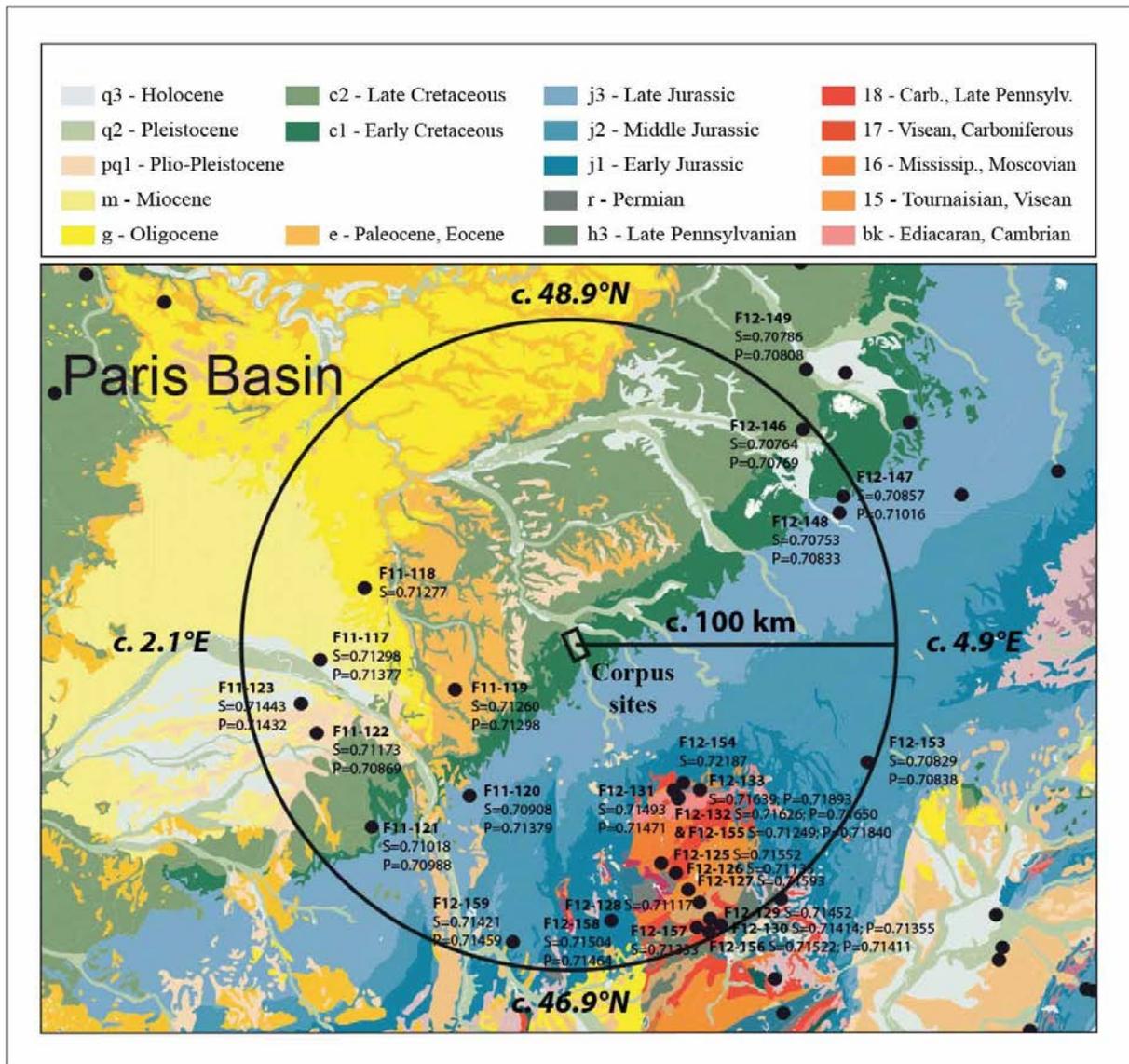


Figure C3. 40 : Carte géologique de la région entourant nos sites d'intérêt dans la vallée de l'Yonne sur un rayon de 100 km et localisation des prélèvements Sr de la base de données iRhum (Willmes *et al*, 2013) utilisés comme valeurs de référence dans ce travail.

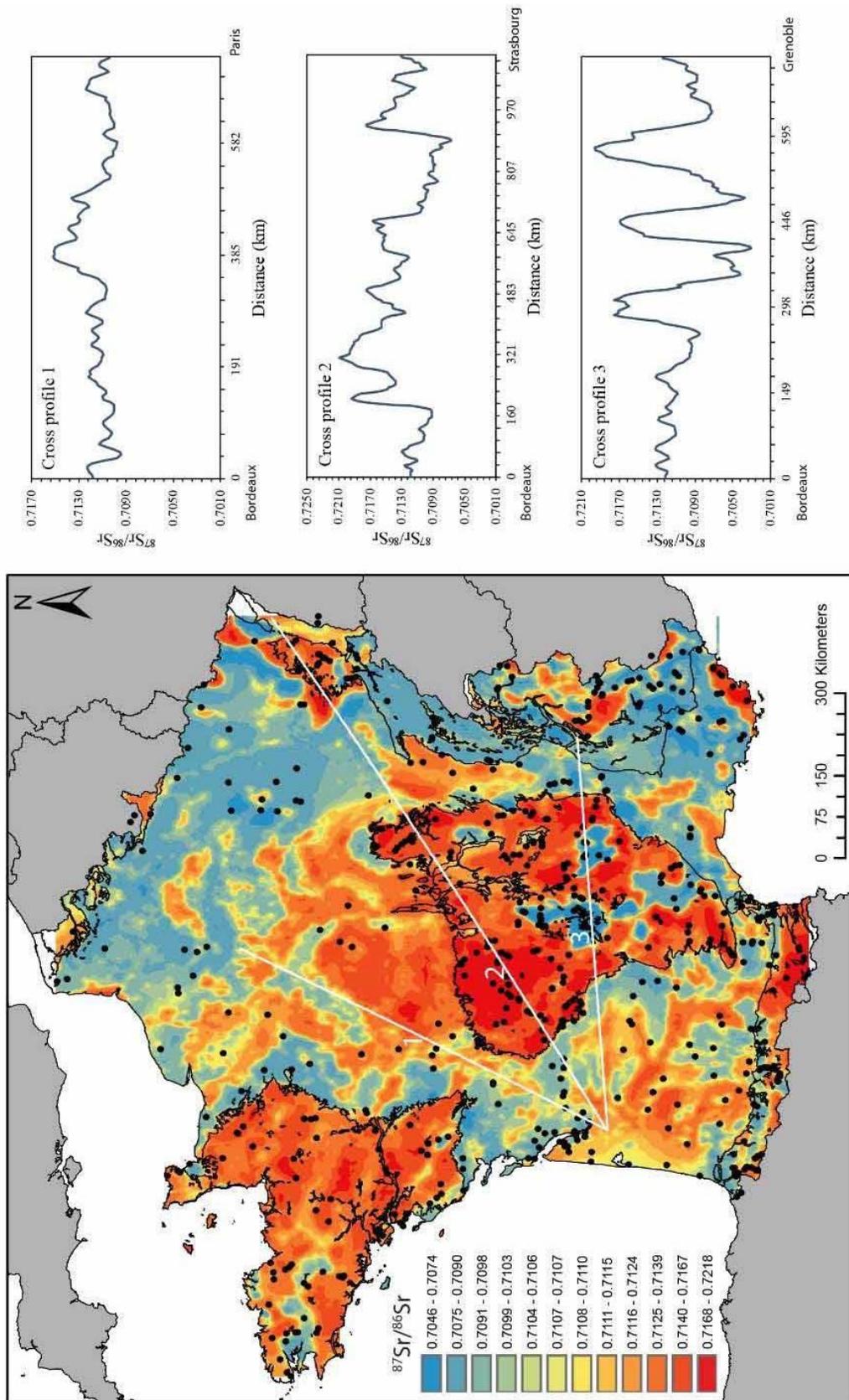


Figure C3. 41 : Carte de France des *isoscapes* de Sr réalisés par M. Willmes et collaborateurs (2018) à partir des données géologiques et des valeurs mesurées sur des échantillons de sols et de plantes. Trois exemples de profils croisés sont présentés (lignes blanches), partant de Bordeaux et allant vers Paris (profil croisé 1), Strasbourg (profil croisé 2) et Grenoble (profil croisé 3). Les points noirs indiquent la localisation des échantillons analysés. D'après Willmes *et al*, 2018.

Name	Region	Environment	Age	Age_radio	sample ID	N Soil sample	mean $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm \text{SD}$ (Soil)	range of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Soil)	N Plant sample	mean $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm \text{SD}$ (Plant)	range of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Plant)
bk	MC	metamorphic	Ediacaran, Cambrian	670-500 Ma	F12-132, F12-155	2	0.71438 ± 0.00267	0.71249 - 0.71626	2	0.71745 ± 0.00134	0.71650 - 0.71840
15	MC	plutonic	Tournaisien, Viséan	355-335 Ma	F12-128	1	0.71117 ± 0.00002		0		
16	MC	plutonic	Mississippian, Moscovian	355-305 Ma	F12-130	1	0.71414 ± 0.00004		1	0.71355 ± 0.00002	0.71411 ± 0.00002
17	MC	plutonic	Viséan, Carbonifère	335-305 Ma	F12-154, F12-157, F12-156	3	0.71681 ± 0.00448	0.71333 - 0.72187	1	0.71411 ± 0.00002	
18	MC	plutonic	Carbonifère, Late Pennsylv.	335-295 Ma	F12-129	1	0.71452 ± 0.00002		0		
h3	MC	sedimentary	Late Pennsylvanien	305-295 Ma	F12-131, F12-133	2	0.71566 ± 0.00703	0.71493 - 0.71639	2	0.71682 ± 0.00298	0.71471 - 0.71893
j1	PB, MC	sedimentary	Early Jurassic	203-175 Ma	F12-158	1	0.71460 ± 0.00002		1	0.71464 ± 0.00001	
j2	PB, MC	sedimentary	Middle Jurassic	175-154 Ma	F12-159, F12-153	2	0.71109 ± 0.00371	0.70846 - 0.71371	2	0.71149 ± 0.00439	0.70838 - 0.71459
j3	PB, MC	sedimentary	Late Jurassic	154-135 Ma	F11-120, F12-148	2	0.70830 ± 0.00710	0.70753 - 0.70908	2	0.71106 ± 0.00387	0.70833 - 0.71379
c1	PB	sedimentary	Early Crétacé	135-96 Ma	F12-147	1	0.70831 ± 0.00001		1	0.71016 ± 0.00001	
c2	PB	sedimentary	Late Crétacé	96-65 Ma	F11-121, F12-146	2	0.70886 ± 0.00786	0.70755 - 0.71018	2	0.70890 ± 0.00140	0.70791 - 0.70988
e	PB, MC	sedimentary	Paléocène, Eocène	65,0-33,7 Ma	F11-119	1	0.71260 ± 0.00001		1	0.71298 ± 0.00002	
g	PB, MC	sedimentary	Oligocène	33,7-23,5 Ma	F11-118	1	0.71277 ± 0.00002		0		
m	PB	sedimentary	Miocène	23,5-5,30 Ma	F11-117	1	0.71298 ± 0.00002		1	0.71377 ± 0.00002	
pq1	PB	sedimentary	Pliocène, Pliocène	5,30-0,75 Ma	F11-122	1	0.71173 ± 0.00002		1	0.70869 ± 0.00002	
q2	SF	sedimentary	Ionien, Late Pliocène	0,75-0,01 Ma	F11-123	1	0.71443 ± 0.00001		1	0.71432 ± 0.00002	
q3	SF	sedimentary	Holocène	0,01-0,00 Ma	F12-149*	1	0.70786 ± 0.00001		1	0.70808 ± 0.00001	

Tableau C3. 26 : Synthèse des valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  des échantillons de sol et de plantes de la région dans un rayon de 100 km autour des sites, par couches géologiques, d'après la base de données iRhum (Willmes et al, 2013). Les altitudes et les distances par rapport aux sites étudiés varient (de 91 à 627m et de c.40 à 110 km respectivement). MC = Massif central, PB = Bassin parisien, SF = Formations superficielles, Pennsylv. = Pennsylvanien, \*hors du rayon de 100 km.

## Chapitre 4. Analyses et traitement des données

Ce chapitre reprend en partie les informations données dans les articles correspondants et en propose une brève version française. Il pourvoit toutefois un certain nombre de précisions additionnelles quant à la préparation des échantillons et au traitement des résultats, en particulier pour les analyses qui ne sont pas réalisées en routine selon des protocoles communément utilisés (micro-échantillonnage et ablation laser). Les informations relatives à la création d'un catalogue individuel et à la gestion des données brutes sont également apportées dans ce chapitre. En revanche, le développement de l'analyse statistique n'est pas répété ici, étant déjà décrit dans le détail dans les articles correspondants. Enfin, une discussion autour de l'utilisation des modèles est proposée dans la dernière section et le chapitre se clôt par un récapitulatif des analyses réalisées.

### I. Analyse des isotopes stables dans le collagène osseux

---

#### I.1. Préparation des échantillons

Au total, 177 échantillons humains et 62 échantillons de faune ont été préparés pour l'analyse des isotopes stables du collagène osseux (cf. Chap5). Les fragments d'os ont été nettoyés en surface manuellement à l'aide d'une pointe abrasive Dremel© (Rey *et al.* 2017) ou par sablage à air comprimé d'oxydes d'aluminium (Rey *et al.* 2019). Ils ont ensuite été broyés à l'aide d'un mortier en agate et tamisés pour obtenir une poudre de granulométrie inférieure à 0,7 mm.

Le collagène a été extrait au laboratoire LAMPEA - UMR 7269 selon la méthode Longin (1971) réadaptée par Bocherens (1992). La première étape consiste à **déminéraliser** 0,5 g de poudre d'os dans une solution d'acide chlorhydrique fort (HCl 1M) 20 minutes à température ambiante (agitation magnétique) qui élimine les phosphates de calcium et autres minéraux et solubilise les acides fulviques. Une déminéralisation trop courte (< 20 min) ne permet pas d'éliminer tous les minéraux et une déminéralisation trop longue (>20 min) risque de détériorer le collagène (Ambrose 1990). La solution est alors filtrée pour éliminer la phase liquide. Les résidus (filtrat) déminéralisés sont ensuite **purifiés** à la soude (NaOH 0,125M) pendant 20 minutes à température ambiante pour éliminer les lipides et les acides humiques et fulviques (contaminants du sol). La solution est à nouveau filtrée pour éliminer la phase liquide et le filtrat **solubilisé** par l'ajout d'acide chlorhydrique faible (HCl 0,01M,

pH = 2) pendant 17h à 100°C afin de dérouler la triple hélice du collagène. Une filtration par Ezee-Filter™ permet cette fois de récupérer la phase liquide et d'éliminer les éventuels restes argileux. Les échantillons sont alors congelés à -65°C puis **lyophilisés** (déshydratation à froid permettant le passage de l'eau de l'état solide à l'état gazeux) afin d'obtenir du collagène pure à l'état solide, d'aspect blanc cotonneux.

Ce collagène est alors pesé pour déterminer le rendement d'extraction et stocké dans des flacons scellés au dessiccateur. Une micro-pesée permet ensuite de déposer 1mg de collagène lyophilisé dans une capsule en étain qui sera envoyée au laboratoire d'analyse en vue des mesures des teneurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) et élémentaires (%C et %N) par EA-IRMS (cf. Chap2.VIII). Le collagène restant est stocké dans des tubes Vial au laboratoire PACEA et disponible pour de futures analyses.

### I.2. Analyse du collagène global

Une partie des analyses a été réalisée, en plusieurs temps, au laboratoire **Iso-Analytical Limited** (Crewe, Royaume-Uni) à l'aide d'un spectromètre de masse isotopique à flot continu Europa Scientific 20-20 couplé à un analyseur élémentaire Europa Scientific. L'autre partie a été réalisée avec un spectromètre de masse isotopique à flot continu Finnigan Delta plus XP (Thermo Fisher Scientific, USA) couplé à un analyseur élémentaire Flash EA 1112 au Stable Light Isotope Laboratory du département d'archéologie de l'Université de Cap Town (Afrique du Sud) dans le cadre d'une collaboration avec D.-C. Salazar-Garcia.

Les valeurs ont été **calibrées** relativement aux standards V-PDB pour C, AIR pour N et V-CDT pour S en utilisant des standards internes eux-mêmes calibrés sur les standards internationaux (cf. Chap5.II, Table 2). À IsoAnalytical, un échantillon sur cinq environ a été mesuré en double.

Toutes les données et les valeurs de standards sont disponibles en Annexe A17 à 21 telles que transmises par les laboratoires. **L'incertitude analytique** est inférieure à 0,2‰ pour  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  et inférieure à 0,3‰ pour  $\delta^{34}\text{S}$  (calculée à l'aide du calculateur de Szpak *et al.* 2017 ; Annexe A22). Le détail du calcul de l'exactitude et de la précision de la mesure est fourni pour chaque session d'analyses en Annexe A22. L'incertitude analytique reste inférieure à la variabilité attendue au sein d'un même individu du fait de l'instabilité physiologique du collagène (Goude 2007).

En revanche, des différences ont été mesurées entre les laboratoires (cf. Chap5.III.1). Ce résultat est inférieur au seuil proposé par W.J. Pestle et collaborateurs, (2014) en-dessous duquel des différences de valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  mesurés dans différents laboratoires (selon différentes méthodes d'extractions, différents spectromètres de masse isotopiques et différentes méthodes de calibration notamment, en plus de différentes conditions analytiques telles que la température par exemple ;

Goude 2007 ; Pestle *et al.* 2014 ; Sealy *et al.* 2014) ne représentent pas nécessairement des variations biologiques.

La qualité du collagène et la fiabilité des données isotopiques ont été contrôlées selon les recommandations internationales : C>30 %, N>10 % (Ambrose 1993), C/N entre 2,9 et 3,6 (DeNiro 1985), S entre 0,15 et 0,35%, C/S entre 300-900 et N/S entre 100-300 (Nehlich et Richards 2009 ; cf. Chap5.II).

### I.3. Analyse des acides aminés spécifiques du collagène

À partir de 11 échantillons de collagène lyophilisés restants (6 échantillons humains et 5 de faune ; cf. Chap7), **les acides aminés ont été séparés** et analysés au laboratoire du Centre de Biogéochimie de la **JAMSTEC** (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology) de Yokosuka (Japon) d'après le protocole établi par le laboratoire et décrit en détail par Y. Naito et collaborateurs (2013). Le collagène a été **hydrolysé** dans de l'acide chlorhydrique (HCl 12N) à 110°C pendant 12h. Puis, une **dérivatisation** a été réalisée avec du chlorure de thionyle/2-propanol (TC/iPr, 1/4, v/v) à 110°C pendant 2h (estérification isopropylique) et avec du chlorure de pivaloyle/dichlorométhane (PC/DCM, 1/4, v/v) à 110°C pendant 2h (acylation). La couche de solvant organique a été extraite et déshydratée.

Après vérification des acides aminés par GC-FID/NPD, la composition isotopique de l'azote des acides aminés individuels a été mesurée par GC-C-IRMS (cf. Chap2.VIII) à l'aide d'un GC Agilent Technology 6890 couplé à un IRMS Thermo Finnigan Deltaplus XP via des fours de combustion et de réduction. L'analyse instrumentale a été réalisée conformément aux recommandations de Y. Chikaraishi et collaborateurs (2007 ; 2010). L'erreur analytique est inférieure à 0,5‰.

## II. Analyse des isotopes stables dans la dentine

---

### II.1. Préparation des échantillons

Au total, 19 individus (humains uniquement) ont été échantillonnés pour l'analyse des isotopes stables dans la dentine (cf. Chap6). Les échantillons ont été préparés au laboratoire LAMPEA - UMR 7269 (Aix en Provence, France).

Les dents avaient été préalablement **coupées longitudinalement** (cf. III.1) depuis la pointe des cuspides mésiales jusqu'à l'extrémité des racines, le long de l'axe bucco-lingual. Les parties mésiales ont été utilisées pour les analyses par ablation laser (cf. III.1). Pour les individus sélectionnés pour l'analyse de la dentine (cf. Rey *et al.*, 2021, Table 1 ; Chap6), les moitiés distales restantes de chaque dent ont été soit entièrement utilisées pour l'analyse incrémentielle par micro-échantillonnage de la

dentine (pour deux individus : GLN 221B et GLN 284, cf. *infra*), soit recoupées en deux dans le sens de la longueur puis perpendiculairement à la jonction couronne-racine (correspondant à 1/8 de dent) pour l'analyse de la dentine globale coronaire (dans 16 cas) ou radicaire (dans 1 cas ; cf. Rey *et al.*, 2021, Table 1 ; Chap6). Le choix d'analyser la couronne ou la racine s'est effectué sur la période d'âge ciblée (cf. Chap6). Les fragments restants sont stockés dans des tubes Vial au laboratoire PACEA pour une utilisation future.

Les fragments de dents ont été **nettoyés en surface** par projection à air comprimée d'une poudre d'oxydes d'aluminium ( $AlO^3$ , non contaminant pour les mesures EA-IRMS) à l'aide d'une sableuse pour éliminer les contaminations extérieures, le ciment de la racine et l'éventuelle dentine secondaire ou tertiaire si elle était présente (les résidus d'oxydes d'aluminium ont été soufflés par pulsions d'air comprimé).

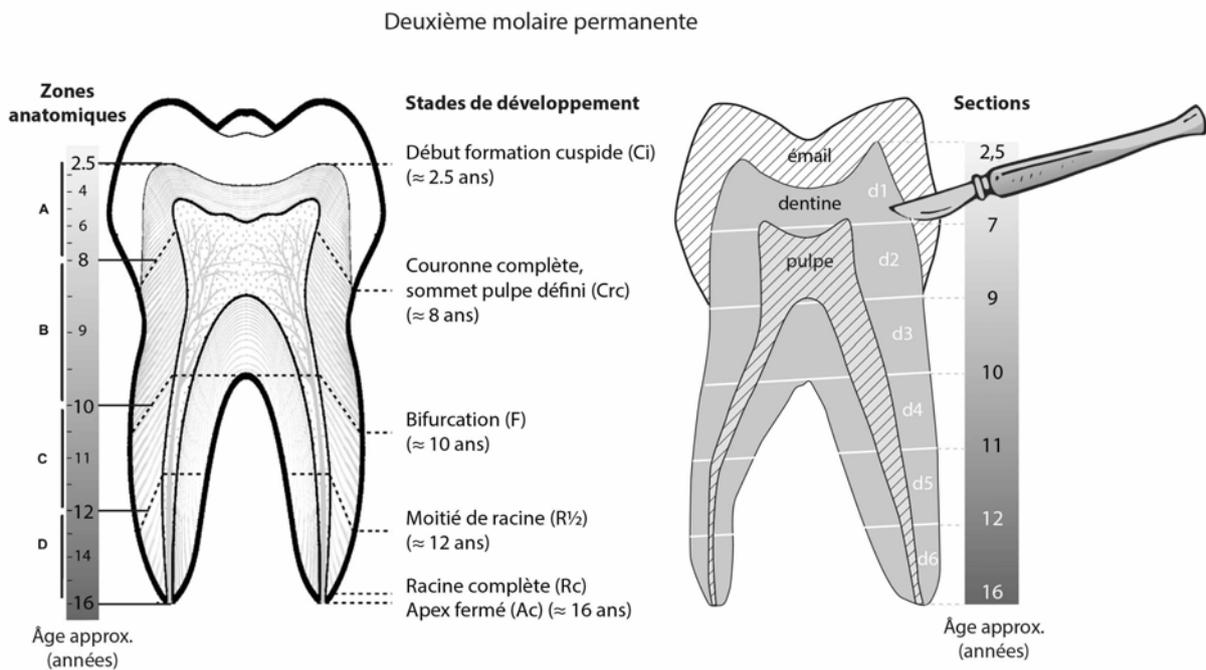
Les fragments ont ensuite été traités pour **l'extraction du collagène** selon le protocole standard du laboratoire LAMPEA (Goude *et al.* 2019) et, pour l'analyse incrémentielle, selon le protocole décrit par J. Beaumont et collaborateurs (2013). Ils ont d'abord été **déminéralisés** dans de l'acide chlorhydrique (HCl 0,5M à 4°C ou 1M à température ambiante pour les échantillons les plus résistants) pendant plusieurs jours et rincés à l'eau distillée une fois complètement déminéralisés (les fragments sont devenus mous). Ils ont ensuite été **nettoyés à la soude** (NaOH 0,125 M) pendant 20h pour éliminer les éventuels contaminants restants et rincés à nouveau. À ce stade, des sections transversales ont été réalisées pour deux échantillons avec un scalpel stérilisé pour obtenir six sections d'une épaisseur d'environ 2 mm (cf. *infra*). Chaque échantillon (sections incrémentielles et dentine coronaire ou radicaire globale) a ensuite été solubilisé dans de l'acide chlorhydrique faible (HCl 0,01M) à 100°C pendant 17h et filtré avec un Ezee-Filter™ (sauf pour les microsections). Les échantillons solubilisés ont été congelés et **lyophilisés** pendant 48h.

- **Micro-échantillonnage et alignement de l'âge**

Pour l'analyse incrémentielle par micro-échantillonnage, la **moitié de dent entière** (toute la longueur) a été coupée en **6 sections horizontales de 2 mm** (Figure C4. 1). Cette stratégie de coupe, plus épaisse que dans d'autres études, a été choisie pour garantir une quantité suffisante de collagène pour la triple analyse du C, N et S, compte tenu de l'hétérogénéité déjà connue de la préservation du collagène dans nos échantillons. Cette stratégie ne permet qu'un aperçu préliminaire du potentiel d'une telle approche.

Les **tranches d'âge approximatives** représentées par chaque section ont été estimées selon A. Czermak et collaborateurs (2020). Le taux de croissance réel au sein des populations passées n'étant pas connu, on suppose généralement que la dentine se développe à un rythme régulier d'environ 4-6  $\mu\text{m}$  par jour (Dean et Scandrett 1995). La durée (en années) du développement de la dentine est généralement divisée par le nombre de sections en fonction de la longueur de la dent de manière à obtenir l'âge médian pour chaque section (Beaumont et Montgomery 2015). Cependant, certaines

études ont montré que le taux de croissance est variable tout au long de la formation d'une dent (Dean et Cole 2013 ; Scharlotta *et al.* 2018). Récemment, A. Czermak et collaborateurs. (2020) ont réévalué l'alignement de l'âge à partir d'une "lecture plus détaillée d'AlQahtani et al. (2010)" et ont proposé une nouvelle approche en utilisant différents taux de croissance en fonction des zones anatomiques des dents. La présente étude s'appuie sur cette méthode de calibration pour attribuer une **fourchette d'âge approximative à chaque section** et, à partir de celle-ci, l'estimation de l'âge moyen. Un schéma de calibration est représenté sur la Figure C4. 1. Afin de simplifier la discussion, l'âge moyen estimé sera utilisé dans le texte, mais la fourchette d'erreur est affichée sur les graphiques (cf. Chap6).



**Figure C4. 1 : Schéma de calibration de l'âge approximatif estimé des sections analysées dans cette étude, représentées à droite, de d1 à d6. La calibration est basée sur les estimations d'âge données par A. Czermak et collaborateurs (2020 ; à gauche) en fonction du taux de croissance différentiel des zones anatomiques de la deuxième molaire permanente et de leur stade de développement correspondant, d'après l'atlas de S. AlQahtani et collaborateurs (2010). Modifié d'après Czermak *et al.*, 2020.**

Selon S.J. AlQahtani et collaborateurs (2010), la dentine de la M2 commence à se développer à 2,5 +/- 0,5 ans et se termine à 16 +/- 0,5 ans (du stade Ci à Ac). Le développement des deux dents échantillonnées ici était terminé. La Figure C4. 1 montre les âges approximatifs estimés délimitant chaque section. Compte tenu de l'épaisseur importante des sections, la variabilité du taux de croissance est moyennée, de même que les rapports isotopiques enregistrés, ce qui rend les éventuelles erreurs de détermination de l'âge moins importantes. Les valeurs des sections d1 et d2 ont ensuite été moyennées pour obtenir une moyenne de dentine coronaire comparable aux autres échantillons de dentine coronaire globale (*bulk*) ciblant un signal enregistré globalement entre 2,5 +/- 0,5 ans et 8,5 +/- 0,5 ans.

- *Note sur l'usure dentaire*

Dans le cas des dents les plus usées (apparition d'îlots dentinaires pour deux dents notamment : GLN 317 et Mon 04-110 ; cf. Tableau C3. 4, p.213 et Tableau C3. 8, p.242), la perte de dentine reste négligeable et ne devrait pas avoir d'influence sur les résultats : les interprétations en termes d'âge notamment restent similaires compte tenu des estimations déjà largement moyennées et de la variation interindividuelle réelle du calendrier de croissance dentaire.

## II.2. Analyses isotopiques du collagène

Pour chaque échantillon (sections incrémentielles et dentine coronaire ou radiculaire globale), le collagène lyophilisé a été envoyé au laboratoire **IsoAnalytical Ltd**, (Crewe, UK) et analysé par EA-IRMS avec un analyseur élémentaire Europa Scientific couplé à un spectromètre de masse isotopique Europa Scientific 20-20.

Les valeurs isotopiques ont été **corrigées** en utilisant pour chaque série des standards internes calibrées sur des standards internationaux de l'IAEA (toutes les données sont disponibles en Annexe A17 à 21). L'incertitude analytique (calculée à l'aide du calculateur de Szpak *et al.* 2017) est de 0,1‰ pour CN et de 0,3‰ pour S (Annexe A22).

La **qualité du collagène** et la fiabilité des données isotopiques ont été contrôlées selon les recommandations internationales : C>30 %, N>10 % (Ambrose 1993), C/N entre 2,9 et 3,6 (DeNiro 1985), S entre 0,15 et 0,35%, C/S entre 300-900 et N/S entre 100-300 (Nehlich et Richards 2009 ; cf. Chap6).

## III. L'ablation laser (analyse des éléments traces et du Sr isotopique)

---

### III.1. Préparation des échantillons

Les analyses par ablation laser des éléments traces et du Sr isotopique ont été conduites sur 62 humains (émail et os) et 32 animaux (*idem* ; cf. Chap8). L'ensemble des échantillons a été préparé au laboratoire LAMPEA - UMR 7269 (Aix en Provence, France).

Les **dents** ont été **coupées** en deux avec une scie diamantée le long de l'axe longitudinal bucco-lingual, en passant par le sommet des cuspides mésiales et perpendiculairement au collet, i.e. à la jonction couronne-racine (en accord avec les protocoles d'histologie en vigueur ; Figure C4. 2). La partie mésiale a été incluse, avec un fragment d'os provenant du même individu lorsque cela était possible, dans une **résine époxy** (diamètre 25mm ; Araldite®). Les moulages ont été polis manuellement (granulométrie P4000) pour obtenir une surface lisse. La moitié restante (non moulée) des dents a été

en partie utilisée pour d'autres analyses (cf. II). La moitié incorporée pourra également être réutilisée. En particulier, des lames minces pourront être réalisées pour une **analyse histologique** des rythmes de croissance de l'émail afin d'évaluer s'il est possible de comparer directement les stries de croissances avec le profil d'ablation laser. Des tests ont déjà été réalisés avec l'aide d'E. Pubert (UMR 5199 PACEA) et l'analyse est en cours.



**Figure C4. 2 : Coupe d'une dent (échantillon GLN 212) selon l'axe bucco-lingual en passant par les cuspidés mésiales et moulage de la dent incluse dans la résine. Photographies L. Rey.**

Aucun prétraitement ne peut être appliqué, ni à l'os ni à l'émail (comme recommandé par Balter *et al.* 2002). Pour l'os en particulier, l'analyse nécessite que le fragment soit entier et ne peut donc être pulvérisé pour les besoins d'un prétraitement. Une éventuelle contamination diagénétique sera discutée plus en détail (cf. Chap8). Malgré ce risque, nous avons tout de même tenté les mesures à partir de fragments des échantillons d'os restants des précédentes analyses, à titre expérimental essentiellement. En particulier, la possibilité de quantifier a posteriori la diagénèse sera examinée. Une analyse ultérieure des os (à partir des mêmes fragments sur les échantillons restants) en solution, préalablement nettoyés à l'acide, permettrait de supprimer au moins une partie de la diagénèse et de voir si les ratios mesurés sont similaires à ceux obtenus ici par ablation laser après nettoyage post-hoc des données.

### III.2. Ablation laser et acquisition des mesures

L'analyse par ablation laser a été réalisée au Laboratoire de Géologie de Lyon, Terre, Planètes, Environnement (LGLTPE) - UMR 5276 ENS (Lyon, France) sous la direction de Vincent Balter et avec l'aide de Théo Tacail.

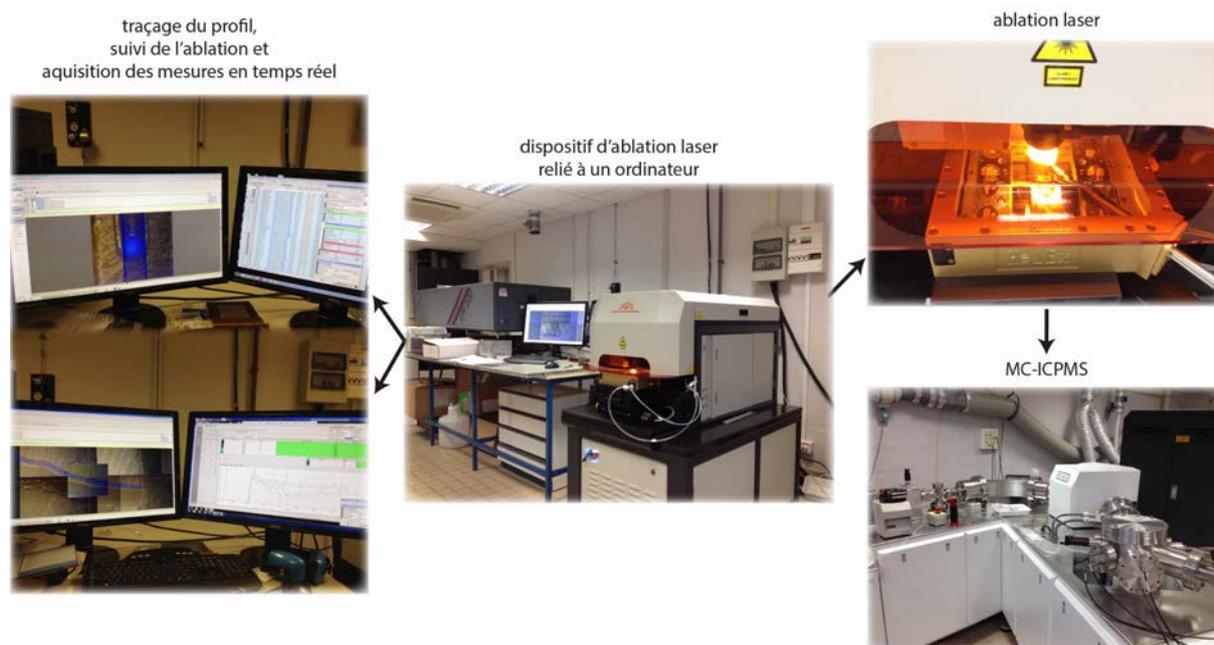


Figure C4. 3 : Illustration du dispositif d'ablation laser connecté à un MC-ICPMS (Nu500 HR) et du suivi d'acquisition des mesures en temps réel. Photographies L. Rey.

Une fois **l'échantillon introduit dans le dispositif laser**, une caméra microscope reliée à un ordinateur permet de **tracer les profils** à partir des images des échantillons grossis plusieurs fois (le dispositif permet de se déplacer sur l'image et de zoomer pour repérer les stries et éventuelles fissures à éviter ; Figure C4. 3). Les profils ont été tracés **le long de la jonction émail-dentine (EDJ)**, comme recommandé par T. Tacail et collaborateurs (2017), afin de croiser les stries de Retzius et les stries transversales, au plus loin de la surface externe plus sujette aux altérations diagenétiques (Figure C4. 4). Ce procédé permet de suivre un signal enregistré dans le temps, depuis le début jusqu'à la fin de la formation de la couronne (cf. Chap2.III.4). Pour les humains et les porcs, les profils ont été tracés de l'apex occlusal ("ocl") vers le collet ("col"), c'est-à-dire dans le sens de croissance de la couronne, et inversement pour les dents d'herbivores (l'interprétation des profils en termes d'âge est donc à considérer en sens inverse). Lorsque cela était possible, les profils dans les dents humaines ont été réalisés du côté lingual (L) pour les molaires inférieures et du côté vestibulaire (V) pour les molaires supérieures (moins affectés par l'usure dentaire). Les profils d'éléments traces et de Sr isotopique se suivent toujours, aussi près que possible (Figure C4. 4 ; tous les profils sont donnés en Annexe A23 et 24 (et en ligne Annexe N2\_Profiles\_pictures). Dans les os, un ou deux petits profils ont été tracés pour obtenir un ensemble de points à moyenner. Pour certains individus, en particulier pour les plus grandes dents d'animaux, deux ou trois profils ont été réalisés dans l'émail, parfois disjoints, pour couvrir, bien que de façon interrompue, toute la période de formation de la couronne (cf. Chap8). De plus, les profils dans les dents d'herbivores ont été tracés dans la partie interne ou externe de l'émail, selon les échantillons (d'après les études de Zazzo *et al.* 2005 et Müller *et al.* 2019, il semblerait que l'analyse de l'émail interne soit plus adaptée). Pour un échantillon de bœuf (GLN F3), nous avons réalisé

plusieurs profils dans la surface interne et externe de l'émail, afin de tester les éventuelles différences entre les deux. Le nombre de profils réalisés pour chaque individu est disponible en Annexe A25.

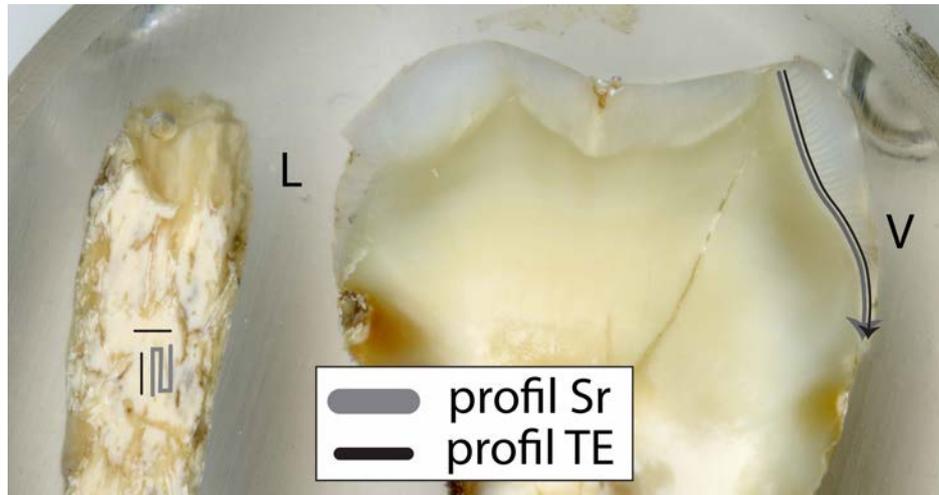


Figure C4. 4 : Exemple de profils d'ablation laser réalisés dans l'émail d'une M2 supérieure gauche, le long de la jonction émail-dentine, et dans l'os de l'échantillon GLN 221B. Le profil plus fin des éléments traces (TE) a été réalisé à côté du profil plus épais du Sr isotopique. Le côté vestibulaire (V), en meilleur état que le côté lingual (L), a été privilégié.

L'ablation laser des échantillons a été exécutée selon une procédure séquentielle : **chaque séquence** était composée de **3 à 6 échantillons encadrés par un standard international SRM-1400** ("bone ash", de valeurs connues ; cf. III.4) au début et à la fin de la séquence pour corriger les biais instrumentaux (système de bracketing). Le blanc a été mesuré pendant 5 secondes (laser éteint) avant chaque mesure. Tous les détails sont donnés dans Tacail *et al.* 2017.

Le dispositif d'ablation laser était connecté à un **ICPMS quadripôle** (Q-ICPMS, X series, ThermoFisher) pour la mesure des concentrations en éléments traces (**41 éléments ont été mesurés**, dont **seulement 6 sont exploités ici** ; Tableau C4. 1 ; cf. Annexe N3\_Raw\_data\_TE\_Python) et à un **ICPMS multi-collecteur** (MC-ICPMS, Nu500 HR, Nu Instruments) pour les mesures des isotopes du Sr. La taille du spot pour l'acquisition des éléments traces et des isotopes de Sr était respectivement de 50 et 150  $\mu\text{m}$ , avec une fréquence de 10 et 20 Hz et une vitesse de 10  $\mu\text{m/s}$  pour les deux (les autres paramètres instrumentaux sont donnés en Annexe A26).

élément	symbole	isotope	élément	symbole	isotope
Lithium	Li	7Li 6Li	Etain	Sn	120Sn 118Sn
<b>Magnésium</b>	<b>Mg</b>	<b>26Mg</b> <b>25Mg</b>	Antimoine	Sb	121Sb
Silicium	Si	29Si	<b>Barium</b>	<b>Ba</b>	<b>138Ba</b> <b>137Ba</b>
Soufre	S	34S	Lanthane	La	139La
<b>Calcium</b>	<b>Ca</b>	<b>46Ca</b> <b>43Ca</b>	Cérium	Ce	140Ce
Titane	Ti	49Ti 47Ti	Praséodyme	Pr	141Pr
Chlore ??	Cl O	51Cl O	Néodyme	Nd	146Nd 143Nd
Chrome	Cr	53Cr	Samarium	Sm	149Sm 147Sm
<b>Manganèse</b>	<b>Mn</b>	<b>55Mn</b>	Europium	Eu	153Eu 151Eu
Fer	Fe	57Fe	Gadolinium	Gd	157Gd 155Gd
Cobalt	Co	59Co	Dysprosium	Dy	163Dy 161Dy
Nickel	Ni	62Ni 61Ni 60Ni	Erbium	Er	167Er 166Er
Cuivre	Cu	65Cu 63Cu	Ytterbium	Yb	173Yb 172Yb
Zinc	Zn	68Zn 66Zn	Lutécium	Lu	175Lu
Krypton	Kr	83Kr	Platine	Pt	195Pt 194Pt
Rubidium	Rb	85Rb <b>88Sr</b>	Or	Au	197Au 202Hg
<b>Strontium</b>	<b>Sr</b>	<b>87Sr</b> <b>86Sr</b>	Mercur	Hg	201Hg 200Hg
Yttrium	Y	89Y	Plomb	Pb	207Pb 204Pb
Zirconium	Zr	90Zr	Thorium	Th	232Th
Argent	Ag	109Ag 107Ag	<b>Uranium</b>	<b>U</b>	<b>238U</b>
Cadmium	Cd	111Cd			

Tableau C4. 1 : Liste des éléments et isotopes relatifs mesurés par LA-Q-ICPMS. Les éléments en gras sont ceux discutés dans ce travail.

### III.1. Traitement des données brutes

Les séquences de données brutes ont été traitées de manière **semi-automatisée** avec le logiciel Spyder Python 2.7 afin d'obtenir des profils corrigés pour chaque échantillon, puis avec le logiciel RStudio 1.3.959 pour obtenir des fichiers Excel exploitables, pour générer les graphiques et courbes de données et pour l'analyse statistique (packages FactoMineR et PerformanceAnalytics). En effet, la technique LA-ICP-MS génère rapidement une quantité considérable de données (Big Data) qui doivent être traitées et réduites avant d'être interprétées avec précision (Tacaïl *et al.* 2017). Les codes ont été créés et rendus disponibles pour notre utilisation par T. Tacaïl pour Python Spyder et F. Santos (UMR 5199 PACEA) pour R. Tous les scripts sont disponibles en Annexe A27 à 31 et en Annexe N4\_scripts.

NB : D'autres scripts automatisés de traitements des données ont été proposés et mis en libre accès pour en simplifier l'accès aux non spécialistes (Sforna et Lugli 2017). Ces derniers corrigent uniquement les échantillons des déviations analytiques (calibration avec les standards) et non de la possible diagénèse qui doit être évaluée ensuite.

Ci-après un aperçu des **différentes étapes principales de traitement numérique des données**. L'ensemble de ces étapes a été réalisé à la suite des sessions d'acquisition des mesures. Ces dernières avaient duré une semaine pour l'acquisition des données Sr et une autre pour l'acquisition des données d'éléments traces. En revanche, le **traitement des données**, complexe et novateur, a nécessité **plusieurs mois de travail**. Les récents développements faisant suite à ce travail permettent aujourd'hui d'obtenir des résultats propres en un temps beaucoup plus court (quelques jours). L'ensemble des étapes qui suivent a été réalisé en deux temps, une première fois pour la série de mesures du Sr isotopiques puis une seconde fois pour la série de mesures des éléments traces.

### III.1.a. Création des fichiers de données brutes

Au cours des acquisitions de chaque séquence, les résultats ont été copiés dans un fichier Excel par séquence (LR\_X) avec l'ensemble des **résultats bruts non corrigés** (blancs compris : les données de tous les échantillons et standards d'une même séquence sont à la suite les uns des autres ; cf. Annexes N3\_Raw\_data\_Sr/TE\_Python). En plus, un fichier Excel par séquence a été créé avec la liste des échantillons et standards dans chaque séquence (LR\_X\_SEQ).

### III.1.b. Obtention des fichiers corrigés par les standards

Un script Python-Spyder (Annexe A27 ; Annexe N4\_script\_process) permet d'extraire les données de ces fichiers pour générer un fichier Excel par séquence (LR\_X\_processed) avec l'ensemble des **résultats corrigés** (pour les éléments Sr, Ba, Mg, Mn, U, Rb, Fe, Zn, Pb, Th) composé de plusieurs onglets, avec **un seul profil** d'échantillon ou de standard **par onglet** en plus d'un onglet pour les moyennes et écart-types (cf. Annexes N5\_Data\_out\_Sr/TE). Chaque profil a été vérifié individuellement (e.g. séparations inter-profil effectuées au bon endroit). Ces fichiers comprennent également les valeurs non corrigées des autres éléments mesurés (cf. Tableau C4. 1, p. 310).

Brièvement, les valeurs de blanc ont d'abord permis de séparer automatiquement les profils. Ces derniers ont ensuite été traités à l'aide d'un filtre 3-sigma pour éliminer les valeurs aberrantes. Pour les éléments traces, les profils traités ont été corrigés par les standards d'encadrement (avec un facteur dépendant de leur position relative par rapport au standard) et rapportés à l'élément calcium (Ca). Les rapports Sr/Ca, Ba/Ca, Mg/Ca, Mn/Ca et U/Ca ont été calculés en utilisant les abondances naturelles de  $^{44}\text{Ca}$ ,  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{138}\text{Ba}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{55}\text{Mn}$  et  $^{238}\text{U}$ . Les concentrations élémentaires de  $^{88}\text{Sr}$  et  $^{43}\text{Ca}$  sont également rapportées. Tous les détails sur la procédure de traitement des données sont décrits par T. Tacail et collaborateurs (2017). Pour les isotopes Sr, les profils traités ont été corrigés par les standards

d'encadrement (avec un facteur dépendant de leur position relative par rapport au standard) et le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  a été calculé en utilisant la correction du  $^{85}\text{Rb}$  et du  $^{83}\text{Kr}$ . Tous les détails sur la procédure de traitement des données sont décrits par V. Balter et collaborateurs (2012).

### III.1.c. Obtention d'un unique fichier pour tous les profils

Un script R (Annexe A28 ; Annexe \_N4\_script\_extraction) a ensuite permis de regrouper l'ensemble des données (pour les seuls éléments considérés dans ce travail) en **un seul fichier .csv** pour les éléments traces, d'une part, et pour le Sr isotopique d'autre part (Annexes N6\_Global\_File\_Sr/TE). La Figure C4. 5 montre un aperçu du fichier généré pour les éléments traces. Chaque ligne correspond à un profil d'échantillon ou de standard pour une variable considérée (2590 lignes pour les éléments traces) et les colonnes (de V5 à V900) correspondent aux points d'ablation le long d'un profil. Chaque ligne donne donc l'ensemble des valeurs d'un profil (pour un échantillon et une variable données). On compte environ 600 lignes x 500 colonnes pour le **Sr isotopique (2 variables)** et 2600 lignes x 800 colonnes pour les **éléments traces (7 variables)**, soit un total d'environ **2 380 000 données** (pour les variables sélectionnées dans ce travail uniquement).

File	ID Type	ID Profil	Variable	V5	V6	V7	V8
1 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	STD1	SRM1400-1	R_T88Sr	0.0033961	0.0019286	0.0016894	0.0026213
2 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	STD1	SRM1400-1	R_T138Ba	0.0036718	0.0027415	0.0025572	0.0029709
3 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	STD1	SRM1400-1	R_T26Mg	0.0037795	0.0017179	0.0049744	-0.0045785
4 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	STD1	SRM1400-1	R_T55Mn	0.0004198	0.0004373	0.0005017	0.0004016
5 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	STD1	SRM1400-1	R_T238U	0.0081064	0.0051998	0.0045958	0.0090885
6 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	STD1	SRM1400-1	88Sr	7886.333	6485.333	5785.333	5285.333
7 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	STD1	SRM1400-1	43Ca	3796.250	5497.250	5598.250	3296.250
8 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	s1	GLN 284	Corr_R_T88Sr	0.0008038	0.0006737	0.0006085	0.0005283
9 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	s1	GLN 284	Corr_R_T138Ba	0.0017491	0.0015769	0.0014452	0.0013210
10 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	s1	GLN 284	Corr_R_T26Mg	0.1212483	0.1131726	0.1167974	0.0935192
11 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	s1	GLN 284	R_T55Mn	0.0000165	0.0000398	0.0000209	0.0000393
12 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	s1	GLN 284	Corr_R_T238U	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
13 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	s1	GLN 284	88Sr	49213.333	48713.333	45093.333	42283.333
14 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	s1	GLN 284	43Ca	31054.250	36674.250	37584.250	40594.250
15 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	s2	GLN 215B	Corr_R_T88Sr	0.0001912	0.0002709	0.0002023	0.0002533
16 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	s2	GLN 215B	Corr_R_T138Ba	0.0000170	0.0000274	0.0000200	0.0000258
17 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	s2	GLN 215B	Corr_R_T26Mg	0.0366630	0.0431542	0.0302872	0.0289470
18 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	s2	GLN 215B	R_T55Mn	-0.0000055	-0.0000224	-0.0000248	0.0000142
19 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	s2	GLN 215B	Corr_R_T238U	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
20 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	s2	GLN 215B	88Sr	9088.333	10993.333	9188.333	10893.333
21 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	s2	GLN 215B	43Ca	29554.250	25234.250	28244.250	26744.250
22 LR_1_TRACES_SEQ_processed.xlsx	s3	GLN 294	Corr_R_T88Sr	0.0004360	0.0004009	0.0004848	0.0004009

Figure C4. 5 : Extrait du fichier généré par le code R pour les éléments traces à partir des fichiers eux-mêmes générés par le code Python pour 1) corriger les données par rapport aux standards SRM 1400 (« Corr » dans la colonne Variable), 2) les exprimer relativement au Ca (« R » dans la colonne Variable) et 3) par rapport aux abondances naturelles de  $^{44}\text{Ca}$ ,  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{138}\text{Ba}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{55}\text{Mn}$  et  $^{238}\text{U}$  (« T » dans la colonne Variable). Dans la colonne ID Type, « STD1 » et « STD2 » indiquent les standards qui encadrent les échantillons ; « s1 », « s2 », « s3 » indiquent les échantillons. Les colonnes V5 à V900 correspondent aux points d'ablation de chaque mesure. Chaque ligne correspond au profil d'un échantillon (ou standard) pour une variable considérée. Le fichier comprend 2590 lignes au total.

Un tri des données a permis d'obtenir, pour les échantillons seulement (sans les standards), quatre onglets regroupés dans un seul fichier (Annexes N7\_TOT\_profiles) : un onglet pour les éléments

traces dans l'émail (TE enamel), un pour les éléments traces dans l'os (TE bone), un pour le Sr isotopique dans l'émail (Sr enamel) et le dernier pour le Sr isotopique dans (Sr bone).

#### III.1.d. Nettoyage de la diagénèse

À partir de ces données, un nouveau **nettoyage** a été appliqué pour **éliminer les portions susceptibles d'être diagénétiques** (données en rouge dans le fichier Annexe N7\_TOT\_profiles). Ce nettoyage est détaillé dans le Chapitre 8. Cette étape est probablement **la plus longue et la plus complexe**.

Quatre **fichiers** « **Nett\_[...].csv** » ont ainsi été obtenus pour les quatre types de proxy (TE enamel, TE bone, Sr enamel, Sr bone) directement **utilisables pour l'analyse des données** (cf. Annexe N8\_csv source) : les valeurs supprimées apparaissent en rouge (pour information) dans le fichier Annexe N7\_TOT\_profiles mais ont été supprimées des fichiers **Nett.csv** pour l'analyse statistique, pour la création des courbes de valeurs propres et pour le calcul des moyennes individuelles.

Par opposition, les **fichiers** « **TOT\_[...].csv** » contiennent l'ensemble des données, incluant les parties diagénétiques.

#### III.1.e. Calcul des moyennes individuelles

Enfin, un autre script R (Annexe A29 ; Annexe N4\_scripts\_gener\_moyIndiv) permet d'obtenir un seul fichier Excel comprenant toutes les **valeurs moyennes et les écart-types par individu** (cf. Annexe A34 et Annexe B5, table S1 de l'article Rey *et al.* 2022 ; les différents profils d'un même individu sont donc regroupés ensemble ; cf. Annexe A25) pour chaque variable à partir des **profils nettoyés** (les données en rouge du fichier Annexes N7\_TOT\_profiles ne sont pas considérées dans le calcul de la moyenne).

Il est à noter que les valeurs moyennes sont exprimées tantôt en **log(Sr,Ba/Ca)** dans l'Annexe A34 et la section Chap8.II par soucis d'homogénéité avec la plupart des données de comparaisons de la littérature discutées d'un point de vue anthropologique dans ce travail, tantôt en **log(Sr,Ba/Ca\*1000)** dans l'Annexe B5 de l'article Rey *et al.* 2022. Les deux notations sont couramment utilisées.

NB : Les scripts permettant de tracer les courbes des profils sont disponibles en Annexe A30 et Annexe N4\_scripts\_gph\_profiles (cf. Chap8). Les scripts permettant de calculer les corrélations entre les différentes variables sont disponibles en Annexe A31 et Annexe N4\_scripts\_correl (cf. Chap8).

### III.2. Exactitude et précision des mesures

Les Annexes A32 et A33 présentent l'ensemble des **valeurs moyennes des standards mesurées** à chaque séquence d'ablation laser et le coefficient de variation (CV) correspondant à chaque profil (les valeurs moyennes sont ici corrigées pour chaque série par la formule  $SRM1\ corrigé = SRM1\ mesuré *$

SRM certifié / SRM2 mesuré). L'ensemble des données brutes relatives aux standards est disponible en version numérique (Annexes N6\_Global\_File\_Sr/TE ; les valeurs des profils sont non corrigées).

**L'exactitude et la précision des mesures** sont contrôlées par des **standards SRM-1400 "bone ash"** (2 par séquence ; cf. III.2) pour un total de 140 standards SRM-1400 pour les éléments traces et 98 pour les isotopes du Sr. Le standard SRM-1400, certifié contenir 250ppm de Sr, produit ici un signal de  $^{88}\text{Sr}$  d'environ 140 000 cps sur le Q-ICPMS et d'environ 0,9 V sur le MC-ICPMS. Les valeurs moyennes sont de  $0,6532 \pm 0,0376$  pour  $\text{Sr}/\text{Ca} \cdot 10^3$ ,  $0,6304 \pm 0,0487$  pour  $\text{Ba}/\text{Ca} \cdot 10^3$ ,  $17,9269 \pm 0,7327$  pour  $\text{Mg}/\text{Ca} \cdot 10^3$  et  $0,71310 \pm 0,00109$  pour  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (Annexe A32 et A33), ce qui est proche des valeurs certifiées ( $0,6522 \pm 0,0185$  ;  $0,6286 \pm 0,0263$  ;  $17,9151 \pm 0,3459$  et  $0,713104 \pm 0,000019$  respectivement – valeur TIMS pour la dernière ; Hinners *et al.* 1998 ; Schweissing et Grupe 2003). L'exactitude des mesures est inférieure à 0,1 pour  $\text{Sr}/\text{Ca} \cdot 10^3$ ,  $\text{Ba}/\text{Ca} \cdot 10^3$  et  $\text{Mg}/\text{Ca} \cdot 10^3$ , inférieure à 0,001 pour  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . Notons que la variation de la valeur moyenne mesurée de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de SRM-1400 est plus élevée ( $\pm 0,00109$ ) que celle de la valeur certifiée (sd  $\pm 0,000019$ ). Les écarts types moyens correspondants dans les profils SRM-1400 sont de 0,1014 ; 0,1124 ; 2,1328 et 0,00110 pour  $\text{Sr}/\text{Ca} \cdot 10^3$ ,  $\text{Ba}/\text{Ca} \cdot 10^3$ ,  $\text{Mg}/\text{Ca} \cdot 10^3$  et  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  respectivement, conduisant à un coefficient de variation moyen de 15%, 18%, 12% et 0,15% respectivement (Annexe A32 et A33). La précision des mesures est inférieure à 0,12 pour  $\text{Sr}/\text{Ca} \cdot 10^3$  et  $\text{Ba}/\text{Ca} \cdot 10^3$ , inférieure à 2,2 pour  $\text{Mg}/\text{Ca} \cdot 10^3$  et inférieure à 0,0011 pour  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .

Toutes les valeurs de standard et d'échantillons ( $^{43}\text{Ca}$ ,  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{138}\text{Ba}$  et  $^{26}\text{Mg}$ ) sont supérieures aux limites de quantification (calculées à partir des valeurs moyennes de blanc + 9SD) et donc de détection (calculées à partir des valeurs moyennes de blanc + 3SD) pour chaque session de paramétrage.

NB : Différentes études ont évalué l'exactitude et la précision des données laser en comparaison de données obtenues en solution à partir d'échantillons identiques. Les résultats montrent que les deux méthodes fournissent des résultats tout à fait comparables, pourvu que les conditions soient adaptées au matériel (Copeland *et al.* 2008 ; Müller et Anczkiewicz 2016).

### IV. Récapitulatif des analyses et du matériel

---

Le Tableau C4. 2 résume les effectifs considérés pour chaque type d'analyse et pour chaque site archéologique.

humains		analyse S		analyse S		analyse S		analyse N AA		TE/Sr - ablation laser		TE/Sr - ablation laser os		TE/Sr - ablation laser émail	
		effectif total individus selectionnés	analyse CN collagène osseux	analyse S collagène osseux	analyse CN collagène dentine	analyse S collagène dentine	dont micro-échantillonnage dentine CNS	analyse N AA	TE/Sr - ablation laser nb individus	TE/Sr - ablation laser os	TE/Sr - ablation laser émail				
GLN	95	95	28	12	15	2	6	37	12	34					
Mon	53	53	18	1	2	-	-	13	2	13					
CHI-Pat	8	8	6	2	2	-	-	6	3	6					
BMT	15	13	-	-	-	-	-	2	-	2					
BON	5	4	-	-	-	-	-	1	-	1					
CHI-ED	2	2	-	-	-	-	-	1	1	1					
NZ	2	2	-	-	-	-	-	2	2	2					
<b>TOTAL</b>	<b>180</b>	<b>177</b>	<b>52</b>	<b>15</b>	<b>19</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>62</b>	<b>20</b>	<b>59</b>					
faune		analyse S		analyse S		analyse S		analyse N AA		TE/Sr - ablation laser		TE/Sr - ablation laser os		TE/Sr - ablation laser émail	
		effectif total individus selectionnés	analyse CN collagène osseux	analyse S collagène osseux	analyse CN collagène dentine	analyse S collagène dentine	dont micro-échantillonnage dentine CNS	analyse N AA	TE/Sr - ablation laser nb individus	TE/Sr - ablation laser os	TE/Sr - ablation laser émail				
GLN	21	18	9	-	-	-	3	9	6	8					
Mon	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
CHI-Pat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
BMT	46	38	13	-	-	-	2	20	12	18					
BON	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
CHI-ED	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
NZ	7	6	3	-	-	-	-	3	2	1					
<b>TOTAL</b>	<b>74</b>	<b>62</b>	<b>25</b>	<b>19</b>	<b>15</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>32</b>	<b>20</b>	<b>27</b>					
<b>TOTAL</b>	<b>254</b>	<b>239</b>	<b>77</b>	<b>19</b>	<b>15</b>	<b>2</b>	<b>11</b>	<b>94</b>	<b>40</b>	<b>86</b>					

Tableau C4. 2 : Synthèse des analyses réalisées dans ce travail sur les humains et les animaux, par type d'échantillonnage et par indicateur.

## V. Catalogue et gestion des données brutes

---

### V.1. Le catalogue

Afin d'avoir une vision globale de l'ensemble des résultats effectués pour chaque individu humain au regard de ses caractéristiques biologiques et archéologiques, un catalogue (Annexe C) a été créé sous forme de fiche individuelle dont un modèle est présenté dans la Figure C4. 6. Chaque fiche reprend les caractéristiques principales :

- code de l'individu « Code iso » – si le numéro du code est différent de celui de l'identifiant archéologique, ce dernier est donné dans le texte descriptif (par exemple pour Beaumont). L'identifiant archéologique (ID archéo) correspondant au code ISO (ou code laboratoire) est toujours donné dans les tableaux de synthèse des sites (Annexes A3 à A15).
- sexe, selon la nomenclature adoptée pour ce travail (cf. Chap3.I.3.d) : « **M** » pour masculin, « **F** » pour féminin, « **I** » pour les adultes (>15 ans) de sexe indéterminé, « - » pour les immatures (<15 ans), dont le sexe ne peut être déterminé autrement que par la génétique (le dimorphisme sexuel squelettique n'étant significatif qu'après la puberté ; Bruzek *et al.* 2005), et « ? » lorsque l'individu est d'âge inconnu ou à cheval entre l'enfance et l'âge adulte (e.g. la classe [10-19 ans]). Dans le cas de Gurgy « Les Noisats », le sexe donné **entre parenthèses** correspond au **sexe génétique** (Rivollat, comm. pers.)
- âge-au-décès : une \* indique que l'étude de l'usure dentaire a permis d'affiner l'estimation (donnant un âge généralement < ou > 50 ans)
- éventuelle datation <sup>14</sup>C (en rouge, les datations sortant de la période considérée, à écarter)
- localisation dans la nécropole ou le site
- bref descriptif de la sépulture ou de l'état des restes
- photo et/ou dessin de la sépulture – dans le cas de Beaumont, un plan détaillé du secteur avec la localisation de l'échantillon sur ce plan remplace la photo, les restes étant épars
- quels os et/ou dent ont été prélevés
- quel type d'analyse a été réalisé dans le cadre de ce travail et lesquelles ont fourni un résultat exploitable (« bon résultat »)
- quels prélèvements supplémentaires ont été réalisés pour des analyses futures (« tartre » et/ou « empreinte  $\mu$ -usure » pour l'analyse des textures des micro-usures dentaires ou DMTA ; cf. Chap9.I) et quelles autres analyses (en dehors de la caractérisation anthropologique classique) ont été conduites sur ces individus, fournissant des éléments de comparaisons aux présents résultats : analyses génétiques (par M. Rivollat) caractérisant l'haplogroupe « Hg », le sexe ou la généalogie via l'étude des liens de parenté pour le site de Gurgy « Les Noisats » (cf. Chap3.II.1.c), étude de la microstructure dentaire («  $\mu$ CT », par M. Le Luyer) ou autre.

Ensuite, un **graphique général** représentant la dispersion de tous les résultats obtenus pour **chaque analyse** est représenté, **dès lors que l'analyse en question a fourni un résultat exploitable** pour l'échantillon concerné, et ce **résultat est indiqué par une ★** pour indiquer sa valeur par rapport à la variabilité générale. Pour l'analyse par ablation laser, seuls les valeurs moyennes des éléments traces sont présentées sur un graphique, celles du Sr étant problématiques (cf. Chap8). Les résultats Sr sont toutefois visibles sur les courbes données pour les profils dans l'émail. Le tracé du laser est représenté sur la photographie du moulage de l'échantillon, pour les profils TE (éléments traces) et Sr (strontium isotopique). Pour plus de détails et une meilleure définition, ces tracés sont également disponibles en version numérique en Annexe N2. Les courbes de résultats bruts puis nettoyés (cf. Chap8) sont données, pour l'émail uniquement, afin d'avoir une vision d'ensemble de la variabilité générale de ces profils (cf. Annexe N9 pour plus de détails). Les courbes des profils dans l'os sont données en Annexes N9b.

**Code iso**    sexe    âge au décès    datation cal BC

Texte descriptif



photo / dessin

**Prélèvement**

os    dent

localisation sur plan ★

**Analyses**

CN	S	N	CN	S	TE/Sr	TE/Sr
col os	col os	AA	dentin	dentin	LA	LA
✓	✗					

✓ bon résultat    ✗ mauvais résultat

**Préparation analyses complémentaires**

Tartre    Moulage

**Autres analyses**

génétique (M. Rivollat) : Hg, sexe, généalogie  
 μstructure dentaire (M. Le Luyer)    autre ?

**Analyses os (collagène total et acides aminés spécifiques)**

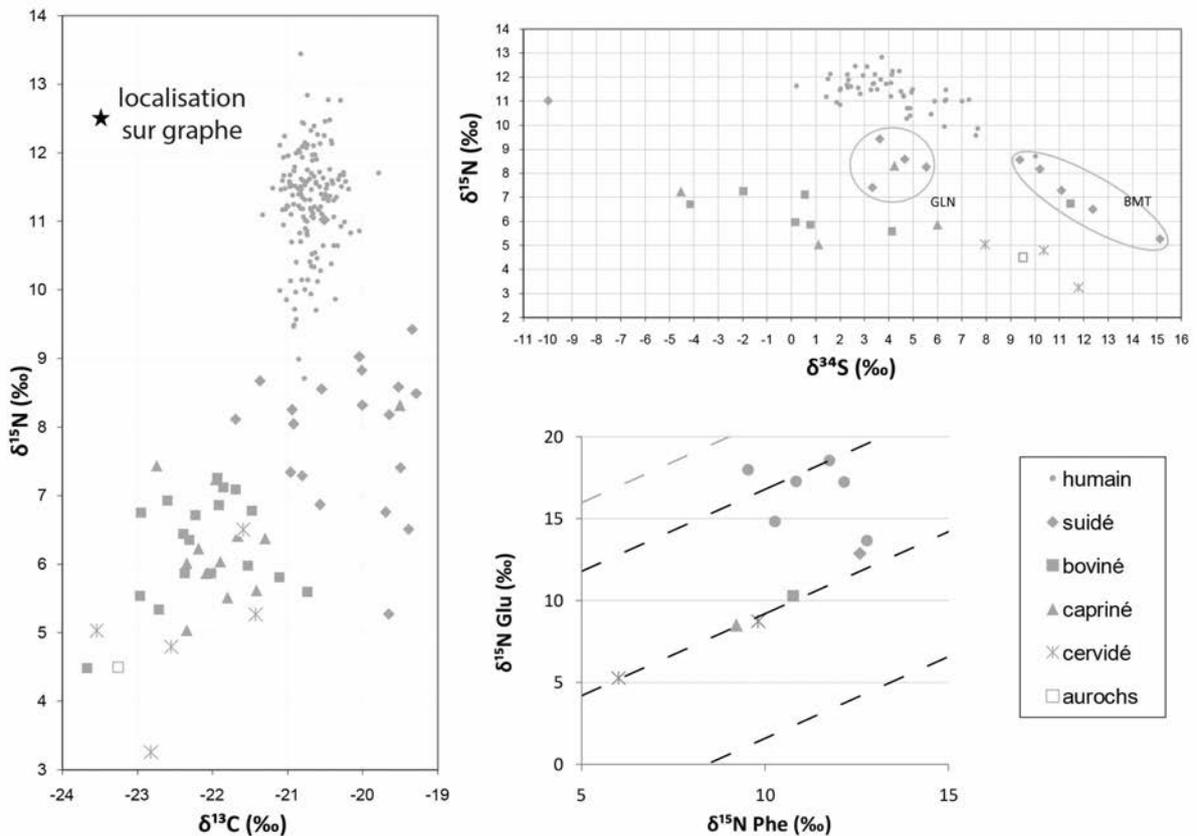
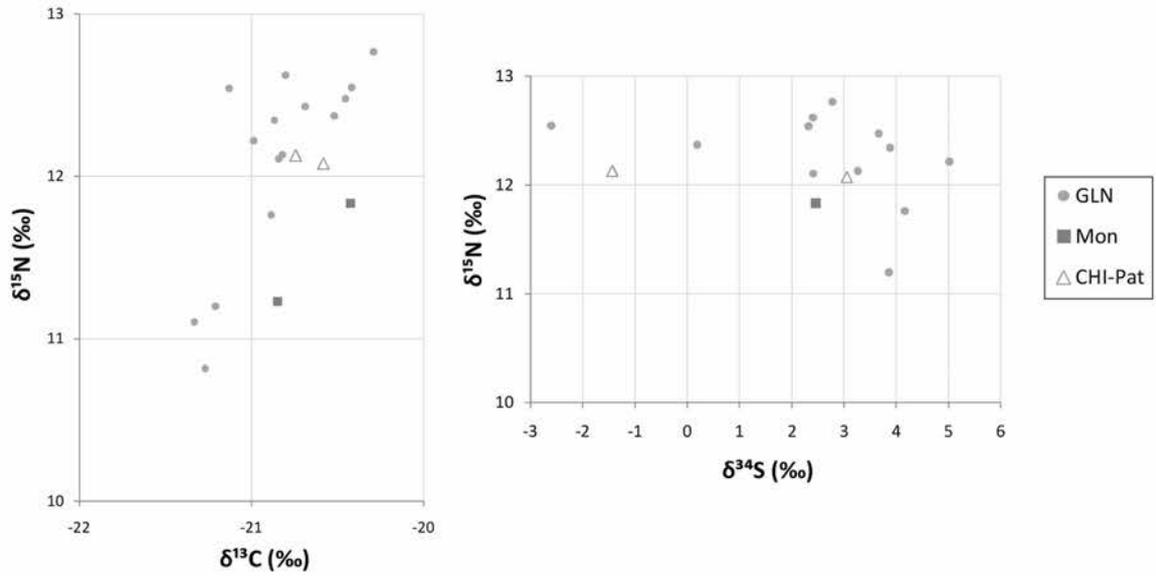


Figure C4. 6 : Modèle de fiche-type du catalogue présentée en fin d'ouvrage (Annexe C) qui rassemble pour chaque individu toutes les données principales archéologiques, biologiques et biochimiques (sous forme de graphiques).

**Analyses dentine humains (collagène total et micro-échantillonnage)**



**Analyses éléments trace (TE) et Sr isotopique (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr) par ablation laser (LA)**

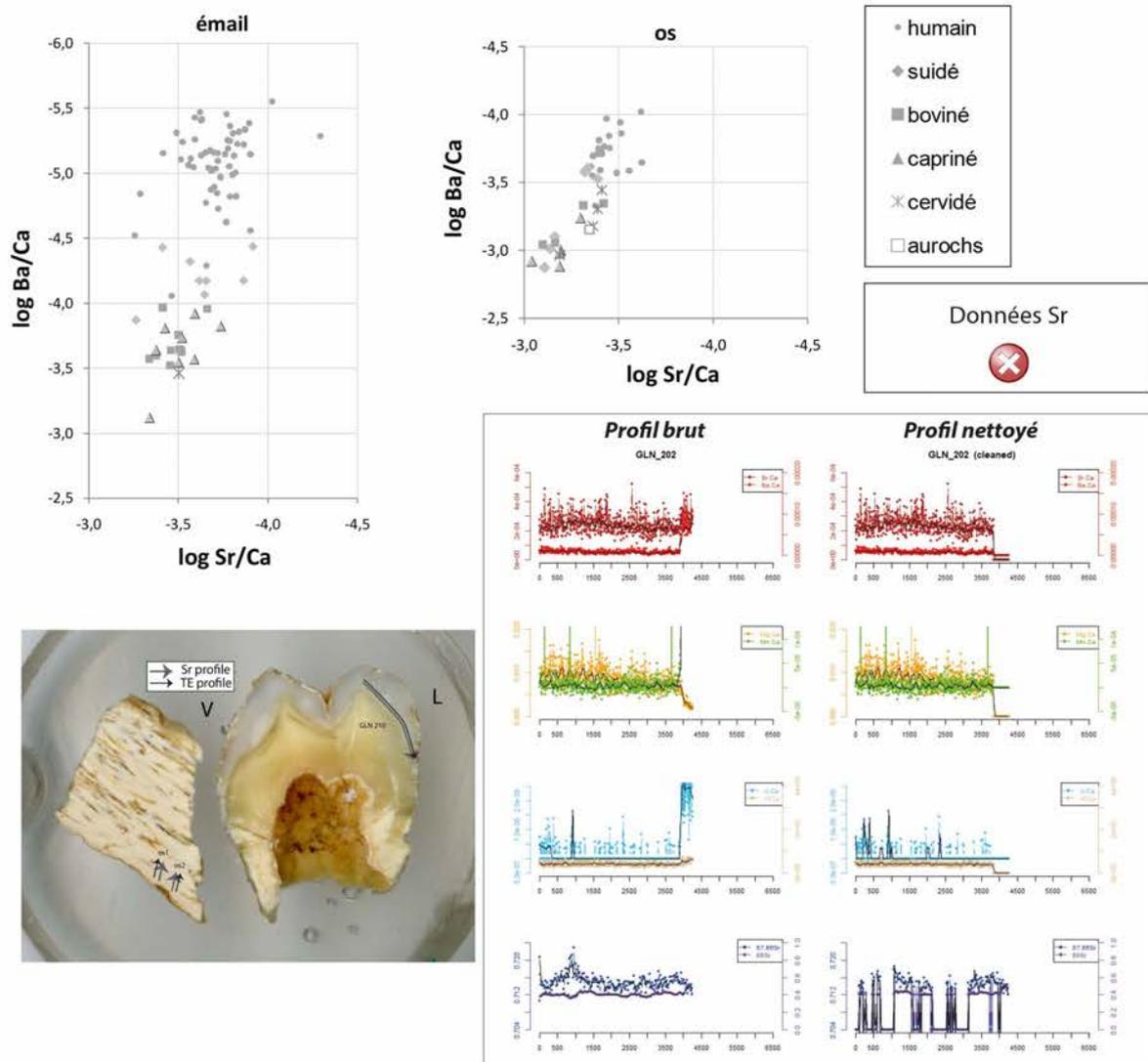


Figure C4. 6 (suite)

### V.2. Gestion des données brutes

Dans le but de permettre la libre **réutilisation des résultats**, l'ensemble des données brutes est disponible dans les articles correspondants et en annexes pour chacun des indicateurs mesurés. Pour les isotopes stables, les données sont présentées telles que fournies par les laboratoires, à savoir déjà calibrées. Toutes les valeurs de standards sont également données. Pour les éléments traces et le Sr isotopique ayant nécessité un traitement particulier ("*bracketing calibration*"; cf. encadré chap2.VI.4.b), toutes les données brutes non calibrées, calibrées puis nettoyées sont présentées. Les analyses par ablation laser fournissant une quantité exceptionnelle de données, celles-ci sont disponibles en version numérique sur Zenodo à l'adresse : <https://doi.org/10.5281/zenodo.5821359> (Annexe N2 à 10).

## VI. L'analyse statistique

---

Les analyses statistiques ont été réalisées en grande partie avec l'aide du statisticien F. Santos (UMR 5199 PACEA) afin de choisir les tests les plus appropriés et pertinents, parfois pour de très petits échantillons. L'ensemble de l'analyse statistique étant variée et adaptée à chaque type d'échantillon et d'analyse, elle est décrite séparément dans les articles correspondants. Aussi, nous ne l'aborderons pas une nouvelle fois ici. Les scripts écrits pour l'analyse statistique des isotopes stables réalisée sous le logiciel R sont fournis en annexes des articles correspondants (cf. Annexes B2 et B3). Une partie des tests statistiques a également été réalisée avec le logiciel Statistica© v. 7.1.

## VII. De l'utilisation des modèles : une gageure ?

---

Ne nombreuses études de la paléodiète utilisent des modèles écologiques afin de quantifier les proportions relatives des différentes ressources consommées. Néanmoins, l'application de ces modèles en archéologie est pour le moins risquée et se confronte à différents problèmes d'importance non négligeable. D'abord, les ressources consommées sont généralement multiples et une partie de celles-ci ne nous est pas parvenue, notamment les plantes dans la plupart des cas, voir certains animaux en contexte funéraire. Ainsi, la vision de l'alimentation est tronquée et la diversité réelle des ressources méconnue. Par ailleurs, le modèle a besoin pour fonctionner d'identifier des sources dont les signatures isotopiques ou élémentaires sont distinctes, ce qui n'est pas toujours le cas. Enfin, les résultats des modèles sont dépendants des paramètres d'entrée considérés et un grand nombre de variables sont incertaines. C'est le cas notamment des facteurs d'enrichissement trophique. D'autre part, ces modèles font fi de toute la complexité physiologique et métabolique ayant cours pendant les processus alimentaires et simplifient chaque étape et chaque facteur à une donnée, au mieux flanquée d'un écart-type. L'ensemble des incertitudes mis bout à bout, il apparaît évident que les résultats des

modèles peuvent s'avérer sans commune mesure avec la réalité, voire tout à fait discordant d'un modèle à l'autre selon que l'on considère certaines données ou non.

Toutefois, comme l'énonce P. Bickle, "*it is thus worth remembering Box's (Box 1979, 202) maxim that while 'all models are wrong, some models are useful'.*" (Bickle 2018, p. 4). En effet, si ces modèles sont appliqués avec pertinence et le choix des paramètres d'entrée est réalisé en accord avec les schémas les plus parcimonieux communément admis, ils peuvent apporter une image complémentaire aux résultats bruts, en combinant l'ensemble des proxies, et peut-être refléter un cas de figure non envisagé ou faire relativiser un résultat. En d'autres termes, ils permettent parfois de remettre en question notre interprétation et/ou de la développer, ainsi que de, pourquoi pas, comparer les résultats avec ceux d'autres contextes et en particulier comparer les résultats des individus entre eux au sein d'un même contexte. Quoi qu'il en soit, il est primordial de toujours garder en mémoire d'une part que ces modèles proposent une hypothèse sur la proportion relative des différentes ressources considérées, et uniquement de celles-ci, et d'autre part que l'intégration d'une ou plusieurs autres ressources dans l'équation pourrait radicalement changer le résultat.

Si d'aucuns jugent ces modèles utiles, d'autres enfin les considèrent dangereux, car ils peuvent conduire à des interprétations biaisées et une vision faussée de la réalité. Il est d'ailleurs fondamental de stipuler qu'au delà des modèles, l'interprétation des résultats bruts, représentés sous forme graphique ou non, ne constitue qu'un reflet de la réalité passant inéluctablement par le prisme de notre jugement, de notre conception de ce que pouvait être le passé et de ce que nous connaissons aujourd'hui.

Si en contexte archéologique l'application de tels modèles ne nous semble pas toujours réellement informative, nous avons néanmoins tenté de les appliquer afin de proposer des pistes de discussion. Les paramètres utilisés, la méthode et les résultats sont décrits en Annexe B4 (Appendix B) de l'article Rey soumis. Nous n'en ferons pas mention ailleurs.



## PARTIE 2

### **RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**



## Chapitre 5. Analyses des isotopes stables (C, N, S) dans le collagène osseux global

### I. Article 1

---

*Comportements alimentaires au Néolithique : nouveaux résultats dans le Bassin parisien à partir de l'étude isotopique ( $\delta^{13}C$ ,  $\delta^{15}N$ ) de la nécropole de Gurgy « Les Noisats » (Yonne, Ve millénaire av. J.-C.)*

Léonie REY, Gwenaëlle GOUDE, Stéphane ROTTIER

Publié dans : **Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris** en 2017

DOI : <https://doi.org/10.1007/s13219-016-0170-9>

Le matériel supplémentaire est disponible en Annexe B1

## Comportements alimentaires au Néolithique : nouveaux résultats dans le Bassin parisien à partir de l'étude isotopique ( $\delta^{13}\text{C}$ , $\delta^{15}\text{N}$ ) de la nécropole de Gurgy « Les Noisats » (Yonne, V<sup>e</sup> millénaire av. J.-C.)

Dietary Patterns in the Neolithic: New Isotopic Evidence ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) from the “Les Noisats” Necropolis at Gurgy in the Paris Basin (5th Millennium BC)

L. Rey · G. Goude · S. Rottier

Reçu le 19 septembre 2015 ; accepté le 4 octobre 2016  
© Société d'Anthropologie de Paris et Lavoisier SAS 2016

**Résumé** Les comportements alimentaires de la population néolithique de Gurgy « Les Noisats » (Yonne, V<sup>e</sup> millénaire av. J.-C.) sont étudiés à travers l'analyse des ratios isotopiques du collagène osseux de 40 sujets. Cette nécropole correspond à l'une des plus importantes du Néolithique français : elle compte 126 inhumations primaires sur une période d'occupation de près d'un millénaire. Au cœur d'une région située à l'intersection entre plusieurs cultures, la grande diversité des dispositifs funéraires et du mobilier atteste des multiples influences alentour. Les résultats isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) des humains comparés à la faune régionale soulignent l'importance des protéines animales issues de l'élevage (viande ou produits laitiers) — voire de poissons d'eau douce — dans le régime alimentaire. La très faible variation des valeurs enregistrée au sein de la population montre une grande homogénéité, rarement mise en évidence pour cette période, indiquant la consommation de ressources similaires pour l'ensemble des individus étudiés. La comparaison de ces données avec les paramètres biologiques et funéraires dégage toutefois quelques tendances, notamment en fonction de l'âge et du sexe des défunts, ainsi que de la chronologie.

**Mots clés** Alimentation · Néolithique · Bassin parisien · Isotope stable

L. Rey (✉) · S. Rottier  
PACEA - UMR 5199, université de Bordeaux,  
allée Geoffroy Saint-Hilaire, CS 50023,  
F-33615 Pessac cedex, France  
e-mail : leonie.rey@u-bordeaux.fr

G. Goude  
Aix Marseille Univ, CNRS, Minist Culture & Com, LAMPEA,  
LAMPEA UMR 7269, MMSH, 5 rue du Château de l'Horloge,  
BP 647, F-13094 Aix-en-Provence cedex 02, France

**Abstract** This study investigates the dietary patterns of the Neolithic population at the “Les Noisats” site at Gurgy in the Paris Basin (5th millennium BC), using stable isotope analysis of bone collagen ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ;  $N = 40$ ). This Neolithic necropolis is one of the largest currently known in France and contains 126 burials covering a period of occupation of roughly one millennium. The site is located at a point where several cultures intersect and has produced a substantial variety of grave goods and burial practices that attest to multiple influences. Compared to a regional isotopic data set on the regional fauna, our results show the importance of animal proteins from livestock (meat and dairy products) in the human diet at the time, which probably also included freshwater fish. The low  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  ranges recorded for this population indicate considerable homogeneity, which has rarely been demonstrated for the Neolithic. The comparison with bioarchaeological parameters did, however, reveal some distinctive trends, especially in relation to age, sex, and chronology.

**Keywords** Diet · Neolithic · Paris Basin · Stable isotope

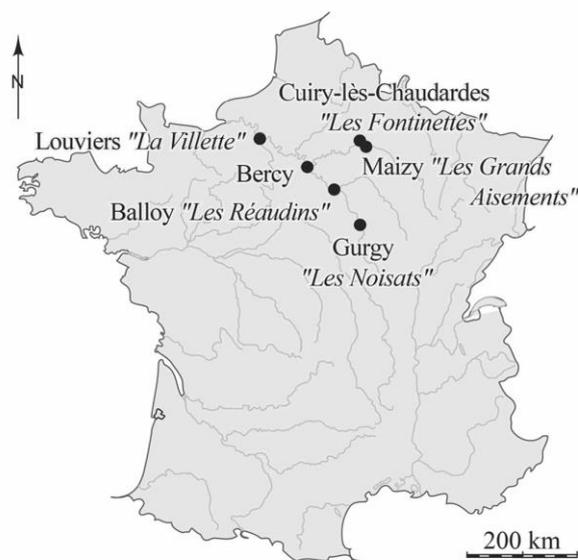
### Introduction

Les études paléalimentaires offrent d'importants renseignements sur les modes de vie des populations du passé. D'une part, l'alimentation globale d'un groupe reflète l'exploitation du milieu naturel et le type d'économie de celui-ci ; d'autre part, les variations alimentaires observées au sein du groupe peuvent mettre en évidence les différences sociales susceptibles de se refléter à plusieurs niveaux : stratification de la société, divisions des tâches, états sanitaires, habitudes et choix individuels. Plusieurs disciplines s'attachent à caractériser les régimes alimentaires des populations du passé : l'étude macro- et microscopique des restes fauniques et

botaniques (archéozoologie, carpologie, palynologie ; [e.g. 1–3]), l'étude technologique et tracéologique de l'outillage lithique [e.g. 4,5] et des récipients céramiques [e.g. 6], l'analyse chimique des résidus organiques piégés dans les poteries [e.g. 7], l'étude de l'état sanitaire buccodentaire et squelettique des populations humaines [e.g. 8,9] ou encore l'analyse du tartre [e.g. 10,11] ou des micro-usures dentaires [e.g. 12] constituent autant d'indices sur les ressources disponibles et consommées par l'homme ainsi que sur ses habitudes alimentaires. Toutefois, ces données concernent en général la nature des repas des communautés et non les proportions et les spécificités individuelles, ou bien renvoient à des périodes de courte durée (quelques jours ou semaines). Par ailleurs, la caractérisation des repas des populations anciennes est soumise aux biais de conservation qui impactent généralement ces restes.

La mesure des concentrations isotopiques enregistrées dans les tissus osseux et dentaires vient enrichir ce tableau et propose une vision directe et individuelle de l'alimentation. Certaines ressources alimentaires ont des teneurs isotopiques distinctes (e.g. viandes, végétaux, poissons) qui s'enregistrent dans les tissus des consommateurs. Ainsi, l'analyse de ces tissus permet de replacer chaque individu dans la chaîne alimentaire [13] et d'accéder aux variations intragroupes, souvent tributaires de paramètres socioculturels [14–16].

En France, les études isotopiques portant sur les comportements alimentaires au Néolithique se développent depuis une quinzaine d'années ([17–20] ; voir Goude et Fontugne, 2016, pour une synthèse [21]). La vallée de l'Yonne (sud-est du Bassin parisien), dans laquelle est implantée la nécropole de Gurgy « Les Noisats » (à 5 km au nord d'Auxerre ; Fig. 1), n'avait jusqu'à ce jour pas encore fait l'objet d'analyses isotopiques. Elle revêt pourtant un intérêt particulier dans l'étude des sociétés néolithiques : sa position géographique la place à la confluence des deux grands courants de néolithisation et des diverses cultures qui en découlent (Matériel supplémentaire 1) ; la concentration exceptionnelle de sites mis au jour sur le secteur, notamment néolithiques (voir Le Roy, 2015, fig. 26 p. 147 [22]), souligne sa richesse archéologique ; enfin, des spécificités locales sur le plan funéraire et culturel ont été mises en évidence (types sépulcraux et mobilier retrouvés dans la région renvoyant à différentes sphères, au sud et au nord-Est) [23]. Dans ce contexte, la nécropole des Noisats (fin du Néolithique ancien–Néolithique moyen I) occupe elle-même une place majeure. Avec plus de 120 sépultures mises au jour sur un total de 220 dans toute la région, elle constitue le plus gros ensemble funéraire régional et l'un des plus importants pour tout le Néolithique français (Matériel supplémentaire 2) [24,25]. Par ailleurs, le site semble avoir été occupé pendant près d'un millénaire, les datations radiométriques et la typologie du mobilier plaçant les inhumations dans une fourchette allant de 5200 à



**Fig. 1** Localisation de la nécropole de Gurgy « Les Noisats » et des différents sites ayant fourni les données isotopiques utilisées pour la création du référentiel régional / Location of the “Les Noisats” necropolis at Gurgy and of the different sites that provided the isotopic dataset used to create the regional baseline

3800 av. J.-C. [26]. La nécropole compte en outre des dispositifs funéraires variés et une grande diversité du mobilier ( inédite pour cette période) qui témoignent de l'influence des multiples cultures alentour (RRBP<sup>1</sup>, VSG<sup>2</sup>, Cerny, Chasséen, Grossgartach, Roessen... ; Matériel supplémentaire 1) et de réseaux d'échange à longues distances [27–29]. À la lumière de ces informations, aucune attribution culturelle spécifique n'a pu être proposée pour cette nécropole.

L'objectif de ce travail est double. Dans un premier temps, il s'agit de discuter du régime alimentaire des humains de Gurgy à l'échelle populationnelle. L'indigence des restes à fonction culinaire (animaux, végétaux, céramiques, outils) retrouvés dans la nécropole et les sites voisins contemporains n'a pas consenti d'étude ciblée sur les modalités de subsistance locales. Ainsi, les résultats des analyses isotopiques (C et N) du collagène osseux des humains seront comparés à ceux des animaux disponibles dans le Bassin parisien (environnement similaire) pour tenter une première caractérisation du type d'économie locale. L'apport de résultats isotopiques sur les humains, inédits dans cette région, permettra non seulement d'enrichir le corpus de données pour le Néolithique européen, mais également de confronter ces résultats avec ce qui est connu pour les groupes humains des régions voisines, dans le but de replacer la nécropole

<sup>1</sup> Rubané récent du Bassin parisien.

<sup>2</sup> Villeneuve-Saint-Germain.

dans le paysage « isotopique » français et limitrophe. Ce dernier point sera discuté au regard des caractéristiques chronoculturelles locales, qui sous-tendent un particularisme régional déjà évoqué [23].

Le second objectif concerne la variabilité humaine intrapopulationnelle. Il vise à mettre en évidence les variations isotopiques entre les individus de la nécropole qui permettraient d'identifier des groupes ayant des pratiques alimentaires distinctes, pouvant refléter de potentielles différences sociales et/ou des origines diverses. Le nombre de sépultures recensées dans la nécropole, la durée d'occupation apparemment longue du site et la diversité des dispositifs funéraires rencontrés (positions et orientations des sujets, structures funéraires, mobilier renvoyant à diverses sphères culturelles et géographiques) laissent envisager une population socialement diversifiée, sans pour autant que des catégories sociales aient pu être identifiées. L'objectif ici est de déterminer si le schéma isotopique suit — ou non — cette apparente diversité de la population et éventuellement de déceler des spécificités en lien avec les paramètres biologiques, funéraires et chronologiques des inhumés qui permettraient d'identifier des statuts sociaux.

## Matériel et méthodes

### Approche isotopique de l'alimentation

La mesure des rapports isotopiques du carbone et de l'azote ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) dans le collagène osseux et son interprétation se fondent sur plusieurs principes acquis depuis de nombreuses années [13,30–32].

Les ressources alimentaires peuvent avoir des teneurs isotopiques distinctes (e.g. légumineuses/céréales/viandes/poissons) qui sont enregistrées dans les tissus des consommateurs et restent inchangées au cours du temps, si l'état de conservation est correct. Les os étant en perpétuel remaniement, les ratios isotopiques de l'alimentation qu'ils enregistrent se renouvellent avec eux. Le dosage isotopique des os humains renseigne donc sur l'alimentation moyenne d'un individu au cours des dernières années de sa vie (durée proportionnelle au taux de renouvellement, qui s'allonge avec l'âge des sujets) [33,34]. En outre, la mesure des teneurs isotopiques du collagène, protéine majoritaire de l'os, renseigne principalement sur la part protéique de l'alimentation [35].

Les ratios isotopiques du carbone et de l'azote chez les végétaux dépendent de leur type photosynthétique (C3, C4, CAM) [36–38], de leur espèce (légumineuses ou non fixatrices d'azote) [39,40] et de nombreux paramètres environnementaux [41–43]. Lors de la consommation des plantes par les herbivores, puis des proies par leurs prédateurs, ces différents teneurs se répercutent le long de la chaîne alimentaire avec un enrichissement à chaque maillon de la chaîne

(de 0 à 1 ‰ pour le carbone et de 3 à 5 ‰ pour l'azote) [39,44–47]. En mesurant les  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  enregistrés dans les tissus des consommateurs, il est donc possible de connaître le milieu dans lequel ils ont puisé leurs ressources et de déterminer leur place dans la chaîne trophique.

Toutefois, de nombreux paramètres environnementaux et climatiques modifient les valeurs isotopiques [42,43,48,49]. Pour éviter les biais d'interprétation dus à des spécificités régionales, il est nécessaire de bien connaître le milieu et, dans la mesure du possible, de comparer les valeurs des humains avec celles de la faune locale et contemporaine [41] (e.g. [19,21,50]).

### Sélection du matériel : le référentiel faunique et les humains

Très peu de restes animaux (hors mobilier) ont été retrouvés dans la nécropole et ont pu être déterminés. Un seul de ces vestiges était disponible (*Bos sp.*, fragment de mandibule) et a été échantillonné pour cette étude. Pour combler cette lacune, les données régionales issues de la littérature ont été utilisées pour établir le référentiel de base (Tableau 1). Il s'agit des valeurs isotopiques de la faune de quatre sites contemporains (au moins en partie) de la nécropole : Cuirylès-Chaudardes « Les Fontinettes » (Aisne, Néolithique ancien/RRBP), Maizy « Les Grands Aisements » (Aisne, Néolithique moyen/Michelsberg), Bercy (Paris, Néolithique moyen/Chasséen) [51] et « Louviers » La Villette (Eure, Néolithique moyen/Chasséen) [19]. Comme Les Noisats, ces sites sont tous situés dans le Bassin parisien, territoire homogène par sa géologie et son environnement (Fig. 1).

Pour l'analyse des restes humains, 42 individus ont été sélectionnés selon plusieurs critères, de façon à avoir un spectre des variations le plus large possible et le plus représentatif de la population (Tableau 2). Les sujets ont d'abord été sélectionnés en fonction de l'état de conservation de leur squelette, puis selon des critères biologiques (toutes classes d'âge au-delà de cinq ans pour éviter le signal de l'allaitement, sex-ratio de la sélection similaire à celui de la population totale ; Matériel supplémentaire 3 (1) et (2)), archéologiques (toutes les structures funéraires [Matériel supplémentaire 3 (3)], les positions et orientations des défunts [Matériel supplémentaire 4], et les types — ou l'absence — de mobilier [Matériel supplémentaire 3 (4)] sont représentés), chronologiques (les sujets datés ont été privilégiés et toutes les phases sont représentées ; Matériel supplémentaire 5), génétiques (les sujets typés ont été privilégiés et presque tous les haplogroupes sont représentés ; Matériel supplémentaire 3 (5)) et selon leur répartition spatiale dans la nécropole (Matériel supplémentaire 2). Les prélèvements ont été effectués sur la partie corticale de la diaphyse fémorale (ou tibiale dans deux cas).

**Tableau 1** Valeurs isotopiques moyennes, minimales et maximales de la faune régionale utilisée comme référentiel, d'après les données de la littérature [19,51] / *Mean, minimum and maximum isotopic values for regional fauna used as references, based on data in the literature [19,51]*

Espèce	Site	Effectif (n)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)			$\delta^{15}\text{N}$ (‰)		
			Min	Moy $\pm$ écart-type	Max	Min	Moy $\pm$ écart-type	Max
<b>Bœuf</b>	Maizy	4	-22,3	-22,0 $\pm$ 0,3	-21,6	5,4	6,2 $\pm$ 0,8	6,9
	Cuiry	8	-23,5	-23,0 $\pm$ 0,5	-22,2	5,1	6,2 $\pm$ 0,7	7,0
	L. Villette	9	-23,1	-22,1 $\pm$ 0,6	-21,2	5,1	7,0 $\pm$ 1	8,1
	Bercy	9	-23,2	-22,5 $\pm$ 0,4	-21,9	5,5	6,6 $\pm$ 0,6	7,5
	<b>TOT.</b>	<b>30</b>	<b>-23,5</b>	<b>-22,4 <math>\pm</math> 0,6</b>	<b>-21,2</b>	<b>5,1</b>	<b>6,6 <math>\pm</math> 0,8</b>	<b>8,1</b>
<b>Porc</b>	L. Villette (TOT.)	3	-21,0	-20,6 $\pm$ 0,4	-20,3	5,8	7,6 $\pm$ 1,8	9,4
<b>Mouton</b>	L. Villette (TOT.)	2	-21,6	-21,5 $\pm$ 0,1	-21,4	7,7	7,7 $\pm$ 0	7,7
<b>Chien</b>	L. Villette (TOT.)	3	-21,0	-20,8 $\pm$ 0,2	-20,7	9,1	9,5 $\pm$ 0,5	10,0
<b>TOT. dom. (chien exclu)</b>		<b>35</b>	<b>-23,5</b>	<b>-22,2 <math>\pm</math> 0,8</b>	<b>-20,3</b>	<b>5,1</b>	<b>6,7 <math>\pm</math> 1</b>	<b>9,4</b>
<b>Aurochs</b>	Maizy	3	-24,5	-24,1 $\pm$ 0,4	-23,8	5,3	6,2 $\pm$ 1,2	7,6
	L. Villette	4	-23,6	-23 $\pm$ 0,4	-22,7	6,7	7,0 $\pm$ 0,2	7,1
	<b>TOT.</b>	<b>7</b>	<b>-24,5</b>	<b>-23,5 <math>\pm</math> 0,7</b>	<b>-22,7</b>	<b>5,3</b>	<b>6,6 <math>\pm</math> 0,8</b>	<b>7,6</b>
<b>Sanglier</b>	Maizy	3	-24,5	-22,6 $\pm$ 1,8	-21,0	5,9	6,9 $\pm$ 0,9	7,5
	L. Villette	3	-21,4	-20,9 $\pm$ 0,5	-20,4	5,8	7,0 $\pm$ 1,2	8,2
	<b>TOT.</b>	<b>6</b>	<b>-24,5</b>	<b>-21,8 <math>\pm</math> 1,5</b>	<b>-20,4</b>	<b>5,8</b>	<b>7,0 <math>\pm</math> 0,9</b>	<b>8,2</b>
<b>Cerf</b>	Maizy	4	-22,9	-22 $\pm$ 1,2	-20,2	5,9	7,2 $\pm$ 1,5	9,2
	Cuiry	5	-24,0	-22,7 $\pm$ 1,3	-20,6	5,5	6,3 $\pm$ 0,6	7,0
	L. Villette	5	-22,9	-22,3 $\pm$ 0,4	-22,0	5,1	5,9 $\pm$ 0,6	6,8
	<b>TOT.</b>	<b>14</b>	<b>-24,0</b>	<b>-22,4 <math>\pm</math> 1,0</b>	<b>-20,2</b>	<b>5,1</b>	<b>6,4 <math>\pm</math> 1</b>	<b>9,2</b>
<b>Chevreuril</b>	Cuiry	5	-24,5	-23,8 $\pm$ 0,7	-22,8	6,8	8,0 $\pm$ 0,8	9,1
	L. Villette	1	-23,9	-23,9	-23,9	6,6	6,6	6,6
	<b>TOT.</b>	<b>6</b>	<b>-24,5</b>	<b>-23,8 <math>\pm</math> 0,6</b>	<b>-22,8</b>	<b>6,6</b>	<b>7,8 <math>\pm</math> 0,9</b>	<b>9,1</b>
	L. Villette (TOT.)	2	-24,6	-23,7 $\pm$ 1,3	-22,8	4,6	5,5 $\pm$ 1,3	6,4
<b>Blaireau</b>	Cuiry (TOT.)	4	-22,4	-20,3 $\pm$ 1,5	-19,1	8,0	9,8 $\pm$ 1,3	11,0
<b>Loup</b>	L. Villette (TOT.)	1	-21,2	-21,2	-21,2	10,8	10,8	10,8

TOT. : total / total ; dom. : domestique / domesticated.

### Analyses et traitement des données

Les fragments ont été nettoyés et broyés manuellement, et le collagène a été extrait selon la méthode Longin [52] réadaptée par Bocherens et al. [53]. Les teneurs élémentaires (%C et %N) et isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) ont été mesurées au laboratoire IsoAnalytical (Royaume-Uni) par un spectromètre de masse isotopique couplé à un analyseur élémentaire Europa Scientific (EA-IRMS). La précision analytique est de  $\pm 0,1$  ‰ pour  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  et les standards sont calibrés sur les standards internationaux IAEA-N1 et IAEA-CH6..

Pour tester statistiquement la distribution des valeurs isotopiques en fonction des différents paramètres, un test préalable de normalité a été effectué : les valeurs suivent bien une loi normale (Shapiro-Wilk,  $p > 0,05$ ,  $n = 40$ ). Au regard de cette distribution, la comparaison de moyennes de deux groupes indépendants (e.g. H/F) a été effectuée avec le test paramétrique de Student (valeurs significativement différen-

tes pour  $p < 0,05$ , avec  $p_{\text{Fisher}} > 0,05$  prérequis). Pour tester la corrélation entre les valeurs isotopiques et les différents paramètres (qualitatifs ou quantitatifs), les rapports de corrélation, coefficients de Pearson, Kendall et Spearman (selon le type de variable) ont été appliqués (plus le résultat est proche de 1 ou -1, plus les données sont corrélées ; plus il est proche de 0, moins elles le sont ; corrélation significative pour  $p < 0,05$ ). L'ensemble de l'analyse statistique a été réalisé avec les logiciels R v2.15.3 et Statistica v6.1.

### Résultats

Sur les 43 échantillons analysés, 41 respectent les critères de conservation communément admis (Tableau 2 ; rendement d'extraction  $> 10$  mg/g, %C  $> 30$ , %N  $> 11$  et C/N entre 2,9 et 3,6) [54,55]. À l'inverse, les sujets 207B et 268B ont été exclus de l'étude. Pour les échantillons retenus, les valeurs

**Tableau 2** Principales données bioarchéologiques, résultats isotopiques et critères de conservation du collagène des humains et de la faune de Gurgy. Les lignes en gras correspondent aux deux individus exclus de l'analyse. \*d'après Rivollat et al. [26] / *Main bioarchaeological data, isotopic results and state of preservation of human and animal collagen at Gurgy. Bold lines represent the two individuals excluded from the analysis. \*after Rivollat et al. [26]*

ID	Sexe	Âge	Datation (cal. BC)*	Structure	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	%C	%N	C/N	Rdt (mg/g)
201	H	16–18	5199–4845	Alcôve	–20,8	12,2	37,0	13,2	3,2	18,7
202	H	20–49	4520–4355	Alcôve	–20,6	11,9	40,3	14,8	3,2	28,8
207A	H	30+	4317–4046	Alcôve	–20,9	11,7	35,2	12,8	3,2	11,7
209	H	20–49	4597–4449	Alcôve	–20,7	12,3	41,6	15,2	3,2	24,4
216	H	30+	4829–4623	Cuvelée	–20,7	12,1	41,0	15,1	3,2	28,3
220	H	20–59	4539–4367	Fosse	–20,5	12,3	40,6	14,9	3,2	43,0
221B	H	30+	4906–4689	Fosse	–20,7	12,8	38,8	13,7	3,3	17,8
224	H	20+		Fosse	–20,7	12,0	41,2	14,9	3,2	49,5
231A	H	20+		Fosse	–20,5	12,4	40,8	14,5	3,3	55,4
240	H	20–49	4781–4551	Fosse	–20,9	12,0	39,5	14,0	3,3	36,4
243A	H	30+	4829–4623	Fosse	–20,6	11,2	46,8	17,3	3,1	25,3
253	H	20–59	4235–3984	Alcôve	–20,8	12,0	39,1	14,1	3,2	43,1
257	H	30+	4826–4609	Fosse	–20,8	12,4	38,3	13,9	3,2	29,3
265	H	30+		Fosse	–20,6	12,3	41,1	15,1	3,2	37,1
266	H	20+		Fosse	–20,4	12,5	38,4	14,0	3,2	49,3
294	H	20+		Fosse	–20,8	11,4	35,1	12,6	3,2	57,2
296	H	30+	4357–4170	Fosse	–20,6	12,0	41,2	15,2	3,2	45,9
302	H	50+		Fosse	–20,5	11,6	43,5	16,2	3,1	49,4
317	H	30+	4784–4546	Fosse	–20,7	12,1	39,7	14,6	3,2	35,7
320	H	20–59		Fosse	–20,5	11,9	40,4	14,8	3,2	47,5
<b>207B</b>	<b>F</b>	<b>20+</b>		<b>Alcôve</b>	<b>–21,7</b>	<b>10,4</b>	<b>33,9</b>	<b>10,4</b>	<b>3,8</b>	<b>4,0</b>
212	F	20–29		Fosse	–21,0	12,2	41,6	15,2	3,2	34,7
225	F	30+		Fosse	–20,8	11,4	38,0	13,9	3,2	41,3
232B	F	20–59	4713–4504	Fosse	–20,8	11,6	37,1	13,1	3,3	34,7
236A	F	20+		Fosse	–20,9	11,2	43,1	15,5	3,2	37,9
243B	F	20+	4795–4616	Fosse	–20,9	11,5	47,2	17,2	3,2	92,2
248	F	40+	4316–3984	Alcôve	–20,8	11,9	42,2	15,4	3,2	30,5
263	F	20+	5199–4838	Fosse	–20,8	12,1	40,0	14,6	3,2	35,9
269	F	20+		Fosse	–20,7	12,0	39,3	14,4	3,2	61,8
289B	F	30+	4772–4662	Fosse	–20,6	11,6	42,3	15,5	3,2	23,4
315	F	20+	4943–4715	Fosse	–20,7	11,9	40,9	14,8	3,2	35,8
323	F	30+		Fosse	–21,1	11,9	41,2	15,0	3,2	33,0
325	F	20–39	5041–4800	Fosse	–21,0	12,0	40,2	14,4	3,2	40,0
237A	I	20–49	4899–4706	Fosse	–21,1	12,1	41,6	14,4	3,4	26,5
249	I	20+		Fosse	–20,7	11,6	40,0	14,5	3,2	36,8
295	I	20+		Fosse	–20,7	12,1	36,7	13,4	3,2	30,6
310B	I	20+		Fosse	–20,8	12,4	43,4	15,6	3,2	42,1
277	I	10–19		Fosse	–20,6	11,2	36,9	13,3	3,2	20,4
215A		5–9		Alcôve	–20,9	11,1	38,7	13,7	3,3	19,6
215B		5–14		Cuvelée	–21,1	10,9	36,0	12,8	3,3	37,1
223		5–9	4765–4540	Fosse	–21,1	11,2	39,0	13,8	3,3	26,5
<b>268B</b>		<b>10–14</b>		<b>Fosse</b>	<b>–21,4</b>	<b>11,5</b>	<b>39,5</b>	<b>13,2</b>	<b>3,5</b>	<b>8,7</b>
<i>Bos sp.</i>					–23	6,7	40,3	14,7	3,2	48,7

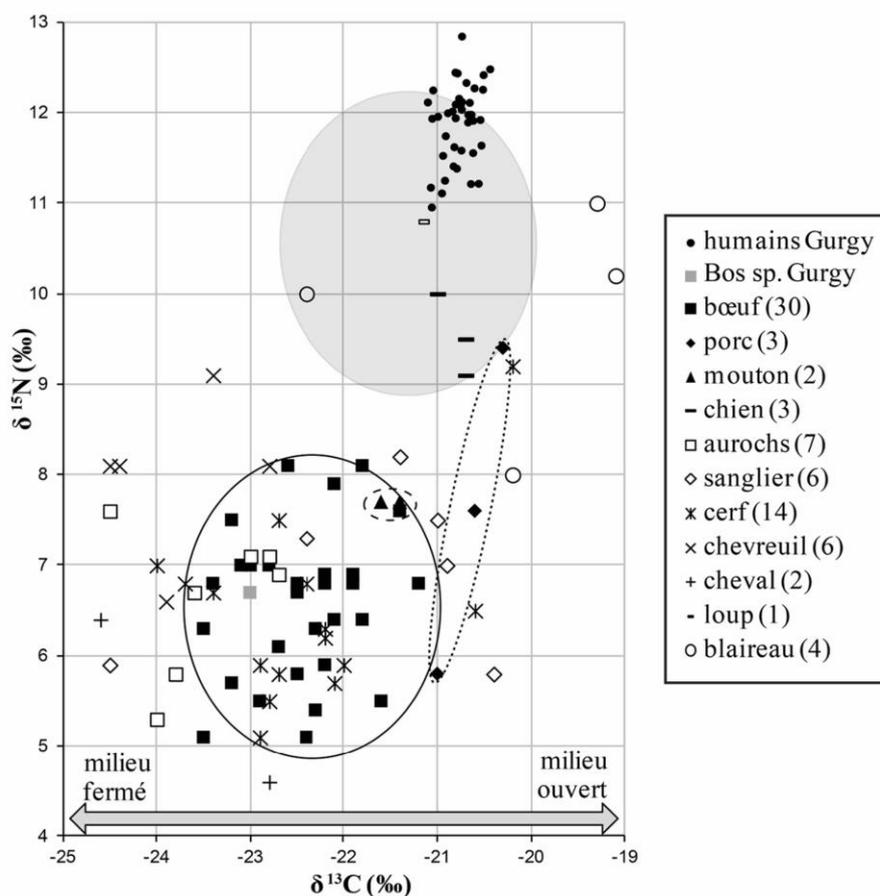
Rdt : rendement d'extraction / *extraction yield*.

isotopiques ne sont pas corrélées aux teneurs élémentaires ni au rendement d'extraction ( $p_{\text{Spearman}} > 0,05$ ) : leur variation n'est donc pas le résultat de l'altération diagenétique et reflète par conséquent les teneurs enregistrées du vivant des individus via leur alimentation.

La répartition des valeurs isotopiques des humains et de la faune régionale est présentée dans la Figure 2. Le boviné de Gurgy (*Bos sp.*) présente un  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-23$  ‰ et un  $\delta^{15}\text{N}$  de  $6,7$  ‰. Ces valeurs sont comprises dans la variabilité régionale des bovins domestiques (de  $-23,5$  à  $-21,2$  ‰, moy  $\delta^{13}\text{C} = -22,4 \pm 0,6$  ‰ et de  $5,1$  à  $8,1$  ‰, moy  $\delta^{15}\text{N} = 6,6 \pm 0,8$  ‰ ;  $n = 30$ ) [19,51] mais aussi dans celle des aurochs (de  $-24,5$  à  $-22,7$  ‰, moy  $\delta^{13}\text{C} = -23,5 \pm 0,7$  ‰ et de  $5,3$  à  $7,6$  ‰, moy  $\delta^{15}\text{N} = 6,6 \pm 0,8$  ‰ ;  $n = 7$ ). Pour tous les animaux considérés, les résultats sont en accord avec la fré-

quentation d'un milieu terrestre tempéré à végétation en  $\text{C}_3$  (aucun apport marin ou de végétaux de type  $\text{C}_4$  n'est envisagé).

Les humains ont des valeurs qui s'échelonnent entre  $-21,1$  et  $-20,4$  ‰ pour le carbone (moy  $= -20,8 \pm 0,2$  ‰) et entre  $10,9$  et  $12,8$  ‰ pour l'azote (moy  $= 11,9 \pm 0,4$  ‰ ; Tableau 2). La comparaison des valeurs isotopiques moyennes des humains par rapport à l'ensemble des animaux domestiques régionaux ( $\Delta^{15}\text{N}_{\text{humains-animaux dom.}} = 5,2$  ‰ et  $\Delta^{13}\text{C}_{\text{humains-animaux dom.}} = 1,4$  ‰ ;  $n_{\text{animaux dom.}} = 35$ ), et en particulier entre les humains et les bovins domestiques (espèce majoritairement consommée d'après les données archéozoologiques [voir discussion] ;  $\Delta^{15}\text{N}$  et  $\Delta^{13}\text{C}_{\text{humains-bovins dom.}} = 5,3$  et  $1,6$  ‰ respectivement ;  $n_{\text{bovins}} = 30$ ), montre une différence supérieure à un saut trophique théorique ( $\Delta^{15}\text{N}_{\text{proie-prédateur}}$



**Fig. 2** Répartition des valeurs isotopiques de la faune régionale et comparaison avec les humains. Les cercles vides englobent les valeurs des espèces domestiques (trait plein = bovins, petits traits = ovins, pointillés = porcins) ; le cercle plein correspond à la consommation théorique de 100 % de protéines de bœuf selon un rapport proie-prédateur de 4 ‰ en moyenne / *Distribution of isotopic values for the regional fauna and comparison with humans. The open circles enclose the values for domestic species (solid line = cattle, short lines = sheep, dotted line = pig); the full circle corresponds to the mean theoretical consumption of 100% beef protein based on a prey-predator ratio of 4‰ on average*

th. = 3 à 5 ‰ et  $\Delta^{13}\text{C}_{\text{proie-prédateur}}$  th. = 0 à 1 ‰). Sur la Figure 2 est représentée la différence théorique moyenne attendue entre une proie et son prédateur ( $4 \pm 1$  ‰) pour une consommation de 100 % de protéines de viande de bœuf. La dispersion des valeurs des humains outrepassa cette limite théorique moyenne, ce qui indique que des ressources de teneurs en  $^{15}\text{N}$  plus élevées ont dû faire partie de l'alimentation en complément de celle-ci. Plusieurs hypothèses seront proposées ci-après (voir discussion).

La variabilité totale des valeurs isotopiques des humains est de 0,7 ‰ pour le  $\delta^{13}\text{C}$  et de 1,9 ‰ pour le  $\delta^{15}\text{N}$ , ce qui reflète une très grande homogénéité pour l'ensemble de la population. Le croisement des valeurs isotopiques avec les données biologiques révèle toutefois quelques tendances. La Figure 3A montre que les femmes présentent des valeurs ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) globalement plus basses que celles des hommes et une variation en  $\delta^{15}\text{N}$  moins importante que ces derniers. Bien que les valeurs moyennes de ces deux groupes semblent peu distinctes, la différence est statistiquement significative ( $p_{\text{Student}} < 0,01$  pour le  $\delta^{13}\text{C}$  et  $p_{\text{Student}} < 0,05$  pour le  $\delta^{15}\text{N}$ ). Par ailleurs, il existe une nette distinction entre les immatures de 5 à 15 ans et les sujets de plus de 15 ans ; différence statistiquement significative ( $p_{\text{Student}} \delta^{13}\text{C} < 0,01$  et  $p_{\text{Student}} \delta^{15}\text{N} < 0,001$  ; Fig. 3B) bien que la classe [5–15 ans] ne soit représentée que par trois individus (le 268B a été exclu de l'analyse). Les autres classes d'âge ne semblent pas présenter de valeurs isotopiques distinctes les unes des autres.

À Gurgy, le croisement des données archéanthropologiques disponibles [22] a révélé une faible différenciation populationnelle, avec des traitements funéraires relativement similaires au cours du temps et au sein de la population. Néanmoins, quelques disparités semblent exister entre des groupes d'individus (certaines structures ou éléments de mobilier sont plutôt associés à un sexe, certaines tombes semblent rassemblées en petits groupes au sien de la nécropole — indépendamment de l'âge ou du sexe des défunts, un individu semble occuper une position centrale dans celle-ci). Les caractéristiques funéraires plutôt associées à un sexe (structures à alcôves, cuvelées ou de grande taille majoritairement occupées par des hommes ; outils lithiques plutôt associés à ces derniers ; parure en coquillage plutôt associée aux femmes) ont été croisées avec les résultats isotopiques pour chaque sexe séparément (Matériel supplémentaire 6 ; les immatures, n'étant que trois, ne sont pas représentés). Pour les hommes, ces paramètres n'induisent pas de distinction isotopique particulière (Matériel supplémentaire 6 (A) ;  $p_{\text{Student}} \delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N} > 0,1$  ;  $n = 20$ ). Parmi les femmes, celles inhumées avec des objets de parure ( $n = 4$ ) présentent toutes des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  dans la moitié supérieure de la gamme de variation ( $\delta^{15}\text{N} > 11,9$  ‰ ; Matériel supplémentaire 6 (B2)). La différence du  $\delta^{15}\text{N}$  moyen entre les femmes avec et sans parure est statistiquement significative ( $p_{\text{Student}} \delta^{15}\text{N} < 0,05$  ;  $p_{\text{Student}} \delta^{13}\text{C} > 0,1$  ;  $n = 12$ ), bien que les gammes de valeurs des deux groupes restent confondues. Pour les autres catégories (structures et autre mobilier ; Matériel

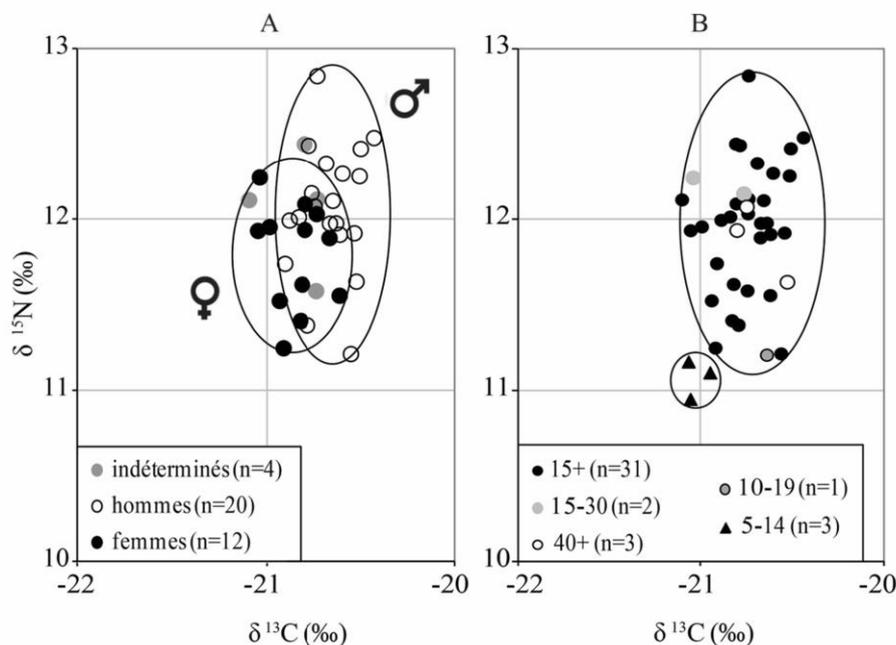


Fig. 3 Dispersion des valeurs isotopiques en fonction du sexe des adultes de plus de 15 ans (A) et de l'âge au décès (B) / Isotope ratios by sex of individuals over 15 years of age (A) and by age groups (B)

supplémentaire 6 (B1, B3 et B4)), les effectifs sont trop déséquilibrés pour conclure. Les autres éléments des dispositifs funéraires (taille des structures, position et orientation des sujets) ne varient pas avec le sexe [22], et ils ont été étudiés indépendamment de ce dernier critère : les résultats ne révèlent pas de corrélation avec les valeurs isotopiques (coefficients de corrélation  $\leq |0,5|$ ,  $p > 0,05$ ).

L'étude de la répartition des valeurs isotopiques en fonction de la chronologie ne montre pas de variation dans les moyennes du  $\delta^{13}\text{C}$  et du  $\delta^{15}\text{N}$  au cours du temps (Fig. 4). Toutefois, une plus large amplitude des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  est enregistrée pour la période du début du Néolithique moyen (4800–4400 cal. BC). Celle-ci s'exprime en outre par la différence marquée en  $\delta^{15}\text{N}$  moyen entre hommes et femmes et une plus forte variabilité pour les hommes. Le croisement avec les données génétiques (haplogroupes disponibles ; [26]) n'a révélé aucune corrélation avec les données isotopiques (Matériel supplémentaire 7).

La variation isotopique selon la répartition spatiale des sépultures montre un équilibre entre les différents secteurs de la nécropole. En revanche, certaines tombes rassemblées entre elles sur le plan spatial<sup>3</sup>, sans distinction par âge ou par sexe, présentent des valeurs isotopiques particulièrement proches. La variation mesurée entre les individus au sein de chaque groupe étant encore plus faible ( $\Delta^{15}\text{N}$  et  $\Delta^{13}\text{C} < 0,5$  et  $0,6$  ‰) que la variation enregistrée pour l'ensemble de la population. Par ailleurs, lorsque hommes et femmes sont associés dans un même groupe, les femmes présentent toujours des valeurs isotopiques de  $\delta^{13}\text{C}$  inférieures (trois cas sur quatre) ou égales (un cas sur quatre) à celles des hommes du même groupe, ce qui corrobore les observations faites sur l'ensemble du corpus. Enfin, l'une des sépultures (221B) semble occuper une place centrale dans la nécropole (Matériel supplémentaire 2). Datée d'une phase ancienne de l'occupation (4906–4689 cal. BC) et entourée d'un espace libre (volontairement réservé ou non), c'est la plus imposante du site, et son orientation semble entraîner celle des autres tombes. Il est intéressant de noter que l'occupant de cette structure présente la valeur de  $\delta^{15}\text{N}$  la plus élevée du groupe échantillonné ( $\delta^{15}\text{N} = 12,8$  ‰).

## Discussion

### Alimentation humaine

Aucune étude environnementale complète n'ayant été réalisée au niveau local et en l'absence de restes fauniques disponibles localement, les données (environnementales) présentées et

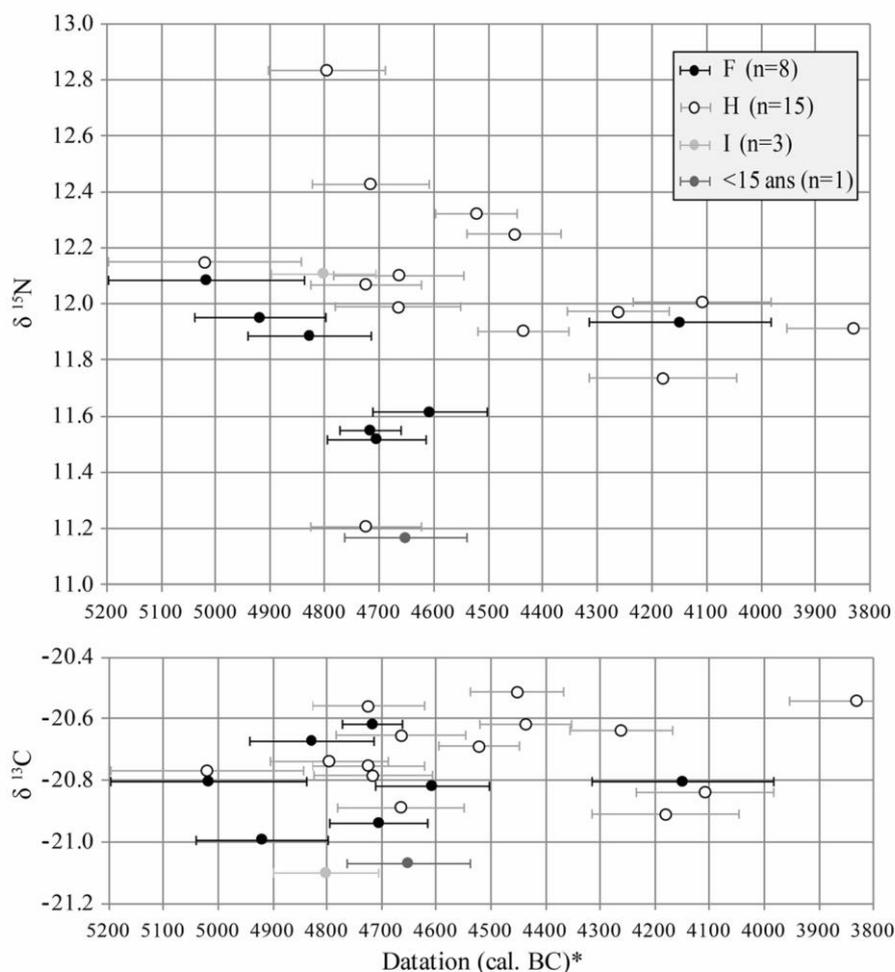
discutées ici concernent toute l'aire géologique du Bassin parisien — la nécropole se situant à l'extrémité sud-est de celle-ci. Dans cette région au climat tempéré, les séquences polliniques montrent une anthropisation du couvert forestier limitée à certaines zones d'occupation de forte densité, sans qu'aucun défrichement massif ne soit attesté [56,57]. Les données carpologiques et palynologiques régionales attestent de la culture des céréales dès le Néolithique ancien ; plusieurs espèces, cultivées et sauvages, sont présentes dans la région (blé et orge principalement, mais aussi pois, lentilles, noisettes, herbes sauvages ; [58–60]). La découverte de matériel agricole témoigne de cette pratique [61].

Par ailleurs, les données archéozoologiques montrent que l'élevage devient la principale source de produits carnés, même si la pratique de la chasse (principalement des cervidés) n'est pas complètement abandonnée [62,63]. Celle-ci devient moins usuelle, particulièrement au Néolithique moyen, détenant principalement un rôle social et symbolique [64]. L'étude archéozoologique de plusieurs sites (VSG, Cerny et Chasséen) atteste de l'exploitation prépondérante du bœuf (*Bos taurus*) puis du porc (*Sus scrofa domesticus*), l'exploitation des moutons (*Ovis aries*) et chèvres (*Ovis capra*) étant minoritaire [63,65,66]. Plusieurs études témoignent en outre d'une gestion mixte du cheptel, indiquant une bonne maîtrise de l'élevage des bovins et de l'exploitation laitière [63,67,68].

Dans l'étude présentée ici, les résultats isotopiques des humains comparés à ceux des animaux de la région montrent une différence moyenne supérieure à celle attendue dans le cadre d'une consommation essentiellement fondée sur les plantes et la viande de bœuf. Cette différence confère aux humains une position élevée dans le réseau trophique régional, qui peut s'expliquer par plusieurs possibilités en termes de régime alimentaire (voir ci-après). Mais avant tout, ce résultat révèle une variation entre les humains et la faune régionale (donc un niveau trophique des humains) supérieure à tout ce qui est actuellement connu en France et dans les régions limitrophes pour le Néolithique ancien et moyen (Matériel supplémentaire 8). Ce constat soulève une fois de plus la question de la place de la nécropole dans le contexte local et met en exergue l'éventualité d'un particularisme régional à maintes reprises évoqué [23]. L'analyse isotopique des restes humains des sites voisins permettra d'apporter une lumière nouvelle sur cette question.

Pour tenter de caractériser le régime alimentaire, plusieurs hypothèses peuvent être proposées (l'importance de l'écart isotopique entre les humains et la faune fournissant ici une vision équivoque de l'alimentation, avec une multitude de combinaisons possibles). D'abord, certaines ressources peuvent disposer de signatures isotopiques enrichies en azote lourd qui, en entrant de façon non négligeable dans le régime alimentaire des humains, pourraient expliquer les valeurs enregistrées ici. Parmi celles-ci, on peut citer les jeunes

<sup>3</sup> Les regroupements spatiaux considérés ici concernent les sujets 320/323/325, 265/266/269, 220/221B, 263/257, 295/296, 215A/B et 243A/B.



**Fig. 4** Dispersion des valeurs isotopiques en fonction de la chronologie. \*d'après Rivollat et al. [26] / *Isotopic ratios according to the chronology. \*after Rivollat et al. [26]*

animaux domestiques non sevrés et le poisson d'eau douce (voire anadrome).

Les jeunes animaux domestiques (veau, agneau, cochon de lait) peuvent être consommés soit directement pour la recherche de viande tendre, soit dans le cadre d'une exploitation laitière (bovine essentiellement) [63,69]. Abattus au cours ou dès la fin du sevrage, le signal isotopique de l'allaitement est encore visible dans leurs tissus et leur confère des valeurs généralement supérieures à celles de la mère [70]. Ici, notons que, dans le cas d'une consommation de jeunes caprinés et/ou suinés, les animaux adultes présentent déjà des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) supérieures à celles des bovins (Fig. 2). Pour cette raison, il est aussi envisageable que le porc (voire que les caprinés), et notamment les jeunes, ait été consommé en plus grande quantité que dans les autres sites, influençant les résultats isotopiques rencontrés ici. Une consommation quasi exclusive de ces animaux n'est toutefois pas envisa-

geable au vu des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$ , ce qui est en accord avec les données archéozoologiques.

L'exploitation de ressources dulcicoles est plus difficile à mettre en évidence. Si elle est attestée dès le Mésolithique à Noyen-sur-Seine (Seine-et-Marne) [71,72], certains auteurs ont montré qu'au Néolithique, les agriculteurs se tournent plutôt vers les produits terrestres et abandonnent la pêche (notamment sur les sites côtiers ; [73]). Cependant, dans le Bassin parisien, quatre sites VSG (situés dans les régions de l'Oise, de l'Aisne et de la Marne) ont livré des quantités significatives de restes de poisson, parmi lesquels les cyprinidés semblent les plus consommés (e.g. carpe, brème, gardon), et la saisonnalité des captures indique que la pêche a effectivement pu constituer un apport non négligeable de protéines pendant les périodes chaudes, en supplément des produits de l'élevage [74,75]. L'importante variabilité isotopique observée dans les écosystèmes aquatiques [76,77]

souligne la nécessité d'utilisation d'un référentiel local et contemporain, mais ces spécimens n'ont pas pu faire l'objet d'analyses isotopiques (vestiges indisponibles). La comparaison des teneurs isotopiques des humains de Gurgy à quelques rares valeurs d'espèces aquatiques disponibles dans la littérature (même très éloignées géographiquement et chronologiquement) [78–83] semble toutefois confirmer la possibilité d'une consommation de telles ressources (Matériel supplémentaire 9).

Malgré le fait que les  $\delta^{15}\text{N}$  enregistrés chez les humains reflètent une position trophique élevée de ces derniers dans la chaîne alimentaire régionale, les ressources végétales ont probablement aussi dû faire partie de l'alimentation de façon non négligeable, comme en témoignent les divers indices archéologiques régionaux. À Gurgy, une meule a été retrouvée dans la nécropole, et le site voisin des « Grands Champs » a livré un certain nombre d'outils de mouture et d'armatures de faucille [61]. Cependant, le collagène enregistre majoritairement les teneurs isotopiques des aliments les plus riches en protéines. Les ressources animales proposant une source de protéines nettement plus élevée que les ressources végétales (80 et 20 % en moyenne, respectivement), ces dernières sont souvent masquées par le signal d'une alimentation carnée [84–86].

D'autres hypothèses, peut-être plus discutables, peuvent être avancées, comme la consommation quotidienne de parties animales présentant des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  plus élevées que la viande (muscle) telles que les abats ou la cervelle par exemple [39]. Des différences de préparations alimentaires entre l'homme et son bétail pourraient également accentuer les variations enregistrées : cuisson des aliments, certaines fermentations ou bouillies mixtes [87–89], ou encore consommation différentielle de végétaux (par exemple légumineuses/tubercules/graines [40] ou céréales éventuellement cultivées avec du fumier comme fertilisant [90–92], pour les humains versus herbe et feuilles, pour le bétail). Certaines des hypothèses proposées ci-avant ont déjà été formulées pour des sites contemporains (consommation de poisson ou de jeunes animaux, utilisation de fertilisant ; [18,80]) pour expliquer de fortes valeurs isotopiques par rapport à la faune associée, mais dans chaque cas, la variation « humain–animal » n'excède pas celle rencontrée aux Noisats (Matériel supplémentaire 8).

Ainsi, la population de Gurgy semble fonder son économie de subsistance sur des produits d'origine animale issus de l'élevage majoritairement (produits de boucherie/laitages) de niveau trophique élevé, et/ou de la pêche, mais la part des ressources végétales, pauvres en protéines, n'est pas connue. L'importance de l'écart enregistré, inédit pour cette période, consent une pluralité de croisements alimentaires possibles pour expliquer ces valeurs. L'apport d'analyses complémentaires (ratios isotopiques du soufre, mesure des éléments traces, du  $\delta^{15}\text{N}$  spécifique des acides aminés,

étude du tartre et des micro-usures dentaires) permettra d'apporter de nouveaux éléments pour étayer les différentes hypothèses proposées ici et tenter de répondre à la question de la consommation de poisson, des jeunes animaux non sevrés, de la proportion des différentes espèces domestiques (bovinés vs suinés vs caprinés) et de la part des végétaux. De plus, de nouvelles analyses réalisées sur les animaux locaux et sur les humains des sites voisins permettront, d'une part, de confirmer le référentiel de base, d'autre part, de considérer la place de la nécropole dans la vallée de l'Yonne et la position de cette dernière par rapport aux régions alentour.

### Variabilité intrapopulationnelle

L'un des intérêts majeurs de l'approche isotopique est de pouvoir détecter les éventuelles distinctions alimentaires au sein même de la population, entre les individus ou groupes d'individus, en relation aux paramètres biologiques (âge et sexe notamment), sociaux (identification de statuts particuliers) ou culturels [15,16,93,94]. La particularité de la nécropole de Gurgy « Les Noisats » réside dans la diversité de ses dispositifs sépulcraux et du mobilier, témoignant du mélange d'influences culturelles diverses et parfois lointaines, ainsi que dans sa durée d'occupation, de près d'un millénaire. Or, la gamme de variation des valeurs isotopiques des humains est exceptionnellement faible pour la période, et l'effectif considéré ( $\Delta^{13}\text{C} = 0,7 \text{ ‰}$ ,  $\Delta^{15}\text{N} = 1,9 \text{ ‰}$ ,  $n = 40$  ; Matériel supplémentaire 8), et indique une très forte homogénéité de l'ensemble de la population. Une plus forte variabilité est toutefois enregistrée au début du Néolithique moyen, reflétant peut-être des pratiques alimentaires légèrement plus diversifiées en ces temps de mutations économiques et sociales, dont la multiplication des cultures illustre la complexité naissante. C'est à cette période que la différence en  $\delta^{15}\text{N}$  entre les sexes est la plus marquée, ce qui pourrait témoigner d'une organisation sociale plus structurée, voire hiérarchisée. Néanmoins, l'homogénéité globale est surprenante. Un résultat comparable a été mis en évidence dans certains sites plus anciens, comme à Fontbrégoua, ou contemporains, comme à Mont d'Hubert, mais les individus sont toutefois moins nombreux qu'aux Noisats et/ou ont été retrouvés dans un contexte particulier [95,96]. À 70 km de Gurgy dans le Bassin parisien, le site Cerny de Balloy « Les Réaudins » propose un point de comparaison intéressant : la faible variation des valeurs isotopiques ( $\Delta^{13}\text{C} = 1 \text{ ‰}$  et  $\Delta^{15}\text{N} = 2,2 \text{ ‰}$ ,  $n = 22$ ) contraste avec l'importante structuration et hiérarchisation des inhumés, dans et en dehors des structures monumentales [20]. Cette analogie pourrait témoigner d'un particularisme alimentaire régional et/ou culturel. Dans l'Eure, le site chasséen de Louviers « La Villette » propose une image différente, avec deux groupes humains distincts du point de vue alimentaire [19]. À titre de comparaison, des variations régionales ont été mises en évidence

dans le sud de la France, entre les aires de la Garonne et du Languedoc, où l'environnement doit influencer la mise en place de systèmes économiques différents [21,50].

Si des rapports isotopiques similaires peuvent être générés par des assemblages alimentaires différents, il est cependant plus probable qu'une population au signal isotopique homogène partage le même type de ressources plutôt que plusieurs combinaisons d'aliments différents qui se compenseraient pour aboutir in fine à un résultat isotopique uniforme. Ici, l'homogénéité est telle que tous les individus semblent avoir consommé des ressources issues des mêmes catégories alimentaires (e.g. viande de bœuf, porc, céréales) et du même environnement dans des proportions équivalentes.

Au sein de cette homogénéité globale, il existe toutefois des variations liées au sexe et à l'âge des sujets, ainsi que des similitudes entre plusieurs individus inhumés ensemble et reflétant sans doute des comportements alimentaires spécifiques. Le croisement des données isotopiques avec ces paramètres montre que les hommes présentent des valeurs ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) plus élevées et diversifiées que les femmes et les enfants. Des variations alimentaires entre les sexes ont déjà été constatées dans plusieurs sites européens [80,93,94], bien qu'elles soient généralement plus marquées. Ici, les critères âge et sexe sont les seuls à présenter des différences isotopiques statistiquement significatives : celles-ci ne peuvent être dues au hasard et reflètent clairement une discrimination — si ce n'est en fonction de l'âge à cause de l'effectif faible — au moins sexuelle. Des études expérimentales en nutrition contrôlée ont montré qu'il n'existe pas de différence isotopique entre les sujets masculins et féminins d'une même espèce ayant une alimentation équivalente [97]. Ces différences, circonscrites dans l'ensemble homogène d'un régime alimentaire apparemment commun à toute la population, peuvent donc refléter soit des distinctions alimentaires ne faisant varier que très légèrement les valeurs isotopiques (e.g. consommation de muscles vs abats d'un même animal, certaines préparations ou proportions), soit des phénomènes physiologiques agissant directement sur l'enregistrement du signal.

D'une part, en effet, des régimes alimentaires similaires (mêmes espèces consommées, proportion des parts végétales et carnées respectées) ne signifient pas nécessairement une alimentation identique ou des comportements alimentaires équivalents [98]. Des différences peuvent résider dans le choix des produits au sein d'un même type de ressource (e.g. différentes pièces de viande/laitage d'un même animal [39]), dans leurs préparations (bouillies, cuissons, fermentations — pouvant impliquer ou non des modifications du signal isotopique [86–88]), dans l'ordre de distribution des denrées ou dans les proportions partagées (toutes mesures gardées pour ne pas inverser les tendances), en fonction des préférences individuelles ou de l'accès différentiel à tel ou tel mets selon son statut social par exemple. La variabilité

isotopique plus importante chez les hommes pourrait par exemple signaler un accès plus large et diversifié aux différents produits. De plus, la dispersion des valeurs isotopiques en fonction du mobilier, par sexe, montre que les femmes possédant des objets de parure ont des valeurs particulièrement élevées, alors que les hommes inhumés avec du mobilier présentent des valeurs aussi bien hautes que basses. Cela pourrait caractériser — si la possession d'objet est liée à un quelconque statut social — l'accès privilégié des femmes d'un certain statut social à un type particulier d'alimentation, alors que tous les hommes, quel que soit leur statut, auraient accès à toutes les denrées. Cette théorie pourrait être testée sur un plus grand nombre d'individus. De la même manière, si la distinction isotopique entre les moins et les plus de 15 ans s'avère exacte sur un plus grand nombre de sujets, cela pourrait indiquer un changement de statut social autour de cet âge, éventuellement accompagné de la modification du régime alimentaire. Cette hypothèse est corroborée par des observations anthropologiques réalisées indépendamment sur la base du mobilier et des structures, considérant « les individus d'un âge supérieur à 13/14 ans comme appartenant à la sphère adulte » ([22], p. 211).

D'autre part, plusieurs paramètres liés aux modes de vie des sujets et/ou induisant des processus physiologiques différents pourraient également expliquer le contraste isotopique ténu observé ici entre hommes, femmes et enfants. Par exemple, l'activité physique modifie les taux de remodelage osseux et implique des processus physiologiques méconnus sur l'enregistrement isotopique [33,99]. La division sexuelle du travail, attestée au Néolithique dans plusieurs populations européennes, notamment par l'étude des marqueurs osseux d'activité [100] pourrait justifier de légères variations isotopiques. À Gurgy, la mauvaise conservation de l'os ne permet malheureusement pas d'observer ce type de marqueurs, ni d'étudier la géométrie de section. Les processus physiologiques reliant les valeurs isotopiques à l'âge sont mal connus, mais aucun lien n'a été démontré entre ces deux paramètres dans le collagène. Une modification du  $\delta^{15}\text{N}$  en fonction de l'âge a été mise en évidence dans certains tissus chez les rats (augmentation chez les jeunes) [101]. Néanmoins, la relation complexe existant entre ces deux paramètres résulterait majoritairement de changements de comportements alimentaires liés à des facteurs socioculturels [102]. Par ailleurs, les taux de remodelage osseux étant plus rapides pendant la croissance, les enfants ont enregistré un signal de plus courte durée [33], pouvant peut-être justifier la faible distinction observée ici.

Des différences d'état sanitaire entre les sexes pourraient également être corrélées aux variations isotopiques [103]. D'un côté, certaines pathologies ou déséquilibres nutritionnels modifient l'enregistrement isotopique dans les tissus [103] ; inversement, certains types de diète entraînent des réactions, pathologiques ou non, qui peuvent

marquer le squelette (e.g. les céréales, riches en glucides, sont cariogènes). L'étude de l'état buccodentaire général, et des lésions carieuses notamment, qui semblent plus toucher les femmes [104], apporterait de nouvelles informations relatives aux modalités de subsistance, ces paramètres étant étroitement liés à l'alimentation. Par ailleurs, pendant les périodes de gestation et d'allaitement, les femmes subissent des changements physiologiques pouvant engendrer des modifications de l'enregistrement isotopique de l'azote dans leurs tissus [16,93,105]. Ces relations sont mal connues dans le collagène, mais dans les conditions de forte natalité supposées par certains auteurs au Néolithique [106], l'enchaînement de phases de grossesse/allaitement pourrait être reflété par de légères variations. Par ailleurs, le lien (intrapopulationnel) entre stature élevée et consommation de ressources carnées (donc  $\delta^{15}\text{N}$ ) a plusieurs fois été souligné dans la littérature [104,107]. Si à Gurgy la stature moyenne des hommes est plus élevée que celle des femmes (estimation de la stature par sexe, sur la base de la longueur du fémur [108,109]), elle n'est pas, pour chaque sexe indépendamment ou pour l'ensemble des sujets, corrélée au  $\delta^{15}\text{N}$  (coeff. de corrélation  $< 0,5$ ).

Enfin, l'hypothèse d'une origine exogène des femmes a été proposée dans plusieurs études [18,50]. Le déplacement de femmes depuis un groupe voisin proposant des valeurs isotopiques légèrement différentes (de l'ordre de la différence enregistrée ici entre les sexes) pourrait expliquer cette légère variation. Toutefois, pour que celle-ci soit visible, il faudrait que les femmes n'aient pas eu le temps de renouveler leur collagène pour effacer le signal d'origine. Des analyses sont en cours sur la dentine ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) et sur l'émail dentaire ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) de ces individus, pour tenter de détecter d'éventuelles modifications du régime alimentaire ou de l'environnement entre l'enfance et l'âge adulte. En effet, les dents, une fois mures, ne sont plus remaniées et présentent la signature isotopique enregistrée pendant leur période de formation. Des exemples de mobilité ont ainsi été relevés, grâce à l'analyse isotopique du strontium, pour des sites du Néolithique ancien et moyen dans le sud de la France et en Allemagne [110,111]. Ici, la question des relations entre la nécropole et les sites voisins est soulevée, d'une part, par la grande diversité des dispositifs funéraires renvoyant à des horizons culturels différents, d'autre part, par le rapport entre le faible nombre d'inhumations relativement à la longue période d'occupation. En effet, ce dernier peut constituer soit le reflet d'un groupe réduit, soit celui d'une sélection des inhumés, le reste de la population pouvant être inhumé ailleurs ou avoir subi des traitements différents. Dans ce dernier cas, la population doit être comparée aux différents systèmes rencontrés dans les sites voisins : structures monumentales Cerny (et nécropoles « plates » attribuées à la même culture), nécropole voisine de Monéteau « Sur Macherin » attribuée au Chasséen [112], restes épars dans les enceintes voisines

de Beaumont « Le Crot aux Moines » et Gurgy « Le Nouveau » notamment [23]. De nouvelles analyses sur les restes humains de ces gisements sont prévues. Par ailleurs, la circulation d'objets, parfois même sur de longues distances [113], et les données génétiques attestant d'origines rubanées et méditerranéennes dans la population de Gurgy [26] placent le site sur des axes d'échanges matériels et populationnels déjà en place. Aucune corrélation n'a cependant été mise en évidence entre les données génétiques et les résultats isotopiques. À noter toutefois que les premières ont une portée multigénérationnelle et les deuxièmes s'interprètent à l'échelle de la vie de l'individu.

La question de la structuration sociale du groupe inhumé à Gurgy est également soulevée par la position de certaines tombes dans la nécropole. Le regroupement de plusieurs individus dans des fosses proches, souligné par la proximité particulièrement marquée de leurs valeurs isotopiques, suggère un rassemblement en lien à des relations sociales ou familiales. Cet argument vient appuyer des observations analogues mises en évidence par l'étude de la morphologie dentaire [114] et de la génétique [26]. En outre, la place du sujet 221B (position centrale dans la nécropole, valeur la plus élevée de  $\delta^{15}\text{N}$ ) pourrait traduire un statut particulier de cet individu en lien à une spécialisation sociale de la nécropole. Ce résultat invite de nouveau à la comparaison avec le site de Balloy, rattaché au Cerny et caractérisé par une organisation sociale structurée et hiérarchisée [20].

## Conclusion

L'approche biochimique utilisée sur les ossements de 40 sujets de la nécropole de Gurgy « Les Noisats » a permis d'apporter de nouveaux éléments pour répondre à la double problématique soulevée dans cette étude. D'abord, la comparaison des valeurs isotopiques des humains avec la faune régionale et contemporaine du site a mis en évidence le niveau trophique particulièrement élevé de cette population par rapport à ce qui est connu dans les régions alentour à la même période. Différentes hypothèses de consommation ont été proposées, comme la consommation importante de protéines animales issues de l'élevage — notamment des jeunes et peut-être d'une part plus importante de suinés et caprinés que celle envisagée dans les régions voisines ; la consommation potentielle de poisson dulcicole ou anadrome ; ou encore, plus contestable, la consommation régulière de morceaux de boucherie à plus fortes teneurs en  $^{15}\text{N}$  (e.g. abats), ou l'utilisation de « préparations » des cultures ou des aliments (fertilisation, cuisson). La part des ressources végétales est quant à elle masquée par le signal d'une alimentation riche en protéines, mais les céréales ont probablement été une source alimentaire non négligeable comme en témoignent les données régionales. L'apport d'autres méthodologies (ratios isotopiques du

soufre, du calcium, de l'azote sur les acides aminés ; dosage des éléments traces ; étude de la micro-usure dentaire ; analyse lipidique des résidus organiques des poteries ; [7,72,115–117]) et celui de l'analyse de restes animaux plus locaux permettront de préciser les hypothèses proposées. Une partie des analyses est en cours.

Ensuite, la comparaison des données isotopiques aux données biologiques et archéologiques a révélé des aspects nouveaux dans la structuration de la population. Au regard des paramètres funéraires, les inhumations à Gurgy semblent peu standardisées (diversité des dispositifs et des influences), mais la population est peu différenciée (pas de catégories clairement identifiées sur la base des dispositifs funéraires ou de la chronologie). Les résultats isotopiques montrent une grande homogénéité de l'ensemble des individus, résultat surprenant qui ne trouve de comparaison pertinente que dans le site voisin de Balloy [20]. Une plus large amplitude est toutefois enregistrée pour la période du début du Néolithique moyen, et de légères tendances sont décelables entre les sexes et entre les enfants de moins de 15 ans et les adultes. Ces différences peuvent être liées à la division des tâches, dont la pratique d'activités spécialisées engendrerait une modification de l'enregistrement du signal isotopique, et/ou simplement liées à des variations dans les modes de consommations (préparations culinaires, différenciation des portions alimentaires) relativement à la position sociale. Les différences entre les sexes sont d'ailleurs plus marquées au début du Néolithique moyen, période de mutations économiques et sociales à la complexité croissante. Par ailleurs, le regroupement spatial de certaines tombes dont les défunts partagent des caractéristiques biologiques et isotopiques évoque un rassemblement des individus selon des affinités sociales ou familiales. Le cas de la sépulture 221B suggère en outre que certains sujets aient bénéficié d'une position particulière dans la société. Ce dernier point est à considérer au regard de la longue période d'occupation de la nécropole et de l'apparente homogénéité populationnelle toutefois observée. L'apport de nouvelles analyses isotopiques (notamment C, N, S, Sr sur os et sur dents ; études en cours) sur un effectif plus grand, à Gurgy et dans les sites voisins, permettra de préciser ces questions. La comparaison avec les gisements contemporains environnants aidera ainsi à mieux comprendre la place de la nécropole dans le système régional et les éventuels liens que celle-ci entretenait avec les autres sites funéraires et les communautés qui s'y rapportaient, proches ou lointaines.

**Remerciements** Cette étude a été financée par le projet DHP (dir : S. Rottier ; Univ. Bordeaux, Lascarbx ; 2012–2014) dans le cadre d'un mémoire de master 2 réalisé en 2013. Nous remercions toutes les personnes ayant permis la réalisation de ce travail, et notamment Jean-Pierre Bracco, Estelle Herrscher et Guy André au LAMPEA ; Dominique Castex, Marie-France Deguilloux et Frédéric Santos à PACEA.

**Liens d'intérêts :** les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt.

## Références

- Hachem L (2011) Le site néolithique de Cuiry-lès-Chaudardes-I. De l'analyse de la faune à la structuration sociale, *Internationale Archéologie*, 549 p
- Renault-Miskovsky J (2002) Apport de la carpologie et de la palynologie à la connaissance de l'environnement végétal, du régime alimentaire, des maladies et de la pharmacopée des hommes préhistoriques. In: Fleurentin J, Pelt JM, Mazars G (eds) Des sources du savoir aux médicaments du futur : actes du IV<sup>e</sup> Congrès européen d'ethnopharmacologie. IRD Éditions, Montpellier, pp 67–72
- Bouby L (2000) Restituer les pratiques agraires par la carpologie archéologique. *Études rurales* 153–154:177–94
- Hamon C (2003) De l'utilisation des outils de mouture, broyage et polissage au néolithique en Bassin parisien : apports de la traçéologie. *BSPF* 100:101–16
- Gibaja JF, Mazzucco N (2015) Conociendo la función del utillaje lítico tallado: Veinticinco años de análisis traçéológicos aplicados a contextos neolíticos del noreste de la Península Ibérica [Getting to know the function of the flaked stone tools: Twenty-five years of use-wear...]. *J Lithic Studies* 2:67–93
- Vieugé J (2014) Use-wear analysis of prehistoric pottery: methodological contributions from the study of the earliest ceramic vessels in Bulgaria (6100–5500 BC). *J Archaeol Sci* 41:622–30
- Regert M (2011) Analytical strategies for discriminating archaeological fatty substances from animal origin. *Mass Spectrom Rev* 30:177–220
- Polet C (2013) L'apport de l'anthropologie biologique à la connaissance des régimes alimentaires des populations du passé. *Bulletin de la fédération des archéologues de Wallonie et de Bruxelles* 72:67–76
- Larsen CS, Shavit R, Griffin MC (1991) Dental caries evidence for dietary change: an archaeological context. In: Kelley MA, Larsen CS (eds) *Advances in dental anthropology*. Wiley-Liss, Inc., pp 179–202
- Power RC, Salazar-García DC, Straus LG, et al (2015) Microremains from El Mirón cave human dental calculus suggest a mixed plant-animal subsistence economy during the Magdalenian in Northern Iberia. *J Archaeol Sci* 60:39–46
- Warinner C, Hendy J, Speller C, et al (2014) Direct evidence of milk consumption from ancient human dental calculus. *Sci Rep* 4:7104
- Scott RS, Ungar PS, Bergstrom TS, et al (2005) Dental micro-wear texture analysis shows within species diet variability in fossil hominins. *Nature* 436:693–5
- Bocherens H, Mariotti A (2002) Paléoenvironnements et paléoalementation : biogéochimie isotopique des vertébrés. In: Miskowsky JL (ed) *Géologie de la préhistoire, méthodes, techniques, applications*. Géopré — Presses universitaires de Perpignan, Paris, pp 1323–44
- Twiss K (2012) The archaeology of food and social diversity. *J Archaeol Res* 20:357–95
- Le Bras-Goude G, Herrscher E, Vaquer J (2012) Funeral practices and foodstuff behaviour: what does eat meat mean? Stable isotope analysis of Middle Neolithic populations in the Languedoc region (France). *J Anthropol Archaeol* 32:280–7
- Oelze VM, Siebert A, Nicklisch N, et al (2011) Early neolithic diet and animal husbandry: stable isotope evidence from three Linearbandkeramik (LBK) sites in Central Germany. *J Archaeol Sci* 38:270–9

17. Goude G (2007) Étude des modes de subsistance de populations néolithiques (VI–IV<sup>e</sup> millénaires av. J.-C.) dans le nord-ouest de la Méditerranée. Approche par l'utilisation des isotopes stables ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) du collagène. Thèse de doctorat, université de Bordeaux-I
18. Goude G, Schmitt A, Herrscher E, et al (2013) Pratiques alimentaires au Néolithique moyen : nouvelles données sur le site de Pontcharaud 2 (Puy-de-Dôme, Auvergne, France). *BSPF* 110:299–317
19. Bocherens H, Billiou D, Tresset A (2005) Approche biogéochimique ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) de l'exploitation de l'environnement par les humains. In: Giligny F (ed) Louviers « La Villette » (Eure) : un site néolithique moyen en zone humide. Presses universitaires de Rennes, Rennes, pp 265–9
20. Herrscher E, Thomas A, Chambon P, et al (2012) Pratiques alimentaires et nécropoles monumentales au Néolithique : le cas des sujets du site de Balloy-les Reaudins (culture de Cerny, V<sup>e</sup> millénaire, Bassin parisien). 1 837<sup>e</sup> Journées de la Société d'anthropologie de Paris, Bordeaux (25–27 janvier 2012). *BMSAP* 24:S21
21. Goude G, Fontugne M (2016) Carbon and nitrogen isotopic variability in bone collagen during the Neolithic period: influence of environmental factors and diet. *J Archaeol Sci* 70:117–31
22. Le Roy M (2015) Les enfants au Néolithique : du contexte funéraire à l'interprétation socioculturelle en France de 5700 à 2100 ans av. J.-C. Thèse de doctorat, université de Bordeaux
23. Chambon P, Rottier S, Augereau A, et al (2013) Évolution, coexistence et confrontation de pratiques funéraires entre 4700 et 4000 av. J.-C. sur un microterritoire dans la vallée de l'Yonne. In: Jaubert J, Fourment N, Depaepe P (eds) Transitions, ruptures et continuité en préhistoire, XXVII<sup>e</sup> Congrès préhistorique de France, Bordeaux — Les Eyzies 2010. Société préhistorique française, Paris, pp 213–28
24. Rottier S, Mordant C, Chambon P, et al (2005) Découverte de plus d'une centaine de sépultures du Néolithique moyen à Gurgy, les Noisats (Yonne). *BSPF* 102:641–5
25. Rottier S (2006) Observations préliminaires à l'étude des remplissages des tombes du Néolithique moyen I de Gurgy « Les Noisats » (Yonne). *RAE* 55:279–85
26. Rivollat M, Mendisco F, Pemonge MH, et al (2015) When the waves of European neolithization met: first paleogenetic evidence from early farmers in the Southern Paris Basin. *PLoS One* 10: e0125521
27. Rottier S (2007) L'architecture funéraire des sépultures du Néolithique moyen des Noisats à Gurgy (Yonne, France). In: Moinat P, Chambon P (eds) Les cistes de Chamblandes et la place des coffres dans les pratiques funéraires du Néolithique moyen occidental. Société préhistorique française, Paris, pp 99–107
28. Bonnardin S (inédit) La parure de Gurgy « Les Noisats » (Yonne). Approche technologique, typologique et fonctionnelle (campagnes 2006 et 2007). In: Rottier S (ed) Rapport d'opération archéologique programmée (2007). SRA Bourgogne, Dijon
29. Augereau A (inédit) L'industrie lithique de Gurgy « Les Noisats » (Yonne). Campagnes 2004–2006. In: Rottier S (ed) Rapport d'opération archéologique programmée (2007). SRA Bourgogne, Dijon
30. DeNiro MJ (1987) Stable isotopy and archaeology. *Am Sci* 75:182–91
31. Ambrose SH (1993) Isotopic analysis of paleodiets: methodological and interpretive considerations. In: Stanford M (ed) Investigations of ancient human tissue. Gordon and Breach Science Publishers, Langhorne, pp 59–130
32. Bocherens H (1999) Isotopes stables et reconstitution du régime alimentaire des hominidés fossiles : une revue. *BMSAP* 11:261–87
33. Valentin J (2002) Bone remodelling. In: Valentin J (ed) Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. *Ann ICRP* 32, Publication 89, Pergamon, pp 185–8
34. Tieszen LL, Boutton TW, Tesdahl KG, et al (1983) Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues: implications for  $\delta^{13}\text{C}$  analysis of diet. *Oecologia* 57:32–7
35. Ambrose SH, Norr L (1993) Experimental evidence for the relationship of the carbon isotope ratios of whole diet and dietary protein to those of bone collagen and carbonate. In: Lambert JB, Grupe G (eds) Prehistoric human bone. Archaeology at the molecular level. Springer-Verlag, Berlin, pp 1–37
36. O'Leary MH (1988) Carbon isotopes in photosynthesis. *BioScience* 38:328–36
37. Smith BN, Epstein S (1971) Two categories of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios for higher plants. *Plant Physiol* 47:380–4
38. Farquhar GD, Ehleringer JR, Hubick KT (1989) Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annu Rev Plant Phys* 40:503–37
39. DeNiro MJ, Epstein S (1981) Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochim Cosmochim Acta* 45:341–51
40. Virginia R, Delwiche CC (1982) Natural  $^{15}\text{N}$  abundance of presumed  $\text{N}_2$ -fixing and non- $\text{N}_2$ -fixing plants from selected ecosystems. *Oecologia* 54:317–25
41. Ambrose SH (1991) Effects of diet, climate and physiology on nitrogen isotope abundances in terrestrial foodwebs. *J Archaeol Sci* 18:293–317
42. Van Klinken GJ, Richards MP, Hedges REM (2000) An overview of causes for stable isotopic variations in past European human populations: environmental, ecophysiological, and cultural effects. In: Ambrose SH, Katzenberg MA (eds) Biogeochemical approaches to paleodietary analysis. Springer US, pp 39–63
43. Hedges REM, Stevens RE, Richards MP (2004) Bone as a stable isotope archive for local climatic information. *Quaternary Sci Rev* 23:959–65
44. Schoeninger MJ, DeNiro MJ (1984) Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals. *Geochim Cosmochim Acta* 48:625–39
45. Bocherens H, Drucker D (2003) Trophic level isotopic enrichment of carbon and nitrogen in bone collagen: case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems. *Int J Osteoarchaeol* 13:46–53
46. DeNiro MJ, Epstein S (1978) Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim Cosmochim Acta* 42:495–506
47. Minagawa M, Wada E (1984) Stepwise enrichment of  $^{15}\text{N}$  along food chains: further evidence and the relation between  $\delta^{15}\text{N}$  and animal age. *Geochim Cosmochim Acta* 48:1135–40
48. Heaton THE (1999) Spatial, species, and temporal variations in the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios of  $\text{C}_3$  plants: implications for palaeodiet studies. *J Archaeol Sci* 26:637–49
49. Heaton THE, Vogel JC, Von la Chevallerie G, et al (1986) Climatic influence on the isotopic composition of bone nitrogen. *Nature* 322:822–3
50. Herrscher E, Le Bras-Goude G (2010) Southern French neolithic populations: isotopic evidence for regional specificities in environment and diet. *Am J Phys Anthropol* 141:259–72
51. Balasse M (1999) De l'exploitation du lait au Néolithique moyen en Europe tempérée : examen des modalités de sevrage des bovins, par l'analyse isotopique des ossements archéologiques. Thèse de doctorat, université Paris-VI
52. Longin R (1971) New method of collagen extraction for radiocarbon dating. *Nature* 230:241–2
53. Bocherens H, Billiou D, Patou-Mathis P, et al (1997) Palaeobiological implications of the isotopic signature ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) of fossil mammal collagens in Scladina cave (Sclayn, Belgium). *Quat Res* 48:370–80
54. DeNiro MJ (1985) Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction. *Nature* 317:806–9

55. Ambrose SH (1990) Preparation and characterization of bone and tooth collagen for isotopic analysis. *J Archaeol Sci* 17:431–51
56. Leroyer C, Duhamel P (2006) L'impact des groupes néolithiques du Bassin parisien sur le milieu végétal : évolution et approche territoriale d'après les données polliniques. In: Duhamel P (ed) Impacts interculturels au Néolithique moyen. Du terroir au territoire : sociétés et espace. Revue archéologique de l'Est, 25<sup>e</sup> supplément, actes du XXV<sup>e</sup> Colloque interrégional sur le Néolithique, Dijon (20–21 octobre 2001), pp 131–49
57. Perriere J, Leroyer C, Duhamel P (2006) Impact sur le milieu végétal et activités agropastorales des groupes néolithiques d'après la séquence pollinique d'Armancourt (Oise). In: Duhamel P (ed) Impacts interculturels au Néolithique moyen. Du terroir au territoire : sociétés et espace. Revue archéologique de l'Est, 25<sup>e</sup> supplément, actes du XXV<sup>e</sup> Colloque interrégional sur le Néolithique, Dijon (20–21 octobre 2001), pp 151–60
58. Ilett M, Constantin C, Farruggia JP, et al (1995) Bâtiments voisins du Rubané et du groupe de Villeneuve-Saint-Germain sur le site de Bucy-le-Long « La Fosse Tounise » (Aisne). *Revue archéologique de Picardie* 9:17–39
59. Bakels C (1997) Le blé dans la culture de Cerny. In: Constantin C, Mordant D, Simonin D (eds) La culture de Cerny. Nouvelle économie, nouvelle société au Néolithique. Actes du Colloque international de Nemours, 1994. Mémoires du Musée de préhistoire d'Île-de-France, pp 315–7
60. Martin L, Bouby L, Marinval P, et al (2014) Exploitation des ressources végétales au Chasséen : un bilan des données carpologiques. Le Chasséen, des Chasséens : retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortailod, Lagozza. 18–20 novembre 2014, Paris
61. Meunier K, Augereau A, Hamon C, et al (2006) Le site Villeneuve-Saint-Germain de Gurgy « Les Grands Champs » (Yonne). In: Duhamel P (ed) Impacts interculturels au Néolithique moyen. Du terroir au territoire : sociétés et espace. Actes du XXV<sup>e</sup> Colloque interrégional sur le Néolithique, Dijon (20–21 octobre 2001). *Revue archéologique de l'Est*, 25<sup>e</sup> supplément, pp 287–301
62. Bedault L (2009) First reflections on the exploitation of animals in Villeneuve-Saint-Germain society at the end of the early Neolithic in the Paris Basin (France). In: Hofmann D, Bickle P (eds) Creating communities: new advances in central European Neolithic research. Oxbow Books, Oxford, pp 111–31
63. Hachem L, Bedault L, Leduc C (2014) L'élevage et la chasse au Chasséen septentrional : renouvellement des connaissances d'après l'étude des enceintes de Villers-Carbonnel (Somme) et de Passel (Oise). Le Chasséen, des Chasséens : retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortailod, Lagozza. 18–20 novembre 2014, Paris
64. Sidéra I (2003) De l'usage des produits de la chasse pour différencier des hommes. Fonctions votive et sociale de la chasse au Néolithique ancien et moyen du Bassin parisien. In: Chambon P, Leclerc J (eds) Les pratiques funéraires néolithiques avant 3500 av. J.-C. en France et dans les régions limitrophes. Société préhistorique française (mémoire 33), Table ronde de Saint-Germain-en-Laye (15–17 juin 2001), pp 91–98
65. Tresset A (1997) L'approvisionnement carné Cerny dans le contexte néolithique du Bassin parisien. In: Constantin C, Mordant D, Simonin D (eds) La culture de Cerny. Nouvelle économie, nouvelle société au Néolithique. Actes du Colloque international de Nemours, 1994. Mémoires du Musée de préhistoire d'Île-de-France, pp 299–314
66. Tresset A (1989) La Faune de l'enceinte néolithique de Barbuise Courtavant (Aube). In: Pré- et protohistoire de l'Aube, livret de l'exposition. Association régionale pour la protection et l'étude du patrimoine préhistorique (ARPEPP). Vertus, pp 135–8
67. Balasse M, Bocherens H, Tresset A, et al (1997) Émergence de la production laitière au Néolithique ? Contribution de l'analyse isotopique d'ossements de bovins archéologiques. *Cr Acad Sci II A* 325:1005–10
68. Balasse M, Tresset A (2002) Early weaning of neolithic domestic cattle (Bercy, France) revealed by intra-tooth variation in nitrogen isotope ratios. *J Archaeol Sci* 29:853–9
69. Balasse M, Boury L, Ughetto-Monfrin J, et al (2012) Stable isotope insights ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ) into cattle and sheep husbandry at Bercy (Paris, France, 4th millennium BC): birth seasonality and winter leaf foddering. *Environmental Archaeology* 17:29–44
70. Balasse M, Tresset A, Bocherens H, et al (2000) Un abattage « post-lactation » sur des bovins domestiques néolithiques. Étude isotopique des restes osseux du site de Bercy (Paris, France). *Anthropozoologica* 31:39–48
71. Vigne JD, Vilette P, Rodriguez P, et al (1989) Noyens-sur-Seine, site stratifié en milieu fluvial : une étude multidisciplinaire intégrée. *BSPF* 86:370–9
72. Naito YI, Chikaraishi Y, Ohkouchi N, et al (2013) Nitrogen isotopic composition of collagen amino acids as an indicator of aquatic resource consumption: insights from Mesolithic and Epipalaeolithic archaeological sites in France. *World Archaeol* 45:338–59
73. Richards MP, Schulting RJ, Hedges REM (2003) Sharp shift in diet at onset of Neolithic. *Nature* 425:366
74. Clavel B, Arbogast RM (2007) Fish exploitation from early neolithic sites in northern France: the first data. In: Dobiat C, Leidorf K (eds) The role of fish in ancient time. 13th Meeting of the International Council of the ICAZ Fish Remains Working Group. *Internationale Archäologie*, pp 85–91
75. Clavel B (2009) Site de pêche néolithique au bord de l'Aisne. *Archéopages* 26:22–3
76. Dufour E, Bocherens H, Mariotti A (1999) Palaeodietary implications of isotopic variability in eurasian lacustrine fish. *J Archaeol Sci* 26:617–27
77. Finlay JC, Kendall C (2007) Stable isotope tracing of temporal and spatial variability in organic matter sources to freshwater ecosystems. In: Michener R, Lajth K (eds) Stable isotopes in ecology and environmental science. Blackwell Publishing Ltd., pp 283–333
78. van der Merwe NJ, Williamson RF, Pfeiffer S, et al (2003) The Moatfield ossuary: isotopic dietary analysis of an Iroquoian community, using dental tissue. *J Anthropol Archaeol* 22:245–61
79. Bösl C, Grupe G, Peters J (2006) A Late Neolithic vertebrate food web based on stable isotope analyses. *Int J Osteoarchaeol* 16:296–315
80. Dürrwächter C, Craig OE, Collins MJ, et al (2006) Beyond the grave: variability in Neolithic diets in Southern Germany? *J Archaeol Sci* 33:39–48
81. Vika E, Theodoropoulou T (2012) Re-investigating fish consumption in Greek antiquity: results from  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  analysis from fish bone collagen. *J Archaeol Sci* 39:1618–27
82. Drucker D, Bocherens H (2004) Carbon and nitrogen stable isotopes as tracers of change in diet breadth during middle and upper Palaeolithic in Europe. *Int J Osteoarchaeol* 14:162–77
83. Fuller BT, Müldner G, Van Neer W, et al (2012) Carbon and nitrogen stable isotope ratio analysis of freshwater, brackish and marine fish from Belgian archaeological sites (1st and 2nd millennium AD). *J Anal At Spectrom* 27:807–20
84. Hedges REM, Reynard LM (2007) Nitrogen isotopes and the trophic level of humans in archaeology. *J Archaeol Sci* 34:1240–51
85. Ambrose SH, Buikstra J, Krueger HW (2003) Status and gender differences in diet at Mound 72, Cahokia, revealed by isotopic analysis of bone. *J Anthropol Archaeol* 22:217–26
86. Bocherens H (2009) Neanderthal dietary habits: review of the isotopic evidence. In: Hublin JJ, Richards MP (eds) The Evolution of

- hominin diets: integrating approaches to the study of palaeolithic subsistence. *Vertebrate paleobiology and paleanthropology series*, pp 241–50
87. Ambrose SH, Butler BM, Hanson DB, et al (1997) Stable isotopic analysis of human diet in the Marianas Archipelago, Western Pacific. *Am J Phys Anthropol* 104:343–61
  88. Katzenberg MA, Saunders S, Abonyi S (2002) Bone chemistry, food and history: a case study from 19th century upper Canada. In: Ambrose S, Katzenberg MA (eds) *Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*. Springer US, pp 1–22
  89. Drucker D (2001) Validation méthodologique de l'analyse isotopique d'ossements fossiles et apports aux reconstitutions paléocologiques du paléolithique supérieur du sud-ouest de la France. Thèse de doctorat, université Pierre-et-Marie Curie, Paris
  90. Kanstrup M, Thomsen IK, Mikkelsen PH, et al (2012) Impact of charring on cereal grain characteristics: linking prehistoric manuring practice to  $\delta^{15}\text{N}$  signatures in archaeobotanical material. *J Archaeol Sci* 39:2533–40
  91. Bogaard A, Heaton THE, Poulton P, et al (2007) The impact of manuring on nitrogen isotope ratios in cereals: archaeological implications for reconstruction of diet and crop management practices. *J Archaeol Sci* 34:335–43
  92. Aguilera M, Balasse M, Lepetz S, et al (2015) Fertilisation des sols de culture par les fumiers et rôle potentiel des céréales dans l'affouragement du bétail : l'éclairage des analyses isotopiques sur restes carpologiques et archéozoologiques. In: Reddé M (ed) *Méthodes d'analyse des différents paysages ruraux dans le Nord-Est de la Gaule romaine : études comparées (hiérarchisation des exploitations ; potentialités agronomiques des sols ; systèmes de production ; systèmes sociaux)*. Michel Reddé Eds pp 41–7
  93. Ogrinc N, Budja M (2005) Paleodietary reconstruction of a Neolithic population in Slovenia: a stable isotope approach. *Chem Geol* 218:103–16
  94. Le Bras-Goude G, Billy I, Charlier K, et al (2006) Contribution des méthodes isotopiques pour l'étude de l'alimentation humaine au Néolithique moyen méridional: le cas du site Chasséen ancien du Crès (Béziers, Hérault, France). *Antropo* 11:167–75
  95. Le Bras-Goude G, Binder D, Zémour A, et al (2010) New radiocarbon dates and isotope analysis of Neolithic human and animal bone from the Fontbrégoua cave. *J Anthropol Sci* 88:167–78
  96. Goude G (2014) Étude isotopique des restes humains du site de Mont d'Hubert (Escalles) : ressources alimentaires et exploitation de l'environnement. In: Praud I, Panloup E (eds) *Rapport de fouille préventive. Escalles, Mont d'Hubert : une enceinte du Néolithique moyen II, des fosses du Néolithique moyen I et du Bronze final sur le littoral de la mer du Nord*. INRAP, pp 332–6
  97. DeNiro MJ, Schoeninger MJ (1983) Stable carbon and nitrogen isotope ratios of bone collagen: variations within individuals, between sexes, and within populations raised on monotonous diets. *J Archaeol Sci* 10:199–203
  98. Pearson J (2007) Hunters, fishers and scavengers: a review of the isotope evidence for Neanderthal diet. *Before Farming* 2:1–16
  99. Hedges RE, Clement JG, Thomas CD, et al (2007) Collagen turnover in the adult femoral mid-shaft: modeled from anthropogenic radiocarbon tracer measurements. *Am J Phys Anthropol* 133:808–16
  100. Villotte S, Knüsel CJ (2014) I sing of arms and of a man...: medial epicondylitis and the sexual division of labour in prehistoric Europe. *J Archaeol Sci* 43:168–74
  101. Ambrose SH (2002) Controlled diet and climate experiments on nitrogen isotope ratios of rats. In: Ambrose SH, Katzenberg MA (eds) *Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp 243–59
  102. Prowse TL, Schwarcz HP, Saunders SR, et al (2005) Isotopic evidence for age-related variation in diet from Isola Sacra, Italy. *Am J Phys Anthropol* 128:2–13
  103. Katzenberg MA, Lovell NC (1999) Stable isotope variation in pathological bone. *Int J Osteoarchaeol* 9:316–24
  104. Le Bras-Goude G, Schmitt A, Loison G (2009) Comportements alimentaires, aspects biologiques et sociaux au Néolithique : le cas du Crès (Hérault, France). *C R Palevol* 8:79–91
  105. Fuller BT, Fuller JL, Sage NE, et al (2004) Nitrogen balance and  $\delta^{15}\text{N}$  : why you're not what you eat during pregnancy? *Rapid Commun Mass Sp* 18:2889–96
  106. Bocquet-Appel JP (2006) La transition démographique néolithique. In: Guilaine J (ed) *Populations néolithiques et environnement*. Séminaire du Collège de France. Errance, Paris, pp 11–20
  107. Herrscher E (2003) Alimentation d'une population historique : analyse des données isotopiques de la nécropole Saint-Laurent de Grenoble (XIII–XV<sup>e</sup> siècle, France). *BMSAP* 15:145–320
  108. Cleuvenot E, Houët F (1993) Proposition de nouvelles équations d'estimation de stature applicables pour un sexe indéterminé et fondées sur les échantillons de Trotter et Gleser. *BMSAP* 5:245–55
  109. Trotter M, Gleser GC (1958) A re-evaluation of estimation of stature based on measurements of stature taken during life and of long bones after death. *Am J Phys Anthropol* 16:79–123
  110. Nehlich O, Montgomery J, Evans J, et al (2009) Mobility or migration: a case study from the Neolithic settlement of Nieder-Mörlen (Hessen, Germany). *J Archaeol Sci* 36:1791–9
  111. Goude G, Castorina F, Herrscher E, et al (2012) First strontium isotope evidence of mobility in the Neolithic of Southern France. *Eur J Archaeol* 15:421–39
  112. Augereau A, Chambon P (2011) Les occupations néolithiques de Macherin à Monéteau (Yonne). *Société préhistorique française*, Paris, 422 p
  113. Petrequin P, Cassen S, Croutsch C, et al (1997) Haches alpines et baches carmacéennes dans l'Europe du V<sup>e</sup> millénaire. *Notae Praehistoricae* 17:135–50
  114. Le Luyer M, Rottier S, Bayle P (2015) Structure interne des dents et organisation des ensembles sépulcraux : exemple de la nécropole néolithique de Gurgy (Yonne). MDCCCXL<sup>es</sup> Journées de la Société d'anthropologie de Paris, 28–30 janvier 2015, Paris
  115. Nehlich O (2015) The application of sulphur isotope analyses in archaeological research: a review. *Earth Sci Rev* 142:1–17
  116. Privat KL, O'Connell TC, Hedges REM (2007) The distinction between freshwater- and terrestrial-based diets: methodological concerns and archaeological applications of sulphur stable isotope analysis. *J Archaeol Sci* 34:1197–204
  117. Chu NC, Henderson GM, Belshaw NS, et al (2006) Establishing the potential of Ca isotopes as proxy for consumption of dairy products. *Appl Geochem* 21:1656–67

## II. Article 2

---

*A multi-isotope analysis of Neolithic human groups in the Yonne valley, Northern France: insights into dietary patterns and social structure*

Léonie REY, Domingo Carlos SALAZAR-GARCÍA, Philippe CHAMBON, Frédéric SANTOS, Stéphane ROTTIER, Gwenaëlle GOUDE

Publié dans : **Archaeological and Anthropological Sciences** en **2019**

DOI : <https://doi.org/10.1007/s12520-019-00885-6>

Le matériel supplémentaire est disponible en Annexe B2



# A multi-isotope analysis of Neolithic human groups in the Yonne valley, Northern France: insights into dietary patterns and social structure

L. Rey<sup>1</sup> · Domingo C. Salazar-García<sup>2,3</sup> · P. h. Chambon<sup>4</sup> · F. Santos<sup>1</sup> · S. Rottier<sup>1</sup> · G. Goude<sup>5</sup>Received: 30 April 2018 / Accepted: 13 June 2019  
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

## Abstract

With the arrival of the Neolithic to Europe, new ways of life and new subsistence strategies emerged. In the Paris Basin (northern France), the appearance of some monumental funerary structures during the Middle Neolithic highlights in particular the increasing complexity of the social organisation. At the same time, several sites, such as open-air cemeteries, do not display any evidence of such arrangement. In the southeast of this area, the two primary routes of neolithisation meet. Several funerary parameters attest to the diverse influence received from other surrounding cultures. In order to assess potential differences in diet, and therefore on purported social distinctions at the inter- and intra-site level, stable isotope analyses (carbon, nitrogen and sulphur) were performed on bone collagen of humans ( $n = 177$ ) and non-human animals ( $n = 62$ ) from seven archaeological sites located in the same area (< 10 km). This study is the biggest so far on French Neolithic material and thus allows for an extensive investigation at a regional scale. Results show that the human nitrogen isotopic ratios are relatively enriched in nitrogen-15 comparing to those of the domesticated animals. This reflects a trophic step that is rarely observed elsewhere in the surrounding Neolithic people, particularly for humans of the biggest site Gurgy “Les Noisats”. Though zooarchaeological data support a predominant cattle consumption, here, we propose a mixed protein consumption of cattle and pig, possibly complemented with some freshwater resources. Furthermore, carbon, nitrogen and sulphur isotopic ratios suggest some slight differences between sexes and sites. This sexual distinction has rarely been identified in the diet within a Neolithic context. Some variations over time were also detected. On the whole, this study seems to support previous observations made from burial practices about a specific regional Neolithic pattern in the Paris Basin as well as bring new elements into discussion of social organisation in human populations.

**Keywords** Neolithic · Diet · Carbon · Nitrogen · Sulphur · Isotope

**Electronic supplementary material** The online version of this article (<https://doi.org/10.1007/s12520-019-00885-6>) contains supplementary material, which is available to authorized users.

✉ L. Rey  
leonie.rey@u-bordeaux.fr; leonie.rey@outlook.fr

<sup>1</sup> UMR 5199 – PACEA, Allée Geoffroy Saint Hilaire, Université de Bordeaux, CS 50023, 33615 Pessac Cedex, France

<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Prehistoria IT-622-13 (UPV-EHU)/ IKERBASQUE-Basque Foundation for Science, Vitoria, Spain

<sup>3</sup> Department of Geological Sciences, University of Cape Town, Cape Town, South Africa

<sup>4</sup> CNRS-UMR 7206, Éco-anthropologie et Ethnobiologie, Musée de l'Homme, 17 place du Trocadéro, F-75116 Paris, France

<sup>5</sup> Aix Marseille Univ, CNRS, Minist Culture, LAMPEA, Aix-en-Provence, France

## Introduction

Isotopic analyses have been conducted routinely since the 1970s to study the diet of past human populations. They provide new results to complement the data from other disciplines: studies on food remains (e.g. zooarchaeology, archaeobotany, lipid residue analysis on pottery, plant micro-remain studies on dental calculus), dental and skeletal health status studies (e.g. stress markers, caries, deficiencies, dental wear) and other archaeological evidence. While these studies generally concern the population's food regimes and are subject to the availability and the conservation of these remains, isotopic analyses bring complementary information allowing a direct and individual vision of the human diet. Some resources (meat, plants, fish) have distinct isotopic ratios that are recorded in the consumer's tissues. The analysis of these tissues allows each individual to be replaced in the local food chain and to access intra-group variations. In

human societies, such variations often depend on socio-cultural parameters. Analysis of local and contemporary animals both provides an isotopic baseline for human diet (as isotopic values vary with environmental conditions) and bring more indications on the livestock management by the human populations. The Neolithic period, in particular, is studied to document one of the biggest dietary transitions in human history: hunter-gatherer populations settle down and become farmer-pastoralists. New resources (animal and plant species newly domesticated) are introduced into the diet of human groups in varying proportions depending on several factors (resources availability, cultural choices, etc.). The Meso-Neolithic transition is well established through isotopic analyses and varies by region according to local specificities (e.g. Jovanović et al. 2018; Richards and Hedges 1999). Many sites in Europe have already been analysed for stable carbon (C) and nitrogen (N) isotope ratios in bone collagen and highlight the dietary changes that occurred in the Neolithic (e.g. Goude and Fontugne 2016). Sulphur (S) isotopic analyses are more rare but are increasingly being included in multi-proxy analyses to better document the dietary patterns, as well as the mobility patterns (e.g. Drucker et al. 2016b; Goude et al. 2018; Nehlich 2015).

In the Paris Basin, zooarchaeological data from Early and Middle Neolithic shows a consumption mainly of cattle (*Bos taurus*) followed by pig (*Sus scrofa domesticus*). Sheep (*Ovis aries*) and goats (*Capra hircus*) are in the minority (e.g. Bedault 2009; Hachem et al. 2014; Tresset 1989, 1997). Humans were also skilled in raising livestock, with dairy farming well-handled alongside meat production (Balasse et al. 1997; Balasse and Tresset 2002; Hachem et al. 2014). Wild animals (mainly deer – *Cervus elaphus*) were still hunted (Hachem et al. 2014) but rather for symbolic and cultural reasons, particularly during the Middle Neolithic (Sidéra 2003). Fishing should also be considered as an additional source of food even in a lesser extent, as a few fish remains have been found in some regional sites (Clavel and Arbogast 2007). Moreover, fishing is attested since the Mesolithic period in the region (Drucker et al. 2016b) and consumption of aquatic resources was proposed for a regional Neolithic site in a previous isotopic study (Rey et al. 2017). Besides, carpological and palynological regional data show that, in this temperate climate with C<sub>3</sub> vegetation, cereal cultivation is present since the early Neolithic with wheat (*Triticum dicoccum* and *monococcum*) and barley (*Hordeum vulgare*) (Bakels 1997; Martin et al. 2014). Wild species are also retrieved: peas (*Pisum sativum*), lentils (*Lens culinaris*), hazelnuts (*Corylus avellana*), wild herbs, etc. (Ilett et al. 1995; Martin et al. 2014). In the Yonne valley, the farming equipment found in several sites reflects the agricultural practices (grindstones, knobs and sickles have been found in Gurgy “Les Noisats” and “Les Grands Champs” and in Monéteau; Augereau and Chambon 2011; Meunier et al. 2006). In this context, isotopic analyses bring a new insight of the local human diet allowing comparisons with other contemporaneous

sites. Each isotope answers specific questions and the combination of several proxies provides a clearer view of the diet (Cooper et al. 2018). Studying bone collagen especially provides information about the proteins consumed, i.e. mainly about animal resources (as plants generally contain less proteins). Complementary studies better answer the issue of the plant part (e.g. archaeobotany and dental calculus analysis; Cristiani et al. 2018; Bouby and Léa 2006).

Furthermore, the Neolithic period is characterised by important cultural changes. The new way of life is spreading in Europe from the Near East through two routes of diffusion: one continental by the Danube, associated with the Linear Pottery Culture (LBK), the other in the south along the Mediterranean Sea associated with the Cardial culture. The Paris Basin is at the extreme point of the continental route. There is evidence the new economy was established from current Lorraine to Normandy shortly before the end of the 6th millennium BC (Billard et al. 2014; Bostyn 2003). In the south of the Paris Basin, the situation is a little different. The traces of this first continental Neolithic period are fleeting, while the centre of France also displays evidence related to the Mediterranean Early Neolithic. The interactions between the two spheres remain poorly understood, but they probably occurred as early as the first centuries of the 5th millennium BC in the south of the Paris Basin. The middle Yonne valley is potentially one of these contact areas (Chambon et al. 2013; Prestreau and Thevenot 1996). There, the LBK reached its southern margin and, from the beginning of the Middle Neolithic period, there is evidence of local cultural expressions that relate little to the rest of the Paris Basin. This area of contact is still marked by the juxtaposition, on a limited geographical scale, of distinct cultural entities (Rubané Récent du Bassin Parisien [RRBP], Blicquy-Villeneuve-Saint-Germain [BVSG], Cemy, Chasséen, Grossgartach, Roessen, Michelsberg). To date, little is known about their respective diet, particularly from the isotopic studies. These cultural entities are defined on the basis of archaeological characteristics and did not reveal specific isotopic signatures. However, some trends can be observed on a larger scale between the cultural spheres of the North and the South, due in particular to local environmental conditions (Goude and Fontugne 2016). However, it is difficult to compare different cultural entities when they do not belong to the same geographical or chronological unit.

The present study considers seven neighbouring sites, almost contemporaneous and attributed to different cultures. It is the biggest study (C, N, S) so far for the European Neolithic to be conducted on numerous human and animal<sup>1</sup> samples from a very limited area. The sites are located on the same geological formation (sedimentary layer c1—Early Cretaceous), along 10 km of the Yonne river in the Paris Basin (Fig. 1; Chambon et al. 2013). They are dated from the

<sup>1</sup> For simplicity, in the text “animal” excludes humans.

Early to the Middle Neolithic. The radiocarbon dates of the human remains range between ca. 5500 and 3000 cal. BC. They concern 97 samples and are taken from the publications corresponding to each site cited in Table 1 (chronological distribution in Online Resource 1). The most recent dates are doubtful because they are too far away from the others for a coherent functioning of the cemetery: those after 3500 cal. BC are not considered in this study. The sample selection was made in such a way as to best represent the apparent cultural diversity. All the sites are funerary but of different types and size (large cemeteries or small complexes, enclosures, etc.) and are associated to several cultures. The grave goods and funerary practices mainly refer to the Cerny and the Chassean cultures, which are found rather in the northwest and southwest respectively, or represent a local component with a mixture of several surrounding influences (Fig. 1). Other archaeological and sampling information relative to these sites is summarised in Table 1 and detailed later.

Thus, the aim of this study is firstly to document the diet of the Neolithic populations of the Yonne valley compared to the adjacent regions. Are the isotopic signatures in the valley homogeneous? Is their position compared to the animals different from what is known elsewhere? What is the contribution of protein resources? Which livestock were mainly raised for food? Was fish possibly consumed? The second focus of this study concerns the inter- and intra-groups variability potentially correlated to socio-cultural status in order to discuss the social organisation and population identity. Are there specific patterns for the different sites, may be linked to their nature? For example, is the isotopic signature different between humans buried in large cemeteries and those scattered in enclosure ditches? Can distinctions related to cultural or funerary characteristics be identified, even within sites? Are there gender division or age disparities, as suggested in a previous study (Rey et al. 2017)? Are there outliers who could have a particular position in the society? The representativeness of the sample selection facilitates consistent comparisons with archaeo-anthropological data. An inclusive multi-proxy approach enables a thorough discussion of the subsistence strategies and the social structuring of human groups in a well-determined archaeological context like this one. Finally, these questions will provide new data to discuss the identity of the populations of the Yonne Valley, their economic and social functioning and, more broadly, their place in the European Neolithic landscape.

## Materials and methods

### Brief description of the sites

The seven sites considered in this study are rather diversified and need a brief description. They count three open-air cemeteries, two enclosures with scattered remains and 2 little

ensembles with alignments of burials or levelled burial. They refer to different cultures and are dated to more or less later phases of the Early and Middle Neolithic period, although their chronologies overlap (see Online Resource 1 for the chronological distribution of the sites). The main information is summarised in Table 1 and complementary information with plans of the sites is presented in Online Resource 2.

Gurgy “Les Noisats” (coded GLN) is the biggest corpus of this study and one of the largest cemeteries (in terms of number of burials) for the French Neolithic. It contains more than 120 burials (Online Resource 2a) dated to 5200–3800 cal BC and the great diversity of the grave goods (although few in number) and of the funerary structures refer to several surrounding cultures (Augereau unpublished; Bonnardin unpublished; Rivollat et al. 2015; Rottier 2007; Rottier et al. 2005). That makes it impossible to attribute the cemetery to one of these cultures specifically. Several studies (physical anthropology, genetic, dental morphology and previous isotopic analyses) have shown a rather homogeneous population (all the classes share the same characteristics) but some slight variations have been highlighted between individuals: disparities between genders, clusters of nearby graves sharing similar characteristics and some outliers displaying unusual funerary parameters (notably GLN 221B who occupies a central place in a very large tomb). The previous C and N isotopic results are included into the present study. The second largest site is that of Monéteau “Macherin” (coded MON). It contains the second biggest cemetery of this region, with 61 burials at least partly attributed to the Chasséen culture (Augereau and Chambon 2011). It also includes a settlement with an associated burial dated to the Early Neolithic and an enclosure, without human remains, contemporaneous to the cemetery. The latter is divided in three groups of burials (A and B inside the enclosure, C outside) and two isolated pairs of burials (D and E; Online Resource 2b). Group C, the biggest one, is contemporaneous to the main occupation of Gurgy “Les Noisats” (mainly 5000–4200 cal BC) and similarly dense in burials. Groups A and B may be more recent (4500–4000 cal BC) and narrower. No other characteristics distinguish the humans buried in these groups. Generally, the funerary behaviours are rather homogeneous, with many coffins and bodies buried flexed on the left side, but some burials can also be associated with other cultural affiliations (e.g. bodies extended supine as Balloy-type, like in the Cerny culture). Chichery “Sur les Pâturaux” (mainly 4700–4350 cal BC; coded CHI-Pat) constitutes the third main site of the corpus. It is attributed to the Cerny culture (Chambon et al. 2010) but, contrary to the most cases in this culture, it is not considered as a monumental structure (Thomas 2011). Some funerary parameters also refer to other cultures (Chambon et al. 2010). Thirteen burials containing 15 humans are arranged in two main alignments (A and B) where individuals are extended on the back, according to Balloy’s type

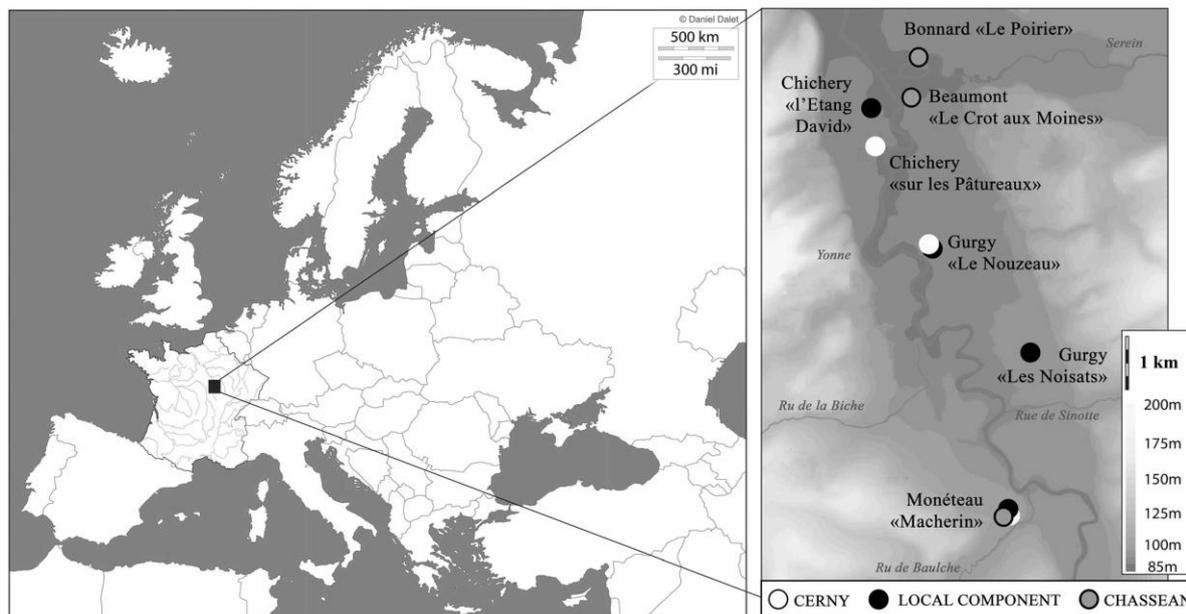


Fig. 1 Locations of the sites analysed in this study, and their respective cultural attributions, after Chambon et al. 2013

(Chambon et al. 2009b; Online Resource 2c). One isolated burial contains the body of a man flexed on his left side and dated to a later period (4335–4074 cal BC).

The following sites are not used for comparing isotopic with biological data of humans (age and sex) because they contain too few remains for which these parameters are known. Beaumont “Le Crôt aux Moines” (4800–4000 cal BC; coded BMT; Online Resource 2d) is an enclosure attributed to Chasséen containing scattered remains of humans and animals together (Chambon et al. 2009a). Other structures were also retrieved, from several excavations, so the site counts 3 main areas: Area A (Pellet and Delor excavation) with the circular house, the fireplace 2 and the s13 78 A II gh area; Area B (Merlange and Bodechon excavation) with the enclosure consisting in two ditches (A and B) that contain the most of the material; and the North area (surface sampling) with the layer 5 (Ederlé prospection) and layer IV. Bonnard “Le Poirier” (4500–4000 cal BC; coded BON) is a little Chasséen ensemble (anciently and partially excavated) (Chambon 2003) composed of an isolated levelled burial with 4 adult individuals and another pit with human remains from 2 individuals severely disturbed (Online Resource 2e). Chichery “l’Etang David” (5100–4100 cal BC; coded CHI-ED) is an incomplete cemetery, partially destroyed and excavated a long time ago (Chambon et al. 2009a; Pellet 1978). It displays 19 burials from which only 5 skeletons have been retrieved (Online Resource 2f). Gurgy “Le Nouveau” (5300–4700 cal BC; coded NZ) is a Cerny enclosure composed of human and animal scattered remains in the ditch and 2 associated burials of adult men (Meunier 2007; Meunier et al. 2012; Online Resource 2 g).

Only the latter were sampled for this study together with animals from the ditch. These two men were buried in exactly the same position and in quite similar graves. However, they are dated to different  $^{14}\text{C}$  ranges, which suppose some dating error.

### Human and animal bone sampling

Overall, stable carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) and nitrogen ( $\delta^{15}\text{N}$ ) isotope analyses were performed on 177 humans and 62 animals, and stable sulphur isotope analysis ( $\delta^{34}\text{S}$ ) was conducted on 52 humans and 25 animals (Table 1; Online Resource 3). Bone samples have been selected so that they encompass as much as possible the archaeological and anthropological diversity observed: different sites, spatial distribution, chronology, funerary parameters—structures, positions, grave good types—and sex, age and genetic data, when available. Long bone cortex (especially from the femur and tibia) was preferentially chosen. The biological identification of humans (sex, age-at-death) was previously studied with reliable methods (Bruzek 2002; Moorrees et al. 1963; Murail et al. 2005). Immature individuals under 2 years old were excluded to avoid, where possible, the breastfeeding signal (limit defined considering the class-age division; the suckling signal has not been overlooked in older children). Moreover, M. Le Roy (2015, p. 440–442) noted changes in funerary behaviours around 14 years of age, mainly at GLN, reflecting a change of social status. Considering this, together with the class-age division, individuals over 15 are considered in this study as part of the adult group. Animal remains come from three sites (BMT, GLN and NZ) and include domestic (cattle, pig, sheep/goat)

**Table 1** Summary of the sites' description and references, 14C dates, and human and animal sample selection.

code site	name of site *old excavation	references	cultural attribution	<sup>14</sup> C date	spatial organization	number of humans buried	animal remains	$\delta^{13}\text{C}$ & $\delta^{15}\text{N}$ individuals analysed	$\delta^{34}\text{S}$ individuals analysed
GLN	Gurgy "Les Noisats"	Rotier et al 2005, Rottier 2007, Rivollat et al 2015	local component ?	5200-3800 cal BC	big and dense cemetery; some gathering of burials; great diversity of grave goods	128	yes	95 humans + 18 animals	28 humans + 9 animals
MON	Montréal "Sur Macherin"	Augereau & Chambon 2011	Chassean (+Cerny +local)	5200-3500 cal BC ?	cemetery divided into 3 separate groups (A, B, C) + 2 pairs of burials (D, E) + 1 earlier burial in settlement	62	no	53 humans	18 humans
CHI-Pat	Chichery "Sur les Pâtureaux"	Chambon et al 2010	Cerny	4700-4350 cal BC	funerary site arranged into 2 alignments of burials (A and B; Balloy's type) + 1 isolated burial (male flexed on his left side)	15	no	8 humans	6 humans
BMT	Beaumont "Le Crôt aux Moines" *	Chambon et al 2013	Chassean	4800-4000 cal BC	enclosure + other structures; 3 areas of excavation. Area A: circular house ( $\approx$ 4300-4000 cal BC), fireplace 2 ( $\approx$ 4400-4100 cal BC), and area s13 78 A II gh ( $\approx$ 4700-4400 cal BC). Area B (Merlange-Bodechon excavation): enclosure with scattered remains in 2 ditches A and B ( $\approx$ 4800-4200 cal BC); the best-documented area and having provided the most of material. North area: surface sampling layer 5-Ederlé ( $\approx$ 4500-4300 cal BC) and layer IV.	scattered remains	yes	13 humans + 38 animals	13 animals
BON	Bonnard "Le Poirier" *	Chambon et al 2013	Chassean	4500-4000 cal BC	1 levelled burial of 4 inhumations + 1 pit with 2 individuals severely disturbed	6	no	4 humans	
CHI-ED	Chichery "l'Étang David" *	Pellet 1978, Chambon et al 2013	local component ?	5100-4100 cal BC	cemetery partially destroyed	$\approx$ 20 (5 skeletons retrieved)	no	2 humans	
NZ	Gurgy "Le Nouzeau"	Meunier et al 2012	Cerny (+ local)	5300-4700 cal BC	enclosure with scattered remains (humans and animals) in ditches + 2 associated burials	2 + scattered remains	yes	2 humans + 6 animals	3 animals

and wild (deer—*Cervus elaphus* and *Capreolus capreolus*, aurochs—*Bos primigenius*) species (Online Resource 3). Sampling was carried out in such a way that we ensured that every individual was only sampled once (selection by species, anatomical part, size and shape, spatial location).

### Principle of stable isotope analysis

At the bottom of the food chain, plants have specific C, N and S isotopic ratios according to their photosynthetic pathway (e.g. C<sub>3</sub> or C<sub>4</sub>; Farquhar et al. 1989; O'Leary 1988; Smith and Epstein 1971), their species (e.g. N<sub>2</sub> fixing or non-N<sub>2</sub> fixing plants; DeNiro and Epstein 1981; Virginia and Delwiche 1982), and their environment (Ambrose 1991; Hedges et al. 2004; Van Klinken et al. 2000; Richards et al. 2003; Tanz and Schmidt 2010). These values are then passed through the food chain and register in the consumer's bone collagen with an enrichment between prey and predator of 0.8 to 1.3‰ for δ<sup>13</sup>C, 3 to 5‰ for δ<sup>15</sup>N, and negligible enrichment for δ<sup>34</sup>S (Bocherens and Drucker 2003; DeNiro and Epstein 1978, 1981; Minagawa and Wada 1984; Schoeninger and DeNiro 1984; Arneson and MacAvoy 2005; Barnes and Jennings 2007; McCutchan et al. 2003). Individuals' place in the local food chain can be retrieved by measuring these ratios in bone collagen, thus determining their trophic level, their potential consumption of the different species and providing environmental information. Because the environmental conditions (temperature, humidity, edaphic properties, etc.) can influence the isotopic values, human data must be compared to those of local and contemporary animals which could potentially have been consumed (Goude and Fontugne 2016; Heaton 1999; Heaton et al. 1986; Hedges et al. 2004; Van Klinken et al. 2000). Plants' δ<sup>34</sup>S values are particularly variable according to environment and geography because they are affected by the local bedrock as well as atmospheric and edaphic conditions. Therefore, measuring the δ<sup>34</sup>S of the consumers can allow to identify distinct origins (e.g. Richards et al. 2001) and/or, depending on locality, also distinguish various animal species consumed (e.g. Privat et al. 2007). It can be particularly useful to detect freshwater fish consumption (Drucker et al. 2016b) and, as this was proposed in a previous preliminary study conducted on C and N isotope ratios in the Yonne valley (Rey et al. 2017), this is the main reason for measuring it in this study. Despite increasingly more sulphur data is now being made available in various contexts, geological and bioavailable sulphur variation at local or sub-local scales is still poorly known (e.g. Nehlich 2015). Moreover, the C, N and S multi-proxy approach is quite new for the Neolithic in France and seems very helpful to enhance our knowledge of the human diet and corresponding behaviours. Furthermore, the isotopic composition

measured in bone collagen mainly reflects the protein portion of the average diet recorded during the last years of life (several decades for adults). Indeed, bone is constantly being remodelled, with a highly variable rate depending on several factors, such as type of skeletal element and bone part, age, growth hormones, disease and nutritional status (Hedges et al. 2007; Valentin 2003; Tieszen et al. 1983; Szulc et al. 2000; Delmas 1993).

### Analytical process

Bone fragments (< 1 g) were cleaned and crushed, and collagen was extracted (UMR 7269 LAMPEA, France) following Longin's (1971) and Bocherens' methods Bocherens (1992). Elemental composition (%C, %N, %S) and isotopic ratios (δ<sup>13</sup>C, δ<sup>15</sup>N, δ<sup>34</sup>S) were measured on freeze-dried collagen by EA-IRMS (elemental analyser-isotope ratio mass spectrometer). Part of the measurements was performed using a Europa scientific elemental analyser coupled to 20–20 IRMS at the IsoAnalytical laboratory (UK). The other part was performed using a Delta plus XP continuous-flow IRMS (Thermo Fisher Scientific, USA), after being combusted in a Flash EA 1112 elemental analyser that was interfaced with it (Thermo-Finnigan, USA), in the Isotope Lab Facilities of the University of Cape Town (South Africa; see Online Resource 3). Sample isotopic values are reported relative to the international reference scales V-PDB for C, AIR for N and V-CDT for S isotopes. The reference materials used for calibrating the isotopic data were internal standards calibrated against IAEA standards (Table 2). Reproducibility error, based on within-run replicate measurement of laboratory standards was ± 0.1‰ for δ<sup>13</sup>C and δ<sup>15</sup>N, and ± 0.2‰ for δ<sup>34</sup>S. The quality of extracted collagen was controlled by using international criteria: collagen yield > 1%, C > 30%, N > 11%, C:N ratio of 2.9–3.6 (Ambrose 1990; DeNiro 1985; van Klinken 1999), S content of 0.15–0.35%, C:S ratio of 600 ± 300, and N:S ratio of 200 ± 100 (Nehlich and Richards 2009). For statistical processing, all the analyses were conducted with the software R 3:5.2 (R Core Team 2018). The code and the source data are available in Online Resource 4 and 5. Given the presence of a few outliers, non-parametric tests were applied to compare isotopic values among groups. Post hoc comparisons for the Kruskal-Wallis test were performed using Holm's method for adjusting *p* values, as implemented in the R package "agricolae" (de Mendiburu 2017). Multivariate isotopic profiles were compared among groups using M.J. Anderson's (2001) variant of permutational multivariate analysis of variance (PERMANOVA) with 1000 permutations, as implemented in the R package "vegan" (Oksanen et al. 2017).

**Table 2** Summary of the reference materials used for calibrating the isotopic data in the different laboratory and by session of analyses. Internal standards are calibrated against international standards.

lab reference	internal standard	material	N measured	standard deviations			accepted values			international standard			material accepted values			
				$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}$ (‰)	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}$ (‰)	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ (‰)	standard	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}$ (‰)	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ (‰)	material	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}$ (‰)
IsoA Rey et al, 2017	IA-R042	NBS-1577B, bovine liver	10	0.06	0.07		-21.60	7.65		IAEA-CH-6			sucrose	-10.43		
	IA-R005 / IA-R045	beet sugar / ammonium sulfate	5	0.01	0.04		-26.03	-4.71		IAEA-N-1			ammonium sulfate		0.40	
	IA-R006 / IA-R046	cane sugar / ammonium sulfate	5	0.09	0.08		-11.64	22.04								
IsoA this study	IA-R042	NBS-1577B, bovine liver	3	0.11	0.12		-21.60	7.65		IAEA-CH-6			sucrose	-10.43		
	IA-R038	L-alanine	2	0.00	0.02		-24.99	-0.65		IAEA-N-1			ammonium sulfate		0.40	
	IA-R006 / IA-R046	cane sugar / ammonium sulfate	1				-11.64	22.04		IAEA-SO-5			ammonium sulfate (barium sulfate)			0.50
UCT this study	IA-R001	barium sulfate	28			0.10										20.33
	IAEA-SO-5	barium sulfate	15			0.16										0.50
	NBS-1577B	bovine liver	15			0.24										7.50
	Merek Gel		19	0.13	0.07		-20.05	7.50		IAEA-CH-6			sucrose	-10.43		
	Seal		19	0.13	0.05		-11.97	15.84		IAEA-N-1			ammonium sulfate		0.40	
	Valine		19	0.12	0.07		-26.80	12.14								

## Results and comparison

### General results

All the individual results are provided in Online Resource 3. Twenty-eight samples (22 humans<sup>2</sup> and 6 animals) did not meet the collagen preservation criteria for  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ , and only one sample (human) did not meet the preservation criteria for  $\delta^{34}\text{S}$  collagen (Online Resource 3). These have been excluded from the study. In total, 211 samples for  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ , and 76 samples for  $\delta^{34}\text{S}$  have been included in the interpretation and discussion. The isotopic ratios do not correlate to elemental composition and extraction yield (Spearman correlation coef. < 0.2). Therefore, the range of values does not reflect diagenetic alterations.

The overall C and N isotope ratios have been plotted onto Fig. 2a and are summarised by species in Table 3. Three different groups of data can be clearly identified, representing different feeding behaviours: humans, pigs and domestic herbivores. The latter is composed of sheep and goats (i.e. Caprinae) together with cattle: they present broadly the same range of values. The difference between these three groups is statistically significant when considering the bivariate ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) isotopic profile according to PERMANOVA ( $p < 0.05$ ). Wild animals show lower  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values than domestic ones, but the difference is not significant.<sup>3</sup> The distribution of the human  $\delta^{13}\text{C}$  values is very low (SD  $\delta^{13}\text{C} = 0.2\text{‰}$ ) and is greater for the animal species (SD  $\delta^{13}\text{C}$  herbivores = 0.8, pig = 0.7 and wild = 0.9‰). These differences in variability between humans and all animal groups are statistically significant according to Snedecor's *F* test ( $p < 0.05$ ).

The S isotopic data are plotted against  $\delta^{15}\text{N}$  (Fig. 2b) and shows four separate groups: humans, domestic herbivores, pigs (this category is also divided into two sub-groups, from GLN and BMT respectively), and wild animals (Table 3). Excluding two outliers (one cattle, GLN F0, maybe wild and one pig BMT F5 out of the overall variability), a Kruskal-Wallis test detected significant differences in  $\delta^{34}\text{S}$  values among the groups compared ( $p < 10\text{e-}5$ ). Furthermore, a post hoc analysis shows that the differences between cattle, humans and wild animals are all statistically significant. Here, cattle are considered separately from Caprinae because the dispersion of their  $\delta^{34}\text{S}$  values is more dissimilar than the dispersion of the C and N isotopic data. Additionally, pig  $\delta^{34}\text{S}$  values are clearly divided into two groups and the difference is statistically significant (test as above). The GLN pigs' group is similar to the humans, the BMT one to the wild animals (test

as above). Overall, the S isotopic variability is very huge (from  $-10$  to  $+15.1\text{‰}$ ), particularly given all samples came from a very small area.

### Animals by sites and areas

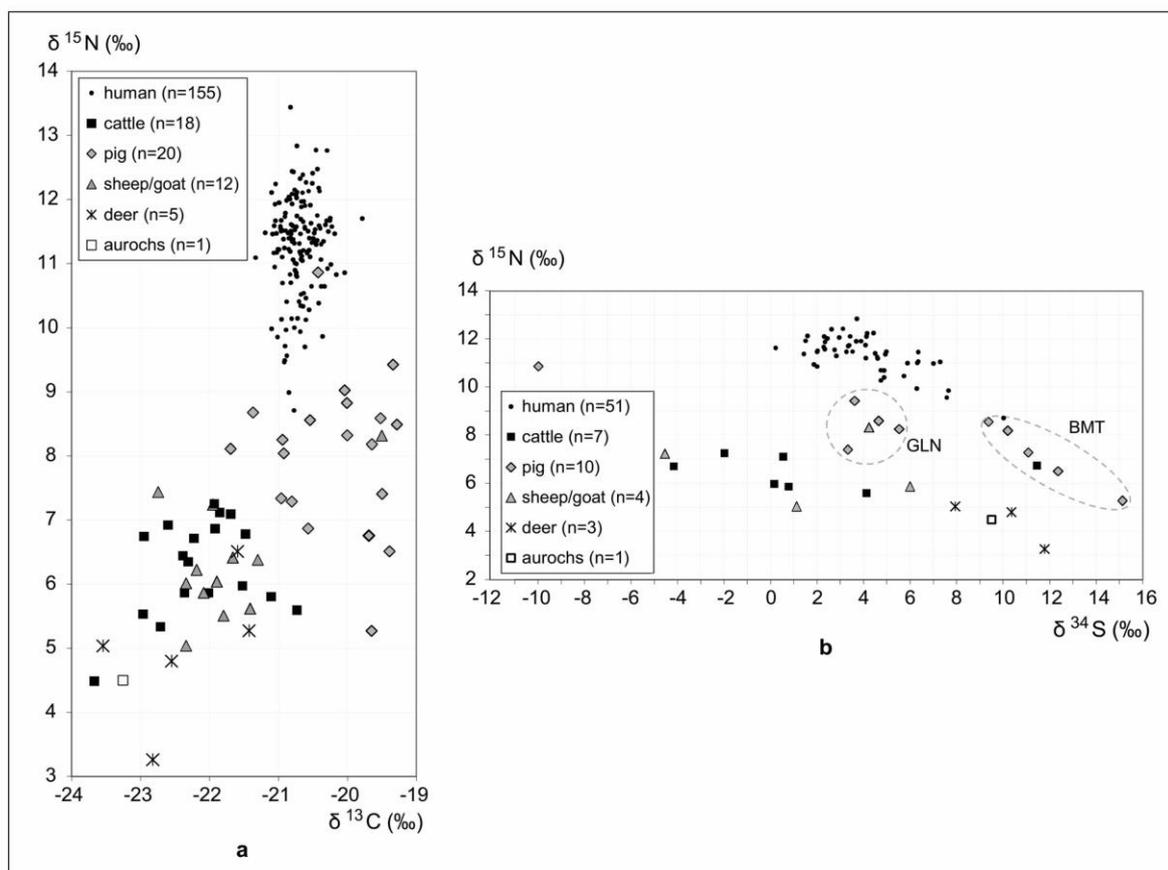
The isotopic distribution of animal values for each site ( $n = 56$  for C and N and 25 for S) is presented in Figs. 3 and 4 and mean values by species are available in Table 4. For each site, the stable isotope data (C, N and S) of pigs is higher than those of cattle. This result is significant for C and N in both GLN and BMT (Mann-Whitney *U* test,  $p < 0.05$ ). Cattle and Caprinae share similar C, N and S values at BMT but have different C, N and S values at GLN and NZ (although the sample size is small). At GLN and NZ, wild species show different isotopic values (lower  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ , and higher  $\delta^{34}\text{S}$ ) than domestic ones (reliable statistical analysis cannot be performed due to the small sample size). This difference (domestic vs. wild) is not as clear at BMT, but this site is divided into several separated areas and structures that must be considered separately. Indeed, animal C, N and S isotopic values of BMT vary slightly between areas (see Online Resource 6 for more details by area). Particularly, the deer with the highest N isotopic ratio and the cattle with the lowest N and C isotopic ratios come from layer 5 "Ederlé" and cannot be attributed with certainty to any specific phase of occupation (surface collection). Excluding these samples, the picture between wild and domestic animals is nearly the same than in the other sites (Fig. 3a). Furthermore, pigs found in the circular house exhibit substantially different isotopic ratios (C, N and S) than in other areas (Online Resource 6), although the small sample sizes do not allow to perform statistical tests. At GLN, domestic animals show slightly different isotopic ratios to those from BMT and NZ. In this site, cattle (like all the domestic animal groups taken together) have a higher  $\delta^{15}\text{N}$  value (Mann-Whitney *U* test,  $p < 0.05$ ) and pigs have higher  $\delta^{13}\text{C}$  and lower  $\delta^{34}\text{S}$  values (Mann-Whitney *U* test,  $p < 0.05$ , excluding the outlier for S) compared to BMT. The comparison with NZ is less relevant due to the little number of samples.

### Humans by sites and areas

Regarding the human variability, 155 humans from the seven sites have provided well-preserved collagen and reliable isotopic data for carbon and nitrogen, and 51 from three sites for sulphur (Fig. 5 and Table 5). The isotopic data show some distinctions between sites for nitrogen and sulphur whereas carbon isotopic values are similar. The human group from GLN presents the highest  $\delta^{15}\text{N}$  and lowest  $\delta^{34}\text{S}$  values, while the contrary (highest  $\delta^{34}\text{S}$  and lowest  $\delta^{15}\text{N}$  values) is observed among the MON people. Post hoc comparisons show that for

<sup>2</sup> NZ 239 has been accepted though his extraction yield was insufficient; all the other criteria were acceptable.

<sup>3</sup> Some specimens were not identified as domestic with certainty, but have a high probability of being domestic specimens and are consequently considered as such; cf Online Resource 3 noted \*



**Fig. 2** Distribution of isotopic values for all the samples retained, all sites included **a** 155 humans and 56 animals for carbon and nitrogen and **b** 51 humans and 25 animals for sulphur and nitrogen. The dotted circles show the separate distributions of pigs from GLN and BMT

$\delta^{15}\text{N}$ , GLN statistically differs (higher) from a homogeneous ensemble constituted by CHI-Pat/MON/BMT and, for  $\delta^{34}\text{S}$ , GLN statistically differs (lower) from MON only. The variation of human values at GLN is relatively limited and significantly lower than the one observed at MON, for both  $\delta^{15}\text{N}$  ( $p = 0.02$ ) and  $\delta^{34}\text{S}$  ( $p = 0.02$ ) values according to Snedecor's  $F$  test. The high variability observed at MON seems to reflect the spatio-temporal structuring of the site. Indeed, MON is divided in three separate groups (A, B and C), two isolated pairs of burials (D and E) and one earlier isolated burial (Online Resource 2b). The different groups display different ranges of isotopic values for C, N and S (Figs. 6b and 7b). The difference between group B, group C and the other groups together is statistically significant for  $\delta^{15}\text{N}$  (Kruskal-Wallis test,  $p < 0.05$ ). Group C variation is closer to the GLN one, while both complexes share similar archaeological patterns and are somewhat contemporary. Group B displays the lowest  $\delta^{15}\text{N}$  and the highest  $\delta^{34}\text{S}$  values of the overall corpus and is also among the most recent burial assemblages. This correlation with

chronology is the only one observed in this study that reveals a change of isotopic values (as an average, not in variability) through time between sites or areas (see Online Resource 7 for more details).

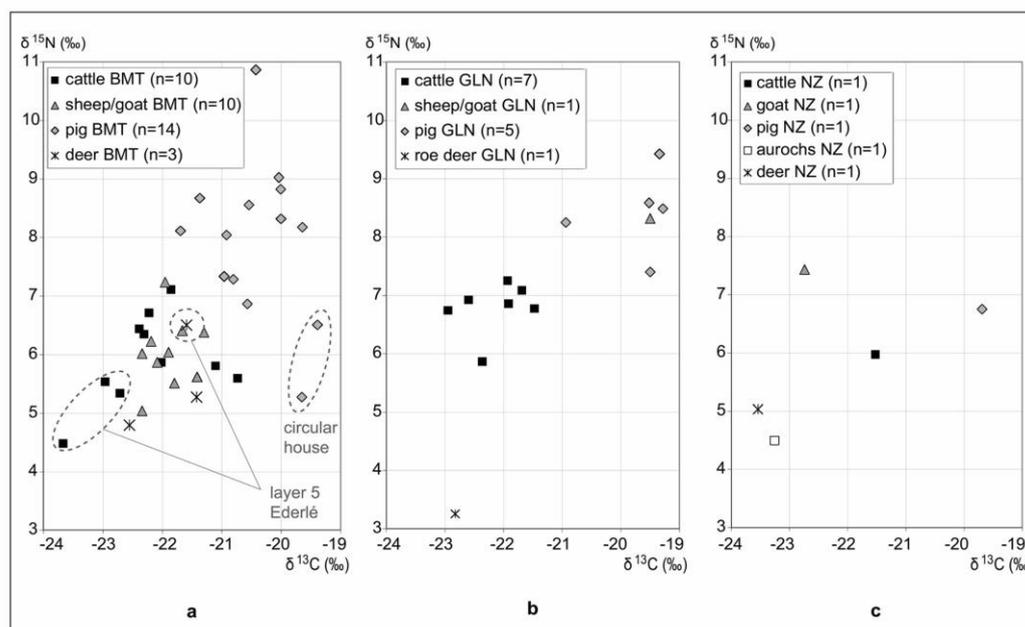
The individuals from CHI-Pat present relatively homogeneous and medium C, N and S isotopic values compared to the overall human variability (Fig. 5). The humans of this site have lower  $\delta^{15}\text{N}$  values than humans from GLN (Mann-Whitney  $U$  test,  $p < 0.05$ ) and these values have a significantly lower dispersion than for other human groups according to Bartlett's test ( $p < 0.05$ ). Despite this relatively low variability at the site level, the two groups of CHI-Pat (consisting of two alignments of burials) have distinct values, especially for nitrogen and sulphur (Figs. 6c and 7c; sample size too small for statistical analysis). The isolated individual CHI-Pat 1, buried in another position than the others (flexed on his left side), has the highest C and S isotope ratios of the site (CHI-Pat) although these values are not very different from the other humans. Individuals from BON and NZ display similar, low nitrogen isotopic values compared to the overall human data

**Table 3** Summary isotopic results ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ , and  $\delta^{34}\text{S}$ ) by species

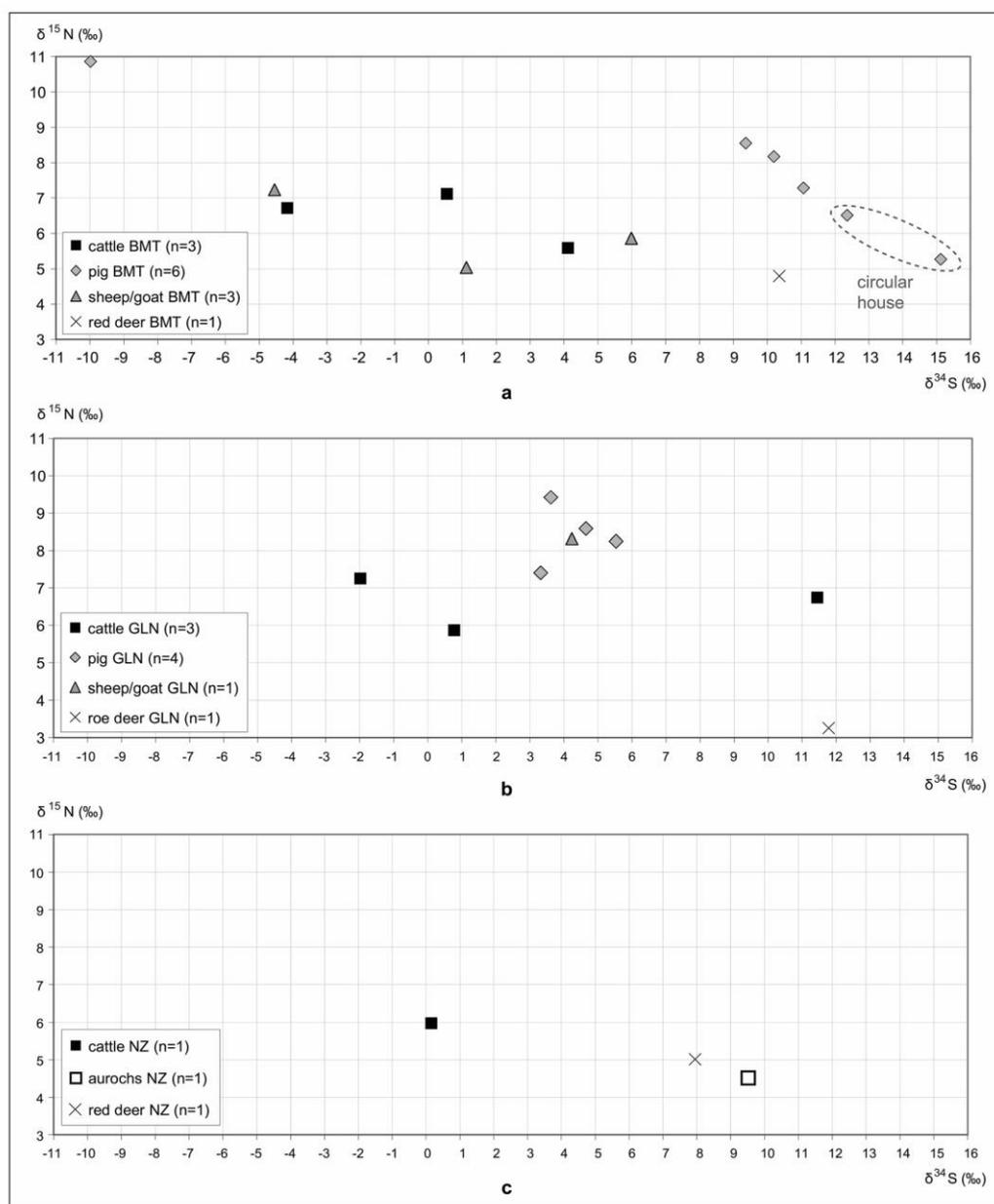
Species	N	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)				$\delta^{15}\text{N}$ (‰)				N	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)			
		min	mean	SD	max	min	mean	SD	max		min	mean	SD	max
TOTAL human	155	-21.3	<b>-20.7</b>	0.2	-19.8	8.7	<b>11.3</b>	0.8	13.4	51	0.2	<b>4.1</b>	1.9	10.0
TOTAL pig	20	-21.7	<b>-20.2</b>	0.7	-19.3	5.3	<b>8.0</b>	1.2	11.0	10	-10.0	<b>6.5</b>	7.0	15.1
cattle	18	-23.7	<b>-22.1</b>	0.7	-20.7	4.5	<b>6.3</b>	0.7	7.3	7	-4.2	<b>1.6</b>	5.1	11.4
sheep/goat	12	-22.7	<b>-21.8</b>	0.8	-19.5	5.0	<b>6.3</b>	0.9	8.3	4	-4.5	<b>1.7</b>	4.6	6.0
TOTAL herbiv	30	-23.7	<b>-22.0</b>	0.8	-19.5	4.5	<b>6.3</b>	0.8	8.3	11	-4.5	<b>1.6</b>	4.7	11.4
deer	5	-23.5	<b>-22.4</b>	0.9	-21.4	3.3	<b>5.0</b>	1.2	6.5	3	7.9	<b>10.0</b>	1.9	11.8
aurochs	1	-23.3	<b>-23.3</b>		-23.3	4.5	<b>4.5</b>		4.5	1	9.5	<b>9.5</b>		9.5
TOTAL wild	6	-23.5	<b>-22.5</b>	0.9	-21.4	3.3	<b>4.9</b>	1.1	6.5	4	7.9	<b>9.9</b>	1.6	11.8

(Fig. 5) although they are dated to different periods. The difference with GLN is statistically significant for  $\delta^{15}\text{N}$  according to a Mann-Whitney  $U$  test ( $p < 0.05$ ). The three individuals from BON have very similar C and N isotopic values (Fig. 5). Conversely, the two people buried at Chi-ED show very distinct values, especially for nitrogen (Fig. 5). Finally, humans from BMT have the same  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  mean values than CHI-Pat but a wider  $\delta^{15}\text{N}$  range and a higher variance (Bartlett's test,  $p < 0.05$ ). In BMT, there is no clear distinction between the different areas (Online Resource 6C) although some differences were observed within the animal samples. Considering the distribution of the isotopic ratios by sites, it appears that there is no correlation between isotopic data and

nature of the sites. The isotopic results of the enclosures of NZ and BMT are no more close to one another than those of the cemeteries of GLN, MON or CHI-ED are. There is no more link with the main cultural attribution of the sites. NZ and BON, attributed to different cultures and periods, have similar isotopic ratios. When considered as an entity, CHI-Pat and NZ, attributed to the Cerny culture, are not distinct from GLN and CHI-ED when these two sites, which share some cultural patterns characteristic of the Yonne valley and are dated to the same period, are also considered as a unit. There are no more similarities between BON and BMT, both attributed to the Chasséen, than with the other sites attributed to other cultures.



**Fig. 3** Distribution of animal  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values from **a** BMT, **b** GLN and **c** NZ. The dotted circles show the particular values of species from different areas of BMT



**Fig. 4** Distribution of animal  $\delta^{34}\text{S}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values from **a** BMT, **b** GLN and **c** NZ. The dotted circle shows the particular values of pigs from the circular house of BMT

### Intra-group isotopic variability of humans

In three sites for which biological data are available and are consistent enough for statistical analysis (GLN, MON, CHI-Pat), it was possible to combine isotopic data with age and sex (Figs. 6 and 7). For each site and within groups, males show different isotopic values (higher  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ , and lower

$\delta^{34}\text{S}$ , on average) than females, as it had already been observed in a previous study for GLN (Rey et al. 2017). The difference is statistically significant for GLN and for MON group C for  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  (Wilcoxon test,  $p < 0.05$ ; sample size too small in the other groups for statistical analysis). For each group, the highest  $\delta^{15}\text{N}$  values of adults are recorded among the males and the lowest are recorded among the females. No significant

difference is detected in terms of variation of values between males and females. Children often display extreme values, particularly for nitrogen. The variability of children's  $\delta^{15}\text{N}$  values is higher than those for adults (Bartlett's test,  $p < 0.05$ ). However, no correlation was found between isotopic ratios and age, neither for children nor for adults.

Other comparisons with the available biological parameters (haplogroups, skeletal and dental health, or stature, information which is often sparse) do not correlate with the isotopic data and will not be further discussed. Regarding the burial practices, there is no general correlation (by site and by group, or between groups) between funerary parameters (type of burial, position and orientation of the bodies, grave goods) and isotopic data, despite the great variety of burials. However, some spatial distinctions can be observed. While MON, CHI-Pat and BMT are considered as several groups separately and discussed above (3.3), GLN seems to be a single ensemble. However, in this site, individuals buried near one another in the cemetery often have relatively close isotopic values compared to the overall variation (Fig. 8). Moreover, a group of individuals (GLN 201-202-206-207A-208-248) buried in an alcove or in a wetting pit, and gathered together at the south-western end of the cemetery, presents similar  $\delta^{15}\text{N}$  and/or  $\delta^{13}\text{C}$  values (light blue dots in Fig. 8; GLN 206 and 208 under 7 years of age). In addition, it is worth noticing that the individual previously identified as outlier GLN 221B (biggest and central tomb) presents the highest  $\delta^{15}\text{N}$  value. In that site, the comparison between isotopic data and chronology does not show any change of isotopic values through time, but seems to show a variation in dispersion of the isotopic values (Fig. 9). The dispersion of  $\delta^{15}\text{N}$  values is slightly higher during the period from 4800 to 4500 cal. BC, although this period has the most individuals and therefore the variability maybe due to a sampling bias. Furthermore, during this period, the  $\delta^{15}\text{N}$  values seem to be more variable for men than for women (Fig. 9b).

## Discussions

### Food economy

First of all, the C, N and S isotopic differences highlighted between the species (domestic herbivores, pigs and wild animals) are quite similar for the three sites. They can be due to specificities inherent to the species themselves (relative to their respective diet, environment and physiology) and/or to specialised managements (different feeding or coming from different location). Namely, wild species probably live in a more covered environment than domestic animals (as forest, with a more negative  $\delta^{13}\text{C}$  value; Heaton 1999); cattle, sheep and goats are herbivorous and may be parked and fed in open-air pens, separately from the pigs ( $\delta^{34}\text{S}$  values are particularly

different from those of pigs and wild animals); pigs are omnivorous ( $\delta^{15}\text{N}$  values are higher than for the herbivorous) and may be fed in part with human wastes (with a global diet richer in  $^{13}\text{C}$  than the human diet). Such a distribution is not always observed elsewhere (Fig. 10, Online Resource 8). Concerning the variations, for a same species, between sites and areas, they could be due to chronological reasons or cultural/practical choices in livestock management. Since they concern different chronological phases between sites and areas, it is possible these variations indicate a change of environment through time, affecting differently the various isotopic ratios and the species. Also, the livestock could be kept in different spaces (e.g. enclosed with fodder vs. left roaming free to feed, more or less open canopy; Heaton 1999) and/or fed with different fodder (see Bogaard et al. 2007; Kanstrup et al. 2012). Such a diversified exploitation has been proposed in other studies (e.g. Oelze et al. 2011). The particularly high range of  $\delta^{34}\text{S}$  values, while the sites are within a radius of 10 km and in the same geological area along the Yonne valley, can also illustrate different origins of the animals, especially for pigs from GLN vs. BMT areas. Also, despite their small number, wild animals which are considered as non-migratory appear to have a tighter range (from +7.9 to +11.8‰,  $n = 4$ ) than the domestic ones (from -10.0 to +15.1‰,  $n = 21$ ). That could illustrate a specific husbandry practice with livestock coming from elsewhere. This is particularly evident when comparing with, for example, the variation measured at Noyen-sur-Seine, a nearby Mesolithic site, for non-carnivorous terrestrial wild animals (from +0.2 to +4.7‰,  $n = 9$ , Drucker et al. 2016b). For pigs, another possibility involves species identification: the wild or domestic status of pigs has not been determined with certainty. Wild boars can display lower  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values than domestic pigs (e.g. Balasse et al. 1997; Bocherens et al. 2005; Fig. 10, Online Resource 8). As the pigs of BMT have lower  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values than the pigs of GLN, it is therefore possible that the bone samples belong to wild species instead of domestic ones (currently, a more in-depth study of the teeth is ongoing) or that domestic pigs from BMT eat the same thing as wild boars (thus running at large). This may be consistent with the sulphur values, as the pigs of BMT clearly plot with the wild species. Anyway, despite some variations between sites and particularly for pigs, the specific isotopic signatures of each species can be used as a baseline for interpreting the human diet.

The overall comparison between humans and domestic animals shows a mixed consumption of herbivores (probably mainly cattle according to the zooarchaeological data) and pigs. No distinction between meat and dairy consumption can be made through isotopic studies in bone collagen, but regional studies highlight a mixed production (Balasse et al. 1997; Hachem et al. 2014). While a mixture of cattle, pig, and caprine meat consumption is easily supposed for humans according to isotopic and zooarchaeological data, assessing the proportions of these various species in the diet is more

**Table 4** Summary isotopic results ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ , and  $\delta^{34}\text{S}$ ) of animal samples by species for each site. TOT = total, herbiv = herbivorous, dom = domestic animals

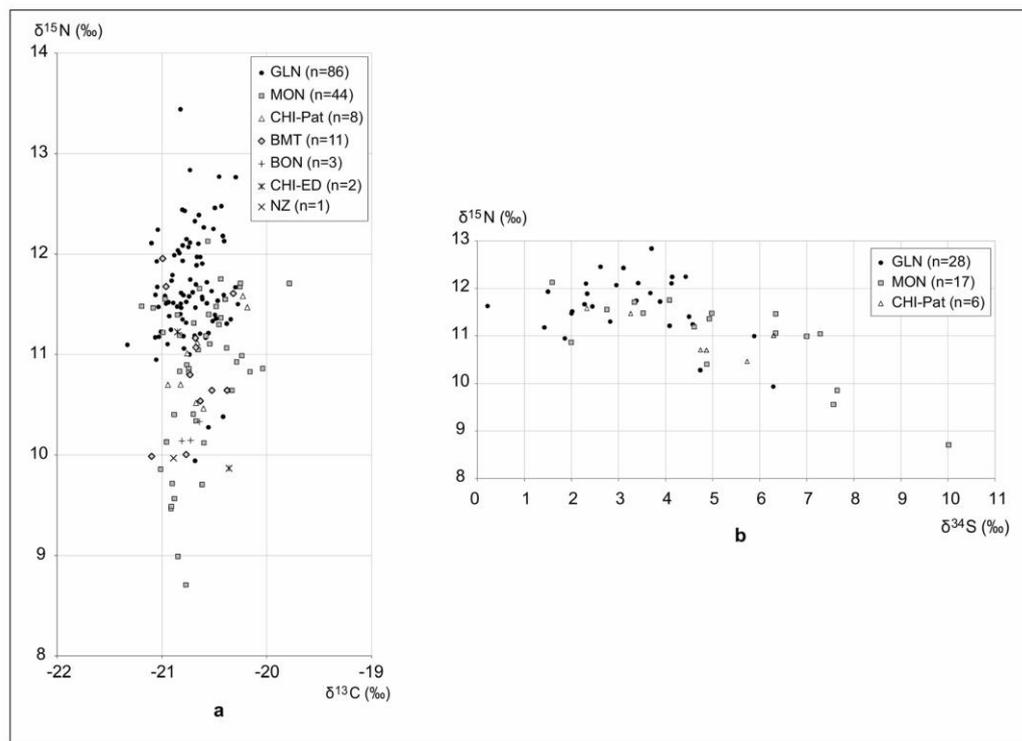
animals		N	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)				$\delta^{15}\text{N}$ (‰)				N	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)			
animal species	min		mean	SD	max	min	mean	SD	max	min		mean	SD	max	
GLN (14)	cattle	7	-23.0	<b>-22.1</b>	0.5	-21.5	5.9	<b>6.8</b>	0.4	7.3	3	-2.0	<b>3.4</b>	7.1	11.4
	sheep/goat	1	-19.5	<b>-19.5</b>		-19.5	8.3	<b>8.3</b>		8.3	1	4.2	<b>4.2</b>		4.2
	TOT herbiv	8	-23.0	<b>-21.8</b>	1.1	-19.5	5.9	<b>7.0</b>	0.7	8.3	4	-2.0	<b>3.6</b>	5.8	11.4
	pigs	5	-20.9	<b>-19.7</b>	0.7	-19.3	7.4	<b>8.4</b>	0.7	9.4	4	3.3	<b>4.3</b>	1.0	5.5
	TOT dom	13	-23.0	<b>-21.0</b>	1.4	-19.3	5.9	<b>7.5</b>	1.0	9.4	8	-2.0	<b>3.9</b>	3.9	11.4
BMT (37)	deer	1	-22.8	<b>-22.8</b>		-22.8	3.3	<b>3.3</b>		3.3	1	11.8	<b>11.8</b>		11.8
	cattle	10	-23.7	<b>-22.2</b>	0.9	-20.7	4.5	<b>5.9</b>	0.8	7.1	3	-4.2	<b>0.1</b>	4.2	4.1
	sheep/goat	10	-22.3	<b>-21.9</b>	0.4	-21.3	5.0	<b>6.0</b>	0.6	7.2	3	-4.5	<b>0.9</b>	5.3	6.0
	TOT herbiv	20	-23.7	<b>-22.1</b>	0.7	-20.7	4.5	<b>6.0</b>	0.7	7.2	6	-4.5	<b>0.5</b>	4.3	6.0
	pigs	14	-21.7	<b>-20.4</b>	0.7	-19.4	5.3	<b>8.0</b>	1.3	11.0	6	-10.0	<b>8.0</b>	9.1	15.1
NZ (5)	TOT dom	34	-23.7	<b>-21.4</b>	1.0	-19.4	4.5	<b>6.8</b>	1.4	11.0	12	-10.0	<b>4.3</b>	7.8	15.1
	deer	3	-22.6	<b>-21.9</b>	0.6	-21.4	4.8	<b>5.5</b>	0.9	6.5	1	10.4	<b>10.4</b>		10.4
	cattle	1	-21.5	<b>-21.5</b>		-21.5	6.0	<b>6.0</b>		6.0	1	0.1	<b>0.1</b>		0.1
	sheep/goat	1	-22.7	<b>-22.7</b>		-22.7	7.4	<b>7.4</b>		7.4	0				
	TOT herbiv	2	-22.7	<b>-22.1</b>	0.9	-21.5	6.0	<b>6.7</b>	1.0	7.4	1	0.1	<b>0.1</b>		0.1
	pig	1	-19.7	<b>-19.7</b>		-19.7	6.8	<b>6.8</b>		6.8	0				
	TOT dom	3	-22.7	<b>-21.3</b>	1.5	-19.7	6.0	<b>6.7</b>	0.7	7.4	1	0.1	<b>0.1</b>		0.1
	aurochs	1	-23.3	<b>-23.3</b>		-23.3	4.5	<b>4.5</b>		4.5	1	9.5	<b>9.5</b>		9.5
	deer	1	-23.5	<b>-23.5</b>		-23.5	5.0	<b>5.0</b>		5.0	1	7.9	<b>7.9</b>		7.9

complex.<sup>4</sup> Carbon and nitrogen isotopic data is consistent with that cattle is mainly consumed in addition to some resources enriched in  $^{15}\text{N}$  and  $^{13}\text{C}$ , particularly for humans with the highest nitrogen isotopic ratios. Pigs are good candidates and probably were also significantly consumed. Sulphur isotopic values do not disagree with a consumption of pigs, though they do not allow concluding. Moreover, a previous study suggested that young domestic animals could be consumed in addition to cattle, providing higher  $\delta^{15}\text{N}$  values due to the nursing effect (Rey et al. 2017). Indeed, slaughter patterns in regional sites of dairy production suggest that young herbivores could be killed and consumed though they were still breastfeeding or had just been weaned. This would yield a

<sup>4</sup> As the different food sources are not known, the authors chose to not apply any mixing model to quantify proportions based on hypothetical food items. Indeed, these models are applied when the isotopic signatures of the different resources are known. Even if a number of uncertainties can be taken into account (Fernandes et al. 2014), there are too many unknowns here. Various resources not identified and which may have different isotopic signatures could have been consumed additionally in varying proportions (e.g. fish, legumes, cereals and wild plants, molluscs, insects, eggs, algae, birds). This would vary the end-members of the model and thus provide completely different results. Tests with hypothetical end-members values were attempted with the Bayesian mixing model FRUITS (Food Reconstruction Using Isotopic Transferred Signals, Fernandes et al. 2014) and gave very varied and non-informative results.

higher trophic level than for adults (e.g. Balasse et al. 2012; Balasse et al. 2000). Young pigs could also be eaten for their tender meat (Hachem et al. 2014). Several juvenile pigs have been found at GLN and have been analysed in this study, together with young herbivores from BMT. However, their values are not distinct from those of adults (Online Resource 3) and consequently no distinction can be made between the consumption of young and older animals. The highest nitrogen values reported here is therefore not associated to an increased consumption of young animals. On another note, considering the isotopic difference between wild and domestic animals, the human isotopic values, in comparison to the wild herbivore values, corroborate the zooarchaeological data, i.e. negligible consumption of these resources.

Another kind of food has been proposed by L. Rey et al. (2017) to explain the high  $\delta^{15}\text{N}$  values: freshwater resources. In the Paris Basin during the Mesolithic, fishing is well attested through isotopic data and artefacts (e.g. Naito et al. 2013; Vigne et al. 1989). Whereas during the Neolithic, farming seems to have replaced marine fishing in some Atlantic European coastal sites (e.g. Richards et al. 2003), there is varied evidence available elsewhere, even if it is not highlighted by isotopic data (Robson et al. 2019). In the Paris Basin,



**Fig. 5** Distribution of human isotopic values by site for **a**  $\delta^{13}\text{C}$  vs.  $\delta^{15}\text{N}$  and **b**  $\delta^{34}\text{S}$  vs.  $\delta^{15}\text{N}$

several Neolithic sites (attributed to VSG<sup>5</sup>) have yielded freshwater fish specimens (Clavel 2009; Clavel and Arbogast 2007). There, fishing (mainly of Cyprinidae) probably provided a non-negligible part of protein intake during hot seasons (*ibid.*). In the Yonne valley, no aquatic remains have been found (except some drilled marine mussel or scallop shells coming from afar and most likely ornamental), but there are no animal remains in general in the tombs of funerary sites, and the excavation conditions of the dwelling sites (old excavations or rescue archaeology) are not conducive to retrieving any fish bones. However, a hook was discovered in one of the tombs of MON (Mon 99–521; Augereau and Chambon 2011, p. 311). Furthermore, some isotopic studies suggest fishing continued in European inland sites, as for example in the Danube Gorges (Jovanović et al. 2015), in Belgium (Bocherens et al. 2007), in Germany (Dürrwächter et al. 2006) and in France (Goude et al. 2013). The isotopic composition of aquatic ecosystems is highly variable and it is necessary to have a local baseline in order to compare human values to the ecosystem (Dufour et al. 1999; Finlay and Kendall 2007; Nehlich 2015; Nehlich et al. 2013). However, in the absence of any local freshwater remains available, we tried to compare our data with those previously published

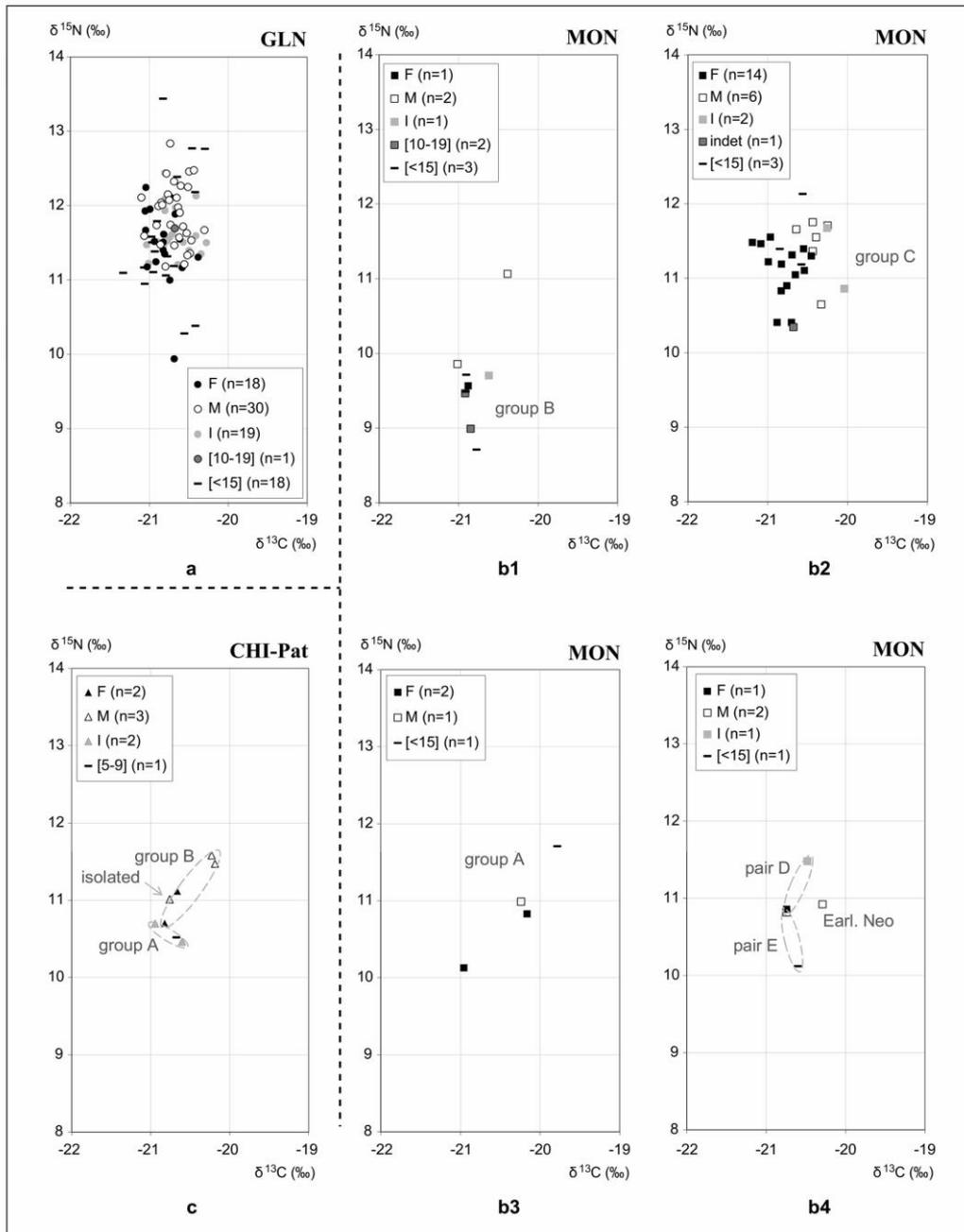
<sup>5</sup> Villeneuve-Saint-Germain

from contexts as similar as possible to ours (Fig. 11; Online Resource 9). Published aquatic carbon and nitrogen isotopic data are available for Neolithic German sites (Bösl et al. 2006), and Palaeo-/Mesolithic French and Belgian sites (Bocherens et al. 2014; Bocherens et al. 2011; Drucker and Bocherens 2004; Drucker et al. 2016a; Drucker et al. 2016b). Published sulphur isotopic data are available for Mesolithic French and Belgian sites, and for Neolithic sites in the Danube Gorges (Drucker et al. 2016b; Nehlich et al. 2010). Assuming that freshwater fish from the Yonne valley should plot within the same range of values as in the above named studies, isotopically detectable freshwater fish consumption by humans is possible. As a comparison, human data from Noyen-sur-Seine have also been plotted onto Fig. 11: they are considered freshwater fish-consumers, and their carbon and nitrogen isotopic values are similar to those of the humans from the Yonne valley. Sulphur isotopic values are different but are by far more variable.

Another hypothesis has to be considered: the manuring effect of crop cultivation. Although plant consumption is often hidden by the meat signal in bone collagen (Ambrose and Krigbawm 2003; Bocherens 2009; Hedges and Reynard 2007), it is almost unquestionable that plants (crops and wild herbs) were consumed in addition to meat, although it is not possible here to assess the relative proportions by the isotopic

**Table 5** Summary isotopic results ( $\delta^{13}C$ ,  $\delta^{15}N$ , and  $\delta^{34}S$ ) of human samples by age and sex for each site; M is male, F is female, I is indeterminate sex, indet is indeterminate age and sex

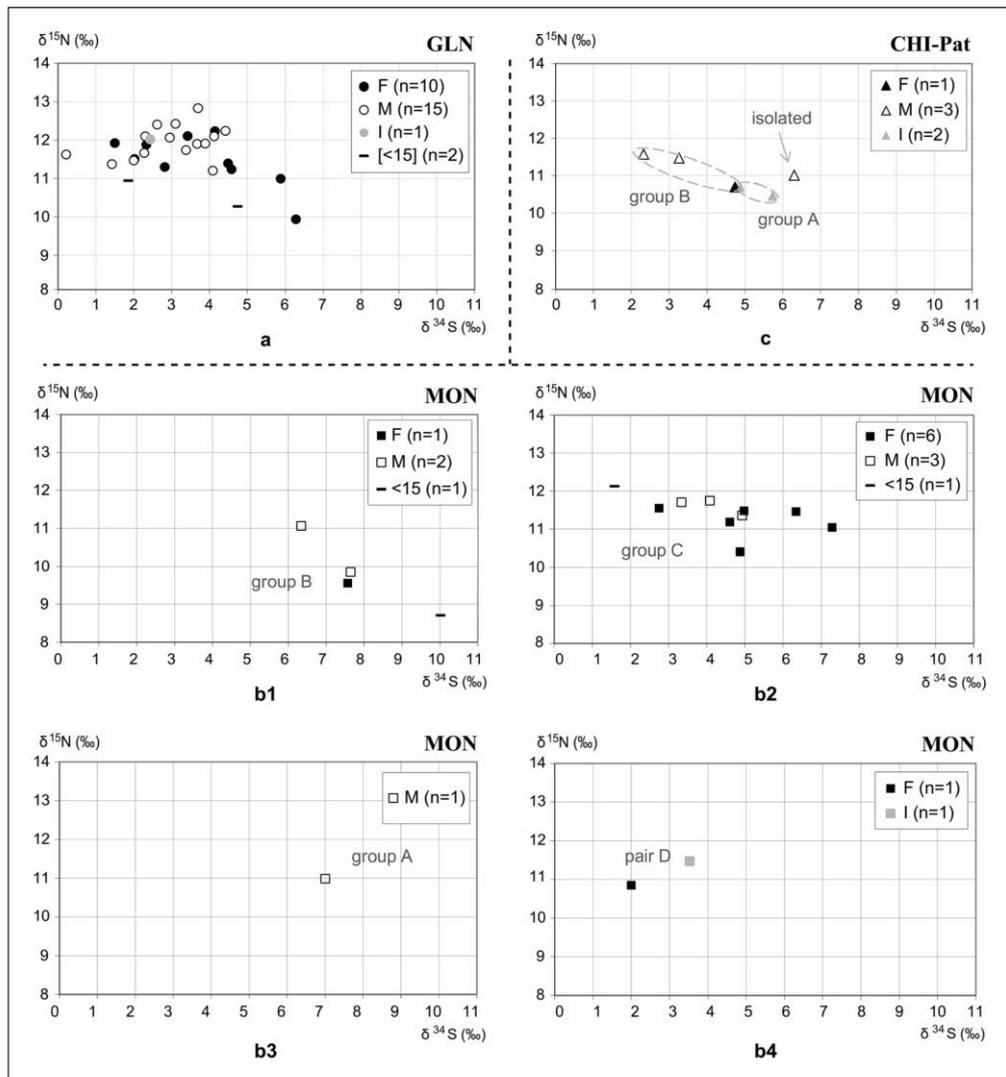
humans		$\delta^{13}C$ (‰)					$\delta^{15}N$ (‰)					$\delta^{34}S$ (‰)				
age and sex classes		N	min	mean	SD	max	N	min	mean	SD	max	N	min	mean	SD	max
GLN (86)	M	30	-21.1	-20.7	0.2	-20.3	11.2	11.9	0.4	12.8	15	0.2	2.9	1.2	4.4	
	F	18	-21.1	-20.8	0.2	-20.4	9.9	11.5	0.5	12.2	10	1.5	3.7	1.6	6.3	
	I	19	-21.0	-20.7	0.2	-20.3	11.2	11.6	0.3	12.4	1	2.4	2.4	2.4	2.4	
	TOT adult	67	-21.1	-20.7	0.2	-20.3	9.9	11.7	0.5	12.8	26	0.2	3.2	1.4	6.3	
	1-9	12	-21.3	-20.8	0.3	-20.3	11.1	11.8	0.8	13.4	0					
	5-14	6	-21.1	-20.8	0.3	-20.4	10.3	11.2	0.7	12.2	2	1.9	3.3	2.0	4.7	
	TOT children	18	-21.3	-20.8	0.3	-20.3	10.3	11.6	0.8	13.4	2	1.9	3.3	2.0	4.7	
	10-19	1	-20.7	-20.7		-20.7	11.7	11.7		11.7	0					
	<b>TOT human</b>	<b>86</b>	<b>-21.3</b>	<b>-20.7</b>	<b>0.2</b>	<b>-20.3</b>	<b>9.9</b>	<b>11.7</b>	<b>0.6</b>	<b>13.4</b>	<b>28</b>	<b>0.2</b>	<b>3.2</b>	<b>1.4</b>	<b>6.3</b>	
	M	11	-21.0	-20.5	0.2	-20.2	9.9	11.1	0.6	11.8	6	3.3	5.5	1.7	7.6	
MON (44)	F	18	-21.2	-20.8	0.2	-20.2	9.6	10.9	0.5	11.6	8	2.0	5.1	2.0	7.6	
	I	4	-20.6	-20.4	0.3	-20.0	9.7	11.0	0.9	11.7	1	3.5	3.5	3.5	3.5	
	TOT adult	33	-21.2	-20.6	0.3	-20.0	9.6	11.0	0.6	11.8	15	2.0	5.1	1.8	7.6	
	1-9	3	-20.6	-20.6	0.0	-20.6	10.1	11.1	1.0	12.1	1	1.6	1.6	1.6	1.6	
	5-9	3	-20.9	-20.5	0.6	-19.8	9.5	10.9	1.2	11.7	0					
	10-14	2	-20.9	-20.9	0.1	-20.8	8.7	9.2	0.7	9.7	1	10.0	10.0		10.0	
	TOT children	8	-20.9	-20.6	0.4	-19.8	8.7	10.6	1.2	12.1	2	1.6	5.8	5.9	10.0	
	10-19	2	-20.9	-20.9	0.0	-20.9	9.0	9.3	0.4	9.5	0					
	indet	1	-20.7	-20.7		-20.7	10.3	10.3		10.3	0					
	<b>TOT human</b>	<b>44</b>	<b>-21.2</b>	<b>-20.6</b>	<b>0.3</b>	<b>-19.8</b>	<b>8.7</b>	<b>10.8</b>	<b>0.8</b>	<b>12.1</b>	<b>17</b>	<b>1.6</b>	<b>5.2</b>	<b>2.3</b>	<b>10.0</b>	
CHI-Pat (8)	M	3	-20.8	-20.4	0.4	-20.2	11.0	11.4	0.3	11.6	3	2.3	4.0	2.1	6.3	
	F	2	-20.8	-20.8	0.1	-20.7	10.7	10.9	0.3	11.1	1	4.7	4.7	4.7	4.7	
	I	2	-20.9	-20.8	0.2	-20.6	10.5	10.6	0.1	10.7	2	4.9	5.3	0.6	5.7	
	TOT adult	7	-20.9	-20.6	0.3	-20.2	10.5	11.0	0.4	11.6	6	2.3	4.5	1.5	6.3	
	5-9	1	-20.7	-20.7		-20.7	10.5	10.5		10.5	0					
	<b>TOT human</b>	<b>8</b>	<b>-20.9</b>	<b>-20.6</b>	<b>0.3</b>	<b>-20.2</b>	<b>10.5</b>	<b>11.0</b>	<b>0.4</b>	<b>11.6</b>	<b>6</b>	<b>2.3</b>	<b>4.5</b>	<b>1.5</b>	<b>6.3</b>	
	indet	11	-21.1	-20.7	0.3	-20.3	10.0	10.9	0.7	12.0	0					
	<b>TOT human</b>	<b>11</b>	<b>-21.1</b>	<b>-20.7</b>	<b>0.3</b>	<b>-20.3</b>	<b>10.0</b>	<b>10.9</b>	<b>0.7</b>	<b>12.0</b>	<b>0</b>					
	5-14	1	-20.4	-20.4		-20.4	9.9	9.9		9.9	0					
	indet	1	-20.9	-20.9		-20.9	11.2	11.2		11.2	0					
BMT (11)	<b>TOT human</b>	<b>2</b>	<b>-20.9</b>	<b>-20.7</b>	<b>0.4</b>	<b>-20.4</b>	<b>9.9</b>	<b>10.6</b>	<b>0.9</b>	<b>11.2</b>	<b>0</b>					
	adult I	2	-20.8	-20.7	0.1	-20.6	10.1	10.2	0.1	10.3	0					
	indet	1	-20.7	-20.7		-20.7	10.1	10.1		10.1	0					
	<b>TOT human</b>	<b>3</b>	<b>-20.8</b>	<b>-20.7</b>	<b>0.1</b>	<b>-20.6</b>	<b>10.1</b>	<b>10.2</b>	<b>0.1</b>	<b>10.3</b>	<b>0</b>					
	adult M	1	-20.9	-20.9		-20.9	10.0	10.0		10.0	0					
	<b>TOT human</b>	<b>1</b>	<b>-20.9</b>	<b>-20.9</b>		<b>-20.9</b>	<b>10.0</b>	<b>10.0</b>		<b>10.0</b>	<b>0</b>					



**Fig. 6** Distribution of human  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values by age and by sex at **a** GLN, **b** MON, for each group separately (b1 = group B, b2 = group C, b3 = group A and b4 = pair D, pair E and early Neolithic burial) and **c** CHI-Pat

study. The combination of isotopic methods to other techniques as dental calculus analyses or paleoparasitology could bring more information about individual plant consumption (e.g. Goude et al. 2018). Anyway, cereal cultivation with animal manure can elevate the  $\delta^{15}\text{N}$  values and register higher

nitrogen isotopic ratios in humans eating manured crops than herbivores eating unmanured forage (Bogaard et al. 2013; Gron et al. 2017). Cases of intensive crop manuring were highlighted in several Neolithic sites in Europe and generally used to lead to overestimate the contribution of animal protein

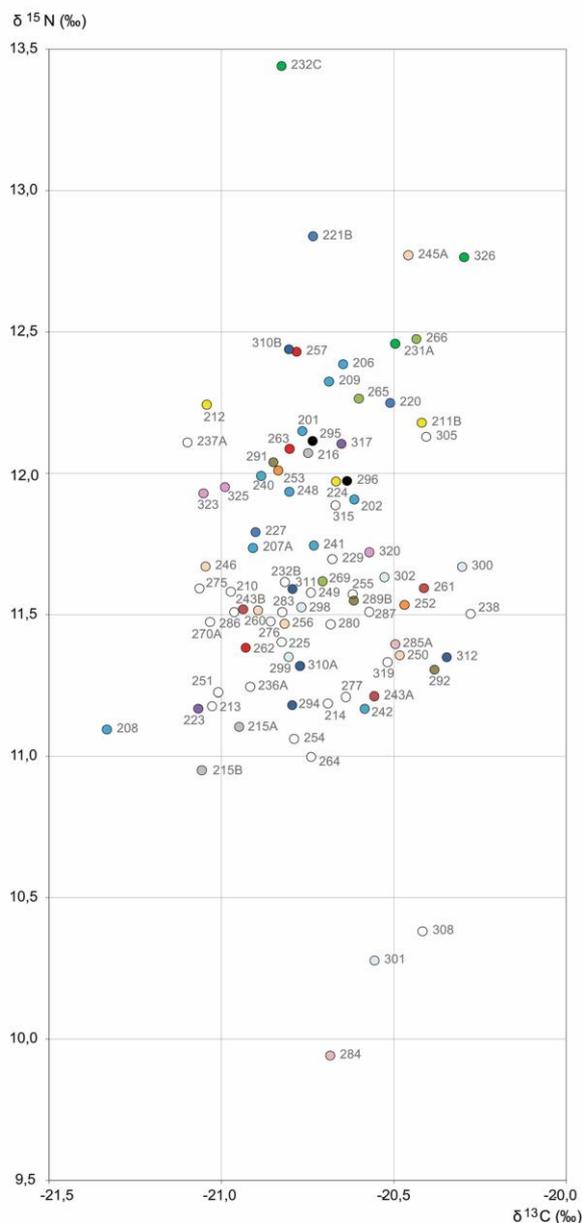


**Fig. 7** Distribution of human  $\delta^{34}\text{S}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values by age and by sex at **a** GLN, **b** MON, for each group separately (b1 = group B, b2 = group C, b3 = group A and b4 = pair D, pair E and early Neolithic burial) and **c** CHI-Pat

to the human diet (ibid). No archaeobotanical remains were found in the Yonne valley to address this issue but this hypothesis could explain the widest  $\delta^{15}\text{N}$  offset registered between some humans and herbivores (especially at GLN). This would testify to different plant cultivation strategies between sites.

Finally, the relationship observed here between humans and animals seems to show that humans occupy a particularly high level in the local food chain, especially at GLN, when compared to what is known for elsewhere in Europe in the Neolithic period (Fig. 10; see also Online Resource 10 and 11). As a comparison, an

important consumption of animal protein was also proposed, with a possible consumption of aquatic resources, in the nearby sites of Pontcharaud 2 (Auvergne) and Gougenheim (Alsace; Goude et al. 2013; Goude et al. 2014; see Fig. 10 and Online Resource 10). The neighbouring and contemporaneous Cerny site of Balloy “Les Réaudins” (Seine-et-Marne) presents a similar position of the humans in the trophic chain, maybe reflecting a regional specificity (Herrscher et al. 2012). In this region (Paris Basin or more largely North of France), people either must have had a more protein-rich diet (more carnivorous) than several other Neolithic populations or consumed a greater quantity of



**Fig. 8** Repartition of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values of humans from GLN relatively to their spatial proximity. Each colour brings together individuals buried on the side

proteins enriched in  $^{15}\text{N}$ , such as pig or fish, or even a diversified plant cultivation using manuring. Complementary analyses on organic residues of pottery, dental calculus or paleoparasitology could bring new elements to assess the local human diet. Anyway, the present result highlights a regional specificity already identified through the archaeological data.

### Diet and social organisation

Although there are no animal isotopic data for every site considered in this study, and despite the slight variations observed, the overall dispersion of values is more or less consistent for all the sites analysed here: domestic herbivores, pigs, and wild herbivores have distinct specific values in the three sites, with nearly the same mean between sites. These animal samples can therefore be used as the local baseline for all the humans (of each site). If animals from GLN display values slightly different to those from BMT (mainly for  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ , and for pigs'  $\delta^{34}\text{S}$ ), the human isotopic ratios are even more distinct between them, meaning the human variability can be due to dietary distinctions, different origin/mobility (with different isotopic background), or chronological effects. Subsequently, the isotopic variability of humans identified between sites can represent in part the animal variability between sites, but could probably also represent dietary or mobility specificities linked to social or cultural reasons. In fact, the various sites studied here seem to have different functions (enclosures, cemeteries, small funerary complexes) and refer to different cultures and periods. However, it is not known how these influences could affect dietary practices and isotopic signatures of these groups of people.

This study does not highlight any correlation between the isotopic data and the cultural attribution of the sites, nor with their nature or function. By seeking a comparison in the surrounding area, the site of Balloy “Les Réaudins”, attributed to the Cerny culture, has been analysed for C and N isotopic ratios in bone collagen (Herrscher et al. 2012). Contrarily to the sites of NZ and CHI-Pat, also attributed to the Cerny culture, this one is composed of monumental and highly organised structures, illustrating a hierarchization of funerary spaces (Thomas 2011, p. 189–258). The comparison between Cerny’s monumental structures<sup>6</sup> and open-air funerary structures of the same culture may be particularly helpful to track social distinctions. However, the humans isotopic values of Balloy are in the same range as CHI-Pat and NZ (and in the same range as all the other sites of the Yonne valley), which does not reveal any differences in terms of diet (at least for aspects of the diet reflected by the isotopic analyses; Fig. 10). Balloy and CHI-Pat, both constituted by alignments of burials, particularly share very close average values. The farther and more recent sites of La Villette and Bercy (Paris Basin), attributed to a different Chassean type (*Chasséen septentrional*) than those of the Yonne valley, seem less relevant for a cultural comparison here. Regardless, they show on average lower values than humans from the Yonne valley (Bocherens et al. 2005). The link with the chronology is more complex due to problems with radiocarbon dates performed on human bone

<sup>6</sup> Thus far, Balloy is the only site among Cerny’s monumental structures that has had isotopic analyses performed.

(Augereau and Chambon 2011, p. 339–353; Meunier 2007) and to the difficulties of attributing a specific cultural phase when the archaeological material is poorly represented. Furthermore, sequencing the sites and cultural groups in the Yonne valley is still one of the big unresolved issues of archaeology in the region (Augereau et al. 2014; Chambon et al. 2013). So, individual dating, together with cultural attribution of the sites and individual groups, have to be considered carefully. Notwithstanding, the isotopic differences identified between sites and areas clearly distinguish several human groups, living separately in space or in time (depending on the sites), even if they were exchanging, or transmitting, knowledge and objects. The proximity between GLN and MON group C, given by both archaeological and isotopic data, is particularly noteworthy. This reflects the already highlighted complexity (and specificity) of this region, considering the multiple cultural influences encountered and the difficulty to identify well-defined groups (from an archaeological point of view, not isotopic or dietary, that is not known).

Concerning the relationship between burial practices and isotopic data, only some trends stand out at GLN: adult subjects buried in alcoves have similar  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values (sample size is not appropriate for statistical analysis; Fig. 8, light blue dots). Note that these individuals are all adult males (the two children in alcove have lower values) and are grouped in the south-western part of the cemetery. Alcove burials refer to the RRBP culture and may constitute a coherent socio-cultural group (Rottier 2007). In this site, we have also highlighted isotopic similarities between individuals buried in tombs grouped together (Fig. 8), without these individuals sharing other funerary or biological characteristics (genetic studies in progress seeking for potential parental connections). These groupings could reflect social relationships within the population and would rather suggest a horizontal organisation of the society. On another side, the man GLN 221B presents the highest  $\delta^{15}\text{N}$  value of the overall GLN adult group and occupies the biggest grave with a “central” place in the cemetery (there seems to be a peripheral organisation around his tomb; no specific grave goods were associated; Online Resource 2a). This man could have had a special status among the group, with a specific diet reflected through isotopic data. However, there is no other evidence to suggest a social stratification (neither at GLN nor in other sites) and this argument alone is not sufficient to support such a hypothesis. In overall, there is no general correlation between the burial parameters and the isotopic data inside and between groups, despite the great variability of the graves. The latter could have reflected socio-cultural disparities that could be expressed through food, as certain types of tombs are linked to particular cultural trends (e.g. alcoves referring to the RRBP, Balloy tombs referring to the Cerny). The lack of any significant link with burial practices (no specific isotopic signatures for the different types of graves) raises once again

questions about the relationship between funerary practices and archaeological culture, on the one hand, and between archaeological culture and population on the other hand, particularly in this context. Moreover, the food does not always reflect social structure in the same way, particularly through isotopic data. But when some disparities are visible, we can wonder if food is rather determined, and how, by the region, the culture, the social status (at the intra-group level), the chronology or another parameter.

Then, one of the most striking results comes from the comparison of the isotopic datasets of males and females. Specific sex-based behaviours have been highlighted and echo a previous local study for the Neolithic (Rey et al. 2017). Isotopic distinctions between males and females from the same site, together with the similar isotopic values of some individuals buried besides one another or sharing a similar funerary process (for the particular group of GLN), suggest a visible social division, in particular between sexes. Taking the three proxies together, a principal component analysis (PCA) clearly highlights the isotopic difference recorded between human males versus females by site (Fig. 12). It is worth noticing that the isotopic differences registered between men and women are not the same as those recorded between sites. On the one hand, men and women have different C, N and S average isotopic ratios; on the other hand, only the N and S average isotopic ratios are varying between sites while the C average isotopic ratios are homogeneous. These differences do not have the same explanation and could be linked to differential consumption of resources or environmental specificities (that is to say food provenience or human mobility). In average, men could have consumed more resources enriched in  $^{15}\text{N}$  and  $^{13}\text{C}$  and depleted in  $^{34}\text{S}$  than women, who could have consumed more resources depleted in  $^{15}\text{N}$  and  $^{13}\text{C}$  and enriched in  $^{34}\text{S}$ . On the other hand, some sites (namely GLN, MON group C and CHI-Pat, in a lesser extent) display higher N, lower S and similar C isotope ratios than other sites (namely NZ, BON and CHI-ED). Although there is no isotopic data available locally for freshwater fish remains, the comparison with published S values from Belgium ( $\delta^{34}\text{S}$  between  $-5$  and  $+4\%$ ; Fig. 11b) shows that if local values were similar, a greater consumption of fish could explain, for example, higher  $\delta^{15}\text{N}$  and lower  $\delta^{34}\text{S}$  values registered in some sites compared to others. The C isotopic signature of fish varies between the sites of comparison (Fig. 11a) and could be similar, on average, to that of humans from the Yonne valley, inducing negligible variation between sites. Furthermore, as S isotopic values are highly variable from one environment to another and considering the great variability among the humans, it is quite possible that individuals with different values have lived in different environments or travelled between various environments in life. An ongoing study on strontium isotopes will bring new elements to discuss the individual mobility of these populations of the Yonne valley.

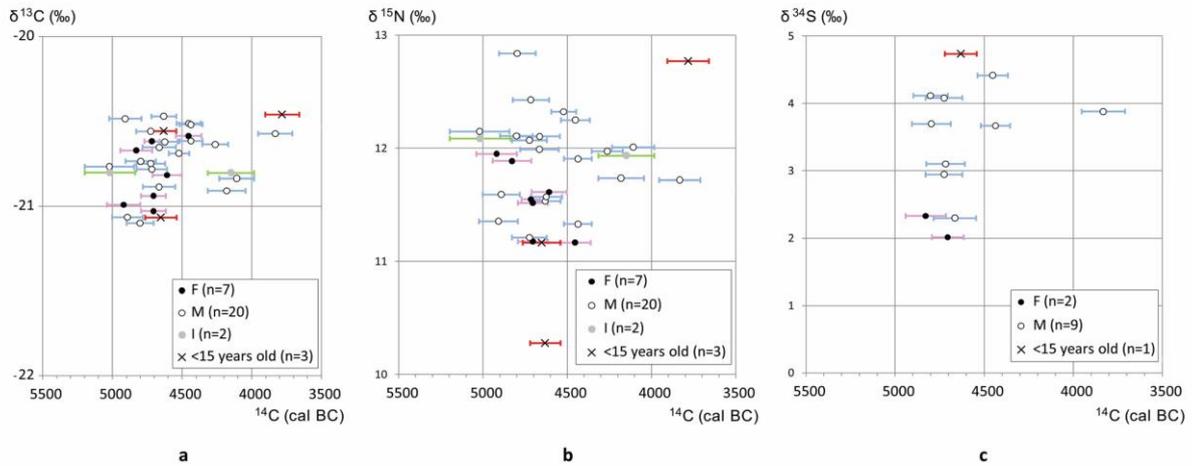
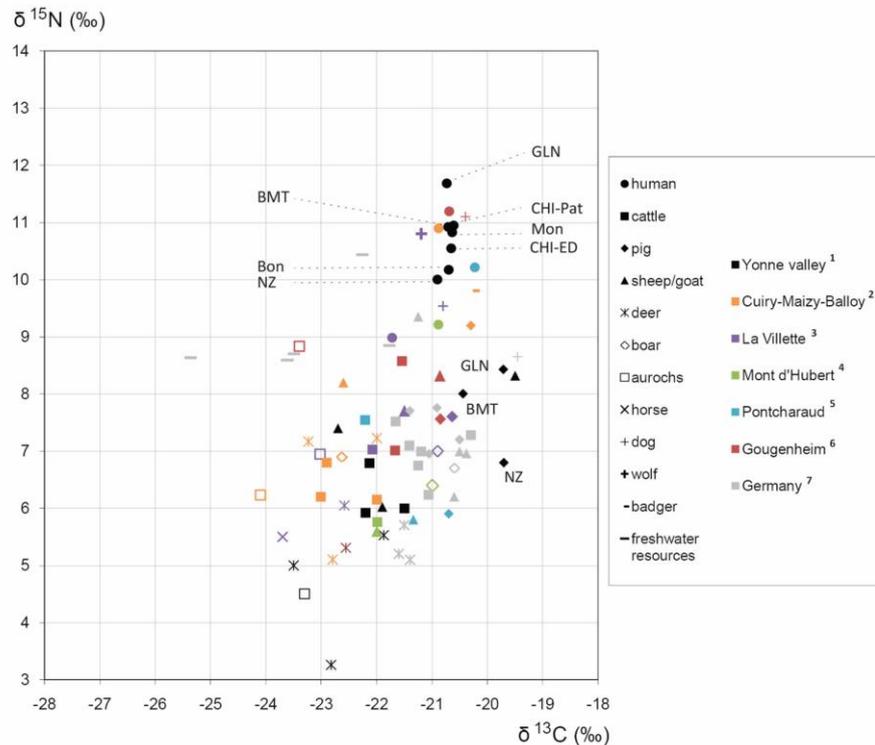


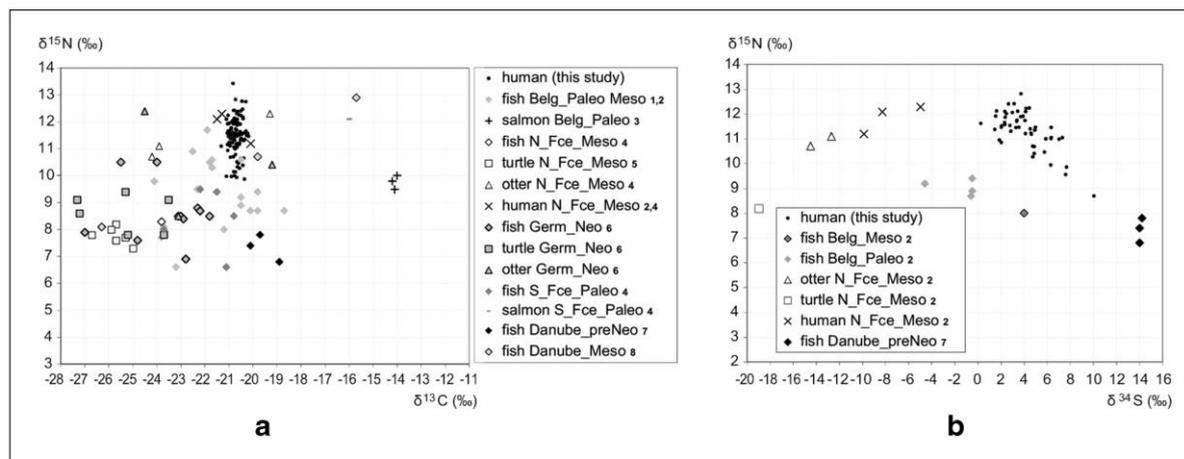
Fig. 9 Distribution of isotopic values relatively to chronology (from 5200 to 3800 cal BC) of the human group of GLN. a  $\delta^{13}\text{C}$ , b  $\delta^{15}\text{N}$  and c  $\delta^{34}\text{S}$

Finally, several hypotheses can be proposed to explain the individuals isotopic variations: (1) a differential protein intake from different animal species, (2) a differential protein intake from the same species but raised (or sometimes hunted) in different areas or with different fodder (given the BMT vs. GLN distinction), (3) a differential consumption of plants (namely legumes, as protein-rich as meat), which have lower  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  than animals but whose  $\delta^{34}\text{S}$  values are

unknown, and/or (4) different origins, even tenuous, or different patterns of mobility. With regard to the differences observed between individuals, which are all in all subtle, these could also be explained by differences in the part of the foodstuff being consumed (different pieces of meat, like offal vs. muscle; different parts of plants, like leaf vs. seed, different nutritional composition of plant as legume vs. cereal), or even by some physiological differences (Petzke and Fuller 2012),

Fig. 10 Regional comparison of isotopic values available in literature for the Neolithic period. All the data are detailed in Online Resource 8 and come from the following publications: (1) this study; (2) Balasse 1999; Herscher et al. 2012; (3) Bocherens et al. 2005; (4) Goude 2014; (5) Goude et al. 2013; (6) Goude et al. 2014; (7) Oelze et al. 2011; Nehlich et al. 2009; Dürrwächter et al. 2006





**Fig. 11** Comparison of human isotopic values with available data for freshwater resources for **a**  $\delta^{13}\text{C}$  vs.  $\delta^{15}\text{N}$  and **b**  $\delta^{34}\text{S}$  vs.  $\delta^{15}\text{N}$ . Abbreviations are used for the sites where the data comes from. *Belg*, Belgium; *N\_Fce*, Northern France; *S\_Fce*, Southern France; *Germ*, Germany; *Paleo*, Palaeolithic; *Meso*, Mesolithic; *preNeo*, pre-Neolithic;

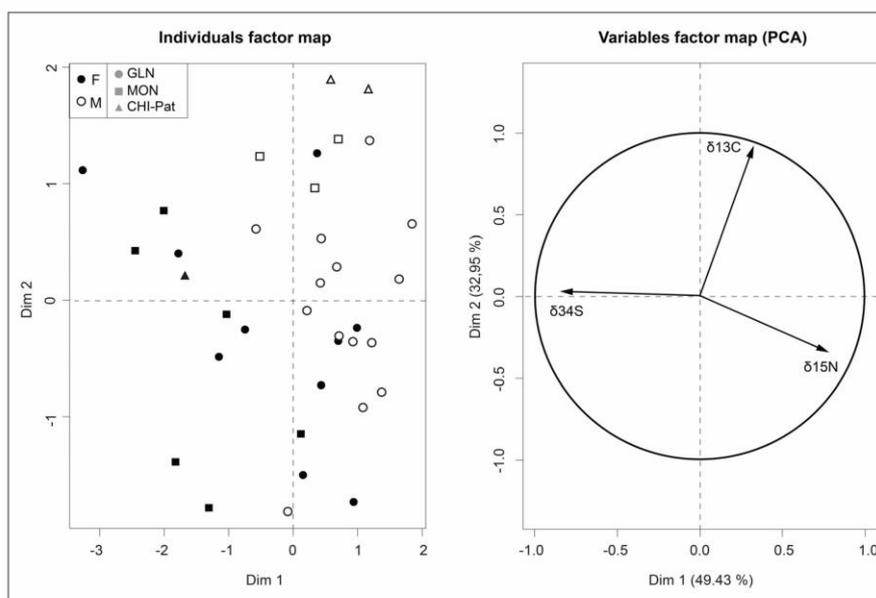
*Neo*, Neolithic. All the data are detailed in Online Resource 9 and come from the following publications: (1) Drucker et al. 2016a; (2) Drucker et al. 2016b; (3) Bocherens et al. 2014; (4) Drucker and Bocherens 2004; (5) Bocherens et al. 2011; (6) Bösl et al. 2006; (7) Nehlich et al. 2010; (8) Bonsall et al. 1997

rather than by different food items consumed. Additional studies (especially on teeth and residues in pottery) would provide useful information on the different food sources such as plants, dairy products and fish to better characterise the local baseline for the human diet. Primarily, it will be necessary to measure the isotopic signature of freshwater fish specimens in order to refine, in particular, the question of the sex-related and between sites dietary variations.

Whatever the cause of these differences, they represent in themselves social or cultural distinctions, maybe also linked to

different mobility patterns, between individuals or groups of individuals. Indeed, the isotopic difference between the sexes could illustrate a sexual division of labour or a social separation of status. In the Neolithic of the broader region, sexual division was already visible in biological studies (Villotte and Knüsel 2014) or associated with grave goods or funerary structures, like in the Cerny culture (Thomas 2011) or at Le Vigneau (Touraine, Coutelas et al. 2015). However, it is relatively new to distinguish such a division through diet, revealed by isotopic analyses, though it has been suggested for other

**Fig. 12** Principal component analysis of  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{34}\text{S}$  together distinguishing human genders, all sites considered



contexts (Ambrose et al. 2003). Compared to other sites where males and females clearly exhibit distinct status through goods (e.g. Thomas 2011, 2014), here, burial criteria do not systematically distinguish sexes. Moreover, isotopic values are not clearly distinct between males and females but rather display a slight tendency. This probably reflects a population broadly sharing the same food supplies and usage of, but in different proportions and/or cooking modes, either linked to their social status, or to their activities. The latter may also involve different mobility pattern with some people travelling or living between different areas, which would lead to averaging different final values than people not moving so much. In this regard, no difference in variability was observed between men and women, which does not allow to propose a mobility scheme towards either a patrilocal or matrilocal system. However, a difference in variability between the sexes seems to be visible during the period between 4800 and 4500 cal BC (Fig. 9), which is known to become more complex and socio-culturally diverse in this region (Chambon et al. 2013; Constantin et al. 1997; Thomas 2011). Nevertheless, the difference in variability is due to only a few samples and may be due to sampling bias.

Finally, regarding the children's isotopic pattern, the extreme values often reported in this study may express the particular nutritional needs required by their growth (e.g. de Luca et al. 2012). Physiological parameters (relative to growth and growth conditions such as health status) and their possible influence on bone isotopic ratios are somewhat unknown (e.g. Herrscher et al. 2017; Mekota et al. 2006). This pattern may also represent a particular diet for children, by social choice, or still a weaning signal, providing them different isotopic values to adults.

## Conclusions

This study confirms previous results obtained at GLN and brings new elements enabling a more in-depth discussion on regional dietary behaviours relating to cultural/functional inter-site variability and regional specificities (at an individual and population scale). Firstly, the data show that the human diet (protein part) is mainly based on cattle and pig, with a possible additional consumption of freshwater fish. The proportion of meat and fish could vary between sites. The multi-proxy analysis was very useful and pointed out new information relative to the human subsistence economy: for example, the diversified exploitation of pigs between sites. However, a direct analysis of additional food sources, and particularly of fish, is necessary to answer questions about their consumption. Secondly, some differences were highlighted between the humans of the different sites. Humans from GLN presented the highest trophic positions while those from NZ

and BON were among the lowest. Nevertheless, there is no correlation between the isotopic values and the function of the sites, nor with their cultural attribution. Certain isotopic patterns seem to correlate with chronology: on the one hand, the lowest nitrogen isotopic values are found among the MON's group B, one of the most recent group, on the other hand, greater nitrogen isotopic variability seems to have been measured for the beginning of the Middle Neolithic (around 4500–4800 cal. BC). Thirdly, sex-related isotopic distinctions are clearly identified, although slight, and reflect a diet or mobility pattern influenced by sexual division. Such a division is known, for the Neolithic period, through funerary behaviours (although not in the Yonne valley, where there is no real sexual difference in funerary treatment, but rather preferences in ornaments, tools, or type of grave, without exclusivity for one sex or another). However, it is relatively new to detect it in food. Furthermore, given the still small isotopic contrast between males and females, they could have consumed the same type of resources, but in different formats (proportions or cooking modes for example), related to their respective social status or their activity. In other words, there was probably no prohibited food for either sex, but they could not have shared the same meals, the same preparations, or they maybe have had different patterns of mobility. This point may particularly highlight the emerging complexity coming out from the new Neolithic lifestyles. Finally, the important variety of funerary behaviours encountered in the Yonne valley is not reflected by the isotopic patterns, which are overall homogeneous. However, some particular burial ensembles share similar isotopic values revealing inside group proximities (e.g. GLN burial groupings, CHI-Pat groups).

This is the most significant dataset to date for Neolithic France in terms of sample size from a limited area. It has allowed the identification of inter- and intra-site differences, at the wide scale of a well-defined region. The isotopic comparisons with neighbouring sites emphasise once again the regional peculiarity of the Yonne valley: a high trophic level for humans (with a possible consumption of fish) and sex differences not highlighted elsewhere. From these results, a food model can be proposed based on a rather horizontal stratification of society, with differences between the sexes and between groups of individuals sharing similar or close burials (maybe related to social links), and probably different livestock management styles between neighbouring groups. Comparison of these results with, in particular, new analyses from the monumental Cerny structures (whose social organisation appears hierarchical) will enable further research on this question.

**Acknowledgements** The authors are very grateful to the researchers who provided information and material for this study: Nicolas Garmond, Jean-

Gabriel Pariat, Ludvine Paleau, Jean-Baptiste Mallye, and Pierre Magniez. The authors also thank Gauthier Devilder for his assistance with the CAD. The authors are very grateful to the reviewers for helping to improve this manuscript. This paper has been reviewed by a language editing assistant.

**Funding information** This research was funded by the DHP project (S. Rottier, Univ. Bordeaux, Lascarb [ANR-10-LABX-52], 2012–2014) and by the Institut Danone France/Fondation pour la Recherche Médicale 2015 partnership (Women and diet at the beginning of farming, 5th – 3rd millennium BC, France: a bio-anthropological approach; Dir. G. Goude 2016–2017; <http://institutdanone.org/nos-prix/femmes-alimentation-les-premieres-societes-agropastorales-ve-iiiie-millennaires-av-j-c-france-approche-bio-anthropologique/>).

## References

- Ambrose SH (1990) Preparation and characterization of bone and tooth collagen for isotopic analysis. *J Archaeol Sci* 17:431–451. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(90\)90007-R](https://doi.org/10.1016/0305-4403(90)90007-R)
- Ambrose SH (1991) Effects of diet, climate and physiology on nitrogen isotope abundances in terrestrial foodwebs. *J Archaeol Sci* 18:293–317. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(91\)90067-Y](https://doi.org/10.1016/0305-4403(91)90067-Y)
- Ambrose SH, Krigbawm J (2003) Bone chemistry and bioarchaeology. *J Anthropol Archaeol* 22:191–199
- Ambrose SH, Buikstra J, Krueger HW (2003) Status and gender differences in diet at Mound 72, Cahokia, revealed by isotopic analysis of bone. *J Anthropol Archaeol* 22:217–226
- Anderson MJ (2001) A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology* 26:32–46. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x>
- Arneson LS, MacAvoy SE (2005) Carbon, nitrogen, and sulfur diet-tissue discrimination in mouse tissues. *Can J Zool* 83(7):989–995
- Augereau A (unpublished) L'industrie lithique de Gurgy "Les Noisats" (Yonne). Campagnes 2004–2006. In: Rottier S (ed) Rapport d'opération archéologique programmée (2007), vol 2010. SRA Bourgogne, Dijon
- Augereau A, Chambon P (2011) Les occupations néolithiques de Macherin à Monéteau (Yonne) vol M53. Société Préhistorique Française, Paris
- Augereau A, Chambon P, Garmond N, Meunier K (2014) Beeching A Le Chasséen dans l'Yonne est-il aussi ancien qu'à Chassey ? In: Le Chasséen, des Chasséens... Retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortailod, Lagozza. Actes du colloque international tenu à Paris (France) du 18 au 20 novembre 2014, Paris
- Bakels C (1997) Le blé dans la culture de Cerny. In: Constantin C, Mordant D, Simonin D (eds) La culture de Cerny. Nouvelle économie, nouvelle société au Néolithique. Actes du Colloque International de Nemours, 1994, vol 6. Mémoires du Musée de Préhistoire d'Ile-de-France, pp 315–317
- Balasse M (1999) De l'exploitation du lait au Néolithique moyen en Europe tempérée : examen des modalités de sevrage des bovins, par l'analyse isotopique des ossements archéologiques. PhD Thesis, Université Paris VI
- Balasse M, Tresset A (2002) Early weaning of neolithic domestic cattle (Bercy, France) revealed by intra-tooth variation in nitrogen isotope ratios. *J Archaeol Sci* 29:853–859
- Balasse M, Bocherens H, Tresset A, Mariotti A, Vigne J-D (1997) Émergence de la production laitière au Néolithique ? Contribution de l'analyse isotopique d'ossements de bovins archéologiques. *Cr Acad Sci II A* 325:1005–1010. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(97\)82382-8](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(97)82382-8)
- Balasse M, Tresset A, Bocherens H, Mariotti A, Vigne J-D (2000) Un abattage "post-lactation" sur des bovins domestiques néolithiques. Etude isotopique des restes osseux du site de Bercy (Paris, France). *Anthropozoologica* 31:39–48
- Balasse M, Boury L, Ughetto-Monfrin J, Tresset A (2012) Stable isotope insights ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ) into cattle and sheep husbandry at Bercy (Paris, France, 4th millennium BC): birth seasonality and winter leaf foddering. *Environ Archaeol* 17:29–44
- Barnes C, Jennings S (2007) Effect of temperature, ration, body size and age on sulphur isotope fractionation in fish. *Rapid Commun Mass Spectrom* 21(8):1461–1467
- Bedault L (2009) First reflections on the exploitation of animals in Villeneuve-Saint-Germain society at the end of the early Neolithic in the Paris Basin (France). In: Hofmann D, Bickle P (eds) Creating communities: new advances in central European Neolithic research. Oxbow Books, Oxford, pp 111–131
- Billard C, Bostyn F, Hamon C, Meunier K (2014) Premiers paysans de la Plaine de Caen, L'habitat du Néolithique ancien de Colombelles « Le Lazzaro » (Calvados) vol M58. Société Préhistorique Française, Paris
- Bocherens H (1992) Biogéochimie isotopique ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) et paléontologie des vertébrés : application à l'étude des réseaux trophiques révolus et des paléoenvironnements. PhD Thesis, Université Paris VI
- Bocherens H (2009) Neanderthal dietary habits: review of the isotopic evidence. In: Hublin J-J, Richards MP (eds) The evolution of hominin diets: integrating approaches to the study of Palaeolithic subsistence. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 241–250. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9699-0\\_19](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9699-0_19)
- Bocherens H, Drucker D (2003) Trophic level isotopic enrichment of carbon and nitrogen in bone collagen: case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems. *Int J Osteoarchaeol* 13:46–53
- Bocherens H, Billiou D, Tresset A (2005) Approche biogéochimique ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) de l'exploitation de l'environnement par les humains. In: Giligny F (ed) Louviers "La Villette" (Eure) : un site néolithique moyen en zone humide. Presses Universitaires de Rennes, Rennes, pp 265–269
- Bocherens H, Polet C, Toussaint M (2007) Palaeodiet of Mesolithic and Neolithic populations of Meuse Basin (Belgium): evidence from stable isotopes. *J Archaeol Sci* 34:10–27
- Bocherens H, Drucker DG, Taubald H (2011) Preservation of bone collagen sulphur isotopic compositions in an early Holocene river-bank archaeological site. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* 310:32–38. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.05.016>
- Bocherens H, Baryshnikov G, Van Neer W (2014) Were bears or lions involved in salmon accumulation in the Middle Palaeolithic of the Caucasus? An isotopic investigation in Kudaro 3 cave. *Quat Int* 339–340:112–118. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.06.026>
- Bogaard A, Heaton THE, Poulton P, Merbach I (2007) The impact of manuring on nitrogen isotope ratios in cereals: archaeological implications for reconstruction of diet and crop management practices. *J Archaeol Sci* 34:335–343
- Bogaard A et al. (2013) Crop manuring and intensive land management by Europe's first farmers. *110:12589–12594*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305918110>
- Bonnardin S (unpublished) La parure de Gurgy "Les Noisats" (Yonne). Approche technologique, typologique et fonctionnelle (campagnes 2006 et 2007). In: Rottier S (ed) Rapport d'opération archéologique programmée (2007), vol 2010. SRA Bourgogne, Dijon
- Bonsall C et al. (1997) Mesolithic and Early Neolithic in the Iron Gates: a palaeodietary perspective. *5:50–92*. <https://doi.org/10.1179/096576697800703575>
- Bösl C, Grupe G, Peters J (2006) A Late Neolithic vertebrate food web based on stable isotope analyses. *Int J Osteoarchaeol* 16:296–315. <https://doi.org/10.1002/oa.834>

- Bostyn F (2003) Néolithique ancien en Haute-Normandie : le village Villeneuve-Saint-Germain de Poses « Sur la Mare » et les sites de la boucle du Vaudreuil vol T04. Société Préhistorique Française, Paris
- Bouby L, Léa V (2006) Exploitation de la vesce commune (*Vicia sativa* L.) au Néolithique moyen dans le Sud de la France. Données carpologiques du site de Claparouse (Lagnes, Vaucluse) 5:973–980. <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2006.07.007>
- Bruzek J (2002) A method for visual determination of sex using the human hip bone. *Am J Phys Anthropol* 117:157–168
- Chambon P (2003) Les Morts dans les sépultures collectives néolithiques en France. Du cadavre aux restes ultimes. vol 35. Supplément à Gallia Préhistoire
- Chambon P et al. (2009a) Evolution, coexistence et confrontation de pratiques funéraires entre 4500 et 4000 av. J.-C. sur un micro-territoire : la vallée de l'Yonne, entre le Serein et le Baulche. - Rapport de Projet collectif de Recherche. Service Régional de l'Archéologie
- Chambon P, Mordant D, Pariat J-G (2009b) Sépultures du Néolithique moyen en Bassin parisien : le cas des architectures sépulcrales. In: Le Brun-Ricalens F, Valotteau F, Hauzeur A (eds) Relations interrégionales au Néolithique entre Bassin parisien et Bassin rhénan. Actes du 26e colloque interrégional sur le Néolithique, Luxembourg, 8 et 9 novembre 2003. *Archaeologia Mosellana* 7: 445–467
- Chambon P, Delor JP, Augereau A, Gibaja Bao JF, Meunier K, Thomas A, Murail P, Molez D (2010) La nécropole du Néolithique moyen de Sur les Pâtureaux à Chichery (Yonne). *Gallia Préhistoire* 52:117–192
- Chambon P, Rottier S, Augereau A, Bonnardin S, Meunier K, Pariat J-G (2013) Evolution, coexistence et confrontation de pratiques funéraires entre 4700 et 4000 av. J.-C. sur un microterritoire dans la vallée de l'Yonne. In: Jaubert J, Fournent N, Depaep P (eds) Transitions, ruptures et continuité en Préhistoire, XXVIIe Congrès Préhistorique de France, Bordeaux - Les Eyzies 2010, vol 1. Société Préhistorique Française, Paris, pp 213–228
- Clavel B (2009) Site de pêche néolithique au bord de l'Aisne. *Archéopages* 26:22–23
- Clavel B, Arbogast R-M (2007) Fish exploitation from early neolithic sites in northern France : the first data. In: Dobiat C, Leidorf K (eds) The role of fish in ancient time. 13th Meeting of the International Council of the ICAZ Fish Remains Working Group. *Internationale Archäologie* 8:85–91
- Constantin C, Mordant D, Simonin D (1997) La culture de Cerny. Nouvelle économie, nouvelle société au Néolithique. Actes du Colloque International de Nemours, 1994 vol 6. Mémoires du Musée de Préhistoire d'Ile-de-France, Nemours : A.P.R.A.I.F
- Cooper CG, Lupo KD, Zena AG, Schmitt DN, Richards MP (2018) Stable isotope ratio analysis (C, N, S) of hair from modern humans in Ethiopia shows clear differences related to subsistence regimes. <https://doi.org/10.1007/s12520-018-0740-5>
- Coutelas A, Hauzeur A, Courboin-Gresillaud E, Terrom J (2015) with the collaboration of Chesnaux L, Chol E, Chravzev J, Fernandès P, Gomez de Soto J, Goude G, Louyot D, Mens E, Roux L, Rué M, Varennes G. Pussigny (37), « Le Vigneau 2 ». Nécropoles néolithique et protohistoriques. Rapport final d'opération. Orléans: SRA Centre. 1113 p
- Cristiani E et al. (2018) Dental calculus and isotopes provide direct evidence of fish and plant consumption in Mesolithic Mediterranean. 8: 8147. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26045-9>
- de Luca A, Boisseau N, Tea I, Louvet I, Robins RJ, Forhan A, Charles MA, Hankard R (2012)  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  in hair from newborn infants and their mothers: a cohort study. *Pediatr Res* 71:598–604. <https://doi.org/10.1038/pr.2012.3>
- de Mendiburu F (2017) agricolae: statistical procedures for agricultural research. R package version 1.2–8. <<https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>>
- Delmas PD (1993) Biochemical markers of bone turnover. *J Bone Miner Res* 8:S549–S555. <https://doi.org/10.1002/jbmr.5650081323>
- DeNiro MJ (1985) Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction. *Nature* 317:806–809
- DeNiro MJ, Epstein S (1978) Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim Cosmochim Acta* 42:495–506
- DeNiro MJ, Epstein S (1981) Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochim Cosmochim Acta* 45:341–351
- Drucker D, Bocherens H (2004) Carbon and nitrogen stable isotopes as tracers of change in diet breadth during Middle and Upper Palaeolithic in Europe. *Int J Osteoarchaeol* 14:162–177
- Drucker DG, Rosendahl W, Van Neer W, Weber M-J, Görner I, Bocherens H (2016a) Environment and subsistence in North-Western Europe during the Younger Dryas: an isotopic study of the human of Rhünda (Germany). *J Archaeol Sci Rep* 6:690–699. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2015.08.002>
- Drucker DG, Valentin F, Thevenet C, Mordant D, Cottiaux R, Delsate D, Van Neer W (2016b) Aquatic resources in human diet in the late Mesolithic in Northern France and Luxembourg: insights from carbon, nitrogen and sulphur isotope ratios. *Archaeol Anthropol Sci* 10: 1–18. <https://doi.org/10.1007/s12520-016-0356-6>
- Dufour E, Bocherens H, Mariotti A (1999) Palaeodietary implications of isotopic variability in eurasian lacustrine fish. *J Archaeol Sci* 26: 617–627
- Dürnwächter C, Craig OE, Collins MJ, Burger J, Alt KW (2006) Beyond the grave: variability in Neolithic diets in Southern Germany? *J Archaeol Sci* 33:39–48
- Farquhar GD, Ehleringer JR, Hubick KT (1989) Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annu Rev Plant Phys* 40:503–537
- Fernandes R, Millard AR, Brabec M, Nadeau M-J, Grootes P (2014) Food reconstruction using isotopic transferred signals (FRUITS): a Bayesian model for diet reconstruction. *PLoS One* 9:e87436. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087436>
- Finlay JC, Kendall C (2007) Stable isotope tracing of temporal and spatial variability in organic matter sources to freshwater ecosystems. In: Michener R, Lajth K (eds) Stable isotopes in ecology and environmental science. Blackwell Publishing Ltd, pp 283–333. <https://doi.org/10.1002/9780470691854.ch10>
- Goude G (2014) Etude isotopique des restes humains du site de Mont d'Hubert (Escalles): ressources alimentaires et exploitation de l'environnement. In: Praud I, Panloup E (eds) Rapport de fouille préventive. Escalles, Mont d'Hubert : une enceinte du Néolithique Moyen II, des fosses du Néolithique Moyen I et du Bronze final sur le littoral de la mer du Nord : INRAP. pp 332–336
- Goude G, Fontugne M (2016) Carbon and nitrogen isotopic variability in bone collagen during the Neolithic period: influence of environmental factors and diet. *J Archaeol Sci* 70:117–131. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2016.04.019>
- Goude G, Schmitt A, Herrscher E, Loison G, Cabut S, André G (2013) Pratiques alimentaires au Néolithique moyen : nouvelles données sur le site de Pontcharaud 2 (Puy-de-Dôme, Auvergne, France). *Bulletin de la Société Préhistorique Française* 110:299–317
- Goude G, Balasescu A, Reveillas H, Thomas Y, Lefranc P (2014) Diet variability and stable isotope analyses: looking for variables within the late Neolithic and Iron Age human groups from Gougenheim site and surrounding areas (Alsace, France). *Int J Osteoarchaeol* 25: 988–996. <https://doi.org/10.1002/oa.2399>
- Goude G, Salazar-García DC, Power RC, Terrom J, Rivollat M, Deguilloux MF, Pemonge MH, le Bailly M, Andre G, Coutelas A, Hauzeur A (2018) A multidisciplinary approach to Neolithic life

- reconstruction. *J Archaeol Method Theory* 26:537–560. <https://doi.org/10.1007/s10816-018-9379-x>
- Gron KJ, Gröcke DR, Larsson M, Sørensen L, Larsson L, Rowley-Conway P, Church MJ (2017) Nitrogen isotope evidence for manuring of early Neolithic Funnel Beaker Culture cereals from Stensborg, Sweden. 14:575–579. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.06.042>
- Hachem L, Bedault L, Leduc C (2014) L'élevage et la chasse au Chasséen septentrional : renouvellement des connaissances d'après l'étude des enceintes de Villers-Carbonnel (Somme) et de Passel (Oise). In: *Le Chasséen, des Chasséens : retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortaillod, Lagozza, Paris, 18–20 novembre 2014, Archives d'Écologie Préhistorique*, pp 241–258
- Heaton THE (1999) Spatial, species, and temporal variations in the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios of  $\text{C}_3$  plants : implications for palaeodiet studies. *J Archaeol Sci* 26:637–649
- Heaton THE, Vogel JC, Von la Chevallerie G, Collett G (1986) Climatic influence on the isotopic composition of bone nitrogen. *Nature* 322: 822–823
- Hedges REM, Reynard LM (2007) Nitrogen isotopes and the trophic level of humans in archaeology. *J Archaeol Sci* 34:1240–1251
- Hedges REM, Stevens RE, Richards MP (2004) Bone as a stable isotope archive for local climatic information. *Quat Sci Rev* 23:959–965. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.06.022>
- Hedges RE, Clement JG, Thomas CD, O'Connell TC (2007) Collagen turnover in the adult femoral mid-shaft: modeled from anthropogenic radiocarbon tracer measurements. *Am J Phys Anthropol* 133:808–816. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20598>
- Herrscher E, Thomas A, Chambon P, Mordant D, André G (2012) Pratiques alimentaires et nécropoles monumentales au Néolithique: le cas des sujets du site de Balloy-les Reaudins (culture de Cerny, Ve millénaire, Bassin Parisien). 1837<sup>e</sup> Journées de la Société d'anthropologie de Paris, Bordeaux (25-27 janvier 2012). *BMSAP* 24:S21
- Herrscher E, Goude G, Metz L (2017) Longitudinal study of stable isotope compositions of maternal milk and implications for the palaeodiet of infants. *Bull Mém Soc Anthropol Paris* 29:131–139. <https://doi.org/10.1007/s13219-017-0190-4>
- Ilett M, Constantin C, Farruggia J-P, Bakels C (1995) Bâtiments voisins du Rubané et du groupe de Villeneuve-Saint-Germain sur le site de Bucy-le-Long «La Fosse Tounise» (Aisne). *Revue Archéologique de Picardie* 9:17–39
- Jovanović J, de Becdelièvre C, Goude G, Le Roy M, Herrscher E, Stefanović S (2015) Diet and health status of children at the Mesolithic Neolithic transition in the Danube Gorges. *Archaika* 3: 42–65
- Jovanović J, de Becdelièvre C, Stefanović S, Živaljević I, Dimitrijević V, Goude G (2019) Last hunters–first farmers: new insight into subsistence strategies in the Central Balkans through multi-isotopic analysis. *Archaeol Anthropol Sci* 11:3279–3298. <https://doi.org/10.1007/s12520-018-0744-1>
- Kanstrup M, Thomsen IK, Mikkelsen PH, Christensen BT (2012) Impact of charring on cereal grain characteristics: linking prehistoric manuring practice to  $\delta^{15}\text{N}$  signatures in archaeobotanical material. *J Archaeol Sci* 39:2533–2540
- Le Roy M (2015) Les enfants au Néolithique : du contexte funéraire à l'interprétation socio-culturelle en France de 5700 à 2100 ans av. J.C. PhD Thesis, Université de Bordeaux
- Longin R (1971) New method of collagen extraction for radiocarbon dating. *Nature* 230:241–242
- Martin L, Bouby L, Marinval P, Dietsch-Sellami M-F, Roussellet O, Cabanis M, Durand F (2014) Exploitation des ressources végétales au Chasséen : un bilan des données carpologiques. In: *Le Chasséen, des Chasséens : retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortaillod, Lagozza, Paris, 18–20*
- McCutchan JH, Lewis WM, Kendall C, McGrath CC (2003) Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur. *Oikos* 102(2):378–390
- Mekota A-M, Grupe G, Ufer S, Cuntz U (2006) Serial analysis of stable nitrogen and carbon isotopes in hair: monitoring starvation and recovery phases of patients suffering from anorexia nervosa. *Rapid Commun Mass Spectrom* 20:1604–1610. <https://doi.org/10.1002/rcm.2477>
- Meunier K (2007) Gurgy “Le Nouveau” (89 - Bourgogne). INRAP, Final Operation Report, unpublished
- Meunier K, Augereau A, Hamon C, Duhamel P (2006) Le site Villeneuve-Saint-Germain de Gurgy ‘Les Grands Champs’ (Yonne). In: Duhamel P (ed) *Impacts interculturels au Néolithique moyen. Du terroir au territoire : sociétés et espace. Actes du 25<sup>e</sup> colloque interrégional sur le Néolithique, Dijon (20–21 octobre 2001)*. *Revue archéologique de l'Est* S25:287–301
- Meunier K et al (2012) Deux enceintes du Néolithique moyen I à Gurgy “le Nouveau” (Yonne). *InterNéo* 9:61–72
- Minagawa M, Wada E (1984) Stepwise enrichment of  $^{15}\text{N}$  along food chains: further evidence and the relation between  $\delta^{15}\text{N}$  and animal age. *Geochim Cosmochim Acta* 48:1135–1140. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90204-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90204-7)
- Moorrees CFA, Fanning EA, Hunt EE (1963) Age variation of formation stages for 10 permanent teeth. *J Dent Res* 42:1490–1502
- Murail P, Bruzek J, Houët F, Cunha E (2005) DSP : a tool for probabilistic sex diagnosis using worldwide variability in hip-bone measurements. *Bull Mém Soc Anthropol Paris* 17:167–176
- Naito YI, Chikaraishi Y, Ohkouchi N, Drucker D, Bocherens H (2013) Nitrogen isotopic composition of collagen amino acids as an indicator of aquatic resource consumption: insights from Mesolithic and Epipalaeolithic archaeological sites in France. *World Archaeol* 45: 338–359
- Nehlich O (2015) The application of Sulphur isotope analyses in archaeological research: a review. *Earth-Sci Rev* 142:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.12.002>
- Nehlich O, Richards M (2009) Establishing collagen quality criteria for sulphur isotope analysis of archaeological bone collagen. *Archaeol Anthropol Sci* 1:59–75. <https://doi.org/10.1007/s12520-009-0003-6>
- Nehlich O, Montgomery J, Evans J, Schade-Lindig S, Pichler SL, Richards MP, Alt KW (2009) Mobility or migration: a case study from the Neolithic settlement of Nieder-Mörlen (Hessen, Germany). *J Archaeol Sci* 36:1791–1799
- Nehlich O, Borić D, Stefanović S, Richards MP (2010) Sulphur isotope evidence for freshwater fish consumption: a case study from the Danube Gorges, SE Europe. *J Archaeol Sci* 37:1131–1139. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.12.013>
- Nehlich O, Barrett JH, Richards MP (2013) Spatial variability in sulphur isotope values of archaeological and modern cod (*Gadus morhua*). *Rapid Commun Mass Spectrom* 27:2255–2262. <https://doi.org/10.1002/rcm.6682>
- Oelze VM, Siebert A, Nicklisch N, Meller H, Dresely V, Alt KW (2011) Early Neolithic diet and animal husbandry: stable isotope evidence from three Linearbandkeramik (LBK) sites in Central Germany. *J Archaeol Sci* 38:270–279
- Oksanen J et al (2017) *Vegan: Community Ecology Package*. R package, version 2.4
- O'Leary MH (1988) Carbon isotopes in photosynthesis. *BioScience* 38: 328–336. <https://doi.org/10.2307/1310735>
- Pellet C (1978) La nécropole rubanée de L'Etang David à Chichery (Yonne). *Revue archéologique de l'Est et du Centre-Est* 29:65–84
- Petzke KJ, Fuller BT (2012) Stable isotope ratio analysis in human hair. In: Preedy VR (ed) *Handbook of hair in health and disease*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, pp 332–351. [https://doi.org/10.3920/978-90-8686-728-8\\_17](https://doi.org/10.3920/978-90-8686-728-8_17)
- Prestreau M, Thevenot JP (1996) L'axe Yonne-Armançon-Saône au Néolithique moyen : Cadre chronologique et interpénétrations

- culturelles. *Revue archéologique de l'Est et du Centre-Est Supplément* 14:383–396
- Privat KL, O'Connell TC, Hedges REM (2007) The distinction between freshwater- and terrestrial-based diets: methodological concerns and archaeological applications of Sulphur stable isotope analysis. *J Archaeol Sci* 34:1197–1204. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.10.008>
- R Core Team (2018) R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria <<http://www.R-project.org/>>
- Rey L, Goude G, Rottier S (2017) Comportements alimentaires au Néolithique : nouveaux résultats dans le Bassin parisien à partir de l'étude isotopique ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) de la nécropole de Gurgy « Les Noisats » (Yonne, Ve millénaire av. J.-C.). *Bull Mém Soc Anthropol Paris* 29:54–69. <https://doi.org/10.1007/s13219-016-0170-9>
- Richards MP, Hedges REM (1999) A Neolithic revolution? New evidence of diet in the British Neolithic. *Antiquity* 73:891–897
- Richards MP, Fuller BT, Hedges REM (2001) Sulphur isotopic variation in ancient bone collagen from Europe: implications for human palaeodiet, residence mobility, and modern pollutant studies. *Earth Planet Sci Lett* 191:185–190. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00427-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00427-7)
- Richards MP, Schulting RJ, Hedges REM (2003) Sharp shift in diet at onset of Neolithic. *Nature* 425:366
- Rivollat M, Mendisco F, Pemonge MH, Safi A, Saint-Marc D, Brémond A, Couture-Veschambre C, Rottier S, Deguilloux MF (2015) When the waves of European Neolithization Met: first paleogenetic evidence from early farmers in the southern Paris Basin. *PLoS One* 10:e0125521
- Robson HK, Skipitytė R, Piličiauskienė G, Lucquin A, Heron C, Craig OE, Piličiauskas G (2019) Diet, cuisine and consumption practices of the first farmers in the southeastern Baltic. *Archaeol Anthropol Sci*. <https://doi.org/10.1007/s12520-019-00804-9>
- Rottier S (2007) L'architecture funéraire des sépultures du Néolithique moyen des Noisats à Gurgy (Yonne, France). In: Moinat P, Chambon P (eds) *Les cistes de Chamblandes et la place des coffres dans les pratiques funéraires du Néolithique moyen occidental*, vol 110, Mémoire XLIII. Cahiers d'archéologie romande (110) et Société préhistorique française (Mémoire 43), Actes du colloque de Lausanne (12–13 mai 2006), pp 99–107
- Rottier S, Mordant C, Chambon P, Thevenet C (2005) Découverte de plus d'une centaine de sépultures du Néolithique moyen à Gurgy, les Noisats (Yonne). *Bulletin de la Société Préhistorique de France* 102:641–645
- Schoeninger MJ, DeNiro MJ (1984) Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals. *Geochim Cosmochim Acta* 48:625–639
- Sidéra I (2003) De l'usage des produits de la chasse pour différencier des hommes. Fonctions votive et sociale de la chasse au Néolithique ancien et moyen du Bassin parisien. In: Chambon P, Leclerc J (eds) *Les pratiques funéraires néolithiques avant 3500 av. J.-C. en France et dans les régions limitrophes*, vol M33. Société préhistorique française, Table ronde de Saint-Germain-en-Laye (15–17 juin 2001), pp 91–98
- Smith BN, Epstein S (1971) Two categories of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios for higher plants. *Plant Physiol* 47:380–384. <https://doi.org/10.1104/pp.47.3.380>
- Szulc P, Seeman E, Delmas PD (2000) Biochemical measurements of bone turnover in children and adolescents. *Osteoporosis Int* 11:281–294. <https://doi.org/10.1007/s001980070116>
- Tanz N, Schmidt HL (2010)  $\delta^{34}\text{S}$ -Value Measurements in Food Origin Assignments and Sulfur Isotope Fractionations in Plants and Animals. *J Agric Food Chem* 58(5):3139–3146
- Thomas A (2011) Identités funéraires, variants biologiques et facteurs chronologiques : une nouvelle perception du contexte culturel et social du Cerny (Bassin parisien, 4700–4300 avant J.-C.). PhD Thesis, Université Bordeaux I
- Thomas A (2014) Bioarchaeology of the middle Neolithic: evidence for archery among early European farmers. *Am J Phys Anthropol* 154:279–290. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22504>
- Tieszen LL, Boutton TW, Tesdahl KG, Slade NA (1983) Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues : implications for  $\delta^{13}\text{C}$  analysis of diet. *Oecologia* 57:32–37
- Tresset A (1989) La Faune de l'enceinte néolithique de Barbuise Courtavant (Aube). In: Direction régionale des affaires culturelles de Champagne-Ardenne cdap, la Conservation du musée de Nogent-sur-Seine et l'Association régionale pour la protection et l'étude du patrimoine préhistorique (ed) *Pré et Protohistoire de l'Aube*, livret de l'exposition. Association régionale pour la protection et l'étude du patrimoine préhistorique (A.R.P.E.P.P.), Vertus, pp 135–138
- Tresset A (1997) L'approvisionnement carné Cerny dans le contexte néolithique du Bassin parisien. In: Constantin C, Mordant D, Simonin D (eds) *La culture de Cerny. Nouvelle économie, nouvelle société au Néolithique*. Actes du Colloque International de Nemours, 1994, vol 6. Mémoires du Musée de Préhistoire d'Île-de-France, pp 299–314
- Valentin J (2003) Bone remodelling. In: Valentin J (ed) *Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values.*, vol 32. vol 3–4, Ann. ICRP edn. Pergamon, pp 185–188. [https://doi.org/10.1016/S0146-6453\(03\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0146-6453(03)00002-2)
- van Klinken GJ (1999) Bone collagen quality indicators for paleodietary and radiocarbon measurements. *J Archaeol Sci* 26:687–695
- van Klinken GJ, Richards MP, Hedges REM (2000) An overview of causes for stable isotopic variations in past European human populations: environmental, ecophysiological, and cultural effects. In: Ambrose SH, Katzenberg MA (eds) *Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*, vol 5. *Advances in Archaeological and Museum Science*. Springer US, pp 39–63. [https://doi.org/10.1007/0-306-47194-9\\_3](https://doi.org/10.1007/0-306-47194-9_3)
- Vigne JD et al (1989) Noyens-sur-Seine, site stratifié en milieu fluvial: une étude multidisciplinaire intégrée. *Bulletin de la Société Préhistorique Française* 86:370–379
- Villotte S, Knüsel CJ (2014) “I sing of arms and of a man...”: medial epicondylitis and the sexual division of labour in prehistoric Europe. *J Archaeol Sci* 43:168–174. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.12.009>
- Virginia R, Delwiche CC (1982) Natural  $^{15}\text{N}$  abundance of presumed  $\text{N}_2$ -fixing and non- $\text{N}_2$ -fixing plants from selected ecosystems. *Oecologia* 54:317–325. <https://doi.org/10.1007/bf00380000>

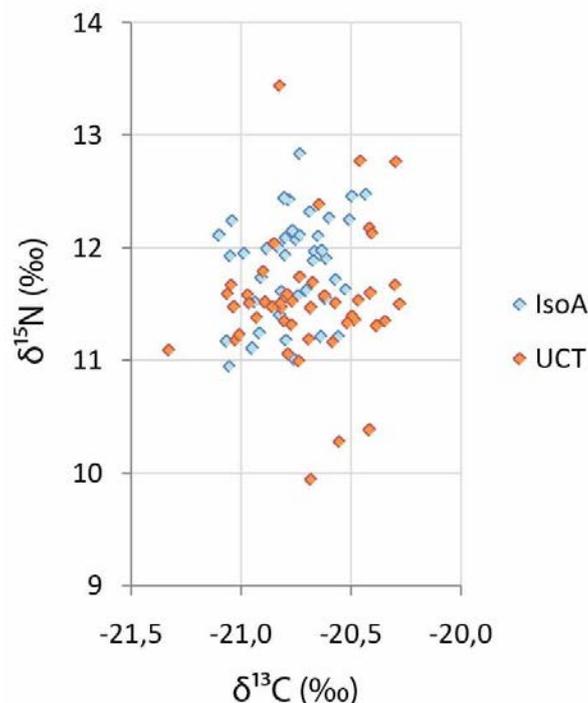
**Publisher's note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

### III. Informations complémentaires relatives aux résultats

La totalité des données brutes (valeurs isotopiques et élémentaires des échantillons et des standards) est disponible en Annexe A17 à 21 pour chaque session d'analyses.

#### III.1. Différences inter-laboratoires

Pour le carbone et l'azote, si la majorité des échantillons de collagène osseux a été mesurée à l'Université de Cap Town (UCT ; n = 179), quelques-uns ont été analysés au laboratoire IsoAnalytical (n = 48 ; cf. Rey *et al*, 2019, Annexe B2, Online Resource 3). Parmi ces derniers et si l'on ne considère que les échantillons dont le collagène est bien conservé (n = 165 pour UCT et n = 46 pour IsoA), 41 sont des humains de Gurgy « Les Noisats ». Pour le même site, 46 autres humains ont été analysés à UCT. Nous avons donc voulu comparer les valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) de ces échantillons mesurées dans les deux laboratoires. Le choix se porte sur les seuls humains du même site pour éviter toute variabilité due à un biais d'échantillonnage (les animaux et les humains n'ayant de fait pas les mêmes valeurs ; cf. I et II). Rappelons que tous les échantillons ont été préparés selon le même protocole (cf. Chap4.I.1). Les résultats sont illustrés dans la Figure C5. 1.



**Figure C5. 1 : Variation des valeurs isotopiques du carbone et de l'azote du collagène osseux des humains de Gurgy «Les Noisats» entre les mesures réalisées au laboratoire IsoAnalytical (IsoA) et à l'Université de Cap Town (UCT).**

En moyenne, les valeurs mesurées à IsoA ont un  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-20,8 \pm 0,2$  ‰ et un  $\delta^{15}\text{N}$  de  $11,8 \pm 0,5$  ‰ et les valeurs mesurées à UCT ont un  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-20,7 \pm 0,2$  ‰ et un  $\delta^{15}\text{N}$  de  $11,5 \pm 0,6$  ‰ (pour les

échantillons dont le collagène est bien conservé uniquement ; cf. encadré). La différence en  $\delta^{13}\text{C}$  est inférieure à 0,1‰ et la différence en  $\delta^{15}\text{N}$  est de l'ordre de 0,3 ‰, bien que les valeurs se recoupent. Les différences sont statistiquement significatives pour  $\delta^{15}\text{N}$  d'après le test U de Mann-Whitney ( $p = 0,002$ ). Cependant, ces différences semblent négligeables au regard de l'ensemble de la variabilité et les échantillons humains sont considérés en comparaison des échantillons animaux, dont seulement 5 ont été mesurés à IsoA contre 51 à UCT. Cette différence restant par ailleurs négligeable par rapport à la valeur seuil de 0,9‰ estimée par une précédente étude entre différents laboratoires (Pestle *et al.* 2014), nous avons choisi de ne pas appliquer de correction et de considérer ensemble la totalité des valeurs des deux laboratoires.

NB : Si l'on considère tous les échantillons humains de GLN, quelle que soit l'état de conservation du collagène, la différence est sensiblement inférieure : en moyenne, les valeurs mesurées à IsoA ont un  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-20,8 \pm 0,2$  ‰ et un  $\delta^{15}\text{N}$  de  $11,8 \pm 0,5$  ‰ et les valeurs mesurées à UCT ont un  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-20,8 \pm 0,6$  ‰ et un  $\delta^{15}\text{N}$  de  $11,6 \pm 0,6$  ‰. La différence en  $\delta^{13}\text{C}$  est inférieure à 0,1‰ et la différence en  $\delta^{15}\text{N}$  est de l'ordre de 0,2 ‰ (bien que les valeurs se recoupent). Les différences sont statistiquement significatives pour  $\delta^{15}\text{N}$  d'après le test U de Mann-Whitney ( $p = 0,01$ ).

### III.2. Conservation du collagène et datations

En ce qui concerne les datations et les problèmes rencontrés quant aux interprétations des dates aberrantes ou douteuses, nous nous sommes demandé si les informations que nous avons obtenues sur la qualité du collagène à travers l'analyse de nouveaux éléments (N et S) pouvaient apporter des clés de réponses supplémentaires. En effet, à l'époque de la réalisation des datations (se faisant également sur le collagène osseux), plusieurs critères qui se mesurent aujourd'hui en routine n'étaient pas systématiquement observés. En particulier le rendement d'extraction du collagène, le pourcentage d'azote (%N) et le rapport C/N (mesurables uniquement par datation AMS et se faisant en routine depuis quelques années seulement).

#### III.2.a. État des données

Pour tous les sites, l'ensemble des datations a été réalisé anciennement (années 2000), selon des méthodes variables (de la préparation des échantillons – avec ou sans prétraitement – à la mesure – conventionnelle ou AMS) et dans des laboratoires différents (Lyon ou Saclay [France], Poznan [Pologne], Groningue [Pays-Bas], Oxford [Royaume-Uni]). Les informations à notre disposition concernant la fiabilité des datations sont inégales et se résument généralement aux indications données pour chaque site dans les rapports d'opération ou les monographies, à savoir dans le meilleur des cas une mention sur la quantité de collagène insuffisante pour considérer la datation fiable. Les minutes des laboratoires, généralement au format papier, n'ont pas été reprises dans le cadre de cette étude et

pourraient fournir des éléments supplémentaires. Il serait notamment possible de calculer les rendements d'extraction et de voir si les %N ont été mesurés lors des datations AMS (c'est exclu pour les datations classiques). En l'état, aucune donnée chiffrée concernant le rendement d'extraction ou la concentration élémentaire en carbone (%C) n'est renseignée dans la documentation à notre disposition, encore moins la concentration en N (%N) dont nous ignorons si elle a été mesurée ou non<sup>1</sup> et par conséquent le rapport C/N. Néanmoins, Ch. Oberlin (CNRS/ UMR 5138) qui a supervisé une partie des datations (préparation de la majorité des collagènes et mesure de quelques-uns) et Ph. Chambon ont accepté de répondre à nos interrogations et de mettre à notre disposition les fichiers papier du laboratoire de Lyon si nécessaire. Dans l'attente de reprendre cette documentation, nous ne savons pas quels protocoles ont été utilisés.

Ainsi, nous avons tenté de croiser les datations et informations relatives disponibles avec les données sur la conservation du collagène obtenues dans le cadre de notre étude, afin de voir si un collagène mal conservé pouvait correspondre à une datation aberrante. Néanmoins, le collagène que nous avons extrait a été purifié par plusieurs prétraitements (cf. Chap4.I.1), alors que certains échantillons datés à l'époque n'avaient peut-être pas subi de prétraitement avant les mesures et nous n'avons pas cette information pour tous les échantillons. Pour les échantillons préparés à Lyon par C. Oberlin – aucune information n'est fournie pour les autres laboratoires –, avant d'extraire le collagène, les %C et %N étaient mesurés directement sur la poudre d'os afin de savoir si le collagène était conservé en quantité suffisante pour être daté ( $N > 0,5\%$ ) et s'ils contenaient un excès de carbone indiquant une possible contamination. Seuls les collagènes contenant un %N suffisant ont été extraits et, dans le cas d'un excès de carbone, ils ont généralement subi un prétraitement basique afin d'éliminer au maximum les contaminants humiques (Augereau et Chambon 2011). Le protocole d'extraction et de purification du collagène (suivant la méthode Longin 1971) n'est pas connu dans le détail mais peut être rendu accessible par le laboratoire de Lyon, pour la partie des analyses qui le concernent (Oberlin, comm. pers.). Quoi qu'il en soit, un grand nombre d'échantillons avaient révélé un collagène mal conservé et il est possible que certains n'aient pas été, ou pas suffisamment, décontaminés avant la datation.

D'autre part, des études ont montré que si le %N de l'os est souvent utilisé pour évaluer au préalable la quantité de collagène contenue dans un échantillon, ce paramètre n'est pas toujours corrélé au rendement d'extraction et que ce %N est variable au sein d'un même os (Fontugne *et al.* 2014 ; Jacob *et al.* 2018). Il est donc possible qu'un os contenant une faible teneur en N comporte suffisamment de collagène pour être daté ou à l'inverse qu'un %N élevé cache un rendement insuffisant (*ibid.*). En outre, si un excès de carbone indique probablement la présence de carbone exogène plus récent, l'inverse ne l'exclue pas nécessairement. Une très faible concentration de C contaminant suffit à

---

<sup>1</sup> Le %N, ainsi que le %C et le rapport C/N a *a priori* été mesuré au minimum au laboratoire d'Oxford (Angleterre).

fausser les datations et les traitements basiques appliqués aux échantillons pour éliminer les contaminants humiques ne sont pas toujours suffisants (Higham 2019).

NB : Il est à noter par ailleurs que, si la correction par rapport au  $\delta^{13}\text{C}$  est nécessaire d'un point de vue technique, ce dernier indicateur ne doit en aucun cas être utilisé à des fins de reconstructions alimentaires (la préparation des échantillons et la mesure de ce rapport diffère entre les deux approches, pouvant induire un fractionnement supplémentaire lors d'un datage) ni pour estimer une éventuelle contamination (Fontugne *et al.* 2014).

En ce qui concerne notre travail, aux Noisats, 9 collagènes sur 95 extraits sont mal conservés chez les humains et 4 sur 18 chez les animaux. À Monéteau, 9 collagènes sur 53 extraits sont mal conservés, ainsi que 2 humains et 1 animal à Beaumont (sur 13 et 38 respectivement), 1 sur 4 au Poirier, de même que 1 humain sur 2 et 1 animal sur 6 au Nouzeau ; les 2 échantillons de l'Étang David sont bien préservés. Au total, 28 échantillons (sur 239) ont fourni un collagène insuffisamment conservé d'après nos critères. Dans la majorité des cas, le collagène n'était pas conservé en quantité suffisante pour fournir assez de matière pour les mesures. Des contaminations ( $\text{C/N} > 3,6$ ) apparaissent dans un tiers des cas seulement (9 échantillons au total).

### III.2.b. Résultats des croisements

Parmi les 85 sujets datés que nous avons analysés (Tableau C5. 1), nous avons obtenu :

- **77 collagènes suffisamment bien conservés** pour retenir comme fiables nos résultats isotopiques. Les **datations** correspondant à ces échantillons sont **indistinctement** celles qui paraissent **cohérentes** d'un point de vue archéologique et celles qui sont à l'inverse tout à fait **aberrantes** (trop anciennes, trop récentes ou inversions stratigraphiques), en passant par les datations plutôt douteuses. En revanche, si pour ces échantillons le collagène que nous avons extrait est suffisamment bien conservé pour interpréter les rapports des isotopes stables à des fins de reconstruction des régimes alimentaires, cela ne signifie pas forcément que les datations ont été réalisées sur des collagènes « propres », exempts de contaminant carbonés pouvant rajeunir les datations, ni que les collagènes étaient suffisamment bien préservés pour donner une fourchette de dates réellement fiable. L'évolution récente des méthodes de datation permettrait de jeter la lumière sur cette problématique (cf. III.2.a).
- En parallèle, **quatre sujets datés ne présentaient pas suffisamment de collagène** pour nos analyses, comme cela avait déjà été relevé pour trois d'entre eux : Mon 99-38, Mon 99-251 et Mon 04-83. Néanmoins, les datations ont été considérées comme fiables pour les deux premiers échantillons. Le dernier qui présentait des dates plus récentes et une très mauvaise conservation du collagène avait été rejeté (Augereau et Chambon 2011, p.341).

code_ISO	ID	group	datations radiocarbone							analyses isotopes stables														
			code laboratoire	date BP	date calibrée (cal BC)	laboratoire d'extraction du collagène	laboratoire de datation	type de datation	fiabilité physico-chimique	note	état de conservation du collagène	$\delta^{13}C$ (‰)	$\delta^{15}N$ (‰)	rendement d'extraction (%)	C (%)	N (%)	C/N	labora. analyse	$\delta^{34}S$ (‰)	S (%)	C/S	N/S	labo. analyse	
GLN 201	st 201		Lyon-5872(SacA-14820)	6070 ± 45	5199-4845	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.8	12.2	1.9	37.0	13.2	3.2	IsoA						
GLN 202	st 202		Lyon-4447(SacA-8630)	5610 ± 40	4520-4355	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.6	11.9	2.9	40.3	14.8	3.2	IsoA	3.7	0.17	644	202	IsoA	
GLN 207A	st 207A		Lyon-4674(SacA-9826)	5335 ± 35	4317-4046	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.9	11.7	1.2	35.2	12.8	3.2	IsoA						
GLN 209	st 209		Lyon-6372(SacA-17082)	5675 ± 40	4597-4449	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.7	12.3	2.4	41.6	15.2	3.2	IsoA						
GLN 213	st 213		Lyon-6373(SacA-17083)	5955 ± 40	4795-4616	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-21.0	11.2	5.0	43.0	15.5	3.2	UCT						
GLN 216	st 216		Lyon-5873(SacA-14821)	5870 ± 40	4829-4623	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.7	12.1	2.8	41.0	15.1	3.2	IsoA	2.9	0.19	586	185	IsoA	
GLN 220	st 220		Lyon-4680(SacA-9832)	5635 ± 35	4539-4367	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.5	12.3	4.3	40.6	14.9	3.2	IsoA	4.4	0.17	621	195	IsoA	
GLN 221B	st 221B		Lyon-4445(SacA-8628)	5910 ± 50	4906-4689	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.7	12.8	1.8	38.8	13.7	3.3	IsoA	3.7	0.19	546	165	IsoA	
GLN 223	st 223		Lyon-5875(SacA-14823)	5795 ± 45	4765-4540	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-21.1	11.2	2.6	39.0	13.8	3.3	IsoA						
GLN 232B	st 232B		Lyon-6376(SacA-17086)	5765 ± 40	4713-4504	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.8	11.6	3.5	37.1	13.1	3.3	IsoA						
GLN 237A	st 237A		Lyon-5879(SacA-14827)	5915 ± 45	4899-4706	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-21.1	12.1	2.6	41.6	14.4	3.4	IsoA	4.1	0.19	594	176	IsoA	
GLN 240	st 240		Lyon-5878(SacA-14826)	5820 ± 40	4781-4551	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.9	12.0	3.6	39.5	14.0	3.3	IsoA						
GLN 242	st 242		Lyon-5877(SacA-14825)	5640 ± 45	4546-4362	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.6	11.2	2.7	42.1	15.2	3.2	UCT						
GLN 243A	st 243A		Lyon-4444(SacA-8627)	5870 ± 40	4829-4623	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.6	11.2	2.5	46.8	17.3	3.1	IsoA	4.1	0.19	672	213	IsoA	
GLN 243B	st 243B		Lyon-4446(SacA-8629)	5855 ± 40	4795-4616	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.9	11.5	9.2	47.2	17.2	3.2	IsoA	2.0	0.15	847	264	IsoA	
GLN 245A	st 245A		Lyon-4675(SacA-9827)	4975 ± 35	3906-3660	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.5	12.8	5.5	42.1	15.3	3.2	UCT						
GLN 245B	st 245B		Lyon-4676(SacA-9828)	4050 ± 35	2833-2475	Lyon ?	Saclay	AMS			contaminé	-21.3	11.7	2.2	44.2	14.1	3.6	UCT						
GLN 246	st 246		Lyon-4679(SacA-9831)	3125 ± 35	1597-1423	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-21.0	11.7	3.1	42.7	15.4	3.2	UCT						
GLN 248	st 248		Ly-12933	5303 ± 49	4316-3984	Lyon ?		classique			suffisant	-20.8	11.9	3.0	42.2	15.4	3.2	IsoA						
GLN 249	st 249		Ly-4678(SacA-9830)	2660 ± 35	892-793	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.7	11.6	3.7	40.0	14.5	3.2	IsoA						
GLN 250	st 250		Lyon-5876(SacA-14824)	6020 ± 45	5025-4794	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.5	11.4	2.2	40.9	14.8	3.2	UCT						
GLN 252	st 252		Lyon-6374(SacA-17084)	5790 ± 40	4722-4542	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.5	11.5	2.5	42.7	15.3	3.2	UCT						
GLN 253	st 253		Lyon-4673(SacA-9825)	5280 ± 40	4235-3984	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.8	12.0	4.3	39.1	14.1	3.2	IsoA						
GLN 255	st 255		Lyon-6375(SacA-17085)	5775 ± 40	4718-4532	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.6	11.6	4.7	42.2	15.4	3.2	UCT						
GLN 257	st 257		Lyon-5881(SacA-14829)	5855 ± 55	4826-4609	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.8	12.4	2.9	38.3	13.9	3.2	IsoA	3.1	0.15	672	209	IsoA	
GLN 263	st 263		Lyon-5880(SacA-14828)	6060 ± 50	5199-4838	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.8	12.1	3.6	40.0	14.6	3.2	IsoA						
GLN 275	st 275		Lyon-5882(SacA-14830)	6000 ± 50	5003-4783	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-21.1	11.6	3.2	40.8	14.5	3.3	UCT						
GLN 289B	st 289B		Ly-12934	5773 ± 58	4772-4662	Lyon ?		classique			suffisant	-20.6	11.6	2.3	42.3	15.5	3.2	IsoA						
GLN 296	st 296		Ly-12935	5449 ± 47	4357-4170	Lyon ?		classique			suffisant	-20.6	12.0	4.6	41.2	15.2	3.2	IsoA						
GLN 301	st 301		Lyon-4448(SacA-8631)	5790 ± 40	4722-4542	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.6	10.3	5.0	42.2	15.4	3.2	UCT	4.7	0.19	579	181	IsoA	
GLN 302	st 302		Lyon-4925(SacA-10413)	4615 ± 35	3498-3348	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.5	11.6	4.9	43.5	16.2	3.1	IsoA	0.2	0.19	601	192	IsoA	
GLN 310B	st 310B		Lyon-4677(SacA-9829)	3400 ± 35	1767-1618	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.8	12.4	4.2	43.4	15.6	3.2	IsoA						
GLN 315	st 315		Lyon-5874(SacA-14822)	5945 ± 50	4943-4715	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.7	11.9	3.6	40.9	14.8	3.2	IsoA	2.3	0.18	596	185	IsoA	
GLN 317	st 317		Lyon-4449(SacA-8632)	5815 ± 45	4784-4546	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.7	12.1	3.6	39.7	14.6	3.2	IsoA	2.3	0.19	558	176	IsoA	
GLN 319	st 319		Lyon-4926(SacA-10414)	5610 ± 40	4520-4355	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.5	11.3	3.0	42.1	15.2	3.2	UCT						
GLN 320	st 320		Lyon-4927(SacA-10415)	5040 ± 40	3955-3710	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-20.6	11.7	4.7	40.4	14.8	3.2	IsoA	3.9	0.21	519	163	IsoA	
GLN 323	st 323		Lyon-4928(SacA-10416)	4265 ± 35	2915-2875	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-21.1	11.9	3.3	41.2	15.0	3.2	IsoA	1.5	0.20	558	174	IsoA	
GLN 325	st 325		Lyon-5883(SacA-14831)	6030 ± 45	5041-4800	Lyon ?	Saclay	AMS			suffisant	-21.0	12.0	4.0	40.2	14.4	3.2	IsoA						
Mon 02-685	02_685	A	Ly 2220(GrA)	5390 ± 50 BP	4342-4055	Groningue (Pays-Bas)	Groningue (Pays-Bas)	AMS			insuffisant			0.2				UCT						
Mon 99-520	99_520	A	Ly 9748	5270 ± 40 BP	4232-3986	Lyon	Lyon	classique			suffisant	-21.0	10.1	1.4	32.3	11.6	3.2	UCT						
Mon 99-521	99_521	A	Ly 2876(OxA)	5535 ± 45 BP	4461-4271	Lyon	Oxford (Royaume Uni)	AMS	très fiable		suffisant	-20.2	11.0	3.3	39.3	14.2	3.2	UCT	7.0	0.19	542	168	IsoA	
Mon 99-548A	99_548A	A	Ly 2219(GrA)	5620 ± 50 BP	4545-4352	Groningue (Pays-Bas)	Groningue (Pays-Bas)	AMS			suffisant	-20.2	10.8	1.0	34.1	12.7	3.1	UCT						
Mon 99-548C	99_548C	A	Ly 2877(OxA)	5285 ± 40 BP	4236-3991	Lyon	Oxford (Royaume Uni)	AMS	fiable	pas de traitement des acides humiques	suffisant	-19.8	11.7	2.7	34.5	12.5	3.2	UCT						
Mon 98-682	98_682	B	Ly 2879(OxA)	5400 ± 40 BP	4344-4071	Lyon	Oxford (Royaume Uni)	AMS			suffisant	-20.9	9.0	4.2	39.9	14.5	3.2	UCT						
Mon 99-38	99_38	B	Ly 2864(OxA)	5255 ± 35 BP	4230-3978	Lyon	Oxford (Royaume Uni)	AMS	très fiable		insuffisant			0.5				UCT						
Mon 99-196	99_196	B	Ly 2865(OxA)	5375 ± 35 BP	4332-4066	Lyon	Oxford (Royaume Uni)	AMS	très fiable		suffisant	-20.9	9.5	2.6	40.1	14.4	3.2	UCT						
Mon 99-240	99_240	B	Ly 9745	5350 ± 35 BP	4323-4052	Lyon	Lyon	classique			suffisant	-20.9	9.6	3.0	32.1	11.4	3.3	UCT	7.6	0.18	484	148	IsoA	
Mon 99-243	99_243	B	Ly 2867(OxA)	5375 ± 35 BP	4332-4066	Lyon	Oxford (Royaume Uni)	AMS	très fiable		suffisant	-21.0	9.9	5.1	41.0	14.4	3.3	UCT	7.6	0.19	560	169	IsoA	
Mon 99-248A	99_248A	B	Ly 2868(OxA)	5335 ± 45 BP	4323-4045	Lyon	Oxford (Royaume Uni)	AMS	très fiable		suffisant	-20.8	8.7	3.6	40.5	14.6	3.2	UCT	10.0	0.20	535	166	IsoA	
Mon 99-250	99_250	B	Ly 2869(OxA)	5340 ± 45 BP	4324-4046	Lyon	Oxford (Royaume Uni)	AMS	très fiable		suffisant	-20.6	9.7	1.9	31.5	11.4	3.2	UCT						
Mon 99-251	99_251	B	Ly 2870(OxA)	5235 ± 40 BP	4229-3966	Lyon	Oxford (Royaume Uni)	AMS	fiable		insuffisant	-20.5	10.1	1.1	28.0	9.9	3.3	UCT						
Mon 99-456	99_456	B	Ly 2218(GrA)	5460 ± 50 BP	4448-4177	Groningue (Pays-Bas)	Groningue (Pays-Bas)	AMS			suffisant	-20.4	11.1	3.0	39.3	14.1	3.2	UCT	6.3	0.20	517	159	IsoA	
Mon 04-83	04_83	C	Ly 2939(Poz)	4910 ± 40 BP	3771-3640	Lyon	Poznan (Pologne)	AMS	rejeté	pb	insuffisant			0.4				UCT						

**Tableau C5. 1 : Informations relatives aux datations radiocarbone réalisées antérieurement dans différents contextes et critères de conservation du collagène obtenus dans cette étude. D'après les publications et rapports d'opération relatifs aux sites archéologiques. Toutes les datations préparées à Lyon sont disponibles sur la base de données accessible en ligne Banadora (BANque NAtionale de DONnées RAdiocarbone pour l'Europe et le Proche Orient).**

Chapitre 5 C, N, S os (bulk collagen)

code_ISO	ID	group	code laboratoire	date BP	date calibrée (cal BC)	laboratoire d'extraction du collagène	laboratoire de datation	type de datation	fiabilité physico-chimique	note	état de conservation du collagène	δ <sup>13</sup> C (‰)	δ <sup>15</sup> N (‰)	rendement d'extraction (%)	C (%)	N (%)	C/N	labora. analyse	δ <sup>34</sup> S (‰)	S (%)	C/S	N/S	labo. analyse
Mon 04-86B	04 86B	C	Ly 2861(OxA)	5455 ± 40 BP	4365-4235	Lyon	Oxford (Royaume)	AMS	très fiable		suffisant	-20.3	10.6	3.2	39.9	14.3	3.2	UCT					
Mon 04-87	04 87	C	Ly 2862(OxA)	5845 ± 40 BP	4826-4588	Lyon	Oxford (Royaume)	AMS	très fiable		suffisant	-20.8	11.2	5.3	40.7	14.5	3.2	UCT	4.6	0.19	556	170	IsoA
Mon 04-89	04 89	C	Ly 2940(Poz)	5730 ± 45 BP	4690-4463	Lyon	Poznan (Pologne)	AMS		pb	suffisant	-20.6	11.2	5.3	40.2	14.5	3.2	UCT					
Mon 04-92	04 92	C	Ly 2934(Poz)	5685 ± 45 BP	4683-4401	Lyon	Poznan (Pologne)	AMS			suffisant	-21.0	11.2	6.3	41.6	14.2	3.4	UCT					
			Ly 2935(Poz)	5760 ± 45 BP	4713 à 4501	Lyon	Poznan (Pologne)	AMS			suffisant												
Mon 04-93	04 93	C	Ly 2936(Poz)	5815 ± 45 BP	4780-4550	Lyon	Poznan (Pologne)	AMS		pb	suffisant	-20.7	11.0	3.5	39.1	14.3	3.2	UCT	7.3	0.19	540	169	IsoA
Mon 04-94B	04 94B	C	Ly 2941(Poz)	5880 ± 45 BP	4875 à 4616	Lyon	Poznan (Pologne)	AMS		pb	suffisant	-20.4	11.4	3.9	37.1	13.5	3.2	UCT	4.9	0.18	560	175	IsoA
			Ly 13571	5730 ± 45 BP	4690 à 4463	Lyon ?		classique			suffisant												
Mon 04-99	04 99	C	Ly 2863(OxA)	5680 ± 35 BP	4615-4405	Lyon	Oxford (Royaume)	AMS	très fiable		suffisant	-20.3	11.7	2.7	40.1	14.5	3.2	UCT	3.3	0.19	549	170	IsoA
Mon 04-103	04 103	C	Ly 2942(Poz)	5675 ± 40 BP	4650-4373 (ou 4444 ?)	Lyon	Poznan (Pologne)	AMS		pb	suffisant	-20.9	11.4	1.9	36.6	13.3	3.2	UCT					
Mon 04-104	04 104	C	Ly 2943(Poz)	5955 ± 45 BP	4946-4722	Lyon	Poznan (Pologne)	AMS		pb	suffisant	-21.1	11.5	3.8	41.2	13.9	3.4	UCT	6.3	0.19	582	169	IsoA
Mon 04-109	04 109	C	Ly 2944(Poz)	5945 ± 45 BP	4938 à 4721	Lyon	Poznan (Pologne)	AMS		pb!!	suffisant	-20.4	11.6	2.7	38.5	14.0	3.2	UCT					
			Ly 3188(SacA-4800)	5940 ± 70 BP	5006 à 4619	Lyon	Saclay	AMS	très fiable	date refaite par Saclay : pb non	suffisant												
			Ly 13403	5760 ± 40 BP	4710 à 4504	Lyon ?	Lyon	classique ?	fiable	date refaite par Lyon : pb non résolu	suffisant												
			GrA 36093	5830 ± 40 BP	4790 à 4556		Groningue (Pays-Bas)	AMS		date refaite par Groningue	suffisant												
Mon 04-212	04 212	C	Ly 2945(Poz)	5435 ± 40 BP	4356 à 4179	Lyon	Poznan (Pologne)	AMS	rejeté	pb	suffisant	-20.9	10.4	5.2	40.7	14.6	3.2	UCT					
			Ly 13570	5615 ± 45 BP	4535 à 4356	Lyon ?		classique	fiable		suffisant												
Mon 04-	04 217B	C	Ly 2946(Poz)	5785 ± 40 BP	4726 à 4531	Lyon	Poznan (Pologne)	AMS		pb	suffisant	-21.2	11.5	3.9	41.1	14.0	3.4	UCT	5.0	0.19	574	168	IsoA
Mon 99-241	99 241	D	Ly 2866(OxA)	5825 ± 35 BP	4786-4557	Lyon	Oxford (Royaume)	AMS	très fiable		suffisant	-20.7	10.9	2.2	41.8	14.9	3.2	UCT	2.0	0.20	544	167	IsoA
Mon 99-242	99 242	D	Ly 9746	5585 ± 45 BP	4499-4344	Lyon	Lyon	classique		pb ?	suffisant	-20.5	11.5	2.7	35.9	13.0	3.2	UCT	3.5	0.20	488	151	IsoA
Mon 00-05	00 05	E	Ly 2937(Poz)	4740 ± 40 BP	3638-3377	Lyon	Poznan (Pologne)	AMS	rejeté	pb	suffisant	-20.7	10.8	1.4	36.5	13.1	3.2	UCT					
Mon 00-15	00 15	E	Ly 2938(Poz)	4670 ± 45 BP	3629-3361	Lyon	Poznan (Pologne)	AMS	rejeté	pb	suffisant	-20.6	10.1	4.4	39.8	14.6	3.2	UCT					
Mon 99-374	99 374	NA	Ly 9747	5910 ± 35 BP	4881-4695	Lyon	Lyon	classique	fiable		suffisant	-20.3	10.9	1.9	34.7	12.4	3.3	UCT					
			Ly 2875(OxA)	6065 ± 50 BP	5207-4812	Lyon	Oxford (Royaume)	AMS	très fiable		suffisant												
CHI-Pat_1	1	isolée	GrA-40379	5385 ± 30 BP	4335-4074	Groningue (Pays-Bas) ?	Groningue (Pays-Bas)	AMS			suffisant	-20.8	11.0		39.7	14.0	3.3	IsoA	6.3	0.20	540	164	IsoA
CHI-Pat_2	2	B	GrA-39956	5385 ± 30 BP	4546-4373	Groningue (Pays-Bas) ?	Groningue (Pays-Bas)	AMS			suffisant	-20.2	11.5	3.4	41.9	14.9	3.3	UCT	3.3	0.20	570	173	IsoA
CHI-Pat_4	4	B	GrA-33923	6100 ± 150 BP	5461-4686	Groningue (Pays-Bas) ?	Groningue (Pays-Bas)	AMS		pb	suffisant	-20.8	10.7	3.4	41.5	14.7	3.3	UCT	4.7	0.20	555	168	IsoA
CHI-Pat_6	6	B	GrA-33943	5690 ± 40 BP	4681-4450	Groningue (Pays-Bas) ?	Groningue (Pays-Bas)	AMS			suffisant	-20.2	11.6	3.4	41.4	14.9	3.2	UCT	2.3	0.18	624	193	IsoA
CHI-Pat_7	7	A	GrA-33945	5710 ± 40 BP	4682-4459	Groningue (Pays-Bas) ?	Groningue (Pays-Bas)	AMS			suffisant	-20.6	10.5	5.2	42.4	15.3	3.2	UCT	5.7	0.19	591	183	IsoA
CHI-Pat_9	9	A	GrA-33946	5750 ± 40 BP	4703-4500	Groningue (Pays-Bas) ?	Groningue (Pays-Bas)	AMS			suffisant	-20.9	10.7	6.7	39.1	14.2	3.2	UCT	4.9	0.18	593	184	IsoA
BMT_H3	n° 3 - P11.6.355	secteur B - fosse B	SacA 17052	5555 ± 40 BP	4460-4338	Lyon	Saclay	AMS			contaminé	-21.7	10.7	3.2	43.6	13.5	3.8	UCT					
BMT_H8	n° 27on28 - couche 5	secteur B - couche	SacA 17053	5600 ± 40 BP	4503-4351	Lyon	Saclay	AMS			suffisant	-21.0	12.0	3.5	40.0	14.6	3.2	UCT					
BMT_H10	n° 33 - foyer 2	secteur A - foyer 2	SacA 17054	5420 ± 35 BP	4346-4177	Lyon	Saclay	AMS			suffisant	-20.7	11.2	1.5	37.1	12.9	3.3	UCT					
CHI-ED 4	P4				4681-4456						suffisant	-20.4	9.9	3.1	39.9	14.4	3.2	UCT					
Bon Poirier	1	sép 1			4500-4000 ?						contaminé	-25.7	10.7	5.5	62.5	8.8	8.2	UCT					
Bon Poirier	4	sép 1			4500-4000 ?						suffisant	-20.8	10.1	2.4	38.0	13.6	3.3	UCT					
Bon_PPPM	petite fosse près de la	sép 2			4344-4224						suffisant	-20.7	10.1	3.1	40.6	14.5	3.2	UCT					
NZ_H238	sépulture 238		GrA-32779	6150 ± 60	5293-4939 ?		Groningue (Pays-Bas)	AMS			contaminé	-22.0	11.5	0.5	11.5	3.1	4.3	UCT					
NZ_H239	sépulture 239		GrA-32810	5890 ± 35	4840-4692 ?		Groningue (Pays-Bas)	AMS			suffisant (ultrafiltration)	-20.9	10.0	0.7	41.3	13.7	3.5	UCT					

(suite)

- Enfin, pour **quatre sujets**, le collagène que nous avons analysé s'est révélé **contaminé** (en dépit des prétraitements) : le rapport C/N dépasse la gamme attendue pour un collagène bien conservé. Parmi ces échantillons :
  - GLN 245B présentait une date aberrante (2833-2475 cal BC) et nos résultats confirment qu'il faille l'exclure,
  - BMT H3 se trouve dans la fourchette acceptable pour ce site, néanmoins, le %C élevé observé au regard du %N indique probablement la présence de contaminants contenant du carbone récent malgré les prétraitements effectués, qui pourraient induire un rajeunissement de l'échantillon – il serait plus prudent d'écarter cette date,
  - Bon-Poirier 1 pour lequel nous n'avons pas trouvé d'information,
  - NZ H238 présentait une date probablement trop ancienne. Dans ce dernier cas, les paramètres mesurés dans notre étude permettent d'écarter définitivement cette date : le collagène est trop mal préservé. Par ailleurs, si nous avons finalement obtenu des résultats fiables pour NZ H239 (la sépulture voisine et indiscutablement contemporaine à la précédente sur la base de leur typologie superposable ; cf. Chap2.VIII.1.d), il faut noter que le collagène était particulièrement mal conservé pour ces deux échantillons : le rendement d'extraction était inférieur à 1 mais nous avons « forcé » l'extraction du collagène par la méthode d'ultrafiltration afin d'obtenir suffisamment de matière pour les analyses. Si pour le premier (H238) le collagène s'est révélé définitivement mal conservé et même si nous avons pu obtenir de bons résultats pour le second (H239), la qualité médiocre du collagène de ces deux sujets invite à remettre en doute non seulement la première datation (la plus ancienne) mais également la seconde, également jugée peut-être trop ancienne d'après les paramètres archéologiques (cf. Chap2.VIII.1.e).

Concernant le S, aucune altération supplémentaire n'a été relevée. Un seul échantillon (Mon\_99-374) n'a pas présenté suffisamment de collagène pour réaliser le dosage isotopique du soufre parmi ceux sélectionnés, mais celui-ci a été effectué sur le collagène restant des précédentes analyses (C et N) et n'a rien à voir avec la qualité du collagène transmis.

Finalement, nous avons croisé nos critères de conservation du collagène (rendement d'extraction, %C, %N et C/N) avec les moyennes des datations calibrées obtenues pour chacun des sites (les résultats sont identiques avec les dates non calibrées). Les résultats sont présentés sur la Figure C5. 2. Aucune corrélation n'apparaît et nous n'avons pas poussé plus avant les tests de corrélation : les meilleurs critères de conservation n'indiquent pas des dates différentes par rapport aux critères les moins bons. Rappelons que le collagène est considéré suffisamment bien conservé lorsque son rendement

d'extraction est supérieur à 1% (1mg/g), sa concentration en C et en N élémentaire supérieure à 30% et 11% respectivement et lorsque le rapport C/N est compris entre 2,9 et 3,6, voir entre 3,1 et 3,4 pour plus de précision (Ambrose 1990 ; DeNiro 1985 ; van Klinken 1999). Il serait bien sûr utile de combiner ces critères et de tester les corrélations site par site et par secteur, mais en l'état actuel des données, cela ne nous semble pas pertinent. NB : la conservation du collagène peut également varier d'un os et d'un fragment osseux à l'autre pour un même individu.

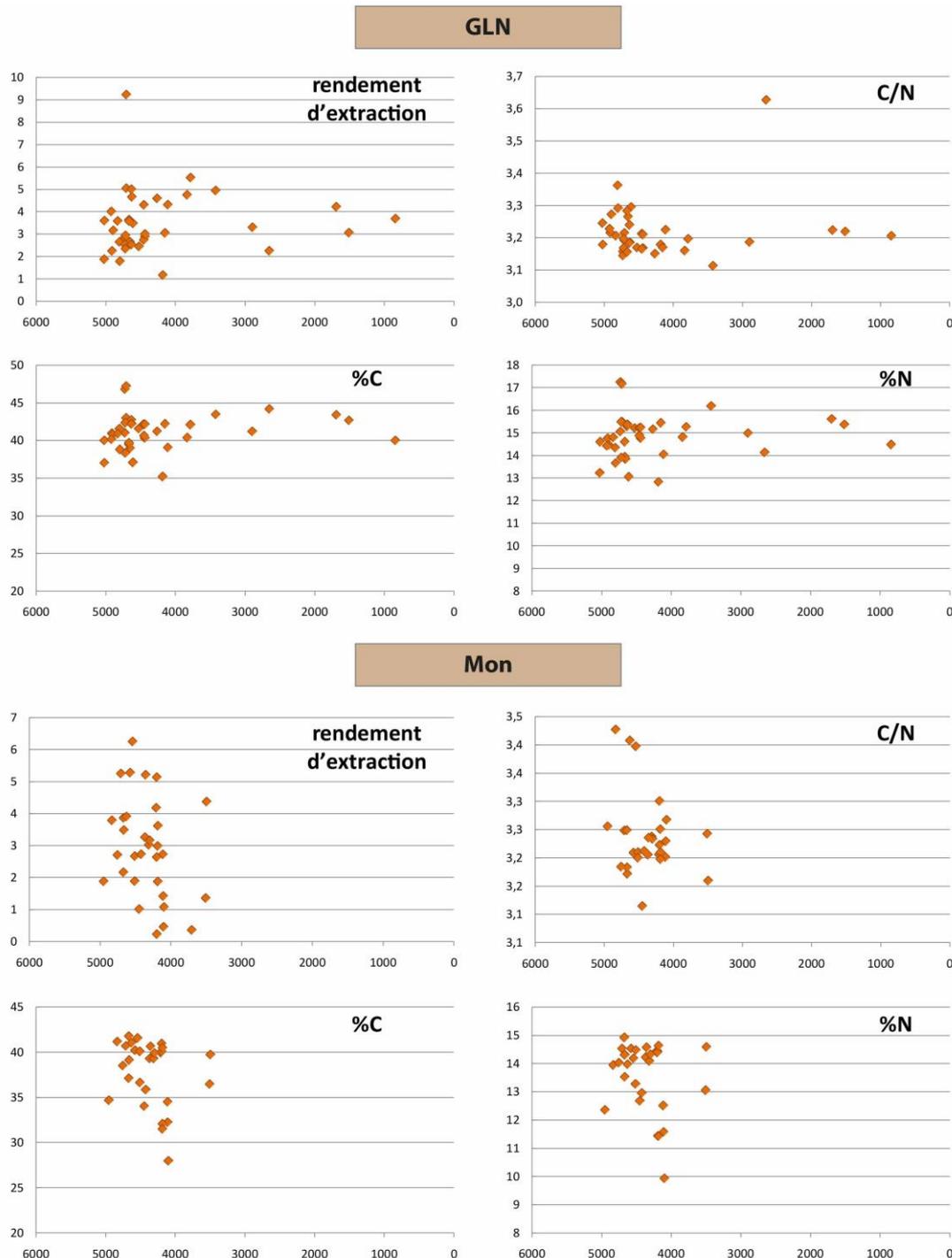
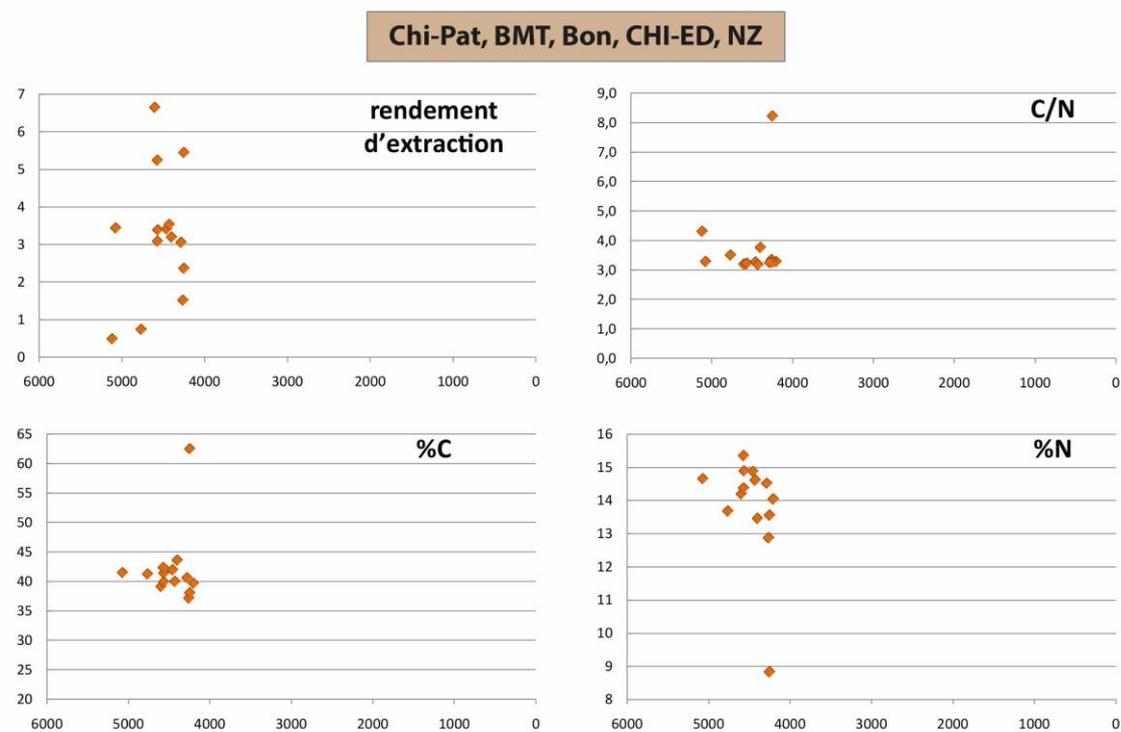


Figure C5. 2 : Critères de conservations du collagène obtenus dans ce travail (rendement d'extraction, %C, %N et C/N) en fonction des datations. Aucune corrélation n'apparaît.



(suite)

### III.2.a. Conclusions

En définitive, la composition isotopique et élémentaire obtenue dans notre travail ne permet pas d'expliquer au cas par cas l'écart observé entre les dates ni les aberrations mises en évidence. Lorsque le collagène extrait dans ce travail était mal conservé (d'après les critères du rendement d'extraction, des %C et %N et du C/N), les dates correspondantes sont aussi bien cohérentes archéologiquement qu'aberrantes, et *vice versa*, les dates aberrantes ne correspondent pas seulement à des collagènes dégradés. Evidemment, ces résultats n'indiquent pas que les collagènes étaient suffisamment bien conservés pour les datations, ni que les traitements pour éliminer les contaminants humiques aient été suffisants à tous les coups – les datations radiocarbone sont particulièrement sensibles à la contamination (e.g. Devièse *et al.* 2021 ; Devièse *et al.* 2019 ; Talamo *et al.* 2021) – et ils ne peuvent certes pas non plus nous enjoindre à écarter l'ensemble des datations. Il serait particulièrement intéressant de connaître les %C, %N et rapport C/N des collagènes datés, lorsque ces derniers ont été mesurés (de même que les rendements d'extraction) et les critères de fiabilité retenus à l'époque par les différents laboratoires pour la datation radiocarbone (ainsi que de revoir éventuellement les méthodes d'extraction du collagène à la lumière des derniers développements techniques, celles-ci pouvant faire varier la qualité et le rendement de collagène ; Talamo *et al.* 2021). Néanmoins, nos résultats permettent de confirmer de façon générale que la **mauvaise conservation du collagène** est certainement en cause dans les **problèmes de datation** de ce corpus. La datation la plus ancienne du Nouzeau, notamment, incohérente avec l'interprétation archéologique, doit être écartée au regard de la qualité du collagène obtenue pour les analyses de la paléodiète.

Toutefois, la mauvaise conservation du collagène n'est pas rédhibitoire et les récentes avancées méthodologiques concernant la datation des spécimens archéologiques à partir non plus du collagène global mais de l'hydroxyproline (l'acide aminé contenant plus de 11% du carbone du collagène) permettrait d'accéder à un niveau bien supérieur de précision et de fiabilité et de dater des échantillons très dégradés et même contaminés (Deviese *et al.* 2018 ; Marom *et al.* 2013). Une nouvelle campagne de datations selon cette méthode offrirait probablement de grandes perspectives quant à la problématique locale et plus largement concernant le Néolithique français en permettant de préciser les phases d'occupation du Cerny et du Chasséen en particulier, documentant ainsi le lien très débattu entre ces cultures. D'autre part, si la consommation de poisson, qui vieillit les datations (cf. Chap2.IV.2.e), ne semble pas être un argument pertinent dans la région pour expliquer tous les problèmes de datation (bien que nous ne puissions pas non plus l'exclure dans certains cas), un nouveau programme de datation permettrait d'exclure définitivement cette hypothèse ou de quantifier l'impact d'un effet réservoir « d'eau douce ». Les nouvelles méthodes d'identification de la consommation de poisson offrent également des pistes prometteuses pour répondre à ces questions (Ishikawa *et al.* 2018).

### IV. Comparaison avec les sites Cerny au-delà de la micro-région

---

Une étude publiée très récemment par C. Cheung et collaborateurs (2021) offre un intéressant point de comparaison dans la région, présentant les résultats isotopiques de 113 échantillons de collagène osseux humain et de 90 animaux issus de 7 sites Cerny du Bassin parisien. Nous n'en ferons pas de synthèse ici et renvoyons directement à l'article, qui en compare d'ailleurs déjà les résultats avec ceux de notre étude, mais souhaitons mettre l'accent sur plusieurs points concernant la variabilité isotopique globale de ces sites et la place de la vallée de l'Yonne dans ce contexte. Une analyse plus poussée prenant en compte la variabilité géographique, archéologique et biologique de l'ensemble de ces groupes humains (en cours) offrira de précieux indices quant à la diversité culturelle et régionale et aux liens qu'entretenaient ces groupes entre eux. Elle permettra de mieux documenter la passerelle existant entre les sites Cerny du Bassin parisien et les sites, Cerny ou non, de la vallée de l'Yonne.

La carte de la Figure C5. 3A montre la position des sites Cerny (étoiles) présentés par C. Cheung et collaborateurs (2021) par rapport aux sites du micro-territoire analysés dans notre étude (triangles). Ces gisements sont localisés sur une aire bien plus vaste que celle de notre étude, au sein de différentes vallées (l'Yonne, l'Essonne, la Seine et la Marne) comprenant une plus large variété de substrats géologiques. Par soucis de simplicité de langage, nous rassemblerons dans cette section les sites de notre étude sous la dénomination « micro-territoire » et les sites de l'étude de C. Cheung et collaborateurs sous la dénomination « Cerny autres », puisque que certains sites du micro-territoire sont également attribués au Cerny (CHI-Pat et NZ).

## IV.1. Schéma général

L'analyse du  $\delta^{34}\text{S}$  de ces sites montre un **gradient** net avec la **géologie** locale (Figure C5. 3). Les **sites du micro-territoire** présentent dans l'ensemble de **plus faibles valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$**  (la différence est statistiquement significative d'après le test U de Mann-Whitney,  $p < 0,00$ ), mais également une **gamme de variation bien plus large** (de  $-10$  à  $+15,1\%$ )<sup>2</sup>, sans doute du fait de la géologie plus complexe dans la micro-région, plus proche du Massif du Morvan. Le détail de cette variation en  $\delta^{34}\text{S}$  est visible sur la Figure C5. 4 qui montre qu'elle est due notamment à la différence mesurée entre les herbivores domestiques et les cochons du micro-territoire. En revanche, les **espèces sauvages** (aurochs, cervidés et renard) du micro-territoire et des sites « Cerny autres » présentent des valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  **similaires** et homogènes (entre  $8$  et  $12\%$  approximativement). Ces espèces ont pu être chassées à l'écart des villages et des zones d'élevage du bétail. De plus, ces animaux se déplacent peut-être sur des territoires assez vastes pour homogénéiser leur signature isotopique (notamment aurochs et cervidés).

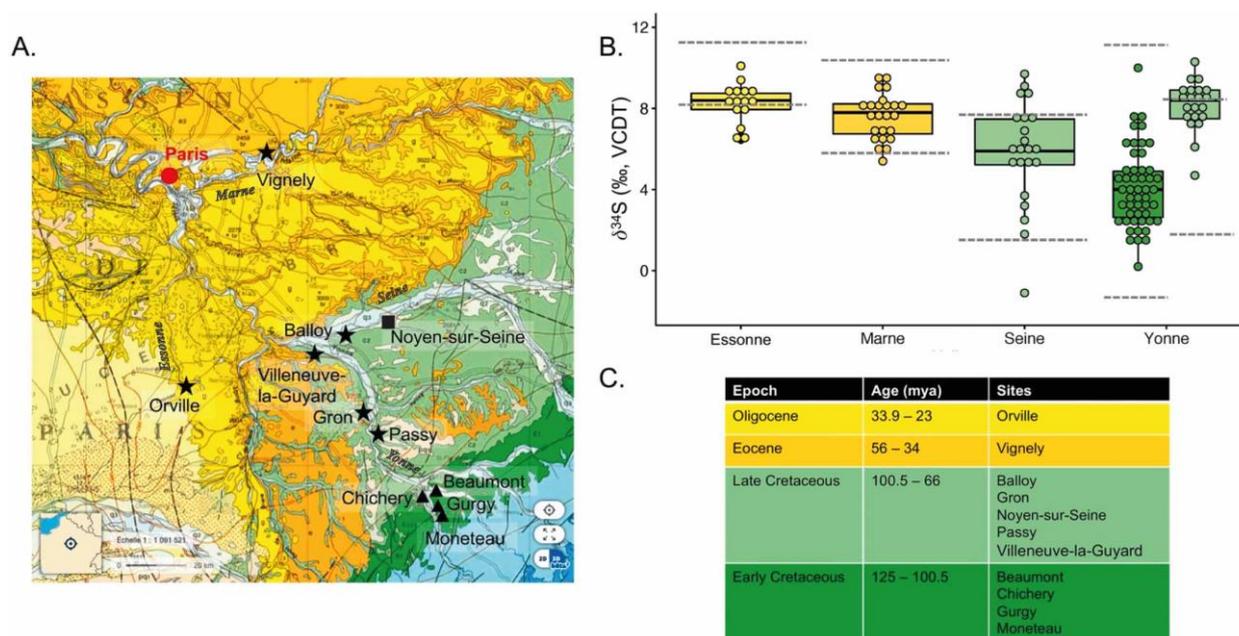


Figure C5. 3 : D'après Cheung *et al.*, 2021. Établissement d'un référentiel de  $\delta^{34}\text{S}$  pour la région du Bassin parisien : A. carte géologique de la région obtenue sur Géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr/>), indiquant les emplacements des sites mentionnés dans l'étude de Cheung *et al.*, 2021 par rapport à la ville moderne de Paris. ★ correspond aux sites Cerny avec des données de  $\delta^{34}\text{S}$  présentées récemment dans l'étude de Cheung *et al.*, 2021, ▲ correspond aux sites avec des données de  $\delta^{34}\text{S}$  provenant de notre étude (Rey *et al.*, 2017, 2019) et ■ correspond aux sites avec des données de  $\delta^{34}\text{S}$  provenant de rapports publiés précédemment (Bocherens *et al.*, 2011, Drucker *et al.*, 2018, Naito *et al.*, 2013). B. boxplot montrant les valeurs  $\delta^{34}\text{S}$  des humains des quatre vallées, avec un code couleur selon la géologie sous-jacente de chaque site respectif. Les lignes pointillées grises indiquent la gamme des écarts types par rapport aux moyennes des données de la faune terrestre de chaque vallée. C. Tableau montrant l'âge des quatre principaux types de substrat rocheux concernés.

<sup>2</sup> Ce résultat souligne la grande variabilité déjà mise en évidence. Si l'on exclut les deux cochons de Beaumont présentant des valeurs extrêmes, la gamme de  $\delta^{34}\text{S}$  sur le micro-territoire se restreint de  $-4,5$  à  $12,4\%$ , ce qui reste plus variable que l'ensemble des échantillons Cerny des quatre vallées (de  $-1,1$  à  $11,3\%$ ).

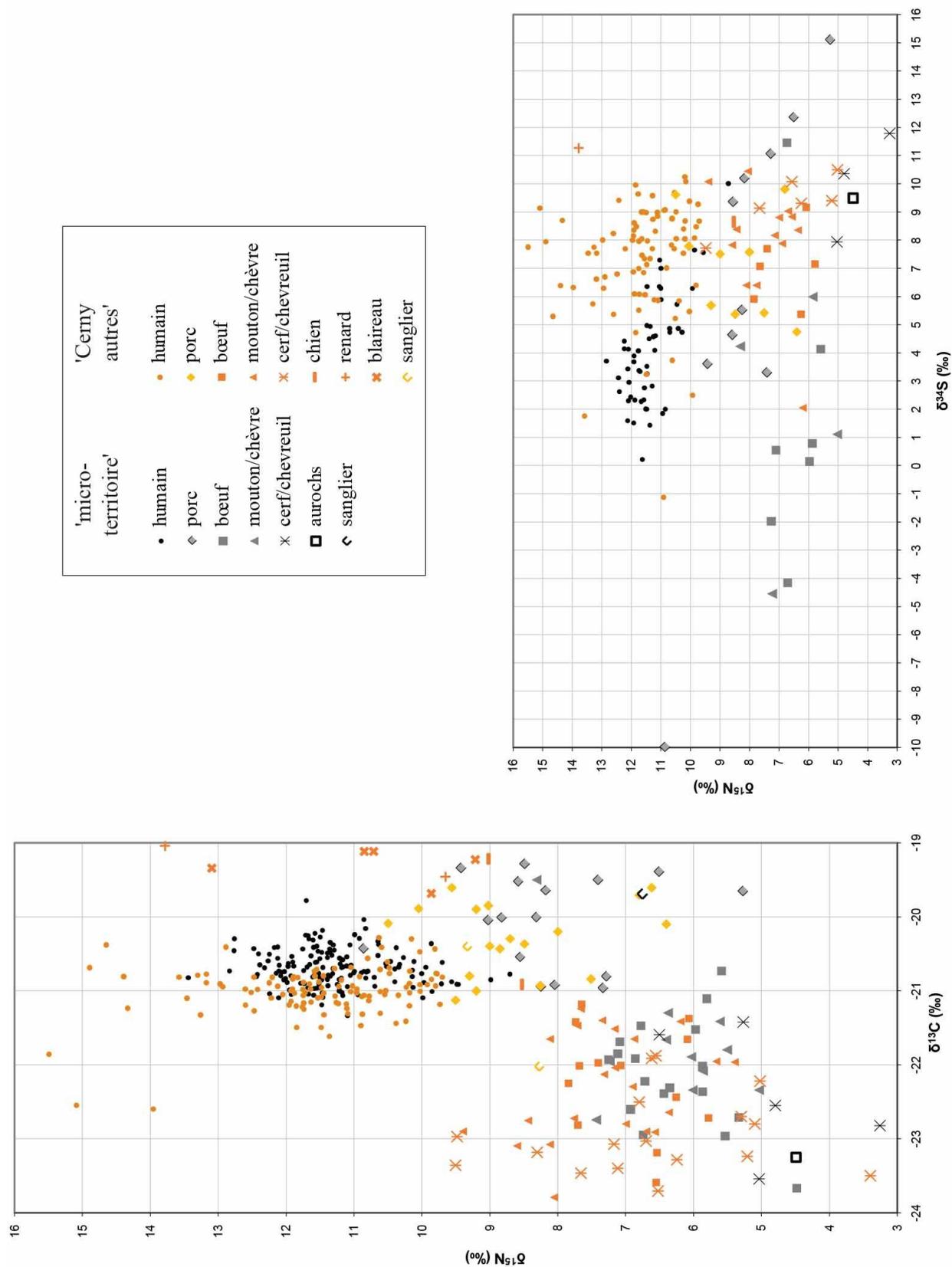


Figure C5. 4 : Dispersion des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) du collagène osseux des humains et animaux des sites du micro-territoire analysés dans ce travail (ronds) et des sites « Cerny autres » (triangles) récemment publiés par C. Cheung et collaborateurs (2021).

L'observation de la dispersion des valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  des sites « **Cerny autres** » révèle une **grande homogénéité entre les espèces**, qui diverge du schéma obtenu sur le micro-territoire en dépit de la plus grande variabilité géographique et géologique des sites « Cerny autres ». Ce résultat supporte l'hypothèse d'une gestion différentielle du bétail sur le micro-territoire : les cochons pourraient être gardés proche des habitations (sur la terrasse alluviale ?) alors que les herbivores seraient amenés à pâturer plus loin, comme cela a déjà été proposé pour d'autres sites néolithiques européens (Bentley et Knipper 2005). La différence en  $\delta^{34}\text{S}$  entre les cochons et les herbivores du micro-territoire pourrait être d'autant plus marqué que la différence entre le  $\delta^{34}\text{S}$  du substrat du Crétacé ancien (de plus de 100 millions d'années) et celui de la terrasse alluviale de l'Holocène (datant de moins de 10 000 ans) peut être grande – le  $\delta^{34}\text{S}$  local augmentant visiblement avec l'âge des couches géologiques sous-jacente (Figure C5. 3). Une analyse plus fine d'échantillons des diverses couches géologiques locales, dont les terrasses alluviales, permettrait sans doute de cartographier précisément la variation en  $\delta^{34}\text{S}$  de la région et d'étayer cette hypothèse.

Par ailleurs, les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  des sites « Cerny autres » sont globalement inférieures aux valeurs du micro-territoire, pour l'ensemble des espèces (la différence est statistiquement significative avec le test U de Mann-Whitney,  $p < 0,00$  ; Figure C5. 4) alors que le  $\delta^{15}\text{N}$  est globalement similaire. Ce résultat pourrait également témoigner de la variabilité géographique et géologique locale (cf. encadré). En revanche, la dispersion en  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  observée entre les espèces (herbivores vs cochons vs humains) sur le micro-territoire est la même que celle observée pour les sites « Cerny autres » et les ordres de grandeurs sont globalement maintenus. Cela est plutôt en faveur d'une **gestion similaire des animaux d'élevage** et de **patrons alimentaires semblables pour l'ensemble des sites de la région** considérés ici. Une comparaison régionale plus large est proposée dans la figure 10 de l'article Rey *et al*, 2019 (cf. II). Il est à noter que les humains dont le  $\delta^{15}\text{N}$  est supérieur à 13‰ ont tous moins de 4 ans et peuvent présenter dans leur squelette un signal d'allaitement ou physiologique toujours visible responsable de cet enrichissement en azote lourd.

Néanmoins, lorsque l'on compare les herbivores domestiques des sites « Cerny autres » avec ceux des sites de la microrégion, la différence en  $\delta^{15}\text{N}$  est statistiquement significative ( $p < 0,05$  d'après le test de Mann-Whitney). Il en est de même si l'on considère uniquement les bovins. En effet, les bovidés (ovins et ovicaprins) des sites « Cerny autres » présentent un  $\delta^{15}\text{N}$  sensiblement supérieur à celui des sites de la microrégion ; la différence est de l'ordre de 0,9 ‰ (la moyenne des herbivores « Cerny autres » est de  $7,1 \pm 0,9$  ‰ et la moyenne des herbivores de la microrégion est de  $6,3 \pm 0,8$  ‰). Si l'on considère uniquement les bovins, la différence est de l'ordre de 0,7 ‰ (la moyenne des bovins « Cerny autres » est de  $6,9 \pm 0,7$  ‰ et la moyenne des herbivores de la microrégion est de  $6,3 \pm 0,8$  ‰). En revanche, pour les humains et les cochons, la différence de  $\delta^{15}\text{N}$  entre les sites « Cerny autres » et les sites de la microrégion n'est pas statistiquement significative ( $p > 0,05$  d'après le test U de Mann-Whitney). Ce résultat induit une différence entre les humains et les herbivores, et en

particulier le bœuf (consommé majoritairement d'après les données de l'archéozoologie), inférieure pour les sites « Cerny autres » par rapport aux sites de la microrégion, et donc un niveau trophique sensiblement inférieur, peut-être en lien avec une moindre consommation de viande. Ce résultat est bien sûr à nuancer à l'échelle de chaque site et au regard de la variabilité globale.

En parallèle, la **faible fréquence de caries** mesurée dans la population Cerny (Thomas 2011) la rapproche des populations de chasseurs-cueilleurs plutôt que d'agriculteurs consommateurs de céréales riches en glucides. Ce résultat supporte l'hypothèse d'une **grande consommation de ressources animales**. L'étude de l'état sanitaire bucco-dentaire des populations du micro-territoire (en cours) permettra de comparer directement les fréquences carieuses, notamment, entre les groupes « Cerny autres » et du micro-territoire et au regard des résultats isotopiques. L'analyse texturale des micro-usures dentaires sera discutée ci-après (Chap9.I.4.d).

NB : Plusieurs études ont montré que les valeurs absolues mesurées dans différents laboratoires et/ou dont les échantillons ont été préparé selon différentes méthodes ne sont pas toujours directement comparables en dessous d'un certain seuil (celui-ci correspondrait à 0,6‰ pour  $\delta^{13}\text{C}$  et 0,9‰ pour  $\delta^{15}\text{N}$  d'après l'étude de la variation inter-laboratoires de Pestle *et al.* 2014, voir aussi par exemple Goude 2007 ; Mion 2019). Le calcul des MMDs (*Minimum Meaningful Differences* ou différences minimales significatives) offrirait une comparaison plus précise. Néanmoins, la différence majoritaire en  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  et non en  $\delta^{15}\text{N}$  pourrait militer en faveur d'une variabilité biologique et non instrumentale et méthodologique.

Ici tous les échantillons « Cerny autres » ont été analysés au laboratoire Iso-Analytical Ltd (Crewe, Royaume-Uni), de même qu'une partie de nos échantillons de la micro-région. En revanche, les méthodes d'extractions du collagène sont sensiblement différentes, mais aucune n'utilise l'ultrafiltration ni la déminéralisation à l'EDTA (Acide Ethylène Diamine Tétra-acétique), susceptibles de faire varier plus largement les valeurs isotopiques (cf. Chap4.I et Cheung *et al.* 2021).

## IV.2. Variabilité inter-groupes chez les humains

La Figure C5. 5 montre la dispersion des valeurs isotopiques du collagène osseux **entre les différents sites** et rappelle les différences déjà discutées entre ces derniers selon les paramètres funéraires et culturels (Cheung *et al.* 2021).

De façon générale, la **variation isotopique de l'azote** des sites du **micro-territoire** est **plus large** que la variation isotopique des sites Cerny, qui occupent pourtant un territoire bien plus vaste (Cheung *et al.* 2021, p. 13). Cela reflète vraisemblablement une **alimentation sensiblement plus homogène au Cerny** et en particulier pour les **nécropoles monumentales** à structures de type Passy (STP) en comparaison des nécropoles non monumentales et des sites non-Cerny.

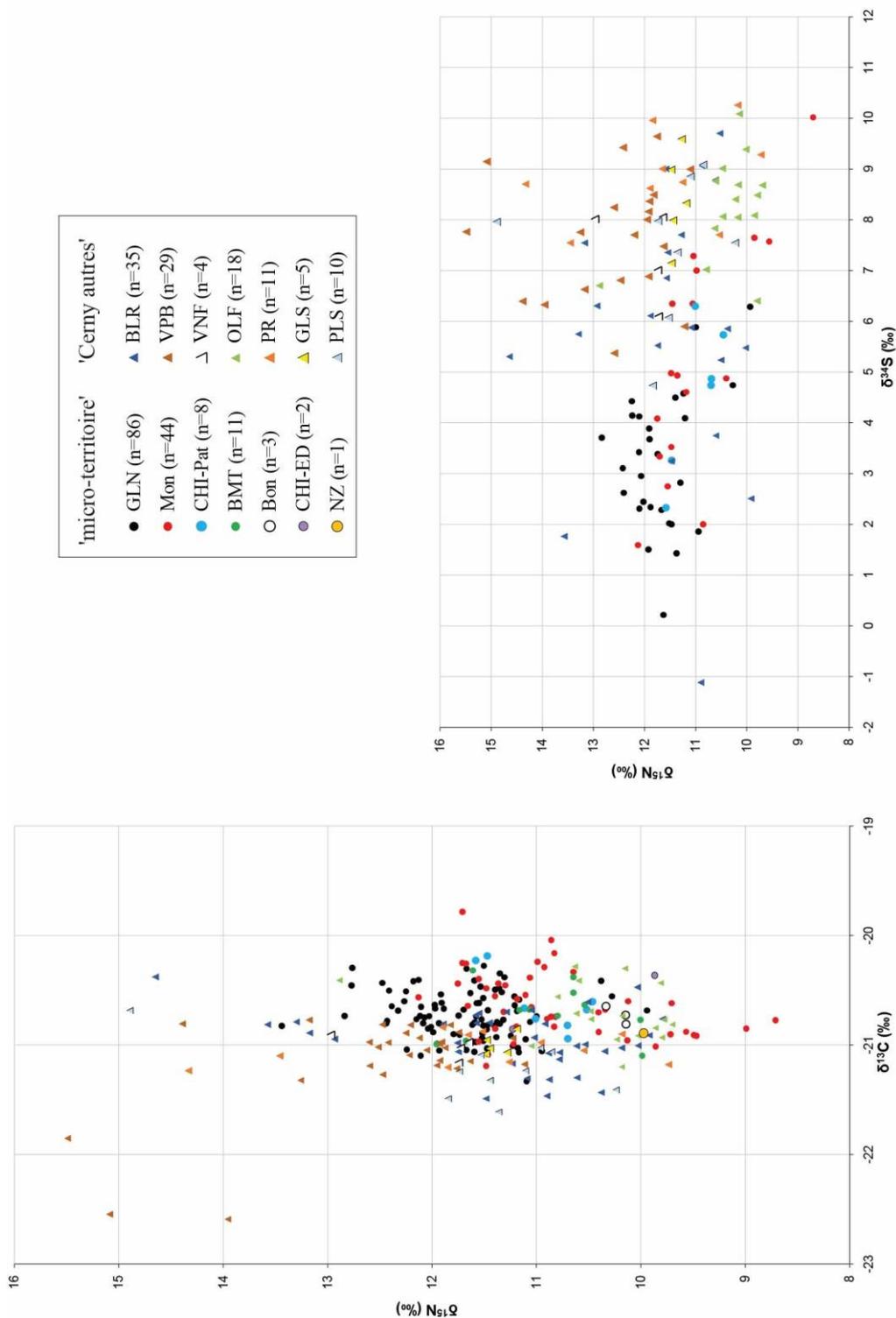


Figure C5.5 : Dispersion des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) du collagène osseux des humains des différents sites du micro-territoire analysés dans ce travail (ronds) et des sites « Cerny autres » (triangles) récemment publiés par C. Cheung et collaborateurs (2021). BLR = Balloy « Les Réaudins », VPB = « Vignely « La Porte aux bergers », VNF = Vignely « La Noue Fénard », OLF = Orville « Les Fiefs », PR = Passy « Richebourg », GLS = Gron « Les Sablons », PLS = Passy « La Sablonnière ».

En particulier, la comparaison des nécropoles non monumentales Cerny **CHI-Pat** et **VPB** indique une différence en  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ . Celle-ci pourrait être due à l'environnement et la distance séparant les deux

sites, ou bien, pour  $\delta^{13}\text{C}$  en particulier, à une différence culturelle (tous les sites « Cerny autres » présentent un  $\delta^{13}\text{C}$  inférieur aux sites du micro-territoire, quelle que soit leur position géographique). En revanche, les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  des deux sites sont globalement similaires (si l'on applique à VPB la correction de -1‰ en  $\delta^{15}\text{N}$  proposée par Cheung *et al.* 2021<sup>3</sup>) et sont en moyenne inférieures à celles de GLN et Mon (Figure C5. 5). Si ces résultats tendent à rapprocher CHI-Pat de VPB en tant que nécropoles non monumentales Cerny, chacun de ces sites reste pourtant dans la variabilité 1) du micro-territoire pour l'un et 2) des autres sites Cerny pour l'autre (comme le soulignent les auteurs), mettant une nouvelle fois en exergue la place particulière de la micro-région de la vallée de l'Yonne, entre le Serein et la Baulche.

En outre, il est à noter que l'étude de C. Cheung et collaborateurs (2021) n'a mis en évidence **aucune différence significative entre les sexes** dans les sites « Cerny autres », à la différence des valeurs enregistrées dans le micro-territoire.

---

<sup>3</sup> Les échantillons provenant de la vallée de la Marne (sites de Vignely « La Porte aux Bergers » et Vignely « La Noue Fénard », respectivement VPB et VNF) présentent un  $\delta^{15}\text{N}$  supérieur de 1‰ en moyenne et cette différence doit être prise en considération lors de la comparaison des échantillons entre eux, ne reflétant pas une différence alimentaire mais bien une variation environnementale (une correction de -1‰ doit être appliquée aux valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  des humains de VPB et VNF avant toute comparaison avec les sites voisins ; Cheung *et al.* 2021).

## Chapitre 6. Analyses des isotopes stables (C, N, S) dans la dentine

### I. Article 3

---

*Sex and age-related social organization in the Neolithic: a promising survey from the Paris Basin*

Léonie REY, Stéphane ROTTIER, Frédéric SANTOS, Gwenaëlle GOUDE

Publié dans : **Journal of Archaeological Science: Reports** en 2021

**DOI** : <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103092>

Le **matériel supplémentaire** est disponible en Annexe B3

Et sur Zenodo : <http://doi.org/10.5281/zenodo.4047736>



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Archaeological Science: Reports

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jasrep](http://www.elsevier.com/locate/jasrep)

## Sex and age-related social organization in the Neolithic: A promising survey from the Paris Basin

Léonie Rey<sup>a,\*</sup>, Stéphane Rottier<sup>a</sup>, Frédéric Santos<sup>a</sup>, Gwenaëlle Goude<sup>b</sup>

<sup>a</sup> UMR 5199 - PACEA (A3P), Université de Bordeaux, Allée Geoffroy Saint Hilaire, CS 50023, 33615 Pessac Cedex, France

<sup>b</sup> Aix Marseille Univ, CNRS, Ministère de la Culture, LAMPEA, Aix-en-Provence, France

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Stable isotope ratios  
Incremental dentine  
Early farmers  
Diet  
Mobility

### ABSTRACT

Previous studies have identified differences based on sex in adult diet and age-based changes in the funerary treatment of children in the Neolithic of northern France. This preliminary study investigates sex-based differences and age-related changes in diet and mobility in childhood in comparison to adulthood.

Nineteen individuals from the Neolithic Yonne valley (Paris Basin) were analyzed for  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  in dentine of the second permanent molar (M2) and 15 also for  $\delta^{34}\text{S}$ . Analyses were performed on different tooth parts depending on the individuals and targeted different age groups: bulk coronal (ca. 2.5–8.5 years; n = 16 adults) and root dentine (ca. 8.5–12 years; n = 1 juvenile) and dentine microsections of the entire tooth (6 age groups between 2.5 and 16 years old; n = 2 adults).

Higher  $\delta^{15}\text{N}$  values in dentine than in adult bone reflect children's dietary specificity, possibly due to their nutritional needs during growth. There is no mean isotopic difference in coronal dentine between males and females under 9 years old. Dietary sex-based division occurs later. Two isotopic shifts are observed on the incremental profiles, indicative of social transitions, possibly sex-related, around 8–9 and 14 years old. The variability of  $\delta^{34}\text{S}$  values highlights different mobility patterns between the sexes and argues for patrilocal. These results echo previous studies and offer a promising perspective which must be investigated further on a larger sample size.

### 1. Introduction

Studies of eating behaviors and mobility patterns help address the issue of social organization in human communities. Stable carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ), nitrogen ( $\delta^{15}\text{N}$ ) and more recently sulfur ( $\delta^{34}\text{S}$ ) isotope analyses are routinely used in archaeology to reconstruct the diet and mobility of past populations (e.g., Fernández-Crespo et al., 2020; Goude et al., 2020b; Moghaddam et al., 2016; Nehlich et al., 2014; Siebke et al., 2020). While bulk collagen stable isotope analysis of bones and teeth is the common approach (a brief methodological background is provided in Supporting Information 1), sequential analysis of dentine recently demonstrated the possibility of tracking individual early life history at a high resolution (e.g., Beaumont et al., 2013a, 2015; Goude et al., 2020a; King et al., 2017). Moreover, sampling in both bone and teeth enables identifying differences registered at distinct moments of life.

This paper presents a preliminary investigation of dietary and mobility patterns in childhood, including sex-based differences and age-related changes, in a population with known sexual differences in adult

food consumption (Rey et al., 2017, 2019). The samples come from three Middle Neolithic sites located in the Yonne Valley (Paris Basin, France; Fig. 1): Gurgy "Les Noisats" (GLN), Monéteau "Macherin" (Mon) and Chichery "Sur les Pâturaux" (CHI-Pat). Archaeological and anthropological information is available in Chambon et al. (2013) and summarized in Rey et al. (2019). Previous isotopic analyses of  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{34}\text{S}$  of bone collagen have pinpointed significant differences between adult males and females (Rey et al. 2019). On the other hand, trace element analysis (Ba/Ca; Sr/Ca) on tooth enamel did not support those sex-based differences in trophic levels during the early phases of life (Rey et al. under review). This inconsistency throughout the life course raises the question of the emergence of sexual division and social organization during a person's lifespan. For the Neolithic period, when social differences become more pronounced, sexual division is one of the most frequently addressed topics in human bioarchaeology (e.g., Cintas-Peña and García Sanjuán, 2019; Goude et al., 2019; Knipper et al., 2017; Robb and Harris, 2018; Siebke et al., 2020), but it is somewhat less well-known in children (e.g., Bickle and Fibiger, 2014; Fernández-Crespo

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [leonie.rey@u-bordeaux.fr](mailto:leonie.rey@u-bordeaux.fr), [leonie.rey@outlook.fr](mailto:leonie.rey@outlook.fr) (L. Rey).

<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103092>

Received 11 March 2021; Received in revised form 4 June 2021; Accepted 10 June 2021  
2352-409X/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

et al., 2018).

Furthermore, in northern France, the study of funerary practices has highlighted two age related changes, around 8–9 and 14–15 years of age, probably linked to a change in social status (Le Roy et al. 2018; Supporting Information 2). “Adolescence”<sup>1</sup> could be a transitional period towards adulthood in the social organization of these farmers, including changes in diet and/or mobility.

To investigate this issue and track possible variations in lifetime, carbon, nitrogen and sulfur stable isotope ratios ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{34}\text{S}$ ) were analyzed in the dentine and compared to previous results obtained in bone collagen. While  $\delta^{13}\text{C}$  is rather linked to environmental variations,  $\delta^{15}\text{N}$  is a good indicator of trophic level, as high  $\delta^{15}\text{N}$  values often reflect high animal protein intake (as well as breastfeeding signal; e.g. Lee-Thorp, 2008; Tsutaya and Yoneda, 2015). In addition, S isotope ratios vary among resources depending on location and can reflect both dietary specificities and/or mobility patterns (for a review of methodologies, see Nehlich 2015). A previous study on bone collagen (Rey et al. 2019) provides more details about specific isotopic variations linked to diet and mobility in this population.

## 2. Material and methods

### 2.1. Sample selection and age alignment

Stable carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) and nitrogen ( $\delta^{15}\text{N}$ ) isotope analysis was performed on dentine samples of 19 human second molars (M2), 15 of which were also analyzed for sulfur ( $\delta^{34}\text{S}$ ). Four samples did not contain sufficient collagen to conduct S analysis after the C and N analyses (which required here between 0.9 and 1.1 mg for CN and ca. 8 mg for S).

Most of the analyses were performed on the bulk coronal dentine of completely formed permanent teeth of adult individuals (Fig. 2). The crown only was sampled for two reasons: to match, in terms of age signal, other analyses performed in the enamel and to avoid averaging samples of widely different age categories. According to the London Atlas of Queen Mary University of London (AlQahtani et al. 2010), the crown of the second molars form approximately between  $2.5 \pm 0.5$  and  $8.5 \pm 0.5$  years of age (stages Ci to Crc). For these samples, the comparison with bone values thus reflects the difference between childhood and adulthood. For one child sample (GLN 215B), whose age-at-death was estimated to be between 8 and 14 years old (according to the stage of dental development of several teeth and considering the broadest range of variation given by AlQahtani et al. 2010, namely including minimum and maximum development stages), the root dentine was analyzed to directly compare it to the bone results. This root (of a lower second molar) was incompletely formed (stage R1/2). Its growth period (stages Ri to R1/2) starts in average at  $8.5 \pm 0.5$  and stops in average at  $12 \pm 0.5$  years old according to AlQahtani et al. (2010).

Moreover, two complete permanent molars belonging to two adults were cut into six horizontal sections of ca. 2 mm each for incremental dentine analysis (Fig. 2). This sectioning strategy (thicker than in other studies) was chosen to ensure sufficient data was available, considering the already known heterogeneity of the collagen preservation in the samples. This strategy only allows for preliminary insights into the potential of such an approach. The approximate age ranges represented by each section were estimated according to Czermak et al. (2020). Since the actual growth rate within past populations is not known, it is generally assumed that dentine develops at a regular rate of approximately 4–6  $\mu\text{m}$  per day (Dean and Scandrett 1995). The duration (years)

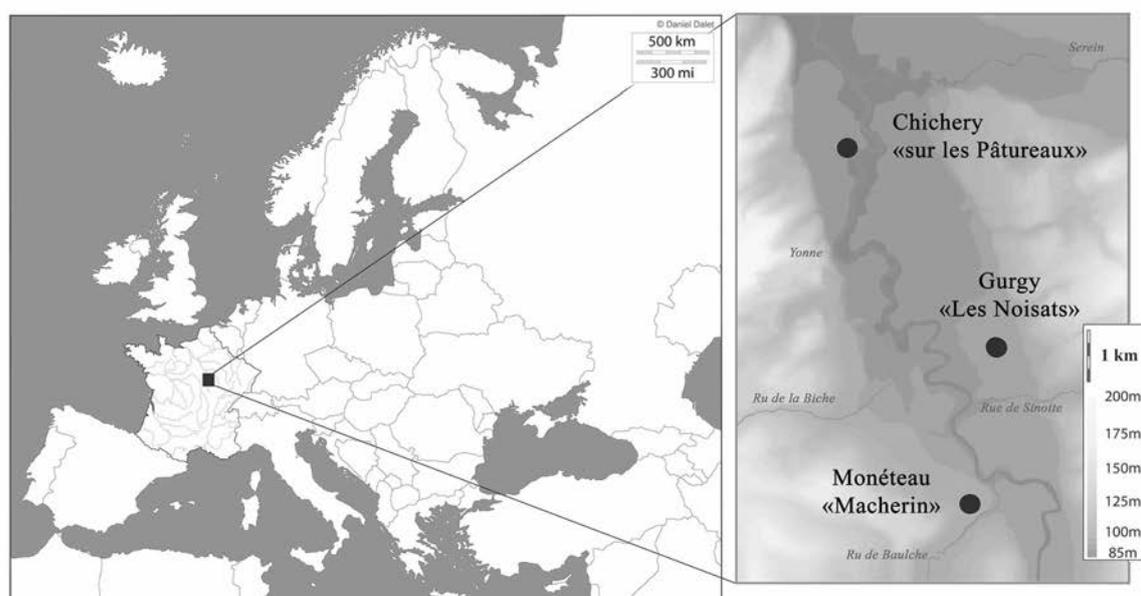
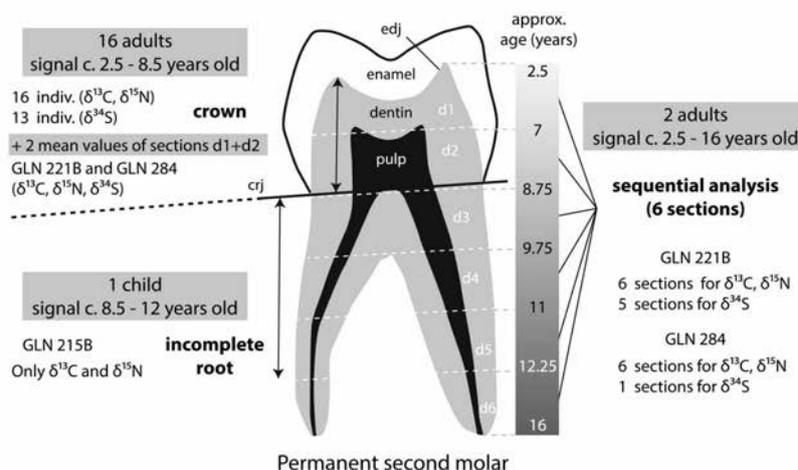


Fig. 1. Location map of the sites mentioned in the text, modified after Chambon et al. (2013).

<sup>1</sup> The word “adolescence” is used here to refer to the transitional period between the end of childhood and the beginning of adulthood, in this study defined between 8 and 9 years and 14–15 years of age according to the results published in Le Roy et al. (2018) and here. This definition is not meant to necessarily apply elsewhere and the cultural definition of this concept is not discussed here.

in the development of dentine was usually divided by the number of sections according to the tooth length so as to obtain the midpoint age for each section (Beaumont and Montgomery 2015). However, some studies have shown that the growth rate is variable throughout the formation of a tooth (Dean and Cole, 2013; Scharlotta et al., 2018). Recently, Czermak et al. (2020) reassessed the age-alignment from a “more detailed reading of AlQahtani et al. (2010)” and proposed a new



**Fig. 2.** Summary of sampling selection: quantity of samples and analyses performed, tooth part sampled and corresponding age. Edj = enamel dentine junction, crj = crown root junction.

approach by using various growth rates according to anatomical tooth areas. The present study relies on this calibration method to assign an approximate age range to each section (a calibration scheme is provided in Supporting Information 3) and from this the midpoint age estimation. The latter will be used in order to simplify the discussion, but the error range is displayed on the graphs. According to AlQahtani et al. (2010), the dentine of M2 starts to develop at 2.5 +/- 0.5 years and ends at 16 +/- 0.5 years (from stage Ci to Ac). The development of both teeth sampled was completed. Fig. 2 shows the estimated approximate ages delimiting each section. Considering the large thickness of the sections, the variability in growth rate is averaged, like the isotopic ratios registered, making the possible error in age determination less significant. The sections d1 and d2 were averaged to obtain a coronal dentine mean (Fig. 2) in order to compare them to the other bulk coronal dentine samples.

The main archaeological and biological data of the samples are provided in Supporting Information 4. Since isotope analyses are destructive, as much information as possible was recorded for future research purposes. All observations, external metrics and pictures were recorded. For several teeth, calculus samples were collected for potential later investigations and an impression of the crown was taken for dental microwear texture analysis (DMTA; see Rey et al. 2016 for preliminary work). Some teeth had also been previously scanned ( $\mu\text{CT}$ ) for an internal tooth structure study (Le Luyer et al. 2016). All the individuals had already been analyzed for  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{34}\text{S}$  in bone collagen (Rey et al., 2017, 2019) and also for radiogenic strontium ( $^{87/86}\text{Sr}$ ) and trace element (Ba/Ca, Sr/Ca, Mg/Ca) ratios in dental enamel of the same teeth by means of laser ablation (Rey et al., under review). The teeth had thus already been cut and embedded in resin for these previous studies, and the remaining parts were used here. The samples were selected for their archaeological interest, on the basis of the previous geochemical results and for their less damaged condition. However, some caries and strong dental wear were also recorded for a few other teeth when no other unworn M2 was available (Supporting Information 4). These teeth will be considered with caution because they can include part of tertiary dentine (Nanci, 2003; van Rensburg, 1987). In any case, the loss of dentine (even for the most worn teeth) remains negligible and should not have had an influence on the results (interpretation in terms of age, especially, must be the same given the already large average considered and the actual interindividual variation).

## 2.2. Sample preparation and analyses

The teeth had been previously cut longitudinally from the tip of the cusps to the tip of the roots along the bucco-lingual axis. Mesial parts had been used in a previous study (Rey et al. under review). The remaining distal half of each tooth were either entirely used for dentine micro-sampling analysis (two individuals) or re-cut in half and then perpendicularly at the crown root junction (crj), for the bulk coronal or root dentine analysis (Fig. 2). The remaining fragments will be used in future analyses. The teeth were then processed for collagen extraction according to the local laboratory standard protocol (Goude et al. 2019) and, for the incremental stable isotope analysis, the protocol described in Beaumont et al. (2013b) (more details in Supporting Information 1). Freeze-dried collagen was then analyzed by EA-IRMS (Europa Scientific EA analyzer coupled to Europa Scientific 20–20 IRMS; IsoAnalytical Ltd, Crewe, UK). Isotopic values were corrected using at each run in-house standards calibrated with IAEA standards. Internal error (calculated on within-run replicate standards) is 0.1‰ for CN and 0.2‰ for S. The quality of collagen and the reliability of isotopic data were controlled according to international recommendations: C > 30%, N > 10% (Ambrose 1993), C/N between 2.9 and 3.6 (DeNiro 1985), S between 0.15 and 0.35%, C/S between 300 and 900 and N/S between 100 and 300 (Nehlich and Richards 2009).

Statistical analyses were performed using R 4.0.2 (R Core Team 2020) within Org mode (Schulte et al. 2012). Percentile bootstrap with 9999 replicates was used to compute confidence intervals for differences in means or variances among groups (Zieffler et al. 2011). These confidence intervals were computed at both the classical nominal level (95%) and an adjusted level provided by Hesterberg (2014) as a correction for small samples. Permutation tests were also used to derive empirical p-values in group comparisons. More theoretical details, along with additional results and all the R code written for this study is available as Supporting Information 5, and the R packages used are detailed in the Appendix. The present study's data are available online on Zenodo (Rey et al. 2020).

## 3. Results and discussion

All samples provided reliable results according to the quality control criteria (Table 1). The isotopic results are plotted in Fig. 3 and summarized in Table 2. There is no difference in isotopic values for either teeth with caries or with strong wear (Supporting Information 6). For the bulk coronal dentine samples,  $\delta^{13}\text{C}$  values range from -21.3 to -20.3‰

**Table 1**  
Summary of dentine isotopic values and previous data for bone collagen (C, N, S) results. †Mean values of micro-sections d1 + d2 (†Table 3). ‡Sex determined by genetic analysis (Rivollat et al. 2020), §(Rey et al. 2019).

ID	sex	status	tooth sample	tooth development stage	corresp. age group	%C dentine	%N dentine	%S dentine	C/N dentine	C/S dentine	N/S dentine	$\delta^{13}C$ (‰) dentine	$\delta^{15}N$ (‰) dentine	$\delta^{34}S$ (‰) dentine	$\delta^{13}C$ (‰) bone§	$\delta^{15}N$ (‰) bone§	$\delta^{34}S$ (‰) bone§
GLN 212	F	adult	LLM2 crown	complete	[2.5-8.5]	45.1	17.0	0.20	3.1	610	197	-20.8	12.1	3.3	-21.0	12.2	4.1
GLN 215B	F†	child	LLM2 root	R 1/2	[8.5-12]	36.7	12.4		3.4			-21.3	11.1		-21.1	10.9	1.9
GLN 220	M	adult	LLM2 crown	complete	[2.5-8.5]	41.7	15.5	0.18	3.1	608	194	-21.1	12.5	2.3	-20.5	12.3	4.4
GLN 225	M	adult	ULM2 crown†	complete	[2.5-8.75]†	43.2†	16.1†	0.18†	3.1†	624†	199†	-20.8†	12.6†	2.4†	-20.7	12.8	3.7
GLN 231A	M	adult	ULM2 crown	complete	[2.5-8.5]	39.9	14.9		3.1			-21.3	10.8		-20.8	11.4	4.5
GLN 243A	M	adult	ULM2 crown	complete	[2.5-8.5]	39.5	15.2	0.20	3.0	525	173	-21.2	11.2	3.9	-20.5	12.5	2.6
GLN 243B	F	adult	ULM2 crown	complete	[2.5-8.5]	39.6	14.8	0.19	3.1	560	179	-20.8	12.1	2.4	-20.6	11.2	4.1
GLN 243B	F	adult	ULM2 crown	complete	[2.5-8.5]	38.1	14.1	0.19	3.1	535	170	-20.9	12.3	3.9	-20.9	11.5	2.0
GLN 257	M	adult	URM2 crown	complete	[2.5-8.5]	39.9	14.7	0.18	3.1	579	183	-20.5	12.4	0.2	-20.8	12.4	3.1
GLN 264	F	adult	ULM2 crown	complete	[2.5-8.5]	39.0	14.2	0.21	3.2	499	156	-21.0	12.2	5.0	-20.7	11.0	5.9
GLN 269	F†	adult	URM2 crown	complete	[2.5-8.5]	41.9	15.8	0.21	3.1	539	174	-20.5	12.5	3.7	-20.7	11.6	2.4
GLN 284†	F	adult	URM2 crown†	complete	[2.5-8.75]†	41.5†	15.4†	0.20†	3.1†	558†	177†	-20.3†	12.8†	2.8†	-20.7	9.9	6.3
GLN 294	F†	adult	LRM2 crown	complete	[2.5-8.5]	38.6	14.0		3.2			-20.7	12.4		-20.8	11.2	1.4
GLN 315	F	adult	URM2 crown	complete	[2.5-8.5]	39.6	14.6	0.19	3.1	560	178	-20.4	12.5	-2.6	-20.7	11.9	2.3
GLN 317	M	adult	LLM2 crown	complete	[2.5-8.5]	38.7	14.3	0.20	3.1	520	165	-20.9	11.8	4.2	-20.7	12.1	2.3
Mon 04-87	F	adult	LLM2 crown	complete	[2.5-8.5]	39.3	14.6		3.1			-20.8	11.2		-20.8	11.2	4.6
Mon 04-110	M	adult	ULM2 crown	complete	[2.5-8.5]	39.2	14.5	0.22	3.1	474	151	-20.4	11.8	2.5	-20.4	11.8	4.1
CHI-Pat 2	M	adult	LRM2 crown	complete	[2.5-8.5]	40.4	15.0	0.19	3.1	557	177	-20.6	12.1	3.0	-20.2	11.5	3.3
CHI-Pat 4	F	adult	ULM2 crown	complete	[2.5-8.5]	40.0	14.9	0.19	3.1	547	175	-20.7	12.1	-1.4	-20.8	10.7	4.7

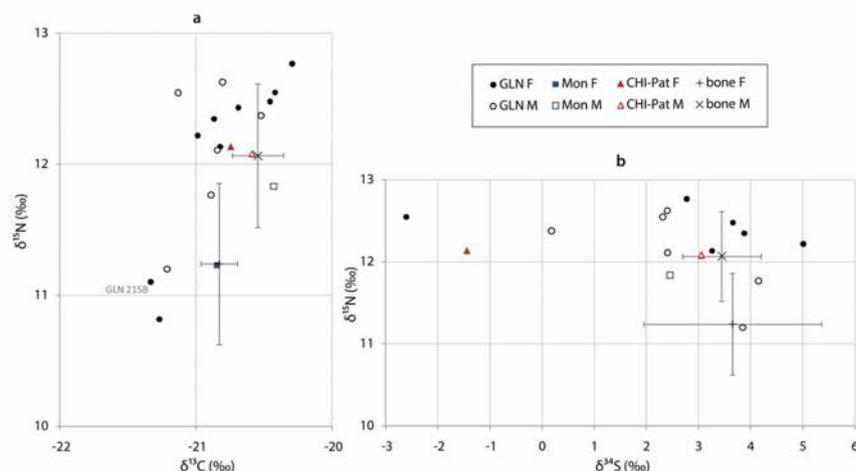


Fig. 3. Distribution of isotopic results in dentine by site and by sex. The bone mean results by sex from a previous study (Rey et al. 2019) are given for comparison. (a)  $\delta^{13}\text{C}$  vs.  $\delta^{15}\text{N}$  and (b)  $\delta^{34}\text{S}$  vs.  $\delta^{15}\text{N}$ .

Table 2

Summary of isotopic mean ratios in adult bone vs. coronal dentine samples and of female vs. male dentine samples. †The bone and the root dentine samples of the child GLN 215B are excluded.

Tissue	n	Mean $\delta^{13}\text{C}$ (‰) ± sd	Mean $\delta^{15}\text{N}$ (‰) ± sd	n	Mean $\delta^{34}\text{S}$ (‰) ± sd
adult bone†	18	-20.7 ± 0.2	11.6 ± 0.7	15	3.7 ± 1.3
coronal dentine†	18	-20.8 ± 0.3	12.1 ± 0.5	15	2.4 ± 2.1
Sex (dentine)	n	Mean $\delta^{13}\text{C}$ (‰) ± sd	Mean $\delta^{15}\text{N}$ (‰) ± sd	n	Mean $\delta^{34}\text{S}$ (‰) ± sd
F	11	-20.8 ± 0.3	12.0 ± 0.7	7	2.1 ± 2.9
M	8	-20.8 ± 0.3	12.1 ± 0.5	8	2.6 ± 1.2

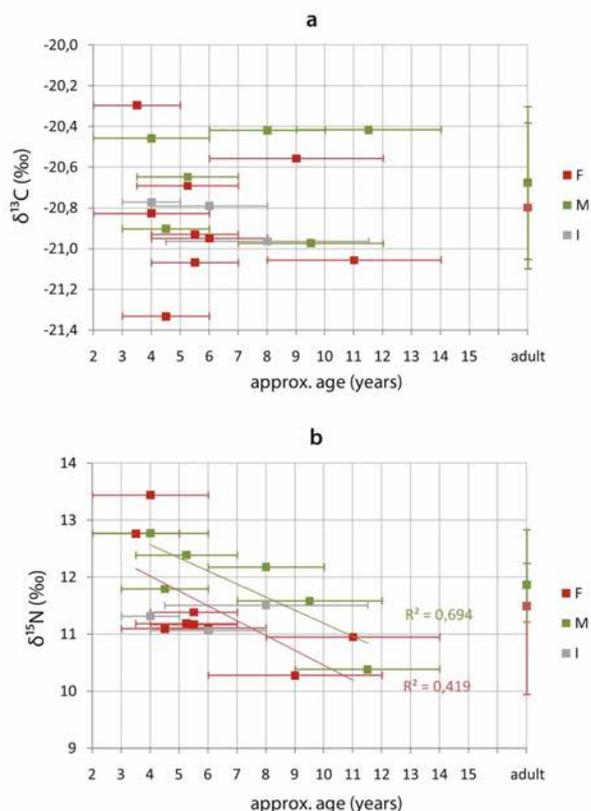
( $\Delta = 1$ ,  $n = 18$ ),  $\delta^{15}\text{N}$  from 10.8 to 12.8‰ ( $\Delta = 2$ ,  $n = 18$ ) and  $\delta^{34}\text{S}$  from -2.6 to 5‰ ( $\Delta = 7.6$ ,  $n = 15$ ). For the root dentine sample (child GLN 215B), the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values fall within these ranges, although they are among the lowest values (Fig. 3, Table 1). It is noteworthy that these values are similar to those from the bone of the same individual (Table 1), both tissues (tooth and bone) corresponding to a signal registered during two overlapping time periods (Beaumont et al. 2018). Furthermore, according to the combination of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  ratios (Fig. 3), the samples from CHI-Pat and Mon seem to cluster “by site”, supporting a previous tendency observed between these sites (Rey et al. 2019). However, considering the overall uniform dispersion of values (Fig. 3, Fig. 1 in Supporting Information 5), the sites will be considered as a whole in the rest of the paper.

### 3.1. General comparison between dentine and bone

Globally, the  $\delta^{15}\text{N}$  data from coronal dentine samples are higher than in adult bone collagen (mean = 12.1‰ in dentine vs. 11.6‰ in bone, with an adjusted 97% percentile bootstrap interval of [0.0111, 0.9333] for the difference between coronal dentine and adult bone means; Table 2, Supporting Information 5). For the sake of consistency regarding the signal period, the child GLN 215B (bone and root dentine samples) is excluded from the comparison which only concerns adult bone and coronal dentine samples. Conversely, the observed  $\delta^{13}\text{C}$  values for dentine and bone are closer (Fig. 3) and the percentile bootstrap confidence intervals do not support a difference in mean values between adult bone and coronal dentine (Table 2, detailed results available in Supporting Information 5). For  $\delta^{34}\text{S}$ , the dentine values are on average

slightly lower than the bone values (Table 2). Considering the great variability, this difference is small and the bootstrap intervals give only a weak or even no real difference between dentine and bone means (Supporting Information 5). This suggests that part of the resources consumed in childhood (especially by the individuals with the lowest values) may come from another environment. This will be discussed later. For  $\delta^{15}\text{N}$ , most of the dentine samples are higher than 12‰, while four samples are clearly lower, near 11‰, among which three from GLN have also lower  $\delta^{13}\text{C}$  values (one of them is the “older” root sample GLN 215B; Fig. 3). This pattern supports the trend previously observed in bones: most of the children (<15 years old) presented extreme  $\delta^{15}\text{N}$  values (>12 and  $\approx$  or < 11‰) compared to the adult group (mainly comprised between 11 and 12.5‰; Fig. 6a in Rey et al. 2019). In both cases (high and low  $\delta^{15}\text{N}$  values relative to adult bones), this may express the physiological metabolism linked to growth, reflecting particular nutritional needs (de Luca et al. 2012) as observed in previous archaeological studies (Beaumont et al. 2018). The influence of metabolic processes involved during growth on the  $\delta^{15}\text{N}$  values of bone collagen is poorly understood, and while some studies record an increase in  $\delta^{15}\text{N}$  in younger individuals (e.g. Ambrose 2002), others conversely record a decrease (e.g. Fuller et al. 2004) or no significant impact (e.g. Waters-Rist and Katzenberg 2010). Moreover, some physiological stress (more prevalent in children) can also impact the  $\delta^{15}\text{N}$  values: if nutritional stress (malnutrition) or some pathologies can cause an increase in  $\delta^{15}\text{N}$  due to the recycling of body proteins (e.g. Fuller et al., 2005; Mora et al., 2021), several diseases can inversely lead to a decrease of  $\delta^{15}\text{N}$  (e.g. Goude et al., 2020a; Hatch et al., 2006; Petzke et al., 2006). It is also possible that children consumed another diet than that of adults due to their social age, or that some individuals, those with the most different dentine values relative to adult bone, come from another environment (see later). Furthermore, the inclusion of a breastfeeding signal could lead to higher  $\delta^{15}\text{N}$  ratios (Beaumont et al., 2015; Tsutaya and Yoneda, 2015). However, here the ratios are averaged over the duration of the signal from 2.5 to 8.5 years old  $\pm$  0.5 and it is unlikely that breastfeeding was still significant during this period. For the Neolithic period, children are expected to be weaned around 2–3 years of age, although this may be delayed in many circumstances (Ash et al., 2016; Goude et al., 2020a; Stuart-Macadam and Dettwyler, 1995). Further information regarding the potential length of weaning can be obtained by analyzing first molars from the same individuals.

A comparison with previous isotope data obtained in children’s bones is proposed in Fig. 4. A decrease in  $\delta^{15}\text{N}$  values with age is observed in the bones of children under 14 years old, especially for



**Fig. 4.** Distribution of carbon (a) and nitrogen (b) isotopic values of children's bones from GLN (those who did not survive into adulthood) according to their age-at-death and compared to the isotopic values of adults' bones from the same site. These results come from a previous study (Rey et al. 2019) and the sex of the children was recently determined by genetic analysis (publication forthcoming).

males (b). However, the bone samples of children recorded the signal of those who did not survive into adulthood. They may have had specific nutrition related to their health condition (e.g., Beaumont et al., 2018; Goude et al., 2020a). The lowest values, in particular, may reflect a specific diet or some (patho-)physiological stress associated with a positive nitrogen balance (Petzke and Fuller, 2012). On the contrary, the highest  $\delta^{15}\text{N}$  values probably include a breastfeeding signal, as bone records a signal averaged over several years before death. The samples with the highest values also seem to correspond to the youngest children. When excluding the extreme values, the difference between males and females is statistically significant ( $p < 0.05$  according to Mann-Whitney), conversely to what is observed in the teeth (see later). Although the small sample size may have biased this observation, it is possible that deceased (possibly as a result of illness) boys and girls did not receive the same treatments/consideration according to their sex. Boys who died young may have had a higher protein-rich diet than little girls. Because bone considers a much longer period than the teeth (especially when, as in the present study, only the crown is considered) and because this signal may be further disturbed by the specific physiological or pathological status of these children who died young (and also because of the broad estimated range of age at death of some of these children), it is difficult and not relevant to link any isotopic variation observed in the bone with a specific age, due to different incorporation times of the elements and mineralization rates (Beaumont et al. 2018).

### 3.2. Sex-related variations in dentine

While higher  $\delta^{15}\text{N}$  values are observed in dentine compared to the bones of all adults, it is noteworthy that the bone-dentine difference in  $\delta^{15}\text{N}$  is emphasized by the low  $\delta^{15}\text{N}$  values of female bones (Fig. 3). Previous results have shown that in adult bone, the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  ratios were statistically different between males and females (Rey et al. 2019). In dentine, there is no evidence of differences in means between males and females for  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{34}\text{S}$  (Table 2, Supporting Information 7, detailed results available in Supporting Information 5). This supports previous trace element results in dental enamel of the same teeth: the Ba/Ca and Sr/Ca ratios were not different according to sex (Rey et al. under review). This may indicate that dietary sexual division occurs after the M2 crown formation is completed, so after 9 years. However, the signal is averaged over the duration of tooth development and the change may occur before the crown is completely formed without it being visible here. This will be further discussed with the incremental dentine profiles. Notwithstanding, the study of funerary practices in Middle Neolithic northern France has highlighted substantial differences in grave goods and the position of the bodies both around 8–9 and 14–15 years of age (Supporting Information 2; Le Roy et al. 2018). Such changes of treatment in death reflect a change in the role or place of the individuals within society, namely a change in social status. These observations allow identifying different social age ranks: children under 8–9 years, adolescents between 8 and 9 and 14–15 years, and adults over 14–15 years of age. A concomitant change in dietary habits, revealed by isotopic data, would not be inconsistent. Over 14–15 years old, males and females were probably feeding differently, maybe according to specific sex-related activities, as shown for example in ethnological studies (e.g., Berbesque et al., 2011; Kaplan et al., 2009; Umezaki et al., 2016). Males could have had a more animal protein rich-diet for example (sex-related dietary differences are further discussed by Rey et al. 2019). Sexual division of labor has been proposed for Prehistoric Europe (e.g., Villotte and Knüsel, 2014; Wunsch and Gibaja Bao, 2003). On the contrary, children under 8–9 years old (maybe up to 14) were in all likelihood consuming the same resources regardless of their sex. Fig. 5 shows for each individual the isotopic difference registered between dentine and bone. Except the juvenile GLN 215B, all individuals are adults so the comparison mainly reflects childhood vs. adulthood. It is particularly evident that the  $\delta^{15}\text{N}$  values of females almost systematically decrease from dentine to adult bone, contrarily to the ones of males for whom they vary indifferently and to a lesser extent. This confirms that the dentine-adult bone difference is mainly sex-related and the transition from childhood to adulthood involves primarily dietary change for females and/or mobility from different isotopic environments.

### 3.3. Sulphur isotope ratios and mobility patterns

Furthermore, the observed variance of  $\delta^{34}\text{S}$  in dentine is slightly wider for females, who have the lowest and the highest values (Fig. 3b, Fig. 5 in Supporting Information 5). The variance is also wider in dentine (with values ranging from  $-2.6$  to  $5\%$ ) than in bone ( $1.4$ – $6.3\%$ ), with a lower mean in dentine ( $2.4$  vs.  $3.7$  in bone; Table 2). Although the permutation test could not provide any strong evidence in favor of this difference ( $p = 0.117$ ), this might indicate a more varied environment for females between 2 and 9 years of age, potentially associated with different origins (genetic work is in progress within the ANR program Interact). Fig. 5 highlights a great difference in  $\delta^{34}\text{S}$  values between childhood and adulthood in some females, without correlation with C and N isotopes. This can reflect different origins. On the other hand, the individual  $\delta^{34}\text{S}$  dentine-bone differences are also relatively high for males, possibly indicating a certain degree of mobility too. These results support an ongoing study of strontium (Sr) isotope ratios that suggested a sex-related mobility pattern with possible foreign origins for females (Rivollat et al, forthcoming). The question of patrilocality has been



Fig. 5. Individual differences in isotopic ratios between dentine and bone for females and males. \*No δ<sup>34</sup>S value.

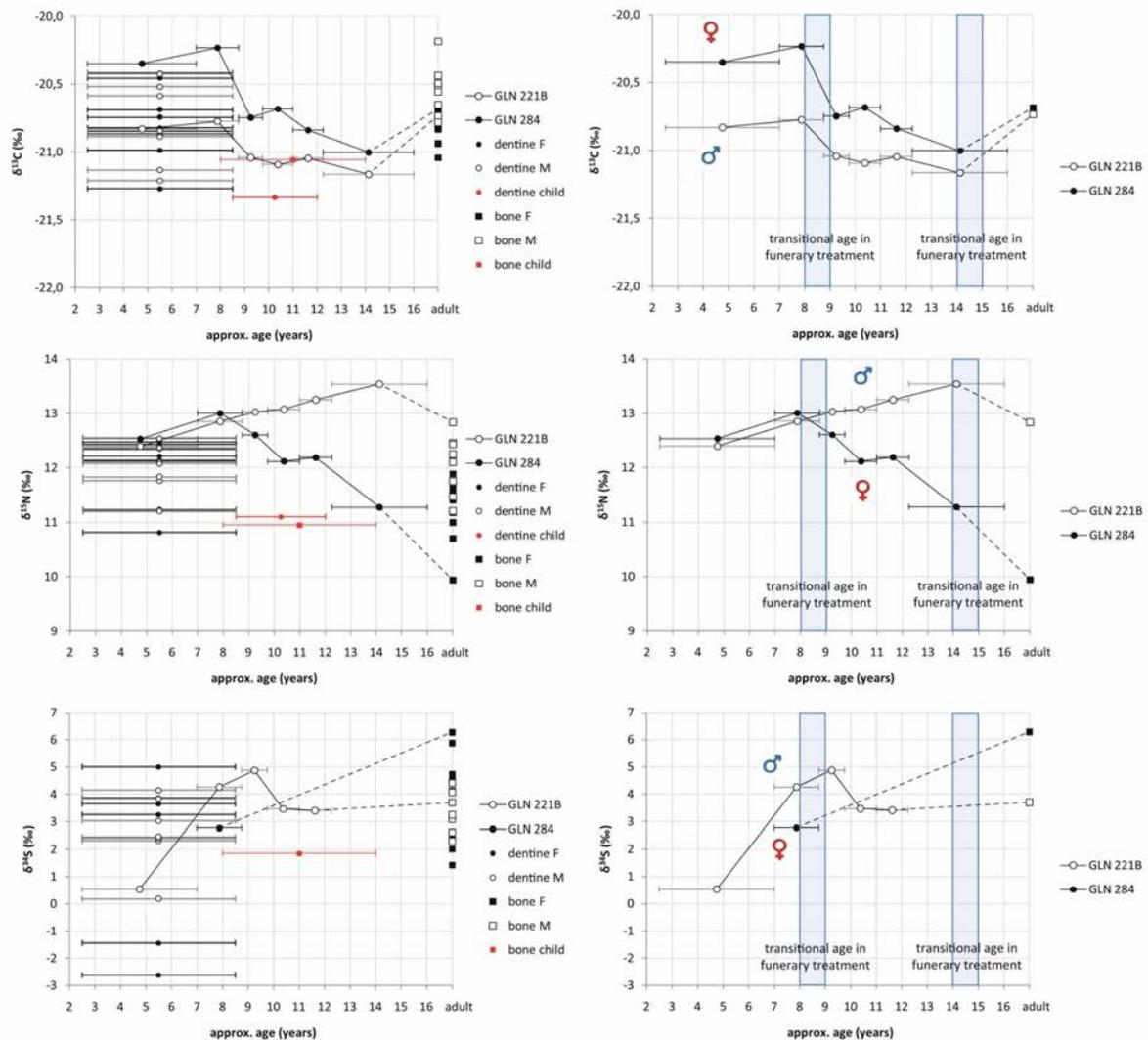
raised several times in similar contexts (Bentley et al., 2012; Goude et al., 2020b, 2019; Knipper et al., 2017; Rasteiro and Chikhi, 2013; Rivollat et al., 2017) and a genetic study combined to new Sr isotopic data is currently in progress to specifically address this issue.

### 3.4. Refining the age-alignment with incremental dentine analysis

The incremental section values along with the bulk dentine samples are represented against age in Fig. 6. Isotopic results of each dentine section are given in Table 3. The S analysis was conducted on the remaining collagen after C and N analysis, which was only sufficient to provide results for 5 sections of GLN 221B and 1 section of GLN 284. Globally, the male GLN 221B presents higher δ<sup>15</sup>N values and lower δ<sup>13</sup>C values than the female GLN 284. For δ<sup>13</sup>C, both patterns are rather similar although that of the female is more variable. The difference between them decreases with age, though it is never very significant, even before 8 years of age where it remains lower than 0.6‰ (Fig. 6). Between the midpoint ages of 8 and 9, the δ<sup>13</sup>C ratios of both suddenly decrease and become less variable, slightly decreasing, until 14 years of age. Then they are slightly higher in adulthood (bone signal). On the contrary, for δ<sup>15</sup>N the patterns are rather the opposite and the difference between both individuals increases with age (Fig. 6). Until 9 years old, both individuals have among the highest δ<sup>15</sup>N values of all the samples. Then, those of the male GLN 221B increase again until age 14, reaching the highest value of all the samples, and then slightly decreasing between 14 and adulthood, where it still remains the highest value of all the samples. Inversely, those of female GLN 284 strongly decrease between 8 years old and adulthood, stabilizing around 10–12 years old, to switch from the highest to the lowest value of all the samples. This indicates that the diet of these children may be enriched in <sup>15</sup>N regardless of sex until 8–9 years of age and that differentiation (possibly sexual) occurs later. This supports and specifies the previous results observed on bulk dentine samples. A first shift could be identified around age 8–9, maybe mainly for female(s), and a second shift, although less evident, could be observed around 14 years old, possibly mostly in male(s). Although this must be observed on more samples, this already echoes the changes identified in the funerary practices around 8–9 and again at 14–15 years old (Fig. 6; Le Roy et al. 2018). Generally, it is not possible to distinguish male from female treatments when studying the remains

of children since their sex cannot be determined without a genetic assessment (which was the case for Le Roy et al. 2018). In such a context, this study shows that the present approach can highlight sex-specificities. However, both GLN 221B and GLN 284 were chosen precisely because they presented extreme values in bone, which may reflect a specific access to resources, maybe due to a particular social status or a physiological effect possibly associated to a health condition, although no pathologies were identified on the skeleton (Rey et al. 2019). It is therefore not excluded that factors other than dietary and environmental change, such as growth or physiological stress, might have been involved and would explain the variations observed between the curves. In addition, the difference between only two individuals of either sex may not reflect a real social distinction based on sex. More incremental dentine analyses are required to further define the age of dietary change (s) in this population and the possible sex-related specificities.

Nevertheless, this result is consistent with the concept of “middle childhood” proposed by different authors for past and present populations (e.g. Eccles, 1999, Bickle and Fibiger 2014). Based on a review of the literature on the Linearbandkeramic Culture (LBK) of the Early European Neolithic, Bickle and Fibiger (2014) suggest that from around 8 years of age and until puberty (the period may vary from one individual to another, according to the child’s capacity more than his chronological age) children may have start to be increasingly gender recognized. “Middle childhood” represents a period of biological and cognitive changes, where children develop different social relationships, roles and desire for autonomy (Eccles, 1999). As proposed for the LBK culture, at this age they could then learn to become adults and take part in gender-related tasks (Bickle and Fibiger 2014). In our study, this could correspond to an increasing differentiation in diets and/or mobility, probably associated with a gradual change in social status that could result in a division of labor between sexes with specific sex-related diets. For δ<sup>34</sup>S, the female GLN 284 also has the highest value in bone, but the dentine value falls within the range of all the bulk dentine samples. If this female spent her childhood in another environment, the S signature of this environment was not different to the local one. During adulthood, the high value can, on the contrary, reflect diet specificity. Indeed, the S isotope ratio is strongly linked to both the C and N isotope ratios (p < 0.05 according to a Spearman correlation, Supporting Information 8), mainly reflecting both the environmental and dietary



**Fig. 6.** On the left, isotopic ratios of bulk and incremental dentine samples by sex according to the corresponding estimated age. On the right, detail of the incremental dentine profiles of both a male and a female according to the corresponding estimated age and alignment with the transitional age identified through the study of funerary practices (Le Roy et al. 2018).

aspects, respectively. On the other hand, the male  $\delta^{34}\text{S}$  values are highly variable until the midpoint age of 10 years old, although still within the range of the whole sample (as there is only one data point for the female, a comparison of their  $\delta^{34}\text{S}$  variability is not possible). This is in line with a high degree of mobility in childhood, which has been previously proposed from bulk dentine results. To the authors' knowledge, this is the first time that high mobility for male children is proposed for the Neolithic period. Indeed, mobility may be characterized by several forms of movement: different origin vs. residential mobility, training period in a neighboring group or fosterage (Massard-Vincent 1996), or transhumance and herding outside the villages (Bentley and Knipper 2005). Further incremental dentine analysis and new strontium isotope results by laser ablation (in progress) could lead to a better understanding of the question of mobility by identifying the recurrence and the diversity of residential environments.

#### 4. Conclusion and perspectives

This preliminary work was conducted in addition to a set of various other analyses and aims to help establish an initial overview of social organization in the Neolithic correlated to sex and age in childhood. Along with the results from the study of funerary practices, the analyses presented here offer new insights and a promising perspective into the change of social status during childhood as revealed through diet. The combined results from a small set of bulk dentine samples and two incremental dentine analyses of both a male and a female helped identify two possible transitional steps during life. Children under 8–9 years of age in all likelihood consumed the same resources regardless of their sex, while some of them, mainly females, probably originated from other places. This raises once again the question of patrilocality in a Neolithic context. Furthermore, a new vision of early farmers' organization emerges: under approximately 10 years of age, the high variability of S values over time for GLN 221B may reflect certain mobility. This is not necessarily linked to a different geographic origin but may reflect

**Table 3**  
Elemental and isotopic ratios of incremental dentine sections for two individuals. The corresponding (corresp.) age groups and approximate (approx.) ages are rounded for the sake of clarity and because of the uncertainty that exists in age estimation.

ID	Sex	Tooth	Section	Corresp. age group	Corresp. approx. age	%C dentine	%N dentine	%S dentine	C/N dentine	C/S dentine	N/S dentine	$\delta^{13}\text{C}$ (‰) dentine	$\delta^{15}\text{N}$ (‰) dentine	$\delta^{34}\text{S}$ (‰) dentine
GLN 221B	M	ULM2	d1	[2.5-7]	5 ± 2.5	43.1	16.0	0.19	3.1	612	195	-20.8	12.4	0.5
			d2	[7-9]	8 ± 1	43.2	16.1	0.18	3.1	635	203	-20.8	12.9	4.3
			d3	[9-10]	9 ± 0.5	42.2	15.4	0.18	3.2	613	192	-21.0	13.0	4.9
			d4	[10-11]	10.5 ± 0.5	43.9	15.9	0.20	3.2	597	185	-21.1	13.1	3.5
			d5	[11-12]	11.5 ± 0.5	41.9	15.4	0.17	3.2	640	202	-21.0	13.2	3.4
			d6	[12-16]	14 ± 2	42.4	15.2	-	3.2	-	-	-	-	-
GLN 284	F	URM2	d1	[2.5-7]	5 ± 2.5	40.7	15.1	-	3.1	558	177	-	12.5	-
			d2	[7-9]	8 ± 1	42.4	15.7	0.20	3.1	558	176	-	12.5	2.8
			d3	[9-10]	9 ± 0.5	42.1	15.6	0.20	3.1	555	-	-	12.6	-
			d4	[10-11]	10.5 ± 0.5	43.1	15.9	-	3.1	-	-	-	12.1	-
			d5	[11-12]	11.5 ± 0.5	41.3	14.9	-	3.2	-	-	-	12.2	-
			d6	[12-16]	14 ± 2	39.6	13.6	-	3.4	-	-	-	11.3	-

occasional travel(s). As this is only observed in one individual, further analysis is needed to determine whether this type of mobility is a cultural trait, and whether it can be extended to other individuals. Moreover, around the age of 8–9 years, children presumably became adolescents, an intermediate step on the path to adulthood achieved at around 14–15 years of age when they became socially “gender-identified”. Considering the relatively low precision scale of this study and its preliminary approach, further analyses must be performed in order to better assess dietary and mobility variation throughout the lifespan. The combined analysis of first and third molars could allow, on the one hand, to identify the age of weaning according to sex through the first molar (see for example [Eerkens and Bartelink 2013](#)) and, on the other hand, to refine the transitional age from adolescence to adulthood through the third molar (although its growth period is much more variable; [Liveridge, 2008](#)). Moreover, this approach enables the assessment of sexual differences in children, while the study of funerary practices fails in this regard as the sex of deceased children cannot be reliably determined without genetic analysis.

**5. Data availability statement**

The authors declare that the data supporting the findings of this study are all available within the article, its [supporting information](#) (SI) files and online on Zenodo (<http://doi.org/10.5281/zenodo.4047736>).

**Funding**

This work was supported by the Institut Danone France/Fondation pour la Recherche Médicale 2015 partnership (Women and diet at the beginning of farming, 5th – 3rd millennium BC, France: a bio-anthropological approach; Dir. G. Goude 2016-2017; <http://institutdanone.org/nos-prix/femmes-alimentation-les-premieres-societes-a-gropastorales-ve-iiiie-millennaires-av-j-c-france-approche-bio-anthropologique/>) and funded by a ministerial grant from the Research National Agency as a program of prospects investments ANR-10-LABX-52 (project ‘Diversité biologique et culturelle de l’Homme de la fin de la Préhistoire à la Protohistoire’; dir: S Rottier; Université de Bordeaux, LaScArBx-ANR; 2012–14).

**Declaration of Competing Interest**

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

**Acknowledgement**

The authors are very grateful to Philippe Chambon, Aline Thomas, Mélie Le Roy, Mona Le Luyer and Maïté Rivollat who provided information or material for this study. This paper has been reviewed by a language editing assistant, Karina Gerdau (<https://karinagerdau.com/>) and by Pauline Cross and Alizé Lacoste-Jeanson whom the authors thank.

**Appendix. R packages used**

- boot 1.3–25 ([Canty and Ripley 2020](#))
- lawstat 3.4 ([Gastwirth et al. 2020](#))
- resample 0.4 ([Hesterberg 2015](#))

**Appendix A. Supplementary data**

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103092>.

## References

- AlQalhtani, S.J., Hector, M.P., Liversidge, H.M., 2010. Brief communication: The London atlas of human tooth development and eruption. *Am. J. Phys. Anthropol.* 142 (3), 481–490.
- Ambrose, S.H., 1993. Isotopic analysis of paleodiets: methodological and interpretive considerations. In: Standford, M. (Ed.), *Investigations of Ancient Human Tissue*. Gordon and Breach Science Publishers, Langhorne, pp. 59–130.
- Ambrose, S.H., 2002. Controlled diet and climate experiments on nitrogen isotope ratios of rats. In: Ambrose, S.H., and Katzenberg, M.A. (eds.), *Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers. pp. 243–259.
- Ash, A., Francken, M., Pap, I., Tvrdý, Z., Wahl, J., Pinhasi R., 2016. Regional differences in health, diet and weaning patterns amongst the first Neolithic farmers of central Europe. *Scientific Reports* 6:29458–29458.
- Beaumont, J., Atkins, E.-C., Buckberry, J.o., Haydock, H., Horne, P., Howcroft, R., Mackenzie, K., Montgomery, J., 2018. Comparing apples and oranges: Why infant bone collagen may not reflect dietary intake in the same way as dentine collagen. *Am. J. Phys. Anthropol.* 167 (3), 524–540.
- Beaumont, J., Gledhill, A.R., Lee-Thorp, J.A., Montgomery, J., 2013a. Childhood diet: a closer examination of the evidence from dental tissues using stable isotope analysis of incremental human dentine. *Archaeometry* 55:277–295.
- Beaumont, J., Gledhill, A.R., Lee-Thorp, J.A., Montgomery, J., 2013b. Protocol for sectioning human dentine: expanded from Methods 1 and 2. Written as a response to questions arising from: Beaumont J, Gledhill A, Lee-Thorp J and Montgomery JA (2013) Childhood diet: a closer examination of the evidence from dental tissues using stable isotope analysis of incremental human dentine. *Archaeometry*. 55(2): 277–295.
- Beaumont, J., Montgomery, J., 2015. Oral histories: a simple method of assigning chronological age to isotopic values from human dentine collagen. *Ann. Hum. Biol.* 42 (4), 407–414.
- Beaumont, J., Montgomery, J., Buckberry, J.o., Jay, M., 2015. Infant mortality and isotopic complexity: New approaches to stress, maternal health, and weaning. *Am. J. Phys. Anthropol.* 157 (3), 441–457.
- Bentley, R.A., Bickle, P., Fibiger, L., Nowell, G.M., Dale, C.W., Hedges, R.E.M., Hamilton, J., Wahl, J., Francken, M., Grupe, G., Lenneis, E., Teschler-Nicola, M., Arbogast, R.-M., Hofmann, D., Whittle, A., 2012. Community differentiation and kinship among Europe's first farmers. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109 (24), 9326–9330.
- Bentley, R.A., Knipper, C., 2005. Transhumance at the early Neolithic settlement at Vaihingen (Germany). *Antiquity* 76.
- Berbesque, J.C., Marlowe, F.W., Crittenden, A.N., 2011. Sex Differences in Hadza Eating Frequency by Food Type. *Am. J. Human Biol. Official J. Human Biol. Council* 23 (3), 339–345.
- Bickle, P., Fibiger, L., 2014. Ageing, childhood and social identity in the Early Neolithic of Central Europe. *Eur. J. Archaeol.* 17 (2), 208–228.
- Canty, A., Ripley, B., 2020. *boot: Bootstrap R (S-Plus) functions*. R Package Version 1.3-25.
- Chambon, P., Rottier, S., Augereau, A., Bonnardin, S., Meunier, K., Pariat, J.-G., 2013. Evolution, coexistence and confrontation de pratiques funéraires entre 4700 et 4000 av. J.-C. sur un microterritoire dans la vallée de l'Yonne. In: Jaubert, J., Fourment, N., Depaepe, P. (Eds.), *Transitions, ruptures et continuité en Préhistoire, XXVIIe Congrès Préhistorique de France, Bordeaux - Les Eyzies 2010*. Société Préhistorique Française, Paris, pp. 213–228.
- Cintas-Peña, M., García Sanjuán, L., 2019. Gender Inequalities in Neolithic Iberia: A multi-proxy approach. *Eur. J. Archaeol.* 22 (4), 499–522.
- Czermak, A., Fernández-Crespo, T., Ditchfield, P.W., Lee-Thorp, J.A., 2020. A guide for an anatomically sensitive dentine microsampling and age-alignment approach for human teeth isotopic sequences. *Am. J. Phys. Anthropol.* 173 (4), 776–783.
- de Luca, A., Boisseau, N., Tea, I., Louvet, I., Robins, R.J., Forhan, A., Charles, M.-A., Hankard, R., 2012.  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  in hair from newborn infants and their mothers: a cohort study. *Pediatr. Res.* 71 (5), 598–604.
- Dean, M.C., Cole, T.J., 2013. Human life history evolution explains dissociation between the timing of tooth eruption and peak rates of root growth. *PLoS One* 8 (1), 14.
- Dean, M.C., Scandrett, A.E., 1995. Rates of dentine mineralization in permanent human teeth. *Int. J. Osteoarchaeol.* 5 (4), 349–358.
- DeNiro, M.J., 1985. Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction. *Nature* 317 (6040), 806–809.
- Ecclis, J.S., 1999. The development of children ages 6 to 14. *Future Children* 9 (2), 30–44.
- Eerkens, J.W., Bartelink, E.J., 2013. Sex biased weaning and early childhood diet among middle holocene hunter-gatherers in Central California. *Am. J. Phys. Anthropol.* 152 (4), 471–483.
- Fernández-Crespo, T., Czermak, A., Lee-Thorp, J.A., Schulting, R.J., 2018. Infant and childhood diet at the passage tomb of Alto de la Huesera (north-central Iberia) from bone collagen and sequential dentine isotope composition. *Int. J. Osteoarchaeol.* 28 (5), 542–551.
- Fernández-Crespo, T., Snoeck, C., Ordoño, J., de Winter, N.J., Czermak, A., Mattioli, N., Lee-Thorp, J.A., Schulting, R.J., 2020. Multi-isotope evidence for the emergence of cultural alterity in Late Neolithic Europe. *Sci. Adv.* 6 (4), eaay2169. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay2169>.
- Fuller, B.T., Fuller, J.L., Sage, N.E., Harris, D.A., O'Connell, T.C., Hedges, R.E.M., 2004. Nitrogen balance and  $\delta^{15}\text{N}$ : Why you're not what you eat during pregnancy. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 18, 2889–2896.
- Fuller, B.T., Fuller, J.L., Sage, N.E., Harris, D.A., O'Connell, T.C., Hedges, R.E.M., 2005. Nitrogen balance and  $\delta^{15}\text{N}$ : Why you're not what you eat during nutritional stress. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 19, 2497–2506.
- Gastwirth, J.L., Gel, Y.R., Wallace Hui, W., Lyubchich, V., Miao, W., Noguchi, K., 2020. *lawstat: Tools for biostatistics, public policy, and law*. R package version 3.4. <https://CRAN.R-project.org/package=lawstat>.
- Goude, G., Dori, I., Sparacello, V.S., Starinini, E., Varalli, A., 2020a. Multi-proxy stable isotope analyses of dentine microsections reveal diachronic changes in life history adaptations, mobility, and tuberculosis-induced wasting in prehistoric Liguria (Finale Ligure, Italy, northwestern Mediterranean). *Int. J. Paleopathol.* 28, 99–111.
- Goude, G., Salazar-García, D.C., Power, R.C., Rivollat, M., Gourichon, L., Deguilloux, M.-F., Pemonge, M.-H., Bouby, L., Binder, D., 2020b. New insights on Neolithic food and mobility patterns in Mediterranean coastal populations. *Am. J. Phys. Anthropol.* 173 (2), 218–235.
- Goude, G., Salazar-García, D.C., Power, R.C., Terrom, J., Rivollat, M., Deguilloux, M.-F., Pemonge, M.-H., Le Bailly, M., Andre, G., Coutelas, A., Hatzeur, A., 2019. A multidisciplinary approach to neolithic life reconstruction. *J. Archaeol. Method Theory* 26 (2), 537–560.
- Hatch, K.A., Crawford, M.A., Kunz, A.W., Thomsen, S.R., Eggett, D.L., Nelson, S.T., Roeder, B.L., 2006. An objective means of diagnosing anorexia nervosa and bulimia nervosa using  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  and  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios in hair. *Rapid Commun. Mass Spectrometry RCM* 20 (22), 3367–3373.
- Hesterberg, T., 2014. What teachers should know about the bootstrap: Resampling in the undergraduate statistics curriculum. <http://arxiv.org/abs/1411.5279>. arXiv: 14115279 [stat].
- Hesterberg, T., 2015. *Resample: resampling functions*. R package version 0.4. <https://CRAN.R-project.org/package=resample>.
- Kaplan, H.S., Hooper, P.L., Gurven, M., 2009. The evolutionary and ecological roots of human social organization. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 364 (1533), 3289–3299.
- King, C.L., Millard, A.R., Gröcke, D.R., Standen, V.G., Arriaza, B.T., Halcerow, S.E., 2017. A comparison of using bulk and incremental isotopic analyses to establish weaning practices in the past. *STAR Sci. Technol. Archaeol. Res.* 3 (1), 126–134.
- Knipper, C., Mittnik, A., Massy, K., Kociumaka, C., Kucukkalipci, I., Maus, M., Wittenborn, F., Metz, S.E., Staskiewicz, A., Krause, J., Stockhammer, P.W., 2017. Female exogamy and gene pool diversification at the transition from the Final Neolithic to the Early Bronze Age in central Europe. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114 (38), 10083–10088.
- Le Luyer, M., Coquerelle, M., Rottier, S., Bayle, P., 2016. Internal Tooth Structure and Burial Practices: Insights into the Neolithic Necropolis of Gurgy (France, 5100–4000 cal. BC). *PLoS One* 11 (7), e0159688.
- Le Roy, M., Rottier, S., Tillier, A.-M., 2018. Who was a 'child' during the Neolithic in France? Childhood in the past 11(2):69–84.
- Lee-Thorp, J.A., 2008. On isotopes and old bones. *Archaeometry* 50 (6), 925–950.
- Massard-Vincent, J., 1996. *S. Lallemand, La circulation des enfants en société traditionnelle. Prêt, don échange. Homme:119–122*.
- Liversidge, Helen M., 2008. Timing of human mandibular third molar formation. *Ann. Hum. Biol.* 35 (3), 294–321. <https://doi.org/10.1080/03014460801971445>.
- Moghaddam, N., Müller, F., Hafner, A., Lössch, S., 2016. Social stratigraphy in Late Iron Age Switzerland: stable carbon, nitrogen and sulphur isotope analysis of human remains from Münsingen. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 8 (1), 149–160.
- Mora, A., Pacheco, A., Roberts, C.A., Smith, C., 2021. Palaeopathology and amino acid  $\delta^{13}\text{C}$  analysis: Investigating pre-Columbian individuals with tuberculosis at Pica 8, northern Chile (1050–500 BP). *J. Archaeol. Sci.* 129, 105367.
- Nanci, A., 2003. *Ten Gate's oral histology: development, structure and function*. Missouri: Mosby. 400 p.
- Nehlich, O., 2015. The application of sulphur isotope analyses in archaeological research: A review. *Earth Sci. Rev.* 142, 1–17.
- Nehlich, O., Richards, M.P., 2009. Establishing collagen quality criteria for sulphur isotope analysis of archaeological bone collagen. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 1 (1), 59–75.
- Nehlich, O., Oelze, V., Jay, M., Conrad, M., Stäuble, H., Teegen, W.-R., Richards, M., 2014. Sulphur isotope ratios of multi-period archaeological skeletal remains from central Germany: A dietary and mobility study. *Anthropologie (Brno)* 52, 15–33.
- Petzke, K.J., Feist, T., Fleig, W.E., Metges, C.G., 2006. Nitrogen isotopic composition in hair protein is different in liver cirrhotic patients. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 20 (19), 2973–2978.
- Petzke, K.J., Fuller, B.T., 2012. Stable isotope ratio analysis in human hair. In: Preedy, V. R. (Ed.), *Handbook of Hair in Health and Disease*. Wageningen, Wageningen Academic Publishers, pp. 332–351.
- R Core Team, 2020. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rasteiro, R., Chikhi, L., Lalueza-Fox, C., 2013. Female and male perspectives on the neolithic transition in Europe: clues from ancient and modern genetic data. *PLoS One* 8 (4), e60944. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0060944>.
- Rey, L., Goude, G., Rottier, S., 2017. Comportements alimentaires au Néolithique : nouveaux résultats dans le Bassin parisien à partir de l'étude isotopique ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) de la nécropole de Gurgy « Les Noisats » (Yonne, Ve millénaire av. J.-C.). *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 29 (1-2), 54–69.
- Rey, L., Rottier, S., Santos, F., Goude, G., 2020. Data file for Rey et al.'s article, "Sex and age-related social organization in the Neolithic: a promising survey" [Data set]. *Zenodo*. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4047736>.
- Rey, L., Salazar-García, D.C., Chambon, P.h., Santos, F., Rottier, S., Goude, G., 2019. A multi-isotope analysis of Neolithic human groups in the Yonne valley, Northern France: Insights into dietary patterns and social structure. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 11 (10), 5591–5616.

- Rey, L., Tacail, T., Le Luyer, M., Salazar-Garcia, D.C., Balter, V., Rottier, S., Goude, G. 2016. Tracking male vs. female Neolithic behaviors: a new multi-element and multi-isotope-ratio analysis to reconstruct diet and mobility in northern France. 8th World Archaeological Congress. Kyoto (Japan).
- Rey, L., Tacail, T., Santos, F., Rottier, S., Goude, G., Balter, V. under review. Disentangling diagenetic and biogenic trace elements and Sr radiogenic isotopes in fossil dental enamel and bone using laser ablation analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*.
- Rivollat, M., Jeong, C., Schiffels, S., Küçükkalınç, İ., Pemonge, M.-H., Rohrlach, A.B., Alt, K.W., Binder, D., Friederich, S., Ghesquière, E. et al. 2020. Ancient genome-wide DNA from France highlights the complexity of interactions between Mesolithic hunter-gatherers and Neolithic farmers. *Sci. Adv.* 6(22):eaaz5344.
- Rivollat, M., Rottier, S., Couture, C., Pemonge, M.-H., Mendisco, F., Thomas, M.G., Deguilloux, M.-F., Gerbault, P., 2017. Investigating mitochondrial DNA relationships in Neolithic Western Europe through serial coalescent simulations. *Eur. J. Hum. Genet.* 25 (3), 388–392.
- Robb, J., Harris, O.J.T., 2018. Becoming gendered in European prehistory: Was Neolithic gender fundamentally different? *Am. Antiquity* 83 (1), 128–147.
- Scharlotta, I., Goude, G., Herrscher, E., Bazaliiskii, V.I., Weber, A.W., 2018. "Mind the gap"—Assessing methods for aligning age determination and growth rate in multi-molar sequences of dietary isotopic data. *Am. J. Hum. Biol.* 30 (5), e23163. <https://doi.org/10.1002/ajhb.v30.510.1002/ajhb.23163>.
- Schulte, E., Davison, D., Dye, T., Dominik, C., 2012. A multi-language computing environment for literate programming and reproducible research. *J. Stat. Softw.* 46 (3), 1–24.
- Siebek, I., Furtwängler, A., Steuri, N., Hafner, A., Ramstein, M., Krause, J., Lösch, S., 2020. Crops vs. animals: regional differences in subsistence strategies of Swiss Neolithic farmers revealed by stable isotopes. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 12 (10) <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01122-1>.
- Stuart-Macadam, P., Dettwyler, K.A. 1995. *Breastfeeding: Biocultural Perspectives*. New York: Aldine De Gruyter.
- Tsutaya, T., Yoneda, M., 2015. Reconstruction of breastfeeding and weaning practices using stable isotope and trace element analyses: A review. *Am. J. Phys. Anthropol.* 156, 2–21.
- Umezaki, M., Naito, Y.I., Tsutaya, T., Baba, J., Tadokoro, K., Odani, S., Morita, A., Natsuhara, K., Phuanukoonnon, S., Vengiau, G., Siba, P.M., Yoneda, M., 2016. Association between sex inequality in animal protein intake and economic development in the Papua New Guinea Highlands: The carbon and nitrogen isotopic composition of scalp hair and fingernail. *Am. J. Phys. Anthropol.* 159 (1), 164–173.
- van Rensburg, B.G.J., 1987. Secondary dentine—Cause and effect. *J. Dent. Res.* 66, 949.
- Villotte, S., Knüsel, C.J., 2014. "I sing of arms and of a man...": medial epicondylitis and the sexual division of labour in prehistoric Europe. *J. Archaeol. Sci.* 43, 168–174.
- Waters-Rist, A.L., Katzenberg, M.A., 2010. The Effect of Growth on Stable Nitrogen Isotope Ratios in Subadult Bone Collagen. *Int. J. Osteoarchaeol.* 20 (2), 172–191.
- Wünsch, G., Gibaja Bao, J.F., 2003. *La nécropole néolithique de Sant Pau del Camp (Barcelona): interprétation socio-économique à partir du traitement statistique du mobilier des sépultures*. Mémoires de la Société préhistorique française 33, 115–123.
- Zieffler, A.S., Harring, J.R., Long, J.D. 2011. *Bootstrap intervals and effect sizes. Comparing groups*: John Wiley & Sons, Ltd. p 181–206.

## Chapitre 7. Analyses isotopiques de l'azote dans les acides aminés

( $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ )

### I. Article 4

---

*Specifying subsistence strategies of Early farmers: new results from compound specific isotopic analysis of amino acids (CSIA-AA)*

Léonie REY, Yuichi I. NAITO, Yoshito CHIKARAISHI, Stéphane ROTTIER, Gwenaëlle GOUDE, Naohiko OHKOUCHI

Soumis à : **International Journal of Osteoarchaeology** en 2021 (en révision)

Le **matériel supplémentaire** est disponible en Annexe B4

**Specifying subsistence strategies of Early farmers: new results from compound specific isotopic analysis of amino acids (CSIA-AA)**

Léonie REY<sup>1</sup>, Yuichi I. NAITO<sup>2</sup>, Yoshito CHIKARAISHI<sup>2</sup>, Stéphane ROTTIER<sup>1</sup>, Gwenaëlle GOUDE<sup>3</sup>, Naohiko OHKOUCHI<sup>2</sup>

**AFFILIATIONS:**

<sup>1</sup> UMR 5199 - PACEA (A3P), Université de Bordeaux, Allée Geoffroy Saint Hilaire, CS 50023, 33615 Pessac Cedex, France

<sup>2</sup> Biogeochemistry Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 237-0061, Japan

<sup>3</sup> Aix Marseille Univ, CNRS, Minist Culture, LAMPEA, Aix-en-Provence, France

**CORRESPONDING AUTHORS:** Léonie Rey (ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8498-2264> ; email: [leonie.rey@outlook.fr](mailto:leonie.rey@outlook.fr)), Yuichi Naito (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8662-7765> ; email: [ynaito0825@gmail.com](mailto:ynaito0825@gmail.com))

**KEYWORDS:** Neolithic, bone collagen, nitrogen stable isotope, freshwater resources, manured cereals

**HIGHLIGHTS**

- Nitrogen isotopic analysis of single amino acids is conducted for the first time on Neolithic farmers from France
- Results emphasized the high trophic position of humans previously observed from  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  relative to faunal samples
- Negligible consumption of freshwater fish is supposed and several food combinations are discussed
- Pigs could be more herbivorous than previously assumed and could have consumed manured cereals

**ABSTRACT:**

Understanding fish contribution to the human diet is an important debate in past population studies as implies specific organization (e.g. adapted techniques, gender-based activities?) and relationship with the local or sublocal environments (e.g. mobility, seasonal-based exploitation). In the Paris Basin, the role of fish has been discussed mainly from rare but obvious archaeological remains as fish bones or hooks. Previous isotopic data from Neolithic human bone bulk collagen highlighted the potential of freshwater resources in protein diet but were not able to quantify it or even confirm its role. In this study we conducted, for the first time on early farmers from France, compound specific isotope analysis on bone collagen amino acids (CSIA-AA). Results indicate a particularly high trophic level of some humans with protein intake mainly based on terrestrial animal resources (domestic cattle and pig), while others rather have a plant-based diet. Freshwater resources appeared to be not significant and several possible food combinations are discussed. Pig particularly appears more herbivorous than previously assumed and has possibly consumed manured cereals from human waste.

## 1. INTRODUCTION

Neolithic represents a major change in people's lifestyles, mainly due to the transition from a hunter-gatherer economy to an economy of production (husbandry and agriculture). Humans are settling down, establishing villages, storing their food and structuring themselves with the emergence of exacerbated hierarchies and prestige (e.g. Beyneix, 2016; Cassidy et al., 2020; Jeunesse, 2016; Thomas, 2014). The study of food allows approaching these new social practices. For example, some French studies suggest that hunting is becoming more symbolic, as hunted animals taking the form of prestigious objects (Jeunesse and Arbogast, 1997; Sidéra, 2003). However, this assumption is discussed, as broader-spectrum feeding societies (based on both farming and hunting/gathering/fishing) could be more egalitarian, while the only production and storage of food could represent social competition in a "banquet economy" (Jeunesse, 2010). The choice of food resource management (collecting wild foods, including aquatic foods vs. producing and storing meat, dairy and cereals, and in which proportions) raises the question of the economic and social organization. This gives an insight of the breadth of the topic and the importance of the role of food in our human societies, past and present.

In the Middle Neolithic period, in the North and Centre of France, humans consumed cattle, to a lesser extent pigs and finally caprine (sheep and goat; e.g. Arbogast et al., 2018; Bedault, 2009; Hachem et al., 2014). Dairy products are also evidenced, but in unknown proportions (Balasse and Tresset, 2002; Drieu et al., 2020; Gillis et al., 2017). The contribution of plants is difficult to quantify as there are few preserved remains, but cereals (wheat and barley) are well attested (Bakels, 1997; Hamon et al., 2019; Martin et al., 2014; Meunier et al., 2006). In this respect, manuring practice is already proposed for some European sites (Bogaard et al., 2013; Fraser et al., 2013; Gron et al., 2017) and should be considered in France. Furthermore, remains of wild plants, peas, lentils, hazelnuts, etc. have also been retrieved in northern France, though their consumption is more difficult to demonstrate (Bouby et al., 2018; Dietsch-Sellami, 2007; Marival, 1995). Overall, recent isotopic studies have shown that the proportion of plants in the diet is often underestimated in the European Neolithic context (Bickle, 2018; Bogaard et al., 2017; Styring et al., 2018).

Moreover, aquatic resources could also have been consumed in the Neolithic period as a complement to the terrestrial supplies. While some studies have demonstrated the abandonment of marine resources at the onset of the Neolithic in marine coastal areas (Richards et al., 2003), the picture is more complex than it appears depending on the region (Bickle, 2018; Salazar-García et al., 2018), several isotopic studies have shown a drop but still a continuity of freshwater fish consumption in European inland sites, as for example in the Danube Gorges (de Becdelièvre et al., 2020; Jovanović et al., 2015), in Belgium (Bocherens et al., 2007), in Ukraine (Budd et al., 2020; Lillie et al., 2011), in the Baltic (Lithuania; Piličiauskas et al., 2017) and in Germany (Bickle, 2018; Fernandes et al., 2015). In Northern France, fishing is well attested in the Mesolithic period at Noyen-sur-Seine and La Chaussée-Tirancourt (Drucker et al., 2018), but it is less obvious for the Neolithic period. Some sites in the Paris Basin have delivered several remains of cyprinidae, pike, perch and eel (Clavel, 2009; Clavel and Arbogast, 2007). Moreover, a hook has been discovered in a grave in the Yonne Valley, in the site of Monéteau (close to our corpus; Augereau and Chambon, 2011, p.311; Augereau et al., 2005). Though such regional evidence is scarce, freshwater fish consumption should be considered.

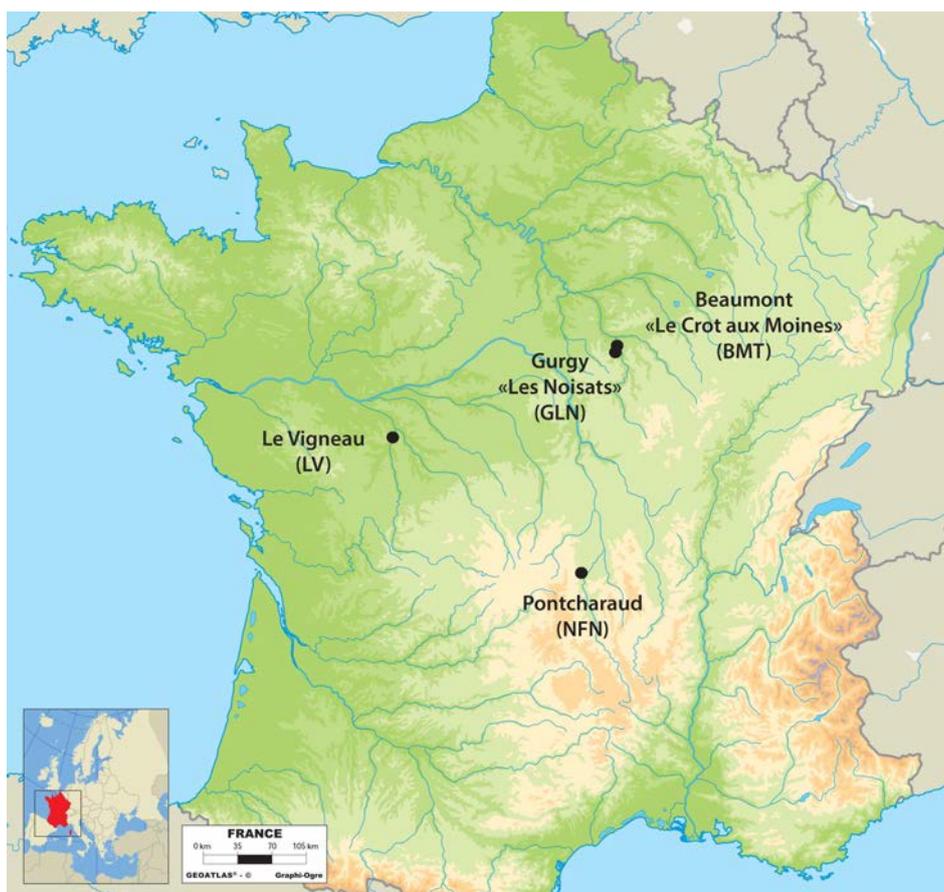
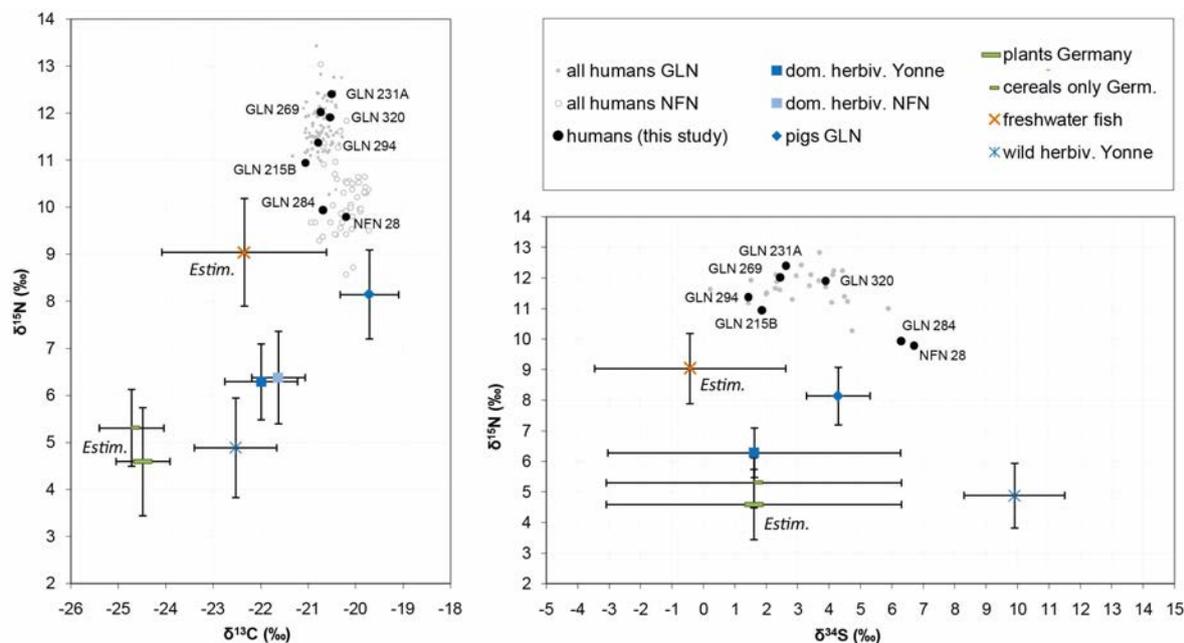


Fig. 1 : Location map of the sites analyzed in this study.

In the North and Center of France, previous isotopic studies of bulk bone collagen have revealed high nitrogen isotopic ratios in humans compared to domestic animals. At Gurgy “Les Noisats” (GLN) and Pontcharaud (NFN; Fig. 1), carbon (C), nitrogen (N) and sulfur (S) isotopic ratios all suggest a mix consumption of herbivores (mainly cattle, in agreement with zooarchaeological data) and pigs, with possible addition of freshwater fish (Fig. 2; Goude et al., 2013; Rey et al., 2019). Terrestrial wild animals do not seem to have been consumed in a substantial extent, in accordance with the zooarchaeological data which suggests that hunting was a rather symbolic activity at this period. The part of plants in diet is not known and the trophic level (TL) of humans given by the nitrogen enrichment between humans and domestic animals is particularly high with respect to what is known in other contemporaneous sites ( $\Delta^{15}\text{N}_{\text{animals-humans}} = 4.7\text{‰}$  at GLN,  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{animals-humans}} = 3.8\text{‰}$  at NFN and, in average,  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{animals-humans}} = 2.9 \pm 1 \text{‰}$  for about thirty Neolithic neighboring sites; Rey et al., 2019 Online Resource 10 and 11). In comparison, such a high value of  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{animals-humans}}$  has been observed at the Les Bréguières site (4.5 ‰) and Baume-Bourbon (4.5 ‰) in the South of France, where the heavy reliance on terrestrial animal protein, with possible consumption of aquatic food, was proposed (Goude, 2007; Goude et al., 2020). The part of plants, of lower trophic level and poorer protein content, is all the more hidden in bulk collagen as other resources of high trophic level and richer in protein are consumed, like animal resources and especially fish. For GLN and NFN, several hypotheses, among various possibilities, have been proposed without being able to conclude: the human diet could be particularly rich in animal proteins (stable isotope analysis of bulk bone collagen cannot distinguish between meat and milk proteins for example); cereals could be manured leading to an increase in  $\delta^{15}\text{N}$  and thus an underestimation of their proportion in diet (plants consumed by humans having different values than forage, as suggested by A. Bogaard and colleagues (2017; 2013); freshwater fish, supposed to have higher  $\delta^{15}\text{N}$  values than terrestrial animals, could be part of the diet

in addition to domestic animals. As neither plant remains nor fish could be retrieved on the sites and analyzed, it is challenging to estimate the position of humans in their local food chain. Without known values of plants, at the bottom of the food chain, and fish at the top, the “intermediate” values of humans can be explained by a multitude of interrelated factors. In addition, the  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{diet-bulk collagen}}$  offset can vary generally between 3 and 5‰ (Bocherens and Drucker, 2003).



**Fig. 2 :** Distribution of C, N and S isotopic values of the samples analyzed in this study relative to the global variability of all the humans and animals from these sites and relative to plant and freshwater fish values from literature as an estimate (Estim.) for comparison. Plants (cereals and pulses) C and N values are from four Neolithic sites in Germany (Styring et al., 2017). S values are estimated from those of herbivores. Freshwater fishes are from various earlier or contemporaneous archaeological sites from neighboring regions (see Appendix Table A1-7 and Fig. A1; Bösl et al., 2006; Drucker and Bocherens, 2004; Drucker et al., 2016; Drucker et al., 2018; Dürrwächter et al., 2006; Meadows et al., 2018). dom.=domestic, herbiv.=herbivores

While S isotope analysis can be useful to evaluate freshwater fish consumption in some contexts (e.g. (Nehlich et al., 2010)), the previous dataset from Northern France sites remains inconclusive: human values overlap with both cattle and pig values (which are distinct), and it is not known whether local freshwater fish values could be distinct from this terrestrial range (Fig. 2; Rey et al., 2019). A survey of the literature showed the wide variation of freshwater isotopic ratios with environmental conditions and the possible overlapping between aquatic and terrestrial ecosystems. The isotopic variability is illustrated in Appendix Fig. A1 for various French, Belgian and German sites (see also Dufour et al., 1999; Dufour and Gerdeaux, 2001; France, 1994 for a general purpose). The large variation of plants values is also demonstrated (Appendix Fig. A1 for a close regional context in the Neolithic; see also Gavériaux et al., accepted for Neolithic Southern France). Notwithstanding, the inverse correlation observed between the  $\delta^{34}\text{S}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values of human bulk collagen from GLN possibly support the complementary consumption of freshwater resources, as suggested by (Nehlich et al., 2014) for the German Neolithic site of Großstorkwitz, although it could also reflect the relative reliance on food from two distinct locations. On another note, no depleted  $^{14}\text{C}$  values in bulk collagen which could reflect any reservoir effect were identified, suggesting conversely no significant consumption of freshwater resources (Cook et al., 2001; Philippsen and Heinemeier, 2013).

In this context, the CNS stable isotope analysis on bulk collagen remained very limited to clearly assess the possible contribution of freshwater fish in the diet and consequently also to estimate the relative contribution of plants. Consequently, our study proposes to estimate the trophic position (TP)

of individuals without requiring *a priori* any local baseline (as food source values) by using compound specific isotopic analysis of amino acids (CSIA-AA; Chikaraishi et al., 2010a).

## 2. MATERIALS AND METHOD

### 2.1 Brief description of the sites

The samples come from four Neolithic sites located in three French regions (Fig. 1). Beaumont “Le Crot aux Moines” (BMT, 4800-4000 cal BC) is an enclosure located in the Yonne Valley (Paris Basin) and attributed to the Chasséen culture. It contains scattered remains of humans and animals conjointly (Chambon et al., 2009). This site has only provided two animal samples for baseline. Gurgy “Les Noisats” (GLN; 5200-3800 cal BC), also located in the Yonne Valley, is one of the biggest cemeteries for the French Neolithic containing more than 120 burials, mainly individuals (Rivollat et al., 2015; Rottier, 2007; Rottier et al., 2005). The few but highly diversified grave goods did not allow a strict cultural attribution but refer to several cultures of the Early and Middle I Neolithic. Very few faunal remains have been retrieved and they are mostly used for ornaments or tools. Most of the samples analyzed in this study (6 humans and 3 animals) came from this site. Le Vigneau 2 (LV; 4720-4350 cal BC) is a large cemetery of 102 mostly individual burials located in Pussigny (Loire Valley; Coutelas et al., 2015). The graves are dated to the Middle Neolithic and belong to the Chambon culture. They probably received shepherds. Ovis remains are repeatedly found with the human skeletons as funerary offerings. From this site, one animal collagen sample is tested by CSIA-AA (LVF9; sheep) and will help to document the geographic variability (see also Goude et al., 2019). Pontcharaud2 (NFN; 4460-4030 BC cal), located in Clermont-Ferrand (Auvergne), is a more recent funerary ensemble composed of 58 mainly individual burials (Loison, 1998). This large ensemble belongs to the Middle I Neolithic of the Limagne. For this site as for GLN, the hypothesis of freshwater fish consumption by the humans has been proposed on the basis of bulk collagen isotopic data (Goude et al., 2013). The collagen of one animal (NFNA01; cattle) and one adult female (NFN28) are tested by CSIA-AA for geographic variability documentation and further investigation about  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  and TPs comparison.

### 2.2 Sample selection

In total, the analyses were performed on 7 humans (4 adult females, 2 adult males, 1 immature female), 6 herbivores (2 cattle, 2 sheep/goat, 2 deer) and 1 pig, omnivorous (Table 1). The main archaeological and analytical data are summarized in Table 1 and further details are available in corresponding references. The samples come from previously prepared bone collagen for stable C, N and S isotope analysis of bulk collagen. Results of these analyses are available in previous studies (Goude et al., 2021; Goude et al., 2019; Goude et al., 2013; Rey et al., 2017; Rey et al., 2019) and are reminded in Table 2. All the samples were chosen for the good preservation of the remaining collagen available and, when possible, to get the best representation of the isotopic variability according to their C, N and S values (see the distribution of the selected samples' isotopic values among the overall distribution of each site for the three regions studied in Appendix Fig. A2). We are aware that such a small number of samples limits the representativeness of the human group variability but it provides the first opportunity to test this methodology on Early European farmers.

archaeological site	ID	archaeo ID	common name	species	sex	age at death	analyzed bone	analysis session	ref archaeo	ref CNS iso
Beaumont "Le Croc aux Moines"	BMT F10	Merlange A2.5	caprine	(Caprinae family)		adult	long bone	2nd session	1	7
Beaumont "Le Croc aux Moines"	BMT F14	Merlange D4.9.X2	red deer	<i>Cervus elaphus</i>		indet	talus	session 2nd	1	7
Gurgy "Les Noisats"	GLN 215B	st 215B	human	<i>Homo sapiens</i>	F	8-14	long bone	session	2, 3, 4	7, 8
Gurgy "Les Noisats"	GLN 231A	st 231A	human	<i>Homo sapiens</i>	M	>20	long bone	1st session	2, 3, 4	7, 8
Gurgy "Les Noisats"	GLN 269	st 269	human	<i>Homo sapiens</i>	F	>20	long bone	1st session 2nd	2, 3, 4	7, 8
Gurgy "Les Noisats"	GLN 284	st 284	human	<i>Homo sapiens</i>	F	>20	long bone	session	2, 3, 4	7
Gurgy "Les Noisats"	GLN 294	st 294	human	<i>Homo sapiens</i>	F	>20	long bone	1st session	2, 3, 4	7, 8
Gurgy "Les Noisats"	GLN 320	st 320	human	<i>Homo sapiens</i>	M	>20	long bone	1st session 2nd	2, 3, 4	7, 8
Gurgy "Les Noisats"	GLN F8	st 38-14	pig	<i>Sus scrofa</i>		indet	coxal	session	2, 3, 4	7
Gurgy "Les Noisats"	GLN F15	st 60-35	cattle	<i>Bos taurus</i>		12-36 months?	long bone	2nd session	2, 3, 4	7
Gurgy "Les Noisats"	GLN F16	st 60-36	roe deer	<i>Capreolus capreolus</i>		adult	MT	session 2nd	2, 3, 4	7
Le Vigneau	LVF9		sheep	<i>Ovis aries</i>		18 months		session 2nd	2, 3, 4	9
Pontcharaud	NFNA01		cattle	<i>Bos taurus</i>				session 2nd	6	10, 11
Pontcharaud	NFN28	sep 38	human	<i>Homo sapiens</i>	F			session 2nd	6	10, 11

Table 1 : Archaeological and biological data of the sample selected for the CSIA-AA and complementary analytical information. 1: Chambon et al., 2013, 2: Rivollat et al., 2015, 3: Rottier et al., 2005, 4: Rottier, 2007, 5: Coutelas et al., 2015, 6: Loison, 1998, 7: Rey et al., 2019, 8: Rey et al., 2017, 9: Goude et al., 2019, 10: Goude et al., 2013, 11: Goude et al., 2021

### 2.3 $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ measurements

All the collagen samples were previously extracted and their quality was certified (see corresponding references). The amino acid samples were prepared following the JAMSTEC established protocol (see Naito et al., 2013b for more details). Collagen was hydrolyzed in 12N HCl at 110°C for 12h. Then, derivatization was carried out with thionyl chloride/2-propanol (TC/iPr, 1/4, v/v) at 110°C for 2h (isopropyl esterification) and with pivaloyl chloride/dichloromethane (PC/DCM, 1/4, v/v) at 110°C for 2h (acylation). The organic solvent layer was extracted and dehydrated. After amino acids were verified by GC-FID/NPD, the nitrogen isotopic composition of individual amino acids was measured by GC-C-IRMS (gas chromatography-combustion-isotope ratio mass spectrometry) using an Agilent Technology 6890 GC coupled to a Thermo Finnigan Deltaplus XP IRMS via combustion and reduction furnaces. Instrumental analysis was performed according to Chikaraishi et al. (2007) and Chikaraishi et al. (2010b). The analytical error was <0.5‰.

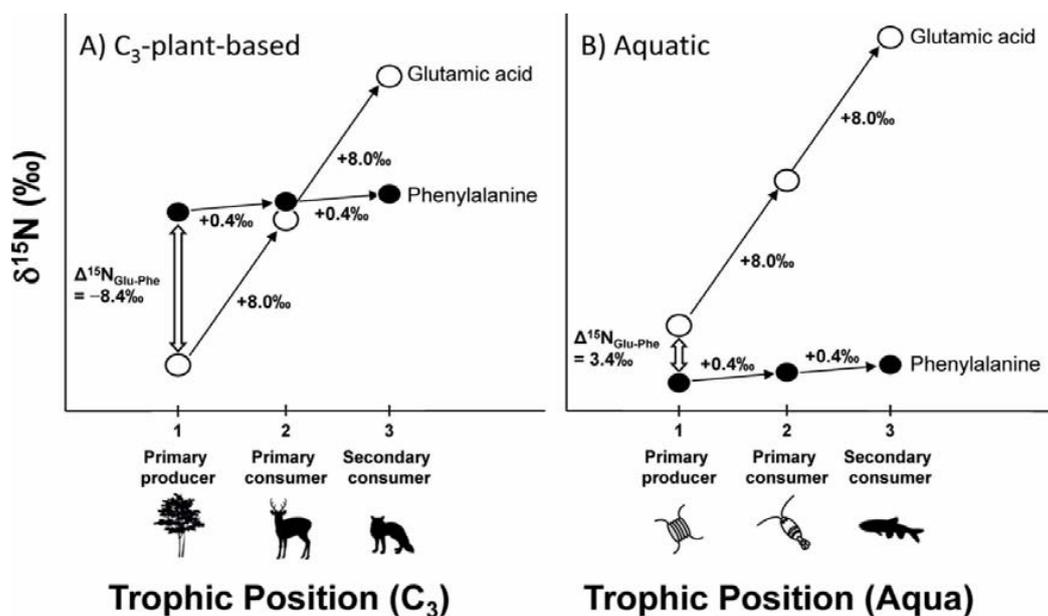
### 2.4 Trophic position (TP) estimation

Assessing the TP of samples relies on the following principles: 1) the  $\delta^{15}\text{N}$  of glutamic acid ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$ ) greatly increases from prey to consumer ( $+8\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$ ) while the  $\delta^{15}\text{N}$  of phenylalanine ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$ ) varies little ( $+0.4 \pm 0.4\text{‰}$ ) in both aquatic (Chikaraishi et al., 2007; Chikaraishi et al., 2009; McClelland and Montoya, 2002) and terrestrial (Chikaraishi et al., 2011) ecosystems – this implies that  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  rather reflects the trophic position while  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  rather reflects the source at the bottom of the food chain, namely the environment; 2) the  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu-Phe}}$  value ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$ ) of primary producers, also called  $\beta$  factor, distinguishes between  $\text{C}_3$  plants ( $\beta \approx -8.4\text{‰}$ , although this  $\beta$  factor is potentially variable and this will be discussed later) and aquatic plants such as algae and cyanobacteria ( $\beta \approx +3.4\text{‰}$ ; Chikaraishi et al., 2007; Chikaraishi et al., 2010a; Fig. 3). According to these observations, the TP of samples can be estimated by the following equations:

$$\text{TP}_{\text{AA}}(\text{C}_3) = ([\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}} + 8.4] / 7.6) + 1 \text{ for terrestrial C3 plants-based ecosystems (1)}$$

$$\text{TP}_{\text{AA}}(\text{aqua}) = ([\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}} - 3.4] / 7.6) + 1 \text{ for aquatic ecosystems (2)}$$

where  $\text{TP}_{\text{AA}}$  indicates the amino acid-based trophic position and the 7.6 value corresponds to the mean difference between the Glu and Phe called trophic discrimination factor or TDF (Chikaraishi et al., 2007; Chikaraishi et al., 2011).  $\text{TP} = 1$ ,  $\text{TP} = 2$  and  $\text{TP} = 3$  indicate respectively primary producers (plants), primary consumers (herbivores) and secondary consumers (carnivores). In the following sections,  $\text{TP}_{\text{ter}}$  is used for terrestrial TP,  $\text{TP}_{\text{aqua}}$  is used for aquatic TP. While the traditional isotopic analysis of collagen needs a local baseline to estimate the position of individuals into their trophic chain (due to large environmental and physiological variations of the values), these equations do not require in theory the characterization of the  $\delta^{15}\text{N}$  values at the bottom of the food chain to estimate the TP. They use the isotopic spacing between two amino acids from the same specimen, thus allowing direct comparisons of the  $\text{TP}_{\text{AA}}$  of individuals originating from various spatiotemporal contexts (Chikaraishi et al., 2014). However, in the case of mixed diet, it is helpful to measure local animal values to disentangle possible variations.



**Fig. 3 :** Schematic illustration of the relationship between trophic position (TP) of organisms and their nitrogen isotopic values of Glu and Phe in C<sub>3</sub>-plant-based (A) and aquatic (B) ecosystems (modified after Chikaraishi et al., 2011). The  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu-Phe}}$  value in primary producers ( $\beta$  factor) varies among C<sub>3</sub> plants (-8.4‰) and aquatic plants such as algae or cyanobacteria (+3.4‰; Chikaraishi et al., 2007; Chikaraishi et al., 2010a).

## 2.5 Baseline references and estimations

To compare the human isotopic values with those of food items probably consumed, we have referenced all available data from contexts as close as possible to our sites. All the data is available in Appendix Table A1-7 and mean values or estimates of each food source considered are represented in Figure 2 and 4. The Yonne baseline inventories all the isotopic values previously obtained from several Neolithic sites in a radius of 10 km in the Yonne valley including GLN and BMT. While the values of local and contemporary terrestrial animals were measured directly along with humans, no plant or fish remains were found on the sites. Archaeoichthyological and archaeobotanical data are besides very scarce in the region and the consumption/production/management of these resources is rather unknown. Consequently, the plants and freshwater baselines are taken from the literature (Appendix Table A4-6).

Plants baseline is estimated from available data from German Neolithic sites (Styring et al., 2017). Mediterranean and further North sites have a relatively different climate and environment that may impact the isotopic ratios (Craine et al., 2009; Gavériaux et al., accepted; Goude and Fontugne, 2016). They have therefore not been considered as baseline here. Earlier sites do not yield cereals, recently cultivated by early farmers, and more recent sites may be more subject to more intense agricultural practices (intensive manuring and water management ; e.g. Varalli et al., 2021), so they are also excluded here. As it has been shown that humans did not consume the same plants as herbivores (Bogaard et al., 2017), we preferred to consider, for C and N isotopes, plant values measured in other sites from a similar context (Neolithic Germany; Styring et al., 2017) rather than our local herbivore values subtracting the trophic enrichment (this gives the forage values). Contrarily, for S, plant values have been estimated from domestic fauna, as suggested by Fernandes et al. (2015), since S isotopic ratio is highly variable with environment (Nehlich, 2015) and there is no fractionation between prey and consumer (Nehlich, 2015; Tanz and Schmidt, 2010). For AA, we used the  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  value estimated by Styring et al. (2015) for the German Neolithic site of Vaihingen. As archaeological plants do not contain sufficient AAs, the  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  value is roughly estimated from comparison of their measured  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  and empirically known difference between  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  in modern cereal grains. In this

case, this means subtracting 0.5‰ from the  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  values of charred grains from Vaihingen. In addition, the plant  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  value is estimated from the average human and domestic animal  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  value of the samples analyzed in this study minus the theoretical trophic enrichment of 0.4‰ (namely  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}} \approx 11.2 (\pm 1.7) - 0.4 \approx 10.8 \pm 1.7$  ‰) according to Styring et al. (2015) recommendations. This value is the same as those estimated for Vaihingen (ibid).

For aquatic resources, namely freshwater fish (riparian are not considered in this study, since they have never been found in the region for the Neolithic period and they are not supposed to be consumed), we have considered a maximum of data from sites located in neighboring regions and belonging to similar or earlier periods (the latter to avoid any pollution effect occurring later).

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

All the collagen samples were well-preserved according to commonly accepted criteria (all details were already published in references cited in Table 1). The analytical quality for CSIA-AA is assessed with standard calibration and through good resolution on GC chromatogram and reproducibility of measurements. All the results are given in Table 2 with calculated TPs and plotted on Figure 2 for bulk collagen and on Figure 4 for AA. Considering a constant  $\beta$  value of  $-8.4 \pm 0.2$ ‰ (Chikaraishi et al., 2011), all domestic and wild herbivores have a TP of  $2 \pm 0.2$ , in agreement with expected values. Pig has a TP of  $2.1 \pm 0.2$  corresponding to a rather herbivorous diet. Humans have TPs from  $2.2$  to  $3.2 \pm 0.2$ , which corresponds to a diet ranging from almost herbivore to quite carnivore. Overall, the  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values of animals vary widely, as commonly observed (Ohkouchi et al., 2017). The  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values of wild deer samples are in average lower than those of domestic species. There is no apparent difference of  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values between sites. Humans have similar  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values to domestic animals.

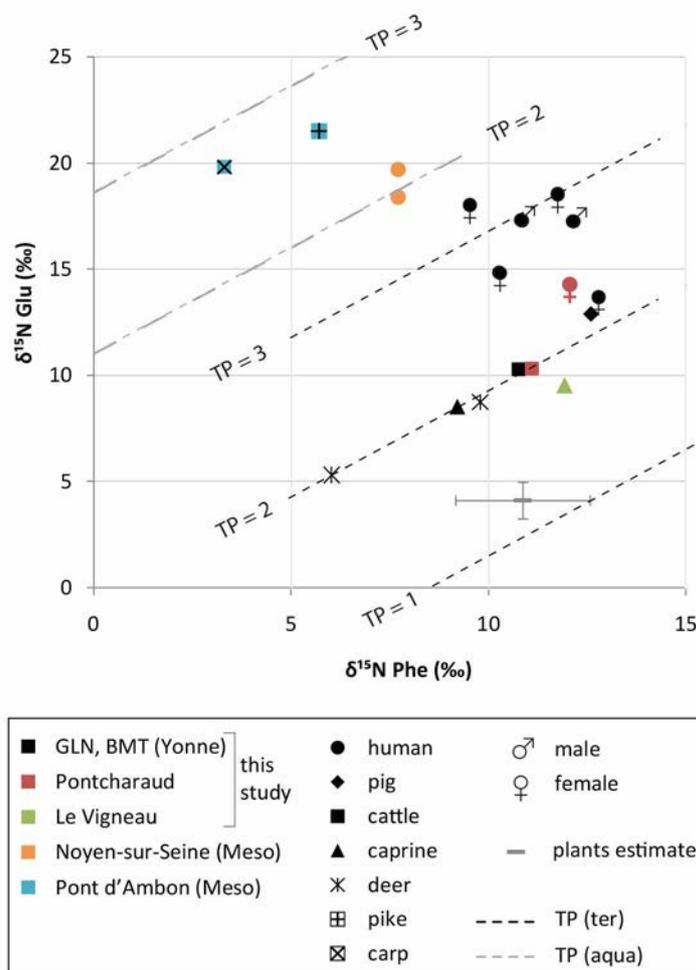
ID	species	$\delta^{13}\text{C}$ bulk*	$\delta^{15}\text{N}$ bulk*	$\delta^{34}\text{S}$ bulk*	Ala	Gly	Val	Leu	Ile	Pro	Asp + Thr	Glu	Phe	Hyp	TP ter	TP aqua
BMT F10	caprine	-22.3	6.0									8.5	9.2		2.0	
BMT F14	red deer	-21.4	5.3				9.0	7.4	9.0			8.8	9.8	7.7	2.0	
GLN 215B	human	-21.1	10.9	1.9						17.8		14.8	10.3	14.6	2.7	1.2
GLN 231A	human	-20.5	12.4	2.6	14.5	11.6	-3.1			21.6	11.8	17.3	12.2	17.8	2.8	1.2
GLN 269	human	-20.7	12.0	2.4	13.3	10.4	13.3			19.4	13.7	18.6	11.8	16.6	3.0	1.4
GLN 284	human	-20.7	9.9	6.3								13.7	12.8		2.2	0.7
GLN 294	human	-20.8	11.4	1.4	14.0	11.4	13.7			18.2	13.1	18.0	9.5	14.3	3.2	1.7
GLN 320	human	-20.5	11.9	3.9	14.9	12.5	13.9			21.3	13.8	17.3	10.8	17.3	3.0	1.4
GLN F8	pig	-19.3	8.5					11.9	11.7	14.0		12.9	12.6	12.1	2.1	
GLN F15	cattle	-22.6	6.9					11.1	12.4	10.5		10.3	10.8	9.1	2.0	
GLN F16	roe deer	-22.8	3.3	11.8				5.6	4.3			5.3	6.0	6.5	2.0	
LVF9	sheep	-21.4	6.7	11.5								9.5	11.9	9.2	1.8	
NFNA01	cattle	-22.4	8.0	8.3**				7.0	11.7			10.3	11.1	10.6	2.0	
NFN28	human	-20.2	9.8	6.7**						16.8		14.3	12.1	14.2	2.4	0.8

Table 2 : Carbon, nitrogen and sulphur isotopic values of bulk collagen, nitrogen isotopic values of single amino acids and corresponding trophic position in terrestrial C3-plant based ecosystem (Ter) and aquatic ecosystem (Aqua).

\*previous results from Goude et al., 2013; Rey et al., 2017; Rey et al., 2019; Goude et al., 2019, \*\*Goude et al., 2021

The results illustrated in Figure 4 show that herbivores' values are well aligned along the line  $\text{TP}_{\text{ter}} = 2.0 \pm 0.2$  corresponding to a pure herbivorous diet, in agreement with expected values. This confirms the reliability of the measurements. The apparent variability in  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values between wild and domestic species could testify of different occupied environment. Livestock could be kept close to the settlements while deer were roaming free further, probably in a more covered environment, as

suggested also by lower C and N isotopic values of bulk collagen than those of domestic species. Moreover, the pig's  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  value is slightly higher than those of herbivores (see later). Despite the limited number of samples, the difference in  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  between wild herbivores, domestic herbivores and pig fits with the differences observed in bulk collagen for C, N and S isotopic ratios (Fig. 2; Rey et al., 2019). This is in line with the already proposed hypothesis of keeping the different species in separate spaces and/or feeding them differently (ibid).



**Fig. 4 : Distribution of  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  vs.  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values of human and animal samples analyzed in this study relative to human and freshwater fish values from the French sites Noyen-sur-Seine and Pont d'Ambon (Naito et al., 2013a) and relative to estimated plant values from the German Neolithic site of Vaihingen for  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  (Styring et al., 2015) and from the mean of human and domestic animal  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values of our samples minus the theoretical trophic enrichment of 0.4‰ for  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$ .**

On the contrary, the humans' results show a wide variability of the TPs and a more homogeneous range of the  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values than animals (Fig. 4). This further supports the previous result on bulk collagen: great variability for N isotope ratios (reflecting trophic effect) vs. homogeneous C and in a lesser extent S isotope ones (rather linked to the source and environment; Rey et al., 2019). The human  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  results indicate a varied diet based on domestic plants and animals in extremely different proportions between individuals, with probably no significant freshwater resources (see details later). No sex-related distinction is highlighted (Fig. 4), contrarily to what has been observed for C, N and S isotope ratios on bulk collagen in the whole GLN sample (Rey et al., 2019). However, here the sample size is too small and unbalanced to conclude. Regarding the animal component, the results are consistent with the mixed consumption of cattle and pig, according to previous isotopic and zooarchaeological data. However, the proportion of animal intake varies greatly between individuals.

First, the lowest TP is obtained for GLN 284 (TP  $\approx$  2.2), which most likely had a very predominantly plant-based diet. This supports previous result in bulk collagen, as the  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  value is significantly lower than all the other adults from the same site. Although zooarchaeological data suggest that wild animals were little consumed by these people, the extreme  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  and  $\delta^{34}\text{S}_{\text{bulk}}$  values of this woman (Fig. 2) could suggest that she may have been an exception to the rule. However, the AA results definitely exclude this possibility as her low trophic level most likely reflects a mainly plant-based diet (Fig. 4). This woman could have had a particular social status with specific diet or could not eat meat for physiological reason (intolerance, allergy, etc.). The hypothesis of a disturbed health condition leading to a nutritional stress and  $^{15}\text{N}$ -depleted ratio has also been proposed (e.g. Hatch et al., 2006; Petzke et al., 2006). Unfortunately, the preservation state of the remains does not allow to investigate this issue. However, due to the slow turnover of bone collagen, only a long term physiological disorder might significantly alter the  $\delta^{15}\text{N}$  (Katzenberg and Lovell, 1999). Similarly, while pregnancy can vary the  $\delta^{15}\text{N}$  values in different ways throughout gestation (e.g. D'Ortenzio et al., 2015; Fuller et al., 2005), it is unlikely that a succession of pregnancies could have caused a variation that would be visible to this extent in the bone, which registers an averaged signal over several years (e.g. Valentin, 2002).

On the other hand, the sample NFN 28 has an intermediate TP ( $\approx$  2.4) rather reflecting an omnivorous diet with a large proportion of plants. This result supports no freshwater fish consumption. At the site level, although other individuals presented higher  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  value than NFN 28 (Fig. 2), the latter's value is close to the average of all the adults (mean  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}} = 10.3 \pm 0.8\text{‰}$ ; Goude et al., 2013). It is thus reasonable to assume that for most of the humans of this site, fish was not part of the staple diet. Its consumption is however not excluded occasionally for a few humans with the highest  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  values of this group (until 13 ‰).

Finally, all the other individuals from GLN have a high TP from approximately 2.7 to 3.2. In terrestrial environments, this reflects a highly carnivorous diet, based on almost 100% of herbivore meat or milk for TP  $\approx$  3, which is not expected for a French Neolithic population. However, the mixed consumption of resources of different trophic levels could also lead to this result. In particular, when the diet includes omnivorous or carnivorous species or fish in addition to herbivores products and plants, as it is suspected here on the basis of C, N and S isotope ratios of bulk collagen. Consequently, we propose to examine different food combinations.

The first food item considered is pig, for which regional zooarchaeological data indicates that it was the second animal resource consumed after cattle (Arbogast et al., 2018; Bedault, 2009; Hachem et al., 2014). While pigs from GLN were supposed to be omnivorous according to their  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  values which are higher than those of herbivores (Fig. 2), here the only sample analyzed has a TP close to herbivores ( $\approx$  2.1). This result could reflect a much more plant-based diet than expected. In this case, the high TP of humans is all the more surprising, indicating an almost exclusive/very largely predominant consumption of animal products (when excluding aquatic resources intake). Although pigs can be significantly fed on human waste, here the difference between the two species in C, N and S isotope ratios of bulk collagen indicates that they do not have the same protein intake (Fig. 2), as also suggested by the CSIA-AA results for nitrogen. Nevertheless, if their diet was more omnivorous than the AA isotope result indicates, it is possible that pigs have consumed lower TP plants. Indeed,  $\beta$  factor is variable and some authors have shown that trees in particular have lower values than herbaceous plants (Kendall et al., 2019; see Appendix Fig. A1.f). The consumption of oak acorns, for example, could decrease the TP of pigs, in addition to animal resources. Indeed, pig is known to be an omnivorous, burrowing animal, feeding on plants, tubers and roots, but also on small animals (insects, mollusks, small mammals or others). The  $\beta$  factor variability has been highlighted by several studies,

either for plant species (e.g. cereals vs. legumes) or anatomical parts (e.g. rachis vs. grain), allowing various possibilities regarding the plant consumption impact on the pigs' TP (see Appendix Fig. A1.f; Bol et al., 2002; Itahashi et al., 2019; Kendall et al., 2019; Paolini et al., 2015; Steffan et al., 2013; Styring et al., 2014b; Takizawa et al., 2017; Yoneyama and Tanaka, 1999). Moreover, TDF has also been reported to be variable, adding uncertainty to our interpretations, although it is mostly referred to be between 7 and 8 for terrestrial mammals (e.g. Chikaraishi et al., 2015; Kendall et al., 2017; McMahon and McCarthy, 2016).

In farming conditions, pigs can be fed essentially with plants, in particular with human cereal waste, possibly including manured crops which present higher  $\delta^{15}\text{N}$  values. This hypothesis is consistent with the observed  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  results (Fig. 4): herbivore's TP and both higher  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values than other domestic samples. Indeed, manuring leads to an increase of all the  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  to a same extent resulting in an unchanged  $\text{TP}_{\text{AA}}$  (Styring et al., 2014a). The  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  discrepancy between pigs and herbivores could also represent the separated spaces of herding, probably keeping pigs closer to the settlement and grazing herbivores further away, possibly more in upland as suggested for the Early Neolithic context in Germany at Vaihingen (Bentley and Knipper, 2005). Regardless, whatever and wherever the pigs are fed, the AA result indicates a more herbivorous TP than previously considered on the basis of N bulk collagen and confirms a different plant-based diet than herbivores. Analysis of more pigs would provide insight into whether this individual is representative of its community or has particularly low TP compared to others. If pigs are effectively more herbivorous than previously assumed (possibly feeding on manured cereals), the particularly high TP of humans is quite unexpected. A comparable case was found for the first Anatomically Modern Humans in Crimea: their high  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  values supposed a high TP (Drucker et al., 2017). However, CSIA-AA has nuanced this result showing that mammoths' TP was actually close to 2 as herbivorous despite their high  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  values (like GLN pigs) and that humans' TP were closer to 2.5, suggesting a rather omnivorous diet. In our case however, humans' TP is still high, most likely indicating a very carnivorous diet, or the introduction in diet of another resource of higher TP, like fish. This brings us to the second food item considered.

Regarding fish consumption, it is unlikely to be significant for these humans although it is not possible to exclude it, namely for some of them (as in particular GLN 294), occasionally. First, substantial consumption of freshwater fish such as pikes, carps or eels (supposed to be fished in this region) would result *a priori* in higher TP. Indeed, fish consumers are encountered regionally in the Mesolithic population of Noyen-sur-Seine (Paris basin) and present a TP higher than 3.5 (Naito et al., 2013a). Further East in Turkey, some Neolithic hunter-gatherers supposed to have eaten freshwater fish also recorded a TP higher than 3 (Itahashi et al., 2017). However, it is difficult to estimate the proportion of fish in the case of a mixed terrestrial and aquatic diet (Ohkouchi et al., 2017). A new method has been developed to disentangle fish consumption based on the difference between  $\delta^{15}\text{N}$  of phenylalanine and methionine ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{Met}}$ ; Ishikawa et al., 2018). However, our analyses were conducted before this new development and we did not measure methionine. Another argument for no (or low) fish consumption concerns the  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values. Local range of values for freshwater fish is not known, but it is likely to be different from those of terrestrial animals, probably lower, as it is the case in other contexts. For example,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values are systematically and significantly lower for freshwater fish than for terrestrial animals at the nearby Mesolithic site of Noyen-sur-Seine (Naito et al., 2013a), in Neolithic Turkey (Itahashi et al., 2019) or in Bronze-Iron age populations of Kazakhstan (Itahashi et al., 2020). Moreover, when humans from these sites consumed fish, they consistently had lower  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values than terrestrial animals. In our study, the human  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values are similar to those of terrestrial domestic animals, and they are contrarily different from those of wild species (assuming that two samples are representative of a whole). We can guess that freshwater resources could be distinct

from domestic fauna in their  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values. In this case, the significant consumption of freshwater resources is unlikely.

Other omnivorous or carnivorous wild animals could have been consumed to complement the staple diet of humans, as for example badger, fox, birds or eggs, and the considerations are probably the same as for fish. Regardless, zooarchaeological data does not support a substantial intake of these resources and if they were consumed, that could be in a very occasional way which probably would not register significantly into the bones.

On another note, while animals'  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values are well correlated ( $r \approx 0.9$ ), the humans'  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values are rather anti-correlated (although the correlation coefficient  $r$  is very low, around -0.4) as well as the  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  and  $\delta^{34}\text{S}_{\text{bulk}}$  values of all the humans from GLN ( $r \approx -0.3$ ). This could indicate a relative reliance on freshwater fish supplies for individuals that have the highest TP and both the lowest  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  and  $\delta^{34}\text{S}_{\text{bulk}}$  (assuming that fish should have lower  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  and  $\delta^{34}\text{S}_{\text{bulk}}$  than terrestrial animals, as in other contexts). However, this could also indicate the relative reliance on plants vs. animal products, where individuals with the highest  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  and  $\delta^{34}\text{S}_{\text{bulk}}$  and the lowest TP could have consumed more cereals. In this regard,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  are well correlated in both humans and animals ( $r \approx 0.9$ ), indicating the trophic effect, and  $\delta^{34}\text{S}_{\text{bulk}}$  and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  are also well correlated in humans ( $r \approx 0.7$ ), rather indicating separated environments or different plants consumed. Although there is no sufficient data for both  $\delta^{34}\text{S}_{\text{bulk}}$  and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  in animals to track any direct correlation, it is noticeable that, considering the whole groups, domestic herbivores have both lower  $\delta^{34}\text{S}_{\text{bulk}}$  and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values than pigs. Possibly, pigs were relying on human manured cereals waste. According to this hypothesis, cereals would have higher  $\delta^{34}\text{S}_{\text{bulk}}$  and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values than herbivores' forage.

It is indisputable that plants constitute another end-member resource for calories intake although their isotopic signature is not known as well as their relative proportion intake. While Styring and colleagues (2015) estimate that the plants'  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values of Vaihingen is similar to that of herbivores, in our context it is possible that this value approaches that of pigs (Fig. 4). Actually, both  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  values and consequently the  $\beta$  factor are quite variable in plants (see Appendix Fig. A1.f) and their local baseline clearly influences the subsequent interpretation. For instance, as Styring and colleagues (2015) suggest for Vaihingen, cereals TP could be quite higher than 1 thus leading to increase the resulting TP of humans. In this case, the humans' diet could be less carnivorous than assumed.

Thus, while CSIA-AA can be very useful to distinguish terrestrial from freshwater resources in some cases (low  $\text{TP} < 2.5$  vs. high  $\text{TP} \gg 3$  + low  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$ ), it appears to be not so conclusive in the case of intermediate values with a mixed diet. Our results find an interesting example of comparison in Turkish Neolithic sites. On the one hand, Pre-Pottery Neolithic hunter-gatherers (from Hayankeyf Höyük) with high  $\text{TP}_{\text{ter}}$  ( $>3$ ) and low  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values have consumed freshwater fish: the amino acid  $\delta^{15}\text{N}$  analysis brings a quite clear picture (Itahashi et al., 2017). On the other hand, the Pottery Neolithic farmers from the same Upper Tigris Valley (at Hakemi Use) have shown lower  $\text{TP}_{\text{ter}}$  ( $2.5 \pm 0.1$ ) and higher  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  values, similar to those of terrestrial animals, suggesting a limited intake of aquatic protein (Itahashi et al., 2019). By comparison, our results would fall between these two observed patterns. Another case similar to the humans of GLN was observed for Neanderthals from Les Cottés and La Grotte du Renne (France; Jaouen et al., 2019). In this example, the combined analysis of the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{Phe}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{Val}}$  has achieved disentangling the question. These Neanderthals probably did not consume freshwater fish and the high TP (2.9) is interpreted as merely corresponding to a pure carnivorous diet.

To test our hypotheses and with the goal of broadening the discussion, we tried to model the relative contribution of different food sources with FRUITS software (Fernandes et al., 2014). All the input parameters, results and discussion are provided in Appendix B1 (Fig. B1, Table B1 and text B1). Due to several uncertainties inherent to the context and method (variable offsets, TDF and  $\beta$  value, unknown local food source values and food sources themselves, variable concentrations), the models are not expected to represent the true proportion of foodstuffs in the diet but they provide an interesting insight for further discuss the interpretations. Moreover, they offer an opportunity to consider together different proxies: here we consider alternatively CNS isotope ratios, N isotope ratio in Glu and Phe and, for the first time to our knowledge, all these proxies together. In each case the models are based on 3 or 4 sources: plants, domestic herbivores, pigs and freshwater fish. The results indicate for the GluPhe model a lower plant intake, a higher meat intake (particularly of pig) and a lower freshwater fish intake than through the CNS model (Appendix Fig. B1). The model integrating all proxies globally shows intermediate results confirming our previous interpretations and enhances the inter-individual differences. Furthermore, it emphasizes the minimal contribution of freshwater fish to the diet of all individuals when considering the 4 end-members previously described. A more in-depth discussion is available in Appendix B1.

#### 4. CONCLUSIONS

To conclude, the CSIA-AA results, in addition to bulk collagen isotopic data, suggest a more carnivorous diet than previously supposed for most humans at Gurgy (GLN). These farmers certainly had a mainly terrestrial based diet, with domestic animals as the primary protein intake and probably a small amount of plants for calories. Pigs were likely more herbivorous than assumed, possibly feeding on manured cereals from human waste. By the way, cereals could present a higher TP than assumed and the variability of  $\beta$  factor and TDF needs to be further defined. Nevertheless, freshwater fish were apparently not a significant contribution to the human diet although their occasional consumption is not definitely excluded for some individuals. On the other hand, the results confirm low TP for a woman previously highlighted as outlier and support a rather omnivorous diet for humans at Pontcharaud (NFN). Finally, the direct comparison with local freshwater fish and more pig samples could confirm these results.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are very grateful to Thomas Lescarret for editing the English. This work was supported by the Institut Danone France/Fondation pour la Recherche Médicale 2015 partnership (Women and diet at the beginning of farming, 5th – 3rd millennium BC, France: a bio-anthropological approach; Dir. G. Goude 2016-2017; <http://institutdanone.org/nos-prix/femmes-alimentation-les-premieres-societesagropastorales-ve-iiie-millennaires-av-j-c-france-approche-bio-anthropologique/>) and funded by a ministerial grant from the Research National Agency as a program of prospects investments ANR-10-LABX-52 (project 'Diversité biologique et culturelle de l'Homme de la fin de la Préhistoire à la Protohistoire'; dir: S Rottier; Université de Bordeaux, LaScArBx-ANR; 2012–14)

#### SAMPLE CREDIT AUTHOR STATEMENT

Léonie REY: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Data Curation, Writing - Original Draft - Review & Editing, Visualization  
 Yuichi I. NAITO: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Resources, Data Curation, Writing - Original Draft - Review & Editing, Visualization

Yoshito CHIKARAISHI: Methodology, Validation, Formal analysis, Writing - Original Draft - Review & Editing, Visualization

Stéphane ROTTIER: Validation, Investigation, Resources, Data Curation, Writing - Original Draft - Review & Editing, Supervision, Funding acquisition, Project administration, Visualization

Gwenaëlle GOUDE: Conceptualization, Validation, Investigation, Data Curation, Writing - Original Draft - Review & Editing, Supervision, Funding acquisition, Project administration, Visualization

Naohiko OHKOUCHI: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Resources, Data Curation, Writing - Original Draft - Review & Editing, Visualization

## REFERENCES

Arbogast, R.-M., Balasse, M., Ollivier, M., Tresset, A., Cucchi, T., Bréhard, S., Blaise, E., Bedault, L., 2018. Des animaux et des hommes au Néolithique, in: Dominique, G., Jean, G. (Eds.), *La Protohistoire de la France*. Hermann, Paris, pp. 153-169.

Augereau, A., Chambon, P., 2011. Les occupations néolithiques de Macherin à Monéteau (Yonne). Société Préhistorique Française, Paris.

Augereau, A., Chambon, P., Sidéra, I., 2005. Les occupations néolithiques de Monéteau, "sur Macherin" (Yonne) : données préliminaires. *Revue Archéologique de l'Est* 54, 51-70.

Bakels, C., 1997. Le blé dans la culture de Cerny, in: Constantin, C., Mordant, D., Simonin, D. (Eds.), *La culture de Cerny. Nouvelle économie, nouvelle société au Néolithique. Actes du Colloque International de Nemours, 1994. Mémoires du Musée de Préhistoire d'Ile-de-France*, pp. 315-317.

Balasse, M., Tresset, A., 2002. Early weaning of neolithic domestic cattle (Bercy, France) revealed by intra-tooth variation in nitrogen isotope ratios. *Journal of Archaeological Science* 29, 853-859.

Bedault, L., 2009. First reflections on the exploitation of animals in Villeneuve-Saint-Germain society at the end of the early Neolithic in the Paris Basin (France) in: Hofmann, D., Bickle, P. (Eds.), *Creating communities: New advances in central European Neolithic research*. Oxbow Books, Oxford, pp. 111-131.

Bentley, R.A., Knipper, C., 2005. Transhumance at the early Neolithic settlement at Vaihingen (Germany). *Antiquity* 76.

Beyneix, A., 2016. Les manifestations de prestige au Néolithique. *Les Nouvelles de l'archéologie*, 63.

Bickle, P., 2018. Stable isotopes and dynamic diets: The Mesolithic-Neolithic dietary transition in terrestrial central Europe. *Journal of Archaeological Science: Reports* 22, 444-451.

Bocherens, H., Drucker, D., 2003. Trophic level isotopic enrichment of carbon and nitrogen in bone collagen: case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems. *International Journal of Osteoarchaeology* 13, 46-53.

Bocherens, H., Polet, C., Toussaint, M., 2007. Palaeodiet of Mesolithic and Neolithic populations of Meuse Basin (Belgium): evidence from stable isotopes. *Journal of Archaeological Science* 34, 10-27.

Bogaard, A., Arbogast, R.-M., Ebersbach, R., Fraser, R.A., Knipper, C., Krahn, C., Schäfer, M., Styring, A., Krause, R., 2017. The Bandkeramik settlement of Vaihingen an der Enz, Kreis Ludwigsburg (Baden-Württemberg): an integrated perspective on land use, economy and diet. *Germania: Anzeiger der Römisch-Germanischen Kommission des Deutschen Archäologischen Instituts* 94.

Bogaard, A., Fraser, R., Heaton, T.H.E., Wallace, M., Vaiglova, P., Charles, M., Jones, G., Evershed, R.P., Styring, A.K., Andersen, N.H., Arbogast, R.-M., Bartosiewicz, L., Gardeisen, A., Kanstrup, M., Maier, U., Marinova, E., Ninov, L., Schäfer, M., Stephan, E., 2013. Crop manuring and intensive land management by Europe's first farmers. *P Natl Acad Sci USA* 110, 12589-12594.

- Bol, R., Ostle, N.J., Petzke, K.J., 2002. Compound specific plant amino acid  $\delta^{15}\text{N}$  values differ with functional plant strategies in temperate grassland. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165, 661-667.
- Bösl, C., Grupe, G., Peters, J., 2006. A Late Neolithic vertebrate food web based on stable isotope analyses. *International Journal of Osteoarchaeology* 16, 296-315.
- Bouby, L., Marie-France, D.-S., Martin, L., Marival, P., Wiethold, J., 2018. Ressources végétales et économie de subsistance au Néolithique en France (6000-2000 av. J.-C.).
- Budd, C., Potekhina, I., Lillie, M., 2020. Continuation of fishing subsistence in the Ukrainian Neolithic: diet isotope studies at Yasinovatka, Dnieper Rapids. *Archaeol Anthropol Sci* 12, 64.
- Cassidy, L., Ó Maoldúin, R., Kador, T., Lynch, A., Jones, C., Woodman, P., Murphy, E., Ramsey, G., Dowd, M., Noonan, A., Campbell, C., Jones, E., Mattiangeli, V., Bradley, D., 2020. A dynastic elite in monumental Neolithic society. *Nature* 582, 384-388.
- Chambon, P., Augereau, A., Bonnardin, S., Delor, J.-P., Gibaja Bao, J.F., Lemercier, O., Meunier, K., Moreau, C., Pariat, J.-G., Prestreau, M., Rottier, S., Sidéra, I., 2009. Evolution, coexistence et confrontation de pratiques funéraires entre 4500 et 4000 av. J.-C. sur un micro-territoire : la vallée de l'Yonne, entre le Serein et le Baulche. - Rapport de Projet collectif de Recherche. Service Régional de l'Archéologie, Dijon, p. 146 p.
- Chambon, P., Rottier, S., Augereau, A., Bonnardin, S., Meunier, K., Pariat, J.-G., 2013. Evolution, coexistence et confrontation de pratiques funéraires entre 4700 et 4000 av. J.-C. sur un microterritoire dans la vallée de l'Yonne, in: Jaubert, J., Fourment, N., Depaepe, P. (Eds.), *Transitions, ruptures et continuité en Préhistoire, XXVIIe Congrès Préhistorique de France, Bordeaux - Les Eyzies 2010*. Société Préhistorique Française, Paris, pp. 213-228.
- Chikaraishi, Y., Kashiyama, Y., Ogawa, N.O., Kitazato, H., Ohkouchi, N., 2007. Metabolic control of nitrogen isotope composition of amino acids in macroalgae and gastropods implications for aquatic food web studies. *Marine ecology progress series* 342, 85-90.
- Chikaraishi, Y., Ogawa, N.O., Doi, H., Ohkouchi, N., 2011.  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  ratios of amino acids as a tool for studying terrestrial food webs: a case study of terrestrial insects (bees, wasps, and hornets). *Ecological research* 26, 835-844.
- Chikaraishi, Y., Ogawa, N.O., Kashiyama, Y., Takano, Y., Suga, H., Tomitani, A., Miyashita, H., Kitazato, H., Ohkouchi, N., 2009. Determination of aquatic food-web structure based on compound-specific nitrogen isotopic composition of amino acids. *Limnology and Oceanography: Methods* 7, 740-750.
- Chikaraishi, Y., Ogawa, N.O., Ohkouchi, N., 2010a. Further evaluation of the trophic level estimation based on nitrogen isotopic composition of amino acids. *Earth, life, and isotopes*, 37-51.
- Chikaraishi, Y., Steffan, S.A., Ogawa, N.O., Ishikawa, N.F., Sasaki, Y., Tsuchiya, M., Ohkouchi, N., 2014. High-resolution food webs based on nitrogen isotopic composition of amino acids. *Ecology and Evolution* 4, 2423-2449.
- Chikaraishi, Y., Steffan, S.A., Takano, Y., Ohkouchi, N., 2015. Diet quality influences isotopic discrimination among amino acids in an aquatic vertebrate. *Ecology and Evolution* 5, 2048-2059.
- Chikaraishi, Y., Takano, Y., Ogawa, N., Ohkouchi, N., 2010b. Instrumental optimization for compound-specific nitrogen isotope analysis of amino acids by gas chromatography/combustion/isotope ratio mass spectrometry. *Earth, life, and isotopes*, 367-386.
- Clavel, B., 2009. Site de pêche néolithique au bord de l'Aisne. *Archéopages* 26, 22-23.
- Clavel, B., Arbogast, R.-M., 2007. Fish exploitation from early neolithic sites in northern France : The first data, in: Dobiati, C., Leidorf, K. (Eds.), *The role of fish in ancient time*. 13th Meeting of the International Council of the ICAZ Fish Remains Working Group. *Internationale Archäologie*, pp. 85-91.

- Cook, G.T., Bonsall, C., Hedges, R.E.M., McSweeney, K., Boronean, V., Pettitt, P.B., 2001. A freshwater diet-derived  $^{14}\text{C}$  reservoir effect at the stone age sites in the Iron Gates Gorge. *Radiocarbon* 43, 453-460.
- Coutelas, A., Hauzeur, A., Courboin-Gresillaud, E., Terrom, J., 2015. with the collaboration of Chesnaux L, Chol E, Chrzavzez J, Fernandès P, Gomez de Soto J, Goude G, Louyot D, Mens E, Roux L, Rué M, Varennes G. Pussigny (37), « Le Vigneau 2 ». Nécropoles néolithique et protohistoriques. Rapport final d'opération. Orléans: SRA Centre. 1113 p.
- Craine, J.M., Elmore, A.J., Aidar, M.P.M., Bustamante, M., Dawson, T.E., Hobbie, E.A., Kahmen, A., Mack, M.C., McLauchlan, K.K., Michelsen, A., Nardoto, G.B., Pardo, L.H., Peñuelas, J., Reich, P.B., Schuur, E.A.G., Stock, W.D., Templer, P.H., Virginia, R.A., Welker, J.M., Wright, I.J., 2009. Global patterns of foliar nitrogen isotopes and their relationships with climate, mycorrhizal fungi, foliar nutrient concentrations, and nitrogen availability. *New Phytologist* 183, 980-992.
- D'Ortenzio, L., Brickley, M., Schwarcz, H., Prowse, T., 2015. You are not what you eat during physiological stress: Isotopic evaluation of human hair. *American Journal of Physical Anthropology* 157, 374-388.
- de Becdelièvre, C., Jovanovic, J., Hofmanová, Z., Goude, G., Stefanović, S., 2020. Direct insight into dietary adaptations and the individual experience of Neolithisation: comparing subsistence, provenance and ancestry of Early Neolithic humans from the Danube Gorges c. 6200–5500 cal BC, in: Gron, K.J., Sørensen, L., Rowley-Conwy, P. (Eds.), *Farmers at the Frontier: A Pan European Perspective on Neolithisation*. Oxbow, Oxford & Philadelphia, pp. 45-75.
- Dietsch-Sellami, M., 2007. L'utilisation des plantes sauvages au Néolithique dans le nord-ouest de la France: témoignages carpologiques, in: Besse, M. (Ed.), *Sociétés néolithiques, des faits archéologiques aux fonctionnements socio-économiques*, Actes du 27e colloque interrégional sur le Néolithique, Neuchâtel. CAR, Lausanne, pp. 127-136.
- Drieu, L., Mirabaud, S., Roffet-Salque, M., Blasco, T., Petrequin, P., Petrequin, A.-M., Evershed, R.P., Regert, M., 2020. Defining pottery use and exploitation of natural products at Clairvaux XIV during the Middle Neolithic, A. Hafner, E. Dolbunova, A. Mazurkevich, E. Prankenaitė, M. Hinz (Eds.), *Settling Waterscapes in Europe: The Archaeology of Neolithic & Bronze Age Pile-Dwellings*. Propylaeum, Bern and Heidelberg, pp. 251-274.
- Drucker, D., Bocherens, H., 2004. Carbon and nitrogen stable isotopes as tracers of change in diet breadth during Middle and Upper Palaeolithic in Europe. *International Journal of Osteoarchaeology* 14, 162-177.
- Drucker, D.G., Naito, Y.I., Jerardino, A., 2016. Aquatic resource exploitation by prehistoric humans. *Journal of Archaeological Science: Reports* 6, 621-622.
- Drucker, D.G., Naito, Y.I., Péan, S., Prat, S., Crépin, L., Chikaraishi, Y., Ohkouchi, N., Puaud, S., Lázníčková-Galetová, M., Patou-Mathis, M., Yanevich, A., Bocherens, H., 2017. Isotopic analyses suggest mammoth and plant in the diet of the oldest anatomically modern humans from far southeast Europe. *Scientific Reports* 7, 6833.
- Drucker, D.G., Valentin, F., Thevenet, C., Mordant, D., Cottiaux, R., Delsate, D., Van Neer, W., 2018. Aquatic resources in human diet in the Late Mesolithic in Northern France and Luxembourg: insights from carbon, nitrogen and sulphur isotope ratios. *Archaeol Anthropol Sci* 10, 351-368.
- Dufour, E., Bocherens, H., Mariotti, A., 1999. Palaeodietary implications of isotopic variability in eurasian lacustrine fish. *Journal of Archaeological Science* 26, 617-627.
- Dufour, E., Gerdeaux, D., 2001. Apports des isotopes stables ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ,  $^{36}\text{S}/^{34}\text{S}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) aux études écologiques sur les poissons. *Cybium* 25, 369-382.
- Dürrwächter, C., Craig, O.E., Collins, M.J., Burger, J., Alt, K.W., 2006. Beyond the grave: variability in Neolithic diets in Southern Germany? *Journal of Archaeological Science* 33, 39-48.

- Fernandes, R., Grootes, P., Nadeau, M.-J., Nehlich, O., 2015. Quantitative diet reconstruction of a Neolithic population using a Bayesian mixing model (FRUITS): The case study of Ostorf (Germany). *American Journal of Physical Anthropology*, n/a-n/a.
- Fernandes, R., Millard, A.R., Brabec, M., Nadeau, M.-J., Grootes, P., 2014. Food Reconstruction Using Isotopic Transferred Signals (FRUITS): A Bayesian Model for Diet Reconstruction. *PLoS ONE* 9, e87436.
- France, R.L., 1994. Nitrogen isotopic composition of marine and freshwater invertebrates. *Marine ecology progress series* 115, 205-207.
- Fraser, R.A., Bogaard, A., Schäfer, M., Arbogast, R., Heaton, T.H.E., 2013. Integrating botanical, faunal and human stable carbon and nitrogen isotope values to reconstruct land use and palaeodiet at LBK Vaihingen an der Enz, Baden-Württemberg. *World Archaeology* 45, 492-517.
- Fuller, B.T., Fuller, J.L., Sage, N.E., Harris, D.A., O'Connell, T.C., Hedges, R.E.M., 2005. Nitrogen balance and  $\delta^{15}\text{N}$ : why you're not what you eat during nutritional stress. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 19, 2497-2506.
- Gavériaux, F., Bouby, L., Marinval, P., Figueiral, I., Binder, D., Fouéré, P., Gernigon, K., Léa, V., Hasler, A., Vignaud, A., Goude, G., accepted. L'alimentation des premières sociétés agropastorales du Sud de la France : premières données isotopiques sur des graines et fruits carbonisés néolithiques et essais de modélisation.
- Gillis, R.E., Kovačiková, L., Bréhard, S., Guthmann, E., Vostrovská, I., Nohálová, H., Arbogast, R.M., Domboróczki, L., Pechtl, J., Anders, A., Marciniak, A., Tresset, A., Vigne, J.D., 2017. The evolution of dual meat and milk cattle husbandry in Linearbandkeramik societies. *Proc Biol Sci* 284.
- Goude, G., 2007. Étude des modes de subsistance de populations néolithiques (VI<sup>e</sup>-IV<sup>e</sup> millénaires av. J.-C.) dans le nord-ouest de la Méditerranée. Approche par l'utilisation des isotopes stables ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) du collagène. Université Bordeaux 1, p. 416.
- Goude, G., Fontugne, M., 2016. Carbon and nitrogen isotopic variability in bone collagen during the Neolithic period: Influence of environmental factors and diet. *Journal of Archaeological Science* 70, 117-131.
- Goude, G., Rivollat, M., Schmitt, A., Salazar-García, D., Villotte, S., Lambert, A., Sanz, A., Brige, P., Pemonge, M.-H., Haak, W., Deguilloux, M.-F., 2021. Identifying biological and behavioural diversity among European Neolithic farmers, 9th International Symposium on Biomolecular Archaeology (1er-4 juin, Toulouse, France). Poster presentation, Toulouse, France.
- Goude, G., Salazar-García, D.C., Power, R.C., Rivollat, M., Gourichon, L., Deguilloux, M.-F., Pemonge, M.-H., Bouby, L., Binder, D., 2020. New insights on Neolithic food and mobility patterns in Mediterranean coastal populations. *American Journal of Physical Anthropology* 173, 218-235.
- Goude, G., Salazar-García, D.C., Power, R.C., Terrom, J., Rivollat, M., Deguilloux, M.-F., Pemonge, M.-H., Le Bailly, M., Andre, G., Coutelas, A., Hauzeur, A., 2019. A Multidisciplinary Approach to Neolithic Life Reconstruction. *Journal of Archaeological Method and Theory* 26, 537-560.
- Goude, G., Schmitt, A., Herrscher, E., Loison, G., Cabut, S., André, G., 2013. Pratiques alimentaires au Néolithique moyen : nouvelles données sur le site de Pontcharaud 2 (Puy-de-Dôme, Auvergne, France). *Bulletin de la Société préhistorique française* 110, 299-317.
- Gron, K.J., Gröcke, D.R., Larsson, M., Sørensen, L., Larsson, L., Rowley-Conwy, P., Church, M.J., 2017. Nitrogen isotope evidence for manuring of early Neolithic Funnel Beaker Culture cereals from Stensborg, Sweden. *Journal of Archaeological Science: Reports* 14, 575-579.
- Hachem, L., Bedault, L., Leduc, C., 2014. L'élevage et la chasse au Chasséen septentrional : renouvellement des connaissances d'après l'étude des enceintes de Villers-Carbonnel (Somme) et de Passel (Oise), Le Chasséen, des Chasséens : retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortailod, Lagozza. *Archives d'Écologie Préhistorique*, Paris, pp. 241-258.

Hamon, C., Salavert, A., Dietsch-Sellami, M.-F., Monchablon, C., 2019. Cultiver et consommer les plantes au Néolithique entre Seine et Meuse : technologie des meules et analyses carpologiques, in Cyril Montoya, Jean-Pierre Fagnart et Jean-Luc Loch dir. *Préhistoire de l'Europe du Nord-Ouest : mobilité, climats et identités culturelles*, Volume 3 : Néolithique - Âge du Bronze Françoise Bostyn, Caroline Hamon, Aurélie Salavert et François Giligny coord. Session 4 - L'exploitation du milieu au Néolithique dans le quart nord-ouest de l'Europe : contraintes environnementales, identités techniques et choix culturels, Actes du XXVIIIe Congrès préhistorique de France Amiens 30 mai-4 juin 2016, Société Préhistorique française, Paris.

Hatch, K., Crawford, M., Kunz, A., Thomsen, S., Eggett, D., Nelson, S., Roeder, B., 2006. An objective means of diagnosing anorexia nervosa and bulimia nervosa using  $15\text{N}/14\text{N}$  and  $13\text{C}/12\text{C}$  ratios in hair. *Rapid communications in mass spectrometry* : RCM 20, 3367-3373.

Ishikawa, N.F., Chikaraishi, Y., Takano, Y., Sasaki, Y., Takizawa, Y., Tsuchiya, M., Tayasu, I., Nagata, T., Ohkouchi, N., 2018. A new analytical method for determination of the nitrogen isotopic composition of methionine: Its application to aquatic ecosystems with mixed resources. *Limnology and Oceanography: Methods* 16, 607-620.

Itahashi, Y., Ananyevskaya, E., Yoneda, M., Ventresca Miller, A.R., Nishiaki, Y., Motuzaitė Matuzevičiūtė, G., 2020. Dietary diversity of Bronze-Iron Age populations of Kazakhstan quantitatively estimated through the compound-specific nitrogen analysis of amino acids. *Journal of Archaeological Science: Reports* 33, 102565.

Itahashi, Y., Erdal, Y.S., Tekin, H., Omar, L., Miyake, Y., Chikaraishi, Y., Ohkouchi, N., Yoneda, M., 2019. Amino acid  $15\text{N}$  analysis reveals change in the importance of freshwater resources between the hunter-gatherer and farmer in the Neolithic upper Tigris. *American Journal of Physical Anthropology* 168, 676-686.

Itahashi, Y., Miyake, Y., Maeda, O., Kondo, O., Hongo, H., Van Neer, W., Chikaraishi, Y., Ohkouchi, N., Yoneda, M., 2017. Preference for fish in a Neolithic hunter-gatherer community of the upper Tigris, elucidated by amino acid  $\delta^{15}\text{N}$  analysis. *Journal of Archaeological Science* 82, 40-49.

Jaouen, K., Richards, M.P., Le Cabec, A., Welker, F., Rendu, W., Hublin, J.-J., Soressi, M., Talamo, S., 2019. Exceptionally high  $\delta^{15}\text{N}$  values in collagen single amino acids confirm Neandertals as high-trophic level carnivores. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, 4928-4933.

Jeunesse, C., 2010. Changements sociaux et signification de la chasse dans les sociétés du Néolithique circumalpin. Une hypothèse alternative au déterminisme écologique, *Vernetzungen. Aspekte siedlungsarchäologischer Forschung. Festschrift für Helmut Schlichtherle zum 60. Geburtstag*. Lavori Verlag, pp. 127-139.

Jeunesse, C., 2016. Biens précieux et biens exceptionnels dans la Préhistoire récente de l'Europe. Le système du dépôt et de la tombe élitare et la naissance de l'Europe barbare. *Préhistoires Méditerranéennes* 5.

Jeunesse, C., Arbogast, R.-M., 1997. A propos du statut de la chasse au Néolithique moyen. La faune sauvage dans les déchets domestiques et dans les mobiliers funéraires, in: Jeunesse, C. (Ed.), *Le Néolithique danubien et ses marges entre Rhin et Seine*. Cahiers de l'association pour la promotion de la recherche archéologique en Alsace, supplément, Actes du 22<sup>e</sup> colloque interrégional sur le Néolithique, Strasbourg (27-29 octobre 1995), pp. 81-102.

Jovanović, J., de Bechedelievre, C., Goude, G., Le Roy, M., Herrscher, E., Stefanović, S., 2015. Diet and health status of children at the Mesolithic Neolithic transition in the Danube Gorges. *Archaika* 3, 42-65.

Katzenberg, M.A., Lovell, N.C., 1999. Stable isotope variation in pathological bone. *International Journal of Osteoarchaeology* 9, 316-324.

Kendall, I., Woodward, P., Clark, J., Styring, A., Hanna, J., Evershed, R., 2019. Compound-specific  $\delta^{15}\text{N}$  values express differences in amino acid metabolism in plants of varying lignin content. *Phytochemistry* 161, 130-138.

- Kendall, I.P., Lee, M.R.F., Evershed, R.P., 2017. The effect of trophic level on individual amino acid  $\delta^{15}\text{N}$  values in a terrestrial ruminant food web. *STAR: Science & Technology of Archaeological Research* 3, 135-145.
- Lillie, M., Budd, C., Potekhina, I., 2011. Stable isotope analysis of prehistoric populations from the cemeteries of the Middle and Lower Dnieper Basin, Ukraine. *Journal of Archaeological Science* 38, 57-68.
- Loison, G., 1998. La nécropole de Pontcharaud en basse Auvergne, in: Guilaine, J. (Ed.), *Sépultures d'Occident et genèses des mégalithismes*. Errance, Paris, pp. 189-206.
- Marinval, P., 1995. Réserve et consommation sur un site post-rubané : «Les Plantes-du-Monts», Gurgy (Yonne). *Revue archéologique de Picardie*. Numéro spécial 9.
- Martin, L., Bouby, L., Marinval, P., Marie-France, D.-S., Rousselet, O., Cabanis, M., Durand, F., Figueiral, I., 2014. L'exploitation des ressources végétales durant le Chasséen : un bilan des données carpologiques en France entre 4400 et 3500 avant notre ère/The use of vegetal resources during the "Chasséen": an overview of archaeobotanical data in France between 4400 and 3500 Cal BC, Le Chasséen, des Chasséens : retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortaillod, Lagozza. Conference Proceedings, Paris, 18-20 novembre 2014.
- McClelland, J.W., Montoya, J., 2002. Trophic relationships and the nitrogen isotopic composition of amino acids in plankton. *Ecology* 83, 2173-2180.
- McMahon, K.W., McCarthy, M.D., 2016. Embracing variability in amino acid  $\delta^{15}\text{N}$  fractionation: mechanisms, implications, and applications for trophic ecology. *Ecosphere* 7, e01511.
- Meadows, J., Robson, H.K., Groß, D., Hegge, C., Lübke, H., Schmölcke, U., Terberger, T., Gramsch, B., 2018. How fishy was the inland Mesolithic? New data from Friesack, Brandenburg, Germany. *Radiocarbon* 60, 1621-1636.
- Meunier, K., Augereau, A., Hamon, C., Duhamel, P., 2006. Le site Villeneuve-Saint-Germain de Gurgy 'Les Grands Champs' (Yonne), in: Duhamel, P. (Ed.), *Impacts interculturels au Néolithique moyen. Du terroir au territoire : sociétés et espace*. Actes du 25<sup>e</sup> colloque interrégional sur le Néolithique, Dijon (20-21 octobre 2001). *Revue archéologique de l'Est*, pp. 287-301.
- Naito, Y.I., Chikaraishi, Y., Ohkouchi, N., Drucker, D., Bocherens, H., 2013a. Nitrogen isotopic composition of collagen amino acids as an indicator of aquatic resource consumption: insights from Mesolithic and Epipalaeolithic archaeological sites in France. *World Archaeology* 45, 338-359.
- Naito, Y.I., Chikaraishi, Y., Ohkouchi, N., Yoneda, M., 2013b. Evaluation of carnivory in inland Jomon hunter-gatherers based on nitrogen isotopic compositions of individual amino acids in bone collagen. *Journal of Archaeological Science* 40, 2913-2923.
- Nehlich, O., 2015. The application of sulphur isotope analyses in archaeological research: A review. *Earth-Science Reviews* 142, 1-17.
- Nehlich, O., Borić, D., Stefanović, S., Richards, M.P., 2010. Sulphur isotope evidence for freshwater fish consumption: a case study from the Danube Gorges, SE Europe. *Journal of Archaeological Science* 37, 1131-1139.
- Nehlich, O., Oelze, V., Jay, M., Conrad, M., Stäuble, H., Teegen, W.-R., Richards, M., 2014. Sulphur isotope ratios of multi-period archaeological skeletal remains from central Germany: A dietary and mobility study. *Anthropologie (Brno)* 52, 15-33.
- Ohkouchi, N., Chikaraishi, Y., Close, H.G., Fry, B., Larsen, T., Madigan, D.J., McCarthy, M.D., McMahon, K.W., Nagata, T., Naito, Y.I., Ogawa, N.O., Popp, B.N., Steffan, S., Takano, Y., Tayasu, I., Wyatt, A.S.J., Yamaguchi, Y.T., Yokoyama, Y., 2017. Advances in the application of amino acid nitrogen isotopic analysis in ecological and biogeochemical studies. *Organic Geochemistry* 113, 150-174.

- Paolini, M., Ziller, L., Laursen, K.H., Husted, S., Camin, F., 2015. Compound-Specific  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  Analyses of Amino Acids for Potential Discrimination between Organically and Conventionally Grown Wheat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 63, 5841-5850.
- Petzke, K.J., Feist, T., Fleig, W.E., Metges, C.C., 2006. Nitrogen isotopic composition in hair protein is different in liver cirrhotic patients. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 20, 2973-2978.
- Philippsen, B., Heinemeier, J., 2013. Freshwater Reservoir Effect Variability in Northern Germany. *Radiocarbon* 55, 1085-1101.
- Piličiauskas, G., Jankauskas, R., Piličiauskienė, G., Craig, O.E., Charlton, S., Dupras, T., 2017. The transition from foraging to farming (7000–500calBC) in the SE Baltic: A re-evaluation of chronological and palaeodietary evidence from human remains. *Journal of Archaeological Science: Reports* 14, 530-542.
- Rey, L., Goude, G., Rottier, S., 2017. Comportements alimentaires au Néolithique : nouveaux résultats dans le Bassin parisien à partir de l'étude isotopique ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) de la nécropole de Gurgy « Les Noisats » (Yonne, Ve millénaire av. J.-C.). *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 29, 54-69.
- Rey, L., Salazar-García, D.C., Chambon, P.h., Santos, F., Rottier, S., Goude, G., 2019. A multi-isotope analysis of Neolithic human groups in the Yonne valley, Northern France: insights into dietary patterns and social structure. *Archaeol Anthropol Sci* 11, 5591–5616.
- Richards, M.P., Schulting, R.J., Hedges, R.E.M., 2003. Sharp shift in diet at onset of Neolithic. *Nature* 425, 366.
- Rivollat, M., Mendisco, F., Pemonge, M.-H., Safi, A., Saint-Marc, D., Brémond, A., Couture-Veschambre, C., Rottier, S., Deguilloux, M.-F., 2015. When the Waves of European Neolithization Met: First Paleogenetic Evidence from Early Farmers in the Southern Paris Basin. *PLoS ONE* 10, e0125521.
- Rottier, S., 2007. L'architecture funéraire des sépultures du Néolithique moyen des Noisats à Gurgy (Yonne, France), in: Moinat, P., Chambon, P. (Eds.), *Les cistes de Chamblandes et la place des coffres dans les pratiques funéraires du Néolithique moyen occidental*. Cahiers d'archéologie romande (110) et Société préhistorique française (Mémoire 43), Actes du colloque de Lausanne (12-13 mai 2006), pp. 99-107.
- Rottier, S., Mordant, C., Chambon, P., Thevenet, C., 2005. Découverte de plus d'une centaine de sépultures du Néolithique moyen à Gurgy, les Noisats (Yonne). *Bulletin de la Société préhistorique de France* 102, 641-645.
- Salazar-García, D.C., Fontanals-Coll, M., Goude, G., Subirà, M.E., 2018. "To 'seafood' or not to 'seafood'?" An isotopic perspective on dietary preferences at the Mesolithic-Neolithic transition in the Western Mediterranean. *Quaternary International*.
- Sidéra, I., 2003. De l'usage des produits de la chasse pour différencier des hommes. Fonctions votive et sociale de la chasse au Néolithique ancien et moyen du Bassin parisien, in: Chambon, P., Leclerc, J. (Eds.), *Les pratiques funéraires néolithiques avant 3500 av. J.-C. en France et dans les régions limitrophes*. Société préhistorique française, Table ronde de Saint-Germain-en-Laye (15-17 juin 2001), pp. 91-98.
- Steffan, S.A., Chikaraishi, Y., Horton, D.R., Ohkouchi, N., Singleton, M.E., Miliczky, E., Hogg, D.B., Jones, V.P., 2013. Trophic Hierarchies Illuminated via Amino Acid Isotopic Analysis. *PLoS ONE* 8, e76152.
- Styring, A., Fraser, R., Bogaard, A., Evershed, R., 2014a. The effect of manuring on cereal and pulse amino acid  $\delta^{15}\text{N}$  values. *Phytochemistry* 102.
- Styring, A., Knipper, C., Müller-Scheeßel, N., Grupe, G., Bogaard, A., 2018. The Proof is in the Pudding: Crop Isotope Analysis Provides Direct Insights into Agricultural Production and Consumption. *Environmental Archaeology*, 1-12.

- Styring, A., Rösch, M., Stephan, E., Stika, H.-P., Fischer, E., Sillmann, M., Bogaard, A., 2017. Centralisation and long-term change in farming regimes: Comparing agricultural practices in Neolithic and Iron Age south-west Germany. *Proceedings of the Prehistoric Society* 83, 357-381.
- Styring, A.K., Fraser, R.A., Arbogast, R.-M., Halstead, P., Isaakidou, V., Pearson, J.A., Schäfer, M., Triantaphyllou, S., Valamoti, S.M., Wallace, M., Bogaard, A., Evershed, R.P., 2015. Refining human palaeodietary reconstruction using amino acid  $\delta^{15}\text{N}$  values of plants, animals and humans. *Journal of Archaeological Science* 53, 504-515.
- Styring, A.K., Fraser, R.A., Bogaard, A., Evershed, R.P., 2014b. Cereal grain, rachis and pulse seed amino acid  $\delta^{15}\text{N}$  values as indicators of plant nitrogen metabolism. *Phytochemistry* 97, 20-29.
- Takizawa, Y., Dharampal, P.S., Steffan, S.A., Takano, Y., Ohkouchi, N., Chikaraishi, Y., 2017. Intra-trophic isotopic discrimination of  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  for amino acids in autotrophs: Implications for nitrogen dynamics in ecological studies. *Ecology and Evolution* 7, 2916-2924.
- Tanz, N., Schmidt, H.-L., 2010.  $\delta^{34}\text{S}$ -Value Measurements in Food Origin Assignments and Sulfur Isotope Fractionations in Plants and Animals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58, 3139-3146.
- Thomas, A., 2014. Social discriminations through the grave: identity and status of the dead in the Cerny culture (Middle Neolithic, Paris Basin, France). *Anthropologie (1962-)* 52, 171-182.
- Valentin, J., 2002. Bone remodelling, in: Valentin, J. (Ed.), *Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values.*, Ann. ICRP ed. Pergamon, pp. 185-188.
- Varalli, A., Desideri, J., David-Elbiali, M., Goude, G., Honegger, M., Besse, M., 2021. Bronze Age innovations and impact on human diet: A multi-isotopic and multi-proxy study of western Switzerland. *PLoS ONE* 16, e0245726.
- Yoneyama, T., Tanaka, F., 1999. Natural abundance of  $^{15}\text{N}$  in nitrate, ureides, and amino acids from plant tissues. *Soil Science and Plant Nutrition* 45, 751-755.

## Chapitre 8. Analyses du strontium isotopique ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) et des éléments traces (Sr/Ca, Ba/Ca) par ablation laser

### I. Article 5

---

*Disentangling diagenetic and biogenic trace elements and Sr radiogenic isotopes in fossil dental enamel and bone using laser ablation analysis*

Léonie REY, Théo TACAÏL, Frédéric SANTOS, Stéphane ROTTIER, Gwenaëlle GOUDE et Vincent BALTER

Publié dans : **Chemical Geology** en 2022 (accepté en 2021)

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120608>

Le matériel supplémentaire est disponible en Annexe B5.



## Disentangling diagenetic and biogenic trace elements and Sr radiogenic isotopes in fossil dental enamel using laser ablation analysis

Léonie Rey<sup>a</sup>, Théo Tacail<sup>b</sup>, Frédéric Santos<sup>a</sup>, Stéphane Rottier<sup>a</sup>, Gwenaëlle Goude<sup>c</sup>, Vincent Balter<sup>d,\*</sup>

<sup>a</sup> CNRS UMR 5199, PACEA, Univ. Bordeaux, Allée Geoffroy Saint Hilaire, CS 50023, 33615 Pessac Cedex, France

<sup>b</sup> Bristol Isotope Group, School of Earth Sciences, University of Bristol, Bristol BS8 1RJ, UK

<sup>c</sup> Aix Marseille Univ, CNRS, Minist Culture, LAMPEA, Aix-en-Provence, France

<sup>d</sup> CNRS UMR 5276, LGLTPE, Univ. Lyon, ENS de Lyon, Univ. Lyon1. 46, Allée d'Italie, 69342 Lyon Cedex 07, France

### ARTICLE INFO

Editor: Christian France-Lanord

#### Keywords:

Laser ablation  
Trace elements  
Strontium isotopes  
Neolithic  
Diet  
Mobility  
Enamel  
Bone

### ABSTRACT

The reconstruction of life histories traits such as the ontogenic evolution of diet or sequences of mobility can be achieved for fossil mammals thanks to laser ablation analysis of trace elements concentration and radiogenic Sr isotope composition in dental enamel. However, a major limitation for the use of laser ablation to study fossil tooth enamel is that the analysis must be carried out on bulk sample hence prohibiting any ad hoc leaching step to remove diagenetic compounds. Biogenic and diagenetic trace elements along with the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio must be monitored and post hoc correlation tests processed to isolate areas free of diagenesis. The present study combines a unique combination of biogenic (Sr and Ba), diagenetic (Mn and U) trace elements, major elements (Mg and Ca) and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio time series obtained by means of laser ablation ICPMS and MC-ICPMS on a large number ( $n = 94$ ) of fossil tooth enamel samples of humans and animals from a set of neighboring Neolithic sites in France. Bone fragments sampled from the same specimens are also analyzed for comparison. Trends between diagenetic and biogenic trace and major elements are first identified using inclusive data analysis. The trends are then validated at the scale of the laser ablation raster, and a protocol of data cleaning is developed to identify areas free of diagenesis. Non-significantly altered Sr/Ca, Ba/Ca and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  average values are thus gathered for each cleaned tooth enamel samples and are discussed, along with previously measured bone collagen  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values, in terms of diet and mobility in the context of the Neolithic revolution.

### 1. Introduction

The analysis of trace elements and radiogenic strontium isotopes in fossil bone and teeth to reconstruct ancient diet and mobility is nowadays of routine use in bioarchaeology and paleoanthropology. Of particular interest for ancient mammal dietary habits is the analysis of fossil enamel strontium/calcium ratio (Sr/Ca) and barium/calcium ratio (Ba/Ca). Sr and Ba are discriminated against Ca in biochemical pathways, which include Ca as an essential element, resulting in the overall decrease of the Sr/Ca and Ba/Ca ratios up trophic chains and allowing the reconstruction of ancient dietary behaviors (e.g., Austin et al., 2013; Balter et al., 2001; Gilbert et al., 1994; Joannes-Boyau et al., 2019; Sponheimer and Lee-Thorp, 2006). The radiogenic  $^{87}\text{Sr}$  isotope abundance is determined after normalization of the stable isotope variations to a reference  $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  value, therefore the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio is immune to

biological and any other process up the trophic chain. Consequently, the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio of an animal ultimately reflects that of the bedrock on which it feeds and is used for the reconstruction of ancient mobility (e.g., Sillen et al., 1998; Müller et al., 2003; Balter et al., 2012; Sillen and Balter, 2018; Lugli et al., 2019).

Since the very beginnings of this archeometric discipline, diagenesis has been recognized to be a major limitation and two methods have been developed to overcome this problem. The first method is to leach ad hoc the bone or enamel sample with dilute acetic acid to remove secondary Ca-carbonates (e.g., Balter et al., 2002; Hopkins et al., 2016; Nelson et al., 1986). However, Ca-carbonates are not the only potential secondary phase, oxy-hydroxides being also frequent diagenetic phases, which are not removed by acetic acid. In addition, bone or enamel can be recrystallized, an extreme case where any leaching technique is helpful. The second method consists to monitor the concentration of an

\* Corresponding author.

E-mail address: [vincent.balter@ens-lyon.fr](mailto:vincent.balter@ens-lyon.fr) (V. Balter).

<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120608>

Received 27 July 2020; Received in revised form 9 September 2021; Accepted 27 October 2021

Available online 1 November 2021

0009-2541/© 2021 Published by Elsevier B.V.

element which is known to be of diagenetic origin and perform post hoc correlation tests with the elements (mainly Sr and Ba) supposed to be of biogenic origin. Uranium (U), thorium (Th) and Rare Earth Elements (REE) accumulate in fossil bones and teeth (Kohn et al., 1999; Reynard and Balter, 2014), and are good indicators of the intensity of the diagenesis. The influence of oxy-hydroxides on the biogenic elements concentration can easily be assessed by measuring manganese (Mn) concentration (e.g., Reynard and Balter, 2014). Regarding the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio, the existence of a correlation between the concentrations and isotope compositions along a mixing hyperbola will attest of a diagenetic overprinting (Budd et al., 2000; Martin et al., 2016).

Thanks to the development of laser ablation, it is now possible to analyze in situ the trace elements concentration (Dolphin et al., 2005; Humphrey et al., 2008; Kohn et al., 2013; Müller et al., 2019) and the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio (e.g., Balter et al., 2008; Lugli et al., 2017; Montgomery et al., 2010). This is of noteworthy interest for enamel because it is less sensitive to diagenesis than bone thanks to its less porous structure, and because it grows incrementally, allowing the reconstruction of individual dietary and mobility histories (Austin et al., 2013; Balter et al., 2012; Joannes-Boyau et al., 2019). However, there is a major limitation for the use of laser ablation of fossil tooth enamel, which is that the leaching step is not possible because it needs to be carried out on powdered samples. Biogenic and diagenetic trace elements must be monitored along with the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio and post hoc correlation tests processed to determine the areas free of diagenesis. To the best of our knowledge, this has been done in three studies only (Balter et al., 2012; Simonetti et al., 2008; Willmes et al., 2016), but no trace elements and radiogenic Sr systematics in fossil tooth enamel has been done yet using laser ablation.

The present study combines a unique set of biogenic (Sr and Ba), diagenetic (Mn and U) trace elements, major elements (Mg and Ca) and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio time series obtained by means of laser ablation ICPMS and MC-ICPMS on a large number of fossil tooth enamel samples ( $n = 62$  and 32 for humans and animals, respectively) from a set of neighboring Neolithic sites in France. Bone samples of same specimen are also analyzed for comparison. In the archaeological context of Neolithic Revolution, which is one of the biggest socio-cultural transitions in human history, dietary behavior and mobility of human groups are central issues because people settled down building villages and hunter-gatherers became farmer-pastoralists. The use of laser ablation in such an archaeological and chrono-cultural context is a crucial methodological step that will pave the way for studies on longitudinal life histories.

Laser ablation measurements of trace elements concentrations and

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios produced in the present study a large number of data (> 500,000). Global trends between diagenetic and biogenic trace and major elements are first identified using inclusive data analysis. These trends are then validated at the scale of the laser ablation raster, and a protocol of data cleaning is developed to identify areas free of diagenesis and with reliable  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio. Most of the rasters unfortunately exhibit diagenetic portions so that the full time series are not exploitable. Non-significantly altered Sr/Ca, Ba/Ca and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  average values are thus gathered for each tooth enamel and bone samples and are discussed, along with previously measured bone collagen  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values.

1.1. Material

The bone and tooth enamel samples come from seven Neolithic sites within a radius of 10 km along the Yonne valley, in the South-East of the Paris basin, at the Northern edge of the Morvan massif, France (Fig. 1). The sites with the corresponding material are presented in Table 1. They are dated to different and overlapping periods covering the 5th millennium BCE and they refer to different and mixed cultural spheres (Table 1). Further archaeological details are available in Rey et al. (2019). The bioavailable Sr local range is determined on the grounds of the geological variability from plants and soil samples given by the iRhum database regionally (within a 15 km radius around the sites, including layers q3, q2, c1, c2 and j3; Fig. 1), and is found to vary from 0.7075 to 0.7145 (Willmes et al., 2013). For humans, all the teeth are second molar (M2) except for 2 individuals for whom the teeth are first molar (M1). This corresponds to a life history between approximately 2.5 and 8.5 years  $\pm$  0.5 for M2 and between approximately 0.5 and 3.5 years  $\pm$  0.5 for M1 (AlQahtani et al., 2010). When it was possible, bone from the same individual was also analyzed to assess dietary and mobility changes between childhood and adulthood because bone records a signal corresponding to the individuals' last years of life (Hedges et al., 2007; Szule et al., 2000) and to assess potential differential diagenetic sensitivity relative to enamel.

All observations (anatomical variations, pathologies, stress indicators, wear, maturation stage) and external metrics were recorded and teeth pictured. In addition, calculus samples, impressions of the crown and  $\mu\text{CT}$ -scans were computed whenever possible for further complementary studies (Le Luyer et al., 2016; Rey et al., 2016). The teeth were cut in two pieces with a diamond saw, along the longitudinal bucco-lingual axis, passing through the top of the mesial cusps and

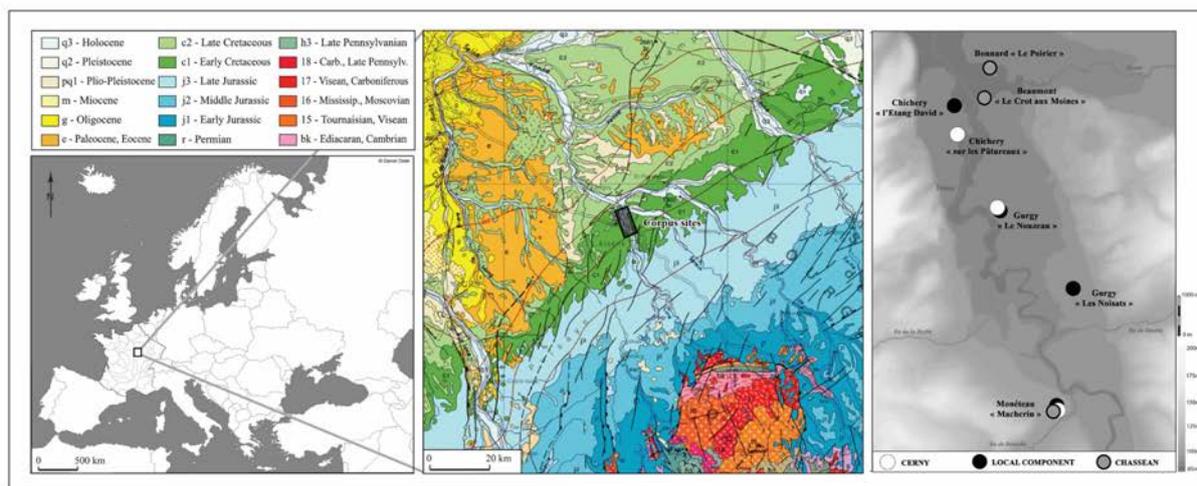


Fig. 1. Localization of the sites and regional geological map. Information is from [geoportail.gouv.fr](http://geoportail.gouv.fr). Scale 1/1,000,000.

**Table 1**  
Summary of archaeological sites information and samples provenance.

Code site	Name site	Cultural attribution	<sup>14</sup> C date	Spatial organization	Number of humans buried	Animal remains	Enamel samples	Bone samples	Stable isotopes <sup>b</sup>
NZ	Gurgy "Le Nouveau"	Cerny (+ local)	5300–4700 cal BC	enclosure with scattered remains +2 associated burials	2 + scattered remains	yes	2 humans 1 animal	2 humans 2 animals	CNS
GLN	Gurgy "Les Noisats"	local component?	5200–3800 cal BC	big and dense cemetery	128	yes	34 humans 8 animals	12 humans 6 animals	CNS
Mon	Monéteau "Macherin"	Chassean (+Cerny +local)	5200–3500 cal BC?	cemetery divided in separated groups	62	no	13 humans	2 humans	CNS
CHI-ED	Chichery "l'Étang David" <sup>a</sup>	local component?	5100–4100 cal BC	cemetery partially destroyed	20	no	1 human	1 human	CN
CHI-Pat	Chichery "Sur les Pâtureaux"	Cerny	4700–4350 cal BC	funerary site with alignments of burials +1 isolated burial	15	no	6 humans	3 humans	CNS
BMT	Beaumont "Le Crôt aux Moines" <sup>a</sup>	Chassean	4800–4000 cal BC	enclosure with scattered remains + other structures	scattered remains	yes	2 humans 18 animals	12 animals	CNS
Bon	Bonnard "Le Poirier" <sup>a</sup>	Chassean	4500–4000 cal BC	2 burials of several inhumations	6	no	1 human	none	CN

<sup>a</sup> Ancient excavation.

<sup>b</sup> Rey et al., 2017; Rey et al., 2019.

perpendicular to the collar (crown root junction, or crj). The mesial part was embedded, with a bone fragment from the same individual whenever possible. Bone fragments were taken from long bone cortical fragments (the bone type is indicated in table S1). The fragments were surface cleaned with a sandblaster with aluminium oxides, washed by compressed air, embedded with tooth enamel in epoxy resin and finally polished manually (granulometry P4000) to obtain a smooth surface.

## 2. Method

### 2.1. Laser ablation

In tooth enamel, rasters were processed along the enamel dentine junction (edj) to cross the Retzius' striae and the transverse striations. For humans and pigs, the profiles were drawn from the apex (« ocl ») to the crj (« col. »). The rasters for concentration and isotopic composition were as close as possible. In bone, one or two small rasters were processed to obtain sufficient data to average. Samples were run according to a fixed sequence procedure according to Tacail et al. (2017). Each sequence was composed of 3 to 6 samples and was bracketed by a sintered international standard SRM1400 "bone ash" (Tacail et al., 2016) at the beginning and the end of the sequence to correct for instrumental biases. Blank was measured during 5 s (laser off) before each measurement. The laser ablation device was connected to a quadrupole-ICPMS (Q-ICPMS, X series, ThermoFisher) for the measurement of element concentrations and to a multicollector-ICPMS (MC-ICPMS, Nu500 HR, Nu Instruments) for the measurements of Sr isotopes. The spot size for the acquisition of trace elements and Sr isotopes was respectively 50 and 150  $\mu\text{m}$ , with a frequency of 10 and 20 Hz and a speed of 10  $\mu\text{m/s}$  for both. Operating conditions are summarized in Table 2.

### 2.2. Data processing

The laser ablation technique generates a considerable amount of data that must be treated and reduced before being interpreted accurately. Each sequence (two standards bracketing 2–3 samples) corresponds to a single block of measurements, either on the Q-ICPMS and MC-ICPMS. These raw data sequences were semi-automatically processed with Spyder Python 2.7 software to obtain corrected profiles for each sample. The procedure notably detects and isolates samples and standards measurements using blanks (5 s) that are added between each sample or standard. The procedure for element concentration is fully described in Tacail et al. (2017). For Sr isotopes, the measurements were corrected using the classical <sup>85</sup>Rb and <sup>83</sup>Kr corrections and the <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratio of

**Table 2**  
Instruments settings.

Laser (Excite 193 nm, photon machine)	
LA pulse [ns]	<4
He MFC1 [L.min <sup>-1</sup> ]	0.8
He MFC2 [L.min <sup>-1</sup> ]	0.4
Laser Output [%]	100
Rep Rate [Hz]	10
Spot Size [ $\mu\text{m}$ ]	50/150
Scan speed [ $\mu\text{m}$ ]	10
ICPMS (X Series, ThermoFisher)	
RF-power [W]	1350
Ar gas flow	
Sample [L.min <sup>-1</sup> ]	1
Coolant [L.min <sup>-1</sup> ]	13
Auxiliary [L.min <sup>-1</sup> ]	0.8
Analyzed isotopes	<sup>24</sup> Mg, <sup>43</sup> Ca, <sup>55</sup> Mn, <sup>88</sup> Sr, <sup>138</sup> Ba, <sup>238</sup> U
MC-ICPMS (Nu Plasma HR, Nu Instruments)	
RF-power [W]	1400
Cones	Ni
Gas flow	
He Sample [L.min <sup>-1</sup> ]	1
Ar Coolant [L.min <sup>-1</sup> ]	13
Ar Auxiliary [L.min <sup>-1</sup> ]	0.7
	H4( <sup>88</sup> Sr), H2( <sup>87</sup> Sr + <sup>87</sup> Rb)
	Ax( <sup>86</sup> Sr + <sup>86</sup> Kr), L2( <sup>85</sup> Rb)
Cup configuration	L3( <sup>84</sup> Sr + <sup>84</sup> Kr), L4( <sup>83</sup> Kr)

the samples was subsequently normalized by the bracketing SRM1400 standards with a factor depending on their position relative to the standards. Because ICPMS and MC-ICPMS have dramatically different data integration time, we use relative position expressed as percent of the raster length to match trace elements concentration and Sr isotope composition at a given location. Elemental ratios are expressed relative to Ca\*1000 otherwise specified. Statistical analyses were performed using the FactoMineR and PerformanceAnalytics packages of the R software.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Quality control of the measurements

As previously mentioned, we used a sintered international standard SRM1400 "bone ash" (Tacail et al., 2016) at the beginning and the end of the sequence to correct samples for instrumental biases. A total of 98 and

140 measurements of the SRM1400 standard has been processed for Sr isotopes and trace elements, respectively. Ablation of the SRM1400 standard, certified to contain 250 ppm of Sr, produces here a signal for  $^{88}\text{Sr}$  of  $\approx 0.9$  V on the MC-ICPMS and of  $\approx 140,000$  cps on the Q-ICPMS. The average value of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio is  $0.71310 \pm 0.00218$  (2SD,  $n = 98$ ) very close to the TIMS value of  $0.71308 \pm 0.00005$  (2SD,  $n = 25$ ; Brazier et al., 2020). The average value of the Sr/Ca, Ba/Ca and Mg/Ca ratios are  $0.653 \pm 0.038$ ,  $0.630 \pm 0.049$  and  $17.93 \pm 0.73$ , respectively, which are always very close to certified values ( $0.652 \pm 0.018$ ,  $0.629 \pm 0.026$ ,  $17.91 \pm 0.35$ , for Sr/Ca, Ba/Ca and Mg/Ca, respectively; Balter and Lécuyer, 2004).

### 3.2. Bulk radiogenic Sr isotope compositions

The standard deviation of standard and sample corrected  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios are plotted as a function of the  $^{88}\text{Sr}$  voltage in Fig. 2A and show an increase of the variability as the  $^{88}\text{Sr}$  voltage decreases, a pattern that has been recognized by Horstwood et al. (2008). Comparing the discrepancy between laser ablation and solution  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  measurements, Simonetti et al. (2008) and Copeland et al. (2008) have also observed that the accuracy of the laser ablation measurements decreases with Sr total voltage. The decreasing  $^{88}\text{Sr}$  voltage is also accompanied by an increase of the corrected  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios mean values (Fig. 2B). Horstwood et al. (2008) and Simonetti et al. (2008) argued that the increase of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio is due to a  $^{40}\text{Ca}\text{-}^{31}\text{P}\text{-}^{16}\text{O}$  polyatomic interference at mass 87. However, using Sr/Rb-free concentrated Ca/P solutions, Müller and Anczkiewicz (2016) recently demonstrated that the  $^{40}\text{Ca}\text{-}^{31}\text{P}\text{-}^{16}\text{O}$  polyatomic interference does not occur at the required intensities to explain the observed increase of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio. Horstwood et al. (2008) proposed that the complete elimination of this interference should be achieved using rigorous calibration to known reference materials, which is actually not the case given the present results. The increase of the variability of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio is likely due to degraded counting statistics for too low voltage. The concomitant increase of the average value of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio with decreasing Sr voltage remains unexplained, but must be ultimately linked, at least indirectly, to degraded counting statistics and thus, could not be corrected anyway. We have selected a threshold value at 0.4 V for  $^{88}\text{Sr}$  below which the value of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio is considered inaccurate and thus eliminated for further discussion. This value holds for a Nu Plasma

HR MC-ICPMS and should be different for a Neptune instrument. We also note that there is an apparent increase of the variability of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio for  $^{88}\text{Sr}$  voltage  $\geq 1$  V (Fig. 2A), but which does not seem to be followed by an increase, or a decrease, of the average value (Fig. 2B). The analysis of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio in bone and tooth enamel by laser ablation should be adapted for each sample, by varying the diameter of the spot size and/or the sampling rate of the laser to obtain enough signal that should ideally lie between 0.6 V to 0.9 V for  $^{88}\text{Sr}$ .

### 3.3. Bulk trace elements compositions

The dataset has been explored using principal component analysis (PCA). PCA consists in reducing the dimensionality of dataset while preserving most of the information. The basic representation provides eigenvectors of the covariance matrix in two dimensions, the principal components (PCs) which are the new variables. Co-variation of the eigenvectors yields information about correlation of the variables. PCA are particularly useful for large dataset, such as in the present study which considers six independent variables (Mg, Ca, Mn, Sr, Ba and U) representing  $\sim 450,000$  and  $50,000$  measurements for enamel and bone, respectively. We have first performed PCA on the whole dataset (Fig. 3A and B). For enamel, the first two PCs account for 31.7% and 21.6%, respectively, of the total variation in the dataset, so the two-dimensional scatterplot given by Fig. 3A represents 53.3% of the variance of the original eleven-dimensional space. All eigenvectors except Mg/Ca are positive along PC1, indicating that they are all positively correlated and negatively correlated to Mg/Ca. Along PC2, eigenvectors of biogenic (Mg, Ca, Sr, Ba and related Ca-ratios) and diagenetic (Mn, U and Ca-ratios) variables are clustered indicating that the set of data contains clear biogenic and diagenetic components that intrinsically positively correlated. The direction of the Mg/Ca eigenvector is opposed to that of U/Ca demonstrating that these ratios are strongly anti-correlated. The direction of the Sr/Ca and Ba/Ca eigenvectors is approximately perpendicular to those of Mn/Ca and U/Ca ones, indicating that the biogenic and diagenetic variables are not correlated. To resume, the information carried by the PCA on enamel suggests that the Sr/Ca and Ba/Ca ratios are not correlated with those of Mn/Ca and U/Ca and that the Mg/Ca ratio negatively correlated to the U/Ca and of Mn/Ca ratios. These conclusions apparently hold for bone, except that the Mg/Ca ratio is positively correlated to those of Sr/Ca and Ba/Ca (Fig. 3B). However,

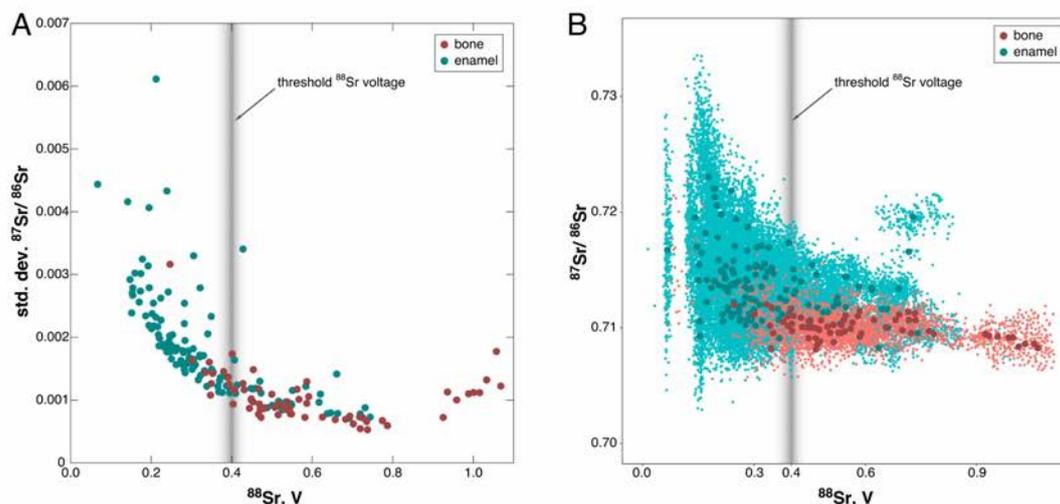


Fig. 2. Quality control of Sr radiogenic isotopes. A) Scatterplot of the standard deviation of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio a function of the  $^{88}\text{Sr}$  voltage showing an increase of the variance with decreasing voltage. B) Scatterplot of the standard deviation of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio a function of the  $^{88}\text{Sr}$  voltage showing an increase of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio with decreasing voltage.

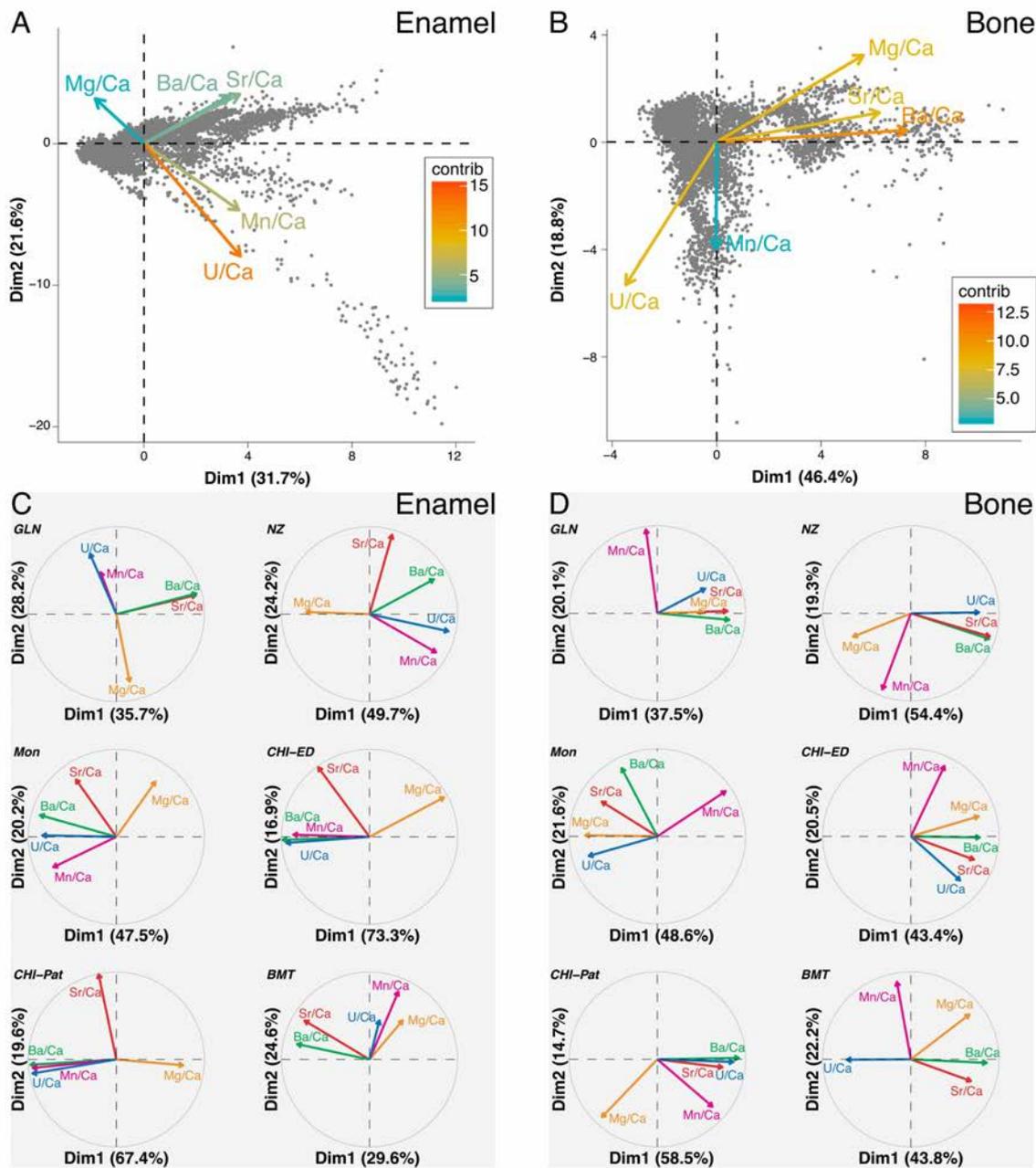


Fig. 3. Principal component analysis (PCA) of raw results. A) PCA of all enamel results. B) PCA of all bone results. C) PCA of enamel results for each locality. D) PCA of bone results for each locality.

inspection of the variance for a given location provides more complex results for enamel (Fig. 3C) and bone (Fig. 3D). Abbreviations of the archaeological sites are given in Table 1. For enamel, the Sr/Ca and Ba/Ca ratios are free of diagenesis at GLN and BMT, while low and high Mg/Ca ratio, respectively, is associated to high Mn/Ca and U/Ca ratios. At NZ, Mon, CHI-ED and CHI-Pat, the enamel Ba/Ca ratio has a diagenetic component because the Ba/Ca, Mn/Ca and U/Ca eigenvectors have closely related directions. In these sites, the enamel Sr/Ca ratio seems to be free of diagenetic influence. For bone, the Sr/Ca and Ba/Ca ratios

have most often a diagenetic component, except at Mon, as illustrated by the common direction of the biogenic and diagenetic eigenvectors.

#### 3.4. Cleaning data from diagenesis and too low Sr content

PCA indicates that diagenesis occurs on a site-by-site systematics and that the chemical composition of bone and enamel is differently affected by diagenesis. Analysis of the effects of diagenesis at the individual scale reveals even more complicated patterns. An example is provided for the

GLN-210 individual (Fig. 4A and B). Two diagenetic zones can be identified in enamel. In the diagenetic Zone 1, the increase of the Mn/Ca and U/Ca ratios is accompanied by a concomitant increase of the Ba/Ca ratio and of the Ca concentration, and a decrease of the Mg/Ca ratio (Fig. 4A). A simultaneous increase of the Sr/Ca ratio is less evident and is not associated to variations of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio anyway. The most

likely explanation is that a Ca-rich, probably calcite, secondary phase precipitated in a crack of the enamel, as recognized earlier by Grün et al. (2008) to be a classic process. This secondary calcite was U- and Ba-rich, but Mg-poor, and has a comparable Sr concentration and isotopic composition than enamel. The crack was also filled with Mn-rich oxyhydroxides. In the diagenetic Zone 2, a small increase of the U/Ca ratio,

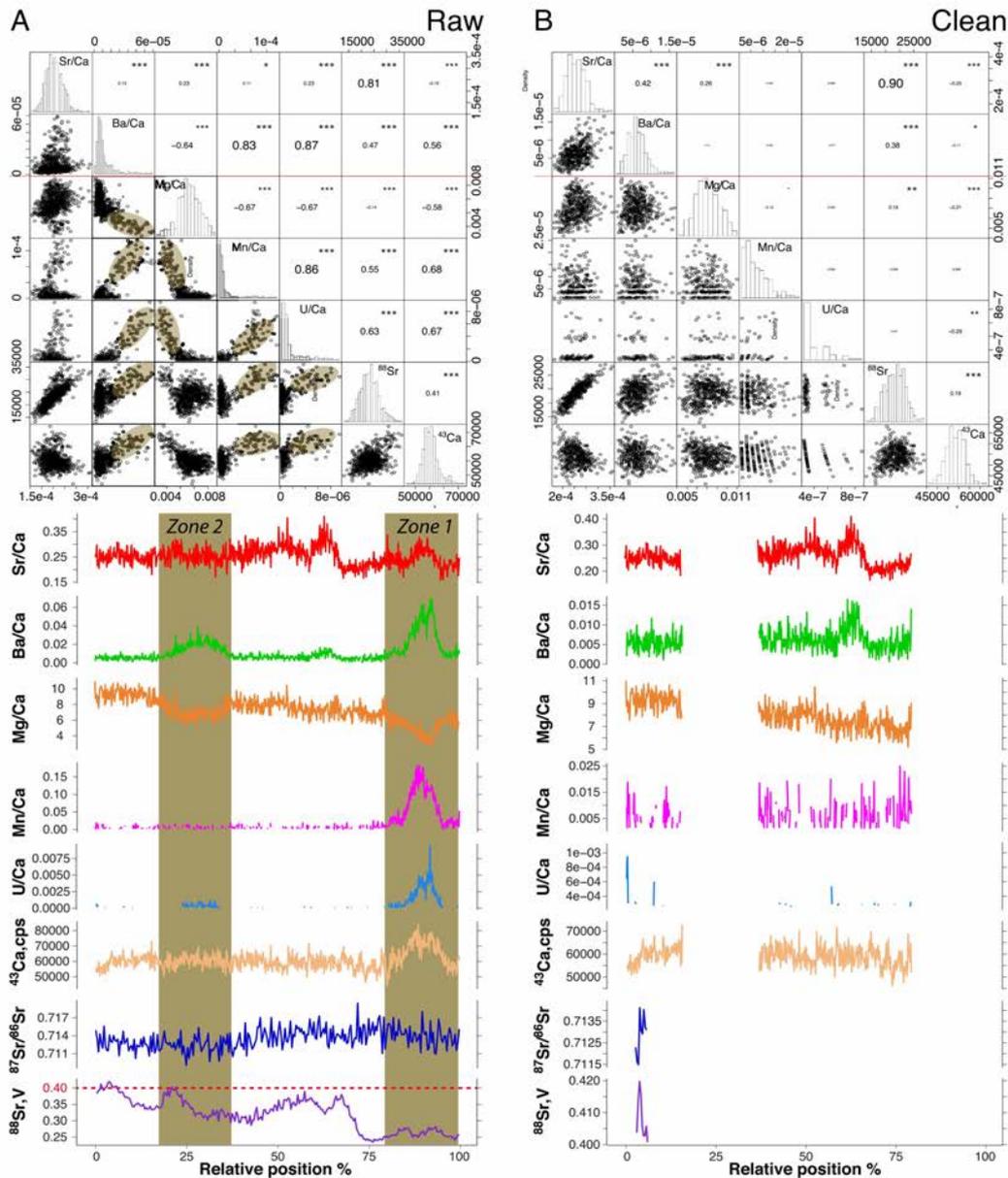


Fig. 4. Effect of cleaning the diagenetic overprinting. A) Chemical characterization of the raw sample. B) Chemical characterization of the clean sample. Each panel is composed of two parts. The top part is a correlation matrix which gives in the upper part the value of the Pearson correlation coefficient and the associated Pvalue annotated with stars (\*) as following: \* Pvalue < 0.05, \*\* Pvalue < 0.001, \*\*\* Pvalue <  $10^{-4}$ , and in the lower part the scatterplot of the given association. The down part is composed of the rasters expressed in relative position to match elemental and isotopic profiles which had very different integration time, hence length.  $^{43}\text{Ca}$  is reported to monitor potential Ca excess due to calcite incorporation. The areas where diagenesis is supposed to have occurred are highlighted in brown, and corresponding values are also highlighted in the scatterplots of the top part. The recognition and the extent of the supposed areas impacted by diagenesis has been done manually, and removed from the dataset, as well as  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values with a corresponding  $^{88}\text{Sr}$  below 0.4 V. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

but not of the Mn/Ca one, is associated to an increase of the Ba/Ca ratio and a decrease of the Mg/Ca ratio, without any change in the Sr/Ca ratio, Sr concentration nor isotopic composition (Fig. 4A). Here, U diffusion only cannot explain the observed diagenetic pattern because it would not take the associated Ba-enrichment and Mg-depletion into account. The observed diagenetic pattern is more likely explained by the presence of a secondary U-enriched phase, which must have been also Ba-enriched. The diagenetic effect on the Mg/Ca ratio is discussed in a subsequent section. The trace elements data were thus cleaned according to the following conditions: increase of the  $^{43}\text{Ca}$  concentration or U/Ca or Mn/Ca ratios correlated to an increase of the Sr/Ca or Ba/Ca ratios or a decrease of the Mg/Ca ratio. The efficiency of the removing of the data suspected to be representative of a diagenetic process was globally followed using correlation matrix in which the lower half is filled with bivariate scatterplots (Fig. 4A and B). Highlighted are areas exhibiting diagenetic patterns (Fig. 4A) which are absent after the cleaning procedure (Fig. 4B). The procedure was done manually and checked iteratively. The cleaning procedure removed 24% of the original data. We observed that diagenesis occurs very often in the crj area, where the enamel is the thinnest. Regarding the accuracy of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio, all data with a  $^{88}\text{Sr}$  voltage below 0.4 V were removed (Fig. 4A and B). This procedure removed 76% of the original data. Reduced data are given in Table S1.

### 3.5. The case of Mg diagenesis

Magnesium is a bioessential element and as such, its concentration in the body is metabolically regulated to lie between the deficiency and toxicity thresholds. The concentration of Mg thus cannot be of any interest for tracing the consumption of Mg-enriched or Mg-depleted food items for paleodiet reconstructions (Klepingera, 1990; Reynard and Balter, 2014). However, the Mg stable isotope composition ( $\delta^{26}\text{Mg}$ ) of bone and tooth enamel is now recognized to vary according to the position of the animal in the trophic chain (Martin et al., 2014, 2015). It is therefore necessary to know how Mg behaves during diagenetic processes before using the Mg isotope compositions to paleontological applications. Lambert et al. (1985) measured the Mg concentration in a set of excavated bones and found higher values than in a reference set of modern bones. However, no information is available on the initial Mg concentration of the excavated bones. To the best of our knowledge, the results of the present study could be the first robust evidence of Mg diagenesis in enamel. The example of the GLN-210 individual provided in Fig. 4 suggests that the Mg/Ca decreases when U/Ca increases, i.e.,

that Mg is leached out of enamel and bone during diagenesis. The Fig. 5 shows that this is a general pattern for the tooth enamel and bone samples analyzed here. Magnesium, as carbonate groups, represents defects in the hydroxyapatite (HAP) lattice, which decrease crystallinity and increase solubility (e.g., Laurencin et al., 2011; Legeros et al., 1996). Laurencin et al. (2011) also suggested, using Density Functional Theory calculations that a local clustering of Mg within the HAP lattice is likely to occur. A picture of Mg diagenesis in fossil HAP can be emphasized, which posits that Mg clusters, which are poorly crystallized, are likely to preferentially dissolve and react with the diagenetic fluids. The pending question, which requires further experiments, is whether the leaching of Mg is associated with an isotopic fractionation. If the leaching is quantitative, fossil bone and enamel would be Mg-depleted, but without Mg isotopic fractionation, allowing the analysis of accurate  $\delta^{26}\text{Mg}$  values for paleontological studies.

### 3.6. Clean radiogenic Sr isotope and trace elements compositions

After cleaning the data, most of the samples exhibited truncated radiogenic Sr and trace elements profiles, so we calculated average and standard deviation for all parameters, which are given in Table S1. Cleaning the data has resulted in the identification of significant correlations among all averaged variables (Fig. 6A). These relationships are first discussed in bone and then in enamel.

#### 3.6.1. Bone

Generally, bone  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios have local values (Fig. 6B), and the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio is correlated with the Sr/Ca ratio (Fig. 6A), which would suggest that diagenesis is still overprinting the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio (Budd et al., 2000). However, a close examination of the scatterplot between the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and Sr/Ca ratios (Fig. 6C) shows that the human (GLN 221B), with the highest  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  value and the lowest Sr/Ca ratio contributes to the observed correlation as an outlier. The observed correlation is also due to the higher Sr/Ca ratios of the BMT assemblage, which is composed of livestock remains only, which are known to be enriched relative humans thanks to the Ca biopurification process (Burton et al., 1999; Balter, 2004; Peek and Clementz, 2012). However, no human bone remains from BMT were analyzed so that the Ca biopurification process cannot be validated for this site. At GLN, where both human and faunal bone remains were analyzed, the Ca biopurification process between human and livestock exists but does not exhibit a typical bone Sr/Ca trophic Sr-enrichment of half a log unit (Fig. 6D, Balter, 2004), being closer to  $\sim 0.1$ . While humans have clearly lower

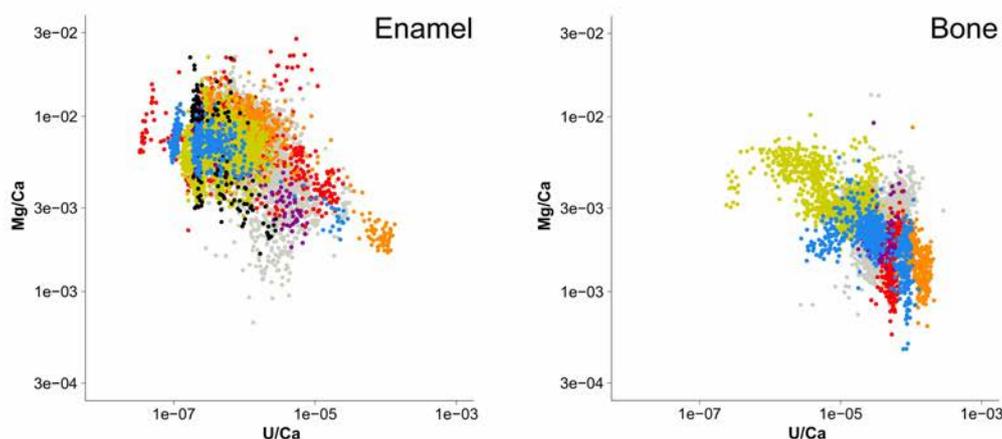
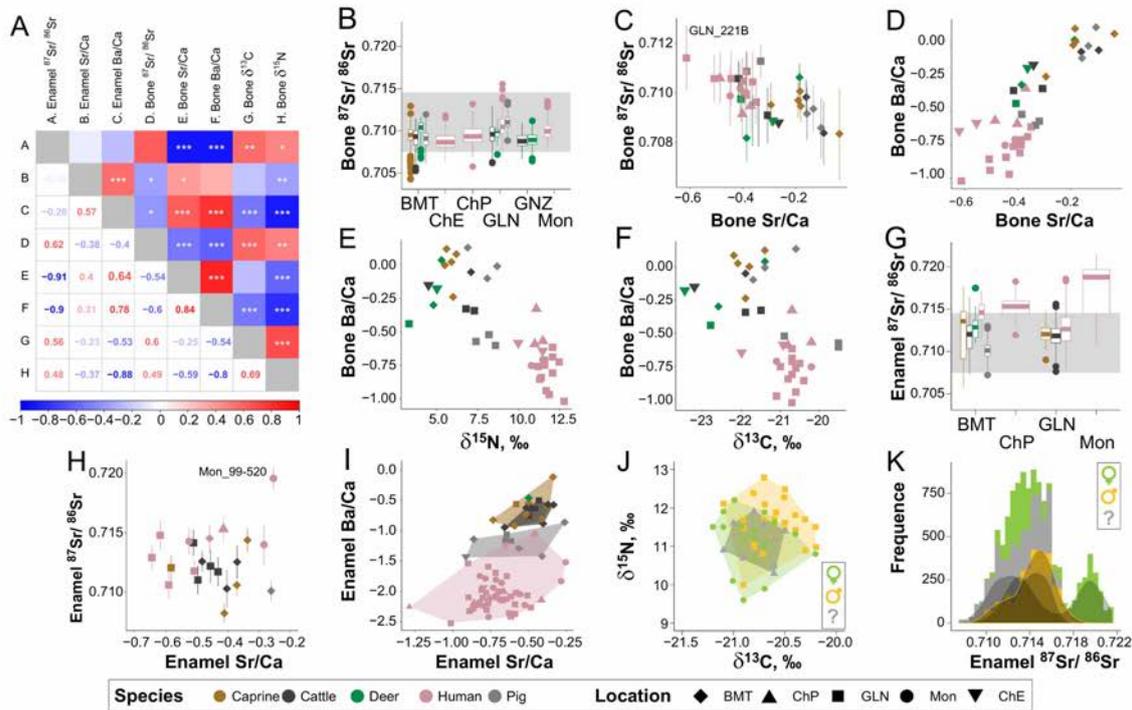


Fig. 5. Magnesium is leached during diagenesis. A) Scatterplot of the Mg/Ca ratio as a function of the U/Ca ratio in enamel. B) Scatterplot of the Mg/Ca ratio as a function of the U/Ca ratio in bone.



**Fig. 6.** Paleocological and paleobiological significance of clean data. A) Correlation matrix for all clean results which gives in the lower part the Pearson correlation coefficient and in the upper part the associated *P*value annotated with stars (\*) as following: \* *P*value < 0.05, \*\* *P*value < 0.001, \*\*\* *P*value < 10<sup>-4</sup>. B) Boxplot of all bone <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr value for each locality. The gray area represents the local <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr range. C) Scatterplot of bone average <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr value as a function of bone average Sr/Ca ratio. D) Scatterplot of bone Ba/Ca ratio as a function of bone Sr/Ca ratio. E) Scatterplot of bone average Ba/Ca ratio as a function of bone δ<sup>15</sup>N value. F) Scatterplot of bone average Ba/Ca ratio as a function of bone δ<sup>13</sup>C value. G) Boxplot of all enamel <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr values for each locality. The gray area represents the local <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr range. H) Scatterplot of enamel average <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr values as a function of enamel average Sr/Ca ratio. I) Scatterplot of enamel average Ba/Ca ratio as a function of enamel average Sr/Ca ratio. J) Scatterplot of bone δ<sup>15</sup>N value as a function of bone δ<sup>13</sup>C value. K) Histogram of the distribution of all cleaned enamel <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr values according to sex. The curves represent density distribution for each sex. Ratios are expressed as log (Sr,Ba / Ca \* 1000).

bone Ba/Ca than livestock at GLN (Fig. 6D, Wilcoxon, *P* value\*\*\* = 0.0004), the typical bone Ba/Ca trophic Ba-enrichment of one log unit is not preserved (it is rather close to ~0.5 at GLN, Fig. 6D). The bone biogenic Ba/Ca values seem however to be well-maintained as illustrated by the very good correlation with collagen δ<sup>15</sup>N values, where human and livestock samples exhibit a species- and location-specific distribution (Fig. 6E). A distribution of the bone Ba/Ca and collagen δ<sup>13</sup>C values according to species and location is also observed (Fig. 6F).

To summarize the results on bone, the overall picture argues for a diagenetic overprinting of Sr, but not Ba, despite the cleaning of the supposed diagenetic data. It is likely that part of the bone Sr burden supposedly cleaned from diagenesis is in fact overprinted by diagenesis in a pervasive way that could not be detectable by local disturbances as identified here with laser ablation in enamel. These results stress the importance of the leaching protocols for eliminating diagenetic compounds in fossil bone and conclude that bone is not a suitable material for laser ablation.

### 3.6.2. Enamel

The variability of the enamel <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios (Fig. 6G) is higher than in bone (Fig. 6B). Enamel <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios are not correlated to Sr/Ca ratios (Fig. 6H) and Sr and Ba are more depleted in enamel (Fig. 6I) than in bone (Fig. 6D). These first observations are in agreement with a lack of significant diagenetic effects on the original Sr and Ba contents (Budd et al., 2000; Peek and Clementz, 2012). In addition, while the Sr/Ca ratio exhibits a slight Sr-enrichment from human to livestock (~ 0.3 log

unit), the Ba/Ca ratio has here the expected log unit (>1). These results are in agreement with previous studies (Sponheimer and Lee-Thorp, 2006; Tacail et al., 2019), confirm that the Sr/Ca ratio in enamel is a poor proxy of trophic level and validate that cleaned enamel has not been significantly altered by diagenesis. Noteworthy is the intermediate trophic position of pigs between bovinds and humans (Fig. 6I). To summarize the results on enamel, the overall picture to argues for an absence of diagenetic overprinting of the <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, Sr/Ca and Ba/Ca ratios, suggesting that the cleaning of the supposed diagenetic data has been efficient.

### 3.7. The context of the Neolithic revolution

Considering the geochemical differences highlighted for human and livestock among locations (Fig. 6E, F, I), it is likely that the Neolithic society was organized into small communities, managing their resources independently and locally, although probably exchanging people and goods with outside. For instance, the clear distinct bone Ba/Ca signatures between the livestock at BMT and GLN is a strong argument for specific livestock management, as it has already been proposed on the grounds of stable isotopes for these sites (Rey et al., 2019) or for other Neolithic sites (Oelze et al., 2011; Goude et al., 2019). Pending questions regarding livestock management are whether it was free-ranging and to what extent the livestock was allowed to range (e.g., Bickle and Hofmann, 2007). Here, livestock have local enamel <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios while humans have generally higher enamel <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios (Fig. 6F). This

seems to indicate that humans, during the formation of the M2 tooth, i. e., approximately between  $2.5$  and  $8.5 \pm 0.5$  years old, included a non-local diet with high  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  value, and were more mobile than the livestock. However, a close examination of the data reveals a more thorough pattern that cannot rule out the existence of micro-regional differences in the bioavailable Sr isotopic baseline. Indeed, some of human Sr isotope values come from MON and CHI-Pat for which there is no associated fauna. The human mobility, as recorded by the enamel  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio, is more likely due to practices unrelated to livestock herding.

One obvious  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  outlier can be identified, i.e., Mon\_99–520 ( $0.7196 \pm 0.0018$ ,  $\pm 2\text{SD}$ , Fig. 6H), who is a female (Table S1). Differences in bone collagen for the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values are observed between males and females (Fig. 6J, MANOVA,  $p$ -value\*\* = 0.0031), suggesting dietary sex-related differences (Rey et al., 2019). We thus performed histograms on enamel  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios according to sex (Fig. 6K). The distribution of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio is not statistically different between sexes (Student  $t$ -test,  $p$ -value = 0.61), but that of males seems to have higher  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values than of females in enamel (Fig. 6G). Interestingly, the distribution of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values for indeterminate is bimodal, suggesting that the sex difference of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  is real. Despite the small number of samples having provided exploitable results (8 males and 4 females) and that sex differences should be considered in a site-by-site approach, this indicates a differential sex-related mobility pattern. The case of Mon 99–520 is interesting, because it suggests that this girl has grown in a very distinct area with a very high  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  value, probably in the neighboring granitic Morvan area. Inclusion of foreign females in Neolithic group is a still debated question (e.g., Bentley et al., 2012; Goude et al., 2019, 2020; Rey et al., 2021), that could be further assessed by  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variation in enamel using laser ablation.

#### 4. Concluding remarks

The laser ablation technique is capable to generate simple profiles of trace elements concentrations and radiogenic Sr isotope compositions in tooth enamel, but not in bone. In enamel, spatial variation not only allows the reconstruction of life traits histories such as diet and mobility, but also the identification of areas where diagenesis has left clues of modifications of the original signatures. Once identified, these areas can be withdrawn from the results. The identification of diagenetic areas in bone is more difficult, probably because the diffusion is higher than in enamel and hence contrasts with normal areas more attenuated. One disadvantage of laser ablation technique is that the sample cannot be cleaned from extraneous components using wet chemistry because the sample needs to be powdered. However, none of this prevents the possibility to soak the chip of fossil bone and tooth enamel in dilute acetic acid to remove surficial calcitic contaminants before laser ablation measurements. The efficiency of such a strategy could be evaluated by performing laser ablation profiles before and after the leaching pretreatment in further studies. Finally, to the best of our knowledge, the Laboratoire de Géologie de Lyon is the only lab that uses solid, homogeneous, matrix-matched, concentration-matched, and certified standard to correct for any interference of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios in Ca-phosphate samples analyzed by laser ablation. These standards can be shared on demand.

#### Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

#### Acknowledgement

The authors are very grateful to J.-B. Mallye and P. Magniez who

provided anthropological material and related information for this study, G. Devilder for his assistance with the CAD and S. Ciliberto and V. Queste for the financial contribution of the Fonds Recherches of the Ecole Normale Supérieure de Lyon to the laser ablation device. This work was supported by the Institut Danone France/Fondation pour la Recherche Médicale 2015 partnership.

#### Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120608>.

#### References

- AlQahtani, S.J., Hector, M.P., Livingside, H.M., 2010. Brief communication: the London atlas of human tooth development and eruption. *Am. J. Phys. Anthropol.* 142, 481–490.
- Austin, C., Smith, T.M., Bradman, A., Hinde, K., Joannes-Boyau, R., Bishop, D., Hare, D. J., Doble, P., Eskenazi, B., Arora, M., 2013. Barium distributions in teeth reveal early-life dietary transitions in primates. *Nature* 498, 216–219.
- Balter, V., 2004. Allometric constraints on Sr/Ca and Ba/Ca partitioning in terrestrial mammalian trophic chains. *Oecologia* 139, 83–88.
- Balter, V., Lécuyer, C., 2004. Determination of Sr and Ba partitioning coefficients between apatite and water from 5°C to 60°C: a new thermometer for aquatic environments. *Geochim. Cosmochim. Acta* 68, 423–432.
- Balter, V., Person, A., Labourdette, N., Drucker, D., Renard, M., Vandermeersch, B., 2001. Were Neandertalians essentially carnivores? Sr and Ba preliminary results of the mammalian palaeobiocoenosis of Saint-Césaire. *C. R. Acad. Sci. Ser. IIA Earth Planet. Sci.* 332, 59–65.
- Balter, V., Saliège, J.F., Bocherens, H., Person, A., 2002. Evidence of physico-chemical and isotopic modifications in archaeological bones during controlled acid etching. *Archaeometry* 44, 329–336.
- Balter, V., Telouk, P., Reynard, B., Braga, J., Thackeray, F., Albarède, F., 2008. Analysis of coupled Sr/Ca and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variations in enamel using laser-ablation tandem quadrupole-multicollector ICP-MS. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 3980–3990.
- Balter, V., Braga, J., Telouk, P., Thackeray, J.F., 2012. Evidence for dietary change but not landscape use in South African early hominins. *Nature* 489, 558–560.
- Bentley, R.A., Bickle, P., Fibiger, L., Nowell, G.M., Dale, C.W., Hedges, R.E.M., Hamilton, J., Wahl, J., Francken, M., Grupe, G., Lennies, E., Teschler-Nicola, M., Arbogast, R.-M., Hofmann, D., Whittle, A., 2012. Community differentiation and kinship among Europe's first farmers. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, 9326–9330.
- Bickle, P., Hofmann, D., 2007. Moving on: the contribution of isotope studies to the early Neolithic of Central Europe. *Antiquity* 81, 1029–1041.
- Brazier, J.M., Schmitt, A.D., Pelt, E., Lemarchand, D., Gangloff, S., Taccail, T., Balter, V., 2020.  $R(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$  and  $\delta^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{SRM987}}$  values of mineral, vegetal and animal reference materials. *Geostand. Geoanal. Res.* 44, 331–348.
- Budd, P., Montgomery, J., Barreiro, B., Thomas, R.G., 2000. Differential diagenesis of strontium in archaeological human dental tissues. *Appl. Geochem.* 15, 687–694.
- Burton, J.H., Price, T.D., Middleton, W.D., 1999. Correlation of bone Ba/Ca and Sr/Ca due to biological purification of calcium. *J. Archaeol. Sci.* 26, 609–616.
- Copeland, S.R., Sponheimer, M., le Roux, P.J., Grimes, V., Lee-Thorp, J.A., de Ruiter, D. J., Richards, M.P., 2008. Strontium isotope ratios ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) of tooth enamel: a comparison of solution and laser ablation multicollector inductively coupled plasma mass spectrometry methods. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 22, 3187–3194.
- Dolphin, A.E., Goodman, A.H., Amarasiwardena, D.D., 2005. Variation in elemental intensities among teeth and between pre- and postnatal regions of enamel. *Am. J. Phys. Anthropol.* 128, 878–888.
- Gilbert, C., Sealy, J., Sillen, A., 1994. An Investigation of Barium, Calcium and Strontium as Palaeodietary Indicators in the Southwestern Cape, South Africa. *J. Archaeol. Sci.* 21, 173–184.
- Goude, G., Salazar-García, D.C., Power, R.C., Terron, J., Rivollat, M., Deguilloux, M.-F., Pemonge, M.-H., Le Bailly, M., Andre, G., Coutelas, A., Hauzeur, A., 2019. A Multidisciplinary Approach to Neolithic Life Reconstruction. *J. Archaeol. Method Theory* 26, 537–560.
- Goude, G., Salazar-García, D.C., Power, R.C., Rivollat, M., Gourichon, L., Deguilloux, M.-F., Pemonge, M.-H., Bouby, L., Binder, D., 2020. New insights on Neolithic food and mobility patterns in Mediterranean coastal populations. *Am. J. Phys. Anthropol.* 173, 218–235.
- Grün, R., Aubert, M., Joannes-Boyau, R.C., Moncel, M., 2008. High resolution analysis of uranium and thorium concentration as well as U-series isotope distributions in a Neandertal tooth from Payre (Ardeche, France) using laser ablation ICP-MS. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 5278–5290.
- Hedges, R.E., Clement, J.G., Thomas, C.D., O'Connell, T.C., 2007. Collagen turnover in the adult femoral mid-shaft: modeled from anthropogenic radiocarbon tracer measurements. *Am. J. Phys. Anthropol.* 133, 808–816.
- Hopkins, R.J.A., Snoeck, C., Higham, T.F.G., 2016. When dental enamel is put to the acid test: pretreatment effects and radiocarbon dating. *Radiocarbon* 58, 893–904.
- Horstwood, M.S.A., Evans, J.A., Montgomery, J., 2008. Determination of Sr isotopes in calcium phosphates using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry and their application to archaeological tooth enamel. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 5659–5674.

- Humphrey, L.T., Dean, M.C., Jeffries, T.E., Penn, M., 2008. Unlocking evidence of early diet from tooth enamel. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105, 6834–6839.
- Joannes-Bouay, R., Adams, J.W., Austin, C., Arora, M., Moffat, I., Herries, A.I.R., Tonge, M.P., Benazzi, S., Evans, A.R., Kullmer, O., Wroe, S., Dossato, A., Fiorenza, L., 2019. Elemental signatures of Australopithecus africanus teeth reveal seasonal dietary stress. *Nature* 572, 112–115.
- Klepingera, L.L., 1990. Magnesium ingestion and bone magnesium concentration in paleodietary reconstruction: cautionary evidence from an animal model. *J. Archaeol. Sci.* 17, 513–517.
- Kohn, M.J., Schoeninger, M.J., Barker, W.W., 1999. Altered states: Effects of diagenesis on fossil tooth chemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta* 63, 2737–2747.
- Kohn, M.J., Morris, J., Olin, P., 2013. Trace element concentrations in teeth – a modern Idaho baseline with implications for archeometry, forensics, and palaeontology. *J. Archaeol. Sci.* 40, 1689–1699.
- Lambert, J.B., Vlasak, S., Simpson, Szpunar, Buikstra, J.E., 1985. Bone diagenesis and dietary analysis. *J. Hum. Evol.* 14, 477–482.
- Laurencin, D., Almora-Barrios, N., de Leeuw, N.H., Gervais, C., Bonhomme, C., Mauri, F., Chrzanowski, W., Knowles, J.C., Newport, R.J., Wong, A., Gan, Z., Smith, M.E., 2011. Magnesium incorporation into hydroxyapatite. *Biomaterials* 32, 1826–1837.
- Le Luyer, M., Coquerelle, M., Rottier, S., Bayle, P., 2016. Internal Tooth Structure and Burial Practices: insights into the Neolithic Necropolis of Gurgy (France, 5100–4000 cal. BC). *PLoS One* 11, e0159688.
- Legeros, R.Z., Sakae, T., Bautista, C., Retino, M., Legeros, J.P., 1996. Magnesium and Carbonate in Enamel and Synthetic Apatites. *Adv. Dent. Res.* 10, 225–231.
- Lugli, F., Cipriani, A., Peretto, C., Mazzucchelli, M., Brunelli, D., 2017. In situ high spatial resolution  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio determination of two Middle Pleistocene (c.a. 580ka) Stephanorhinus hundsheimensis teeth by LA-MC-ICP-MS. *Int. J. Mass Spectrom.* 412, 38–48.
- Lugli, F., Cipriani, A., Capecci, G., Ricci, S., Boschin, F., Boscato, P., Iacumin, P., Badino, F., Mannino, M.A., Talamo, S., Richards, M.P., Benazzi, S., Ronchitelli, A., 2019. Strontium and stable isotope evidence of human mobility strategies across the last Glacial Maximum in southern Italy. *Nat. Ecol. Evol.* 3, 905–911.
- Martin, J.E., Vance, D., Balter, V., 2014. Natural variation of magnesium isotopes in mammal bones and teeth from two South African trophic chains. *Geochim. Cosmochim. Acta* 130, 12–20.
- Martin, J.E., Vance, D., Balter, V., 2015. Magnesium stable isotope ecology using mammal tooth enamel. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112, 430–435.
- Martin, J.E., Deesri, U., Liard, R., Wattanapituksakul, A., Suteethorn, S., Lauprasert, K., Tong, H., Buffetaut, E., Suteethorn, V., Suan, G., Télouk, P., Balter, V., 2016. Strontium isotopes reveal long-term residence of thalattosuchians in the freshwater environment. *Paleobiology* 42, 143–156.
- Montgomery, J., Evans, J.A., Horstwood, M.S.A., 2010. Evidence for long-term averaging of strontium in bovine enamel using TIMS and LA-MC-ICP-MS strontium isotope intra-molar profiles. *Environ. Archaeol.* 15, 32–42.
- Müller, W., Anczkiewicz, R., 2016. Accuracy of laser-ablation (LA)-MC-ICPMS Sr isotope analysis of (bio) apatite—a problem reassessed. *J. Anal. At. Spectrom.* 31, 259–269.
- Müller, W., Fricke, H., Halliday, A.N., McCulloch, M.T., Wartho, J.-A., 2003. Origin and migration of the alpine iceman. *Science* 302, 862–866.
- Müller, W., Nava, A., Evans, D., Rossi, P.F., Alt, K.W., Bondioli, L., 2019. Enamel mineralization and compositional time-resolution in human teeth evaluated via histologically-defined LA-ICPMS profiles. *Geochim. Cosmochim. Acta* 255, 105–126.
- Nelson, B.K., Deniro, M.J., Schoeninger, M.J., De Paolo, D.J., Hare, P.E., 1986. Effects of diagenesis on strontium, carbon, nitrogen and oxygen concentration and isotopic composition of bone. *Geochim. Cosmochim. Acta* 50, 1941–1949.
- Oelze, V.M., Siebert, A., Nicklisch, N., Meller, H., Dresely, V., Alt, K.W., 2011. Early Neolithic diet and animal husbandry: stable isotope evidence from three Linearbandkeramik (LBK) sites in Central Germany. *J. Archaeol. Sci.* 38, 270–279.
- Peek, S., Clementz, M.T., 2012. Ontogenetic variations in Sr/Ca and Ba/Ca ratios of dental bioapatites from Bos taurus and Odocoileus virginianus. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 26, 248–254.
- Rey, L., Tacail, T., Le Luyer, M., Salazar-García, D.C., Balter, V., Rottier, S., Goude, G., 2016. Tracking male vs. female Neolithic behaviors: a new multi-element and multi-isotope-ratio analysis to reconstruct diet and mobility in northern France. In: 8th World Archaeological Congress, Kyoto (Japan).
- Rey, L., Goude, G., Rottier, S., 2017. Comportements alimentaires au Néolithique : nouveaux résultats dans le Bassin parisien à partir de l'étude isotopique ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) de la nécropole de Gurgy « Les Noisats » (Yonne, Ve millénaire av. J.-C.). *Bull. Mém. Soc. Anthropol. Paris* 29, 54–69.
- Rey, L., Salazar-García, D.C., Chambon, P.h., Santos, F., Rottier, S., Goude, G., 2019. A multi-isotope analysis of Neolithic human groups in the Yonne valley, Northern France: insights into dietary patterns and social structure. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 11, 5591–5616.
- Rey, L., Rottier, S., Santos, F., Goude, G., 2021. Sex and age-related social organization in the Neolithic: a promising survey from the Paris Basin. *J. Archaeol. Sci. Rep.* 38, 103092.
- Reynard, B., Balter, V., 2014. Trace elements and their isotopes in bones and teeth: Diet, environments, diagenesis, and dating of archeological and paleontological samples. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 416, 4–16.
- Sillen, A., Balter, V., 2018. Strontium isotopic aspects of *Paranthropus robustus* teeth; Implications for habitat, residence, and growth. *J. Hum. Evol.* 114, 118–130.
- Sillen, A., Hall, G., Richardson, S., Armstrong, R., 1998.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios in modern and fossil food-webs of the Sterkfontein Valley: implications for early hominid habitat preference. *Geochim. Cosmochim. Acta* 62, 2463–2473.
- Simonetti, A., Buzon, M.R., Creaser, R.A., 2008. In-situ elemental and Sr isotope investigation of human tooth enamel by laser ablation-(MC)-ICP-MS: Successes and pitfalls. *Archaeometry* 50, 371–385.
- Sponheimer, M., Lee-Thorp, J.A., 2006. Enamel diagenesis at South African Australopithecus sites: Implications for paleoecological reconstruction with trace elements. *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 1644–1654.
- Szulc, P., Seeman, E., Delmas, P.D., 2000. Biochemical Measurements of Bone turnover in Children and Adolescents. *Osteoporos. Int.* 11, 281–294.
- Tacail, T., Télouk, P., Balter, V., 2016. Precise analysis of calcium stable isotope variations in biological apatites using laser ablation MC-ICPMS. *J. Anal. At. Spectrom.* 31, 152–162.
- Tacail, T., Kováčiková, L., Brůžek, J., Balter, V., 2017. Spatial distribution of trace element Ca-normalized ratios in primary and permanent human tooth enamel. *Sci. Total Environ.* 603–604, 308–318.
- Tacail, T., Martin, J., Arnaud-Godet, F., Thackeray, F., Cerling, T., Braga, J., Balter, V., 2019. Calcium isotopic patterns in enamel reflect different nursing behaviors among South African early hominins. *Sci. Adv.* 5, eaax3250.
- Willmes, M., McMorrow, L., Kinsley, L., Armstrong, R., Aubert, M., Eggins, S., Falguères, C., Maureille, B., Moffat, I., Grün, R., 2013. The IRHUM (Isotopic Reconstruction of Human Migration) database - bioavailable strontium isotope ratios for geochemical fingerprinting in France. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* 6, 761–777.
- Willmes, M., Kinsley, L., Moncel, M.H., Armstrong, R.A., Aubert, M., Eggins, S., Grün, R., 2016. Improvement of laser ablation in situ micro-analysis to identify diagenetic alteration and measure strontium isotope ratios in fossil human teeth. *J. Archaeol. Sci.* 70, 102–116.

## II. Information complémentaires relatives aux résultats

---

Suite à la publication de l'article, la poursuite des analyses a mis en évidence de nouveaux résultats confirmant les craintes proposées quant à l'intégrité des données  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  et nous enjoignant à écarter l'ensemble des résultats du strontium isotopique : nous invitons les lecteurs à rechercher la publication plus récentes (article de M. Rivollat et collaborateurs, en préparation) pour une actualisation des données Sr (cf. II.4).

### II.1. Description des données présentées en Annexe

Les analyses par ablation laser générant une immense quantité de données (BigData), l'ensemble des résultats est présenté en annexes, dont une partie est disponible seulement en version numérique (Annexes N) téléchargeable à l'adresse : <https://doi.org/10.5281/zenodo.5821359>.

- L'Annexe N3\_Raw\_data\_Sr/TE\_Python comprend l'ensemble des **données brutes** (non corrigées) acquises lors des sessions d'analyses du Sr isotopique et des éléments traces, pour les échantillons et les standards, pour chaque séquence d'ablation, ainsi que les codes Python de traitement des données.
- L'ensemble des **scripts** de traitement des données sous Python puis sous R est disponible en Annexe N4\_Scripts.
- L'Annexe N5\_Data\_out\_Sr/TE (dossiers numériques) présente l'ensemble des **données corrigées** (calibrées par les standards) en sortie de code Python : **1 fichier par séquence**. Pour les éléments traces, les fichiers regroupent l'ensemble des valeurs de 41 éléments (65 isotopes ; cf. Tableau C4. 1) : Zirconium (Zr), Yttrium (Y), **Strontium (Sr)**, Rubidium (Rb), Krypton (Kr), Lithium (Li), Zinc (Zn), Cuivre (Cu), Nickel (Ni), Cobalt (Co), Fer (Fe), **Manganèse (Mn)**, Chrome (Cr), Chlore (Cl O), Titane (Ti), **Calcium (Ca)**, Soufre (S), Silicium (Si), **Magnésium (Mg)**, **Uranium (U)**, Thorium (Th), Plomb (Pb), Mercure (Hg), Or (Au), Platine (Pt), Lutécium (Lu), Ytterbium (Yb), Erbium (Er), Dysprosium (Dy), Gadolinium (Gd), Europium (Eu), Samarium (Sm), Néodyme (Nd), Praséodyme (Pr), Cérium (Ce), Lanthane (La), **Barium (Ba)**, Antimoine (Sb), Etain (Sn), Cadmium (Cd), Argent (Ag). Les éléments corrigés sont Sr, Ba, Mg, Mn, U, Rb, Fe, Zn, Pb, Th. Seuls sont utilisés dans le cadre de ce travail les éléments notifiés en gras ci-avant.
- L'Annexe N6\_Global\_File\_Sr/TE comprend l'ensemble des valeurs corrigées des profils d'échantillons et des valeurs de **standards** sur **un seul fichier pour le Sr isotopique**  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

et  $^{88}\text{Sr}$  (ce dernier non corrigé) et sur **un seul fichier pour les éléments traces Sr/Ca, Ba/Ca, Mg/Ca, Mn/Ca (non corrigé), U/Ca,  $^{88}\text{Sr}$  (non corrigé) et  $^{43}\text{Ca}$  (non corrigé).**

- L'Annexe N7\_TOT\_profiles (fichier Excel) présente **l'ensemble des acquisitions TE et Sr isotopique corrigées** pour **chaque profil d'échantillon** : plusieurs centaines de données par profil (pour 398 profils dans l'email et dans l'os, pour 94 individus) et par variable (8 variables : Sr/Ca, Ba/Ca, Mg/Ca, Mn/Ca, U/Ca,  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{43}\text{Ca}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  et  $^{88}\text{Sr}$ ). Ce fichier comptabilise plus de 500 000 données pour les **échantillons uniquement** (sans compter les standards). Les données supprimées par le **nettoyage de la diagenèse** sont indiquées **en rouge**. Le nombre de données par profil total et nettoyé est donné, ainsi que la moyenne et l'écart-type de chaque profil (total et nettoyé).
- En Annexe N8\_csv\_source sont fournis les **fichiers sources au format .csv** en version numérique pour permettre la réutilisation simple des données avant nettoyage de la diagenèse (TOT) et après (Nett), pour le Sr isotopique et les éléments traces séparément, pour l'os et pour l'email.
- L'Annexe A23 présente le tracé des profils effectués dans chaque échantillon d'os et de dent (également disponible au format numérique Annexe N2\_Profiles pictures).
- L'Annexe A25 répertorie **le nombre et le type de profils** réalisés dans l'os et dans l'email **pour chaque individu**. Les profils en rouge correspondent à ceux qui sont totalement exclus de l'analyse après le nettoyage des données. Les **moyennes individuelles** sont calculées à partir des valeurs de **l'ensemble des profils de l'individu** (une moyenne sur os, une sur dent). Les profils en rouge n'ont donc pas été pris en compte dans le calcul de la moyenne. Les **moyennes individuelles nettoyées** sont données en Annexe A34 (pour les éléments traces, les valeurs sont en  $\log(\text{Sr}, \text{Ba}/\text{Ca})$ ) et en annexe de l'article Rey *et al.* 2022 (Annexe B5, Table S1 ; pour les éléments trace, les valeurs sont en  $\log(\text{Sr}, \text{Ba}/\text{Ca} * 1000)$ ).
- L'Annexe A26 répertorie les conditions instrumentales pour les mesures de Sr isotopique et d'éléments traces par ablation laser (LA-MC-ICPMS et LA-Q-ICPMS respectivement).
- Les Annexes A32 et A33 présentent l'ensemble des **valeurs moyennes des standards mesurées** à chaque séquence d'ablation laser pour le Sr isotopique (Annexe A32) et les éléments traces (Annexe A33) et le coefficient de variation (CV) correspondant à chaque profil (les valeurs moyennes sont ici corrigées pour chaque série par la formule  $\text{SRM1 corr.} = \text{SRM1} * \text{SRM certif.} / \text{SRM2}$ ). L'ensemble des données brutes relatives aux standards est disponible en version numérique Annexe N6\_Global\_File\_Sr/TE (les valeurs des profils sont non corrigées).

- Les Annexes A35 à A39 indiquent les **coefficients de variation (CV) mesurés dans chaque profil** (total et nettoyé) et pour chaque variable biogénique Sr/Ca et Ba/Ca dans l'émail (Annexe A35) et dans l'os (Annexe A36), et  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans l'émail (Annexe A37) et dans l'os (Annexe A38), ainsi que pour chaque individu (Annexe A39 ; tous profils d'un même individu considérés ensemble). En rouge sont indiqués les CV intra-profil des échantillons supérieurs aux CV moyens des standards. Ces tableaux montrent d'une part que les **profils nettoyés** sont beaucoup **moins variables** que les profils totaux, témoignant **de l'élimination des valeurs extrêmes** aberrantes correspondant à des zones diagénétiques, et d'autre part que les profils nettoyés dont le CV est supérieur au CV des standards (en rouge) présentent probablement des **variations biogéniques** relevant de changements alimentaires ou de mobilité.
- L'Annexe en ligne N9\_Curves (a et b) montre, pour **chaque profil** dans l'émail et dans l'os, les **courbes de valeurs d'éléments traces** (Sr/Ca, Ba/Ca, Mg/Ca, U/Ca, Mn/Ca et  $^{44}\text{Ca}$ ) et **de Sr isotopique** ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  et  $^{88}\text{Sr}$ ) en fonction de la **distance en  $\mu\text{m}$**  sur le profil. Ces courbes ont été générées par un script semi-automatisé sous R (Annexe A30 et Annexe N4\_scripts\_gph\_profils). Les échelles des ordonnées sont les mêmes pour tous les profils. Pour caler les profils Sr et TE à la même échelle en abscisse, on a considéré en moyenne 5 points Sr / 100 $\mu\text{m}$  et 13 points TE / 100 $\mu\text{m}$ , moyennes calculées à partir de l'ensemble des longueurs de profils en  $\mu\text{m}$  et en nombre de points. Rappelons que chaque point d'ablation laser était de 150 $\mu\text{m}$  pour le Sr isotopique et 50 $\mu\text{m}$  pour les TE (sauf pour les séquences 1 à 7 pour le Sr ; cf. Annexe A26).

Le tableau de données correspondant aux courbes est disponible en Annexe N7\_TOT profiles. Les courbes « nettoyées » (à droite sur les figures) correspondent aux profils TE et Sr nettoyés selon les protocoles décrits dans l'article Rey *et al.* 2022 (cf. I) et représentés pour rappel sur la Figure C8. 1 tels que présentés pour tous les échantillons sur les figures correspondantes (Annexe N9\_Curves et Annexe A40) :

- pour les éléments traces, les pics de corrélations entre indicateurs biogéniques (Sr/Ca et Ba/Ca) et diagénétiques (U/Ca et Mn/Ca) ont été supprimés (valeurs en rouge dans Annexe N7\_TOT profiles).
- pour le Sr isotopique, les valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  correspondant à une tension (voltage) en  $^{88}\text{Sr}$  inférieure à 0,4V ont été supprimées (valeurs en rouge dans Annexe N7\_TOT profiles).

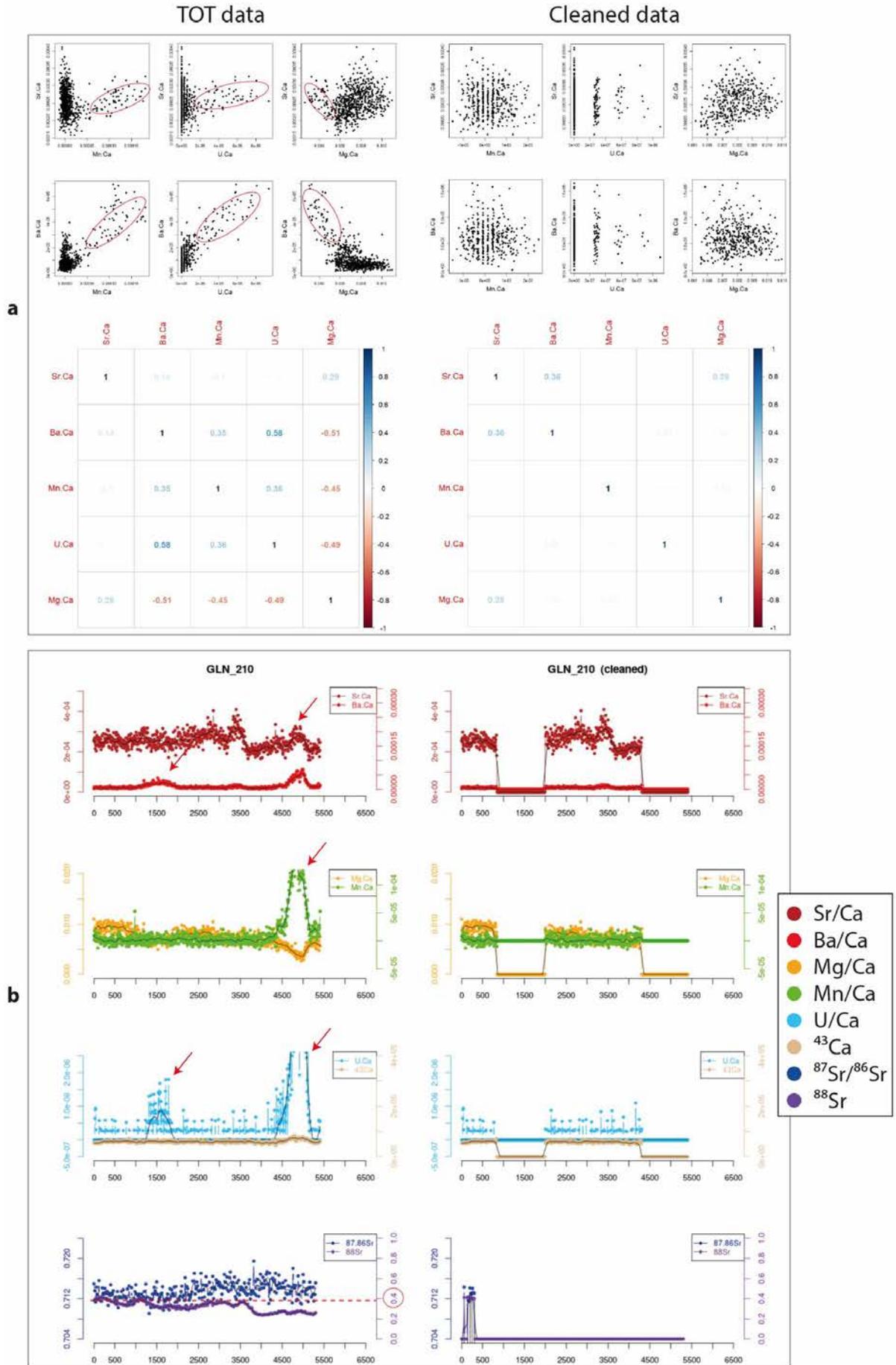


Figure C8. 1 (ci-joint) : Exemple de nettoyage du profil de l'échantillon d'émail GLN 210 : la partie de gauche montre l'ensemble des valeurs non nettoyées, celle de droite l'ensemble des valeurs retenues après le nettoyage. a) Tests de corrélation entre les rapports Sr/Ca et Ba/Ca biogéniques et les rapports Mn/Ca, U/Ca et Mg/Ca diagénétiques (cf. Annexe N10). Les cercles rouges sur les nuages de points montrent les parties corrélées correspondant aux valeurs supprimées à droite. Les matrices de corrélation indiquent les coefficients de corrélation de Pearson. b) Courbes des valeurs de TE et Sr isotopique avant (à gauche) et après nettoyage (à droite) par élimination des sections altérées (cf. Annexe N9). Pour les éléments traces, les pics « biogéniques » et « diagénétiques » synchrones indiqués par des flèches correspondent aux valeurs corrélées (entourées en rouge dans a) qui sont supprimées dans les profils nettoyés (à droite). Pour le Sr isotopique, la ligne pointillée indique le seuil de  $^{88}\text{Sr}$  de 0,4V en dessous duquel les valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  sont éliminées. Les sections de données supprimées par le nettoyage sont représentées par les traits horizontaux à droite.

La légende des couleurs est la même pour toutes les figures de courbes de ce chapitre : Sr/Ca en rouge foncé, Ba/Ca en rouge, Mg/Ca en jaune, Mn/Ca en vert, U/Ca en bleu ciel,  $^{43}\text{Ca}$  en beige,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en bleu foncé et  $^{88}\text{Sr}$  en violet.

- L'Annexe A40 (également disponible au format numérique en Annexe N9c\_curves indiv) présente **les mêmes courbes**, dans l'émail, non plus pour chaque profil mais **pour chaque individu** : tous les profils sont mis bout à bout, séparés par une ligne pointillée. Attention, la majorité des profils ne sont pas jointifs dans l'émail (se référer aux tracés des profils sur photographies en Annexe A23 et A24 et en ligne Annexe N2) et la ligne pointillée représente un intervalle de temps plus ou moins long. Notamment pour les grandes dents d'herbivores, qui ont été coupées en deux, trois profils sont généralement réalisés : un en partie occlusale, un au milieu de la dent et un au niveau du collet (Figure C8. 2). La variabilité individuelle inter-profils (entre les profils d'un même individu) sera discutée dans la section II.6.

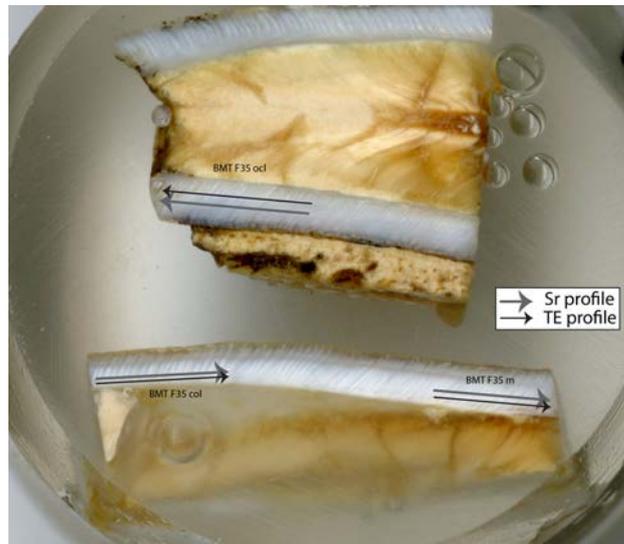
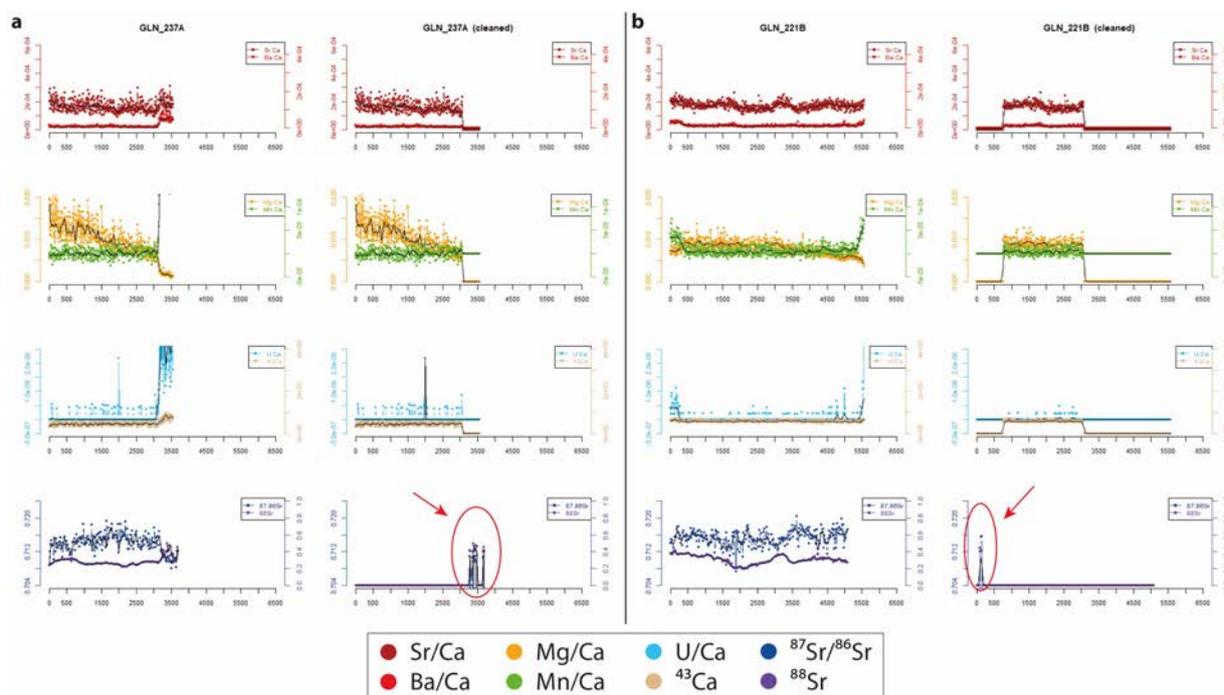


Figure C8. 2 : Exemple de profils tracés dans une dent d'herbivore (échantillon BMT F35) coupée en deux. Trois profils sont tracés pour couvrir différentes périodes de formation de la dent : un au niveau du collet, un au milieu, un à l'extrémité occlusale.

- L'Annexe N10\_correl présente les **tests et matrices de corrélations** de Pearson entre les variables biogéniques (Sr/Ca et Ba/Ca) et diagénétiques (Mg/Ca, Mn/Ca, U/Ca) pour chaque profil dans l'émail (enamel) et dans l'os (bone), avant (TOT) et après nettoyage des données (Nett) tels que présentés sur la Figure C8. 1a. Ces résultats ont été obtenus de façon semi-automatisée avec le logiciel R grâce au script disponible en Annexe A31 (et en ligne Annexe N4\_script\_correl).

## II.2. Le croisement des profils TE et Sr : nécessité d'un nettoyage supplémentaire ?

L'observation des courbes dans l'émail (Annexe A40) montre que dans plusieurs cas, des parties de courbes de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  retenues après nettoyage ( $^{88}\text{Sr} > 0,4\text{V}$ ) correspondent à des parties diagénétiques sur les courbes des éléments traces (TE : Sr/Ca, Ba/Ca, Mg/Ca, Mn/Ca et U/Ca), notamment dans la zone du collet ou de l'extrémité occlusale, plus sensibles à la diagénèse (Figure C8. 3). Si ces valeurs ont été retenues lors du premier nettoyage des profils  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , il serait plus prudent de les supprimer avant toute interprétation des données, étant susceptibles d'avoir été altérées par des atteintes diagénétiques détectées à l'aide des éléments traces. Néanmoins, les rapports isotopiques ne sont pas nécessairement altérés lorsque les rapports élémentaires le sont, mais dans les exemples présentés ici, bien qu'aucune corrélation ne soit observée entre les proxies diagénétiques et le  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , trop peu de données sont disponibles et l'élimination de ces segments paraît la plus raisonnable.



**Figure C8.3 : Exemple des profils des échantillons d'émail GLN 237A (a) et 221B (b) pour lesquels les données de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  conservées (profils de droite « cleaned » pour chaque échantillon, entourées en rouge) correspondent aux sections diagénétiques d'après les éléments traces et devraient être supprimées lors d'un nettoyage additionnel.**

Par ailleurs, certains profils  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans l'émail, une fois nettoyés, ne comptent plus que quelques valeurs (moins de 10), souvent isolées en début ou en fin de profil (par exemple GLN 221B ; Figure C8. 3b). Ces valeurs sont généralement à la limite du seuil retenu et, situées en tout début de profil, elles relèvent sans doute d'un biais instrumental. Pour plus de prudence, elles doivent probablement être supprimées et ne pas être utilisées pour le calcul des moyennes individuelles. Ce nettoyage additionnel des données  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  entraîne l'élimination de plusieurs profils complets (BMT F39, F45, F46 ?, GLN210, 221B, 237A, 241, 276, GLN F3 col int1, F4 ocl, F18 ?, F23 ?, Mon 99-521) et un total de moyennes individuelles inférieur au précédent. Le détail de ce nettoyage additionnel n'est pas

donné ici en raison des arguments avancés ci-après (cf. II.3). Le faible taux de résultats finalement obtenu ici incombe à la susceptibilité trop basse du matériel instrumental par rapport à la mauvaise qualité initiale du matériel archéologique. Ce taux peut être largement amélioré en adaptant l'instrumentation et les réglages techniques à la mesure grâce aux nouveaux développements acquis suite à notre étude (nouvelles analyses en cours, cf. II.4).

### II.3. La difficile interprétation des données $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

La différence observée entre les valeurs moyennes de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans l'émail et dans l'os, essentiellement supérieures à 0,711 dans l'émail et inférieures à 0,711 dans l'os (Figure C8. 4) suggère que, puisqu'il est difficilement concevable que la majorité des individus (humains comme animaux) viennent d'ailleurs, quel que soit le site ou la période concernée, au moins l'une des deux séries de résultats soit aberrante : soit l'os est contaminé et les valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  mesurées sont globalement inférieures aux valeurs réelles, soit le signal de  $^{88}\text{Sr}$  est trop bas dans l'émail et induit une augmentation

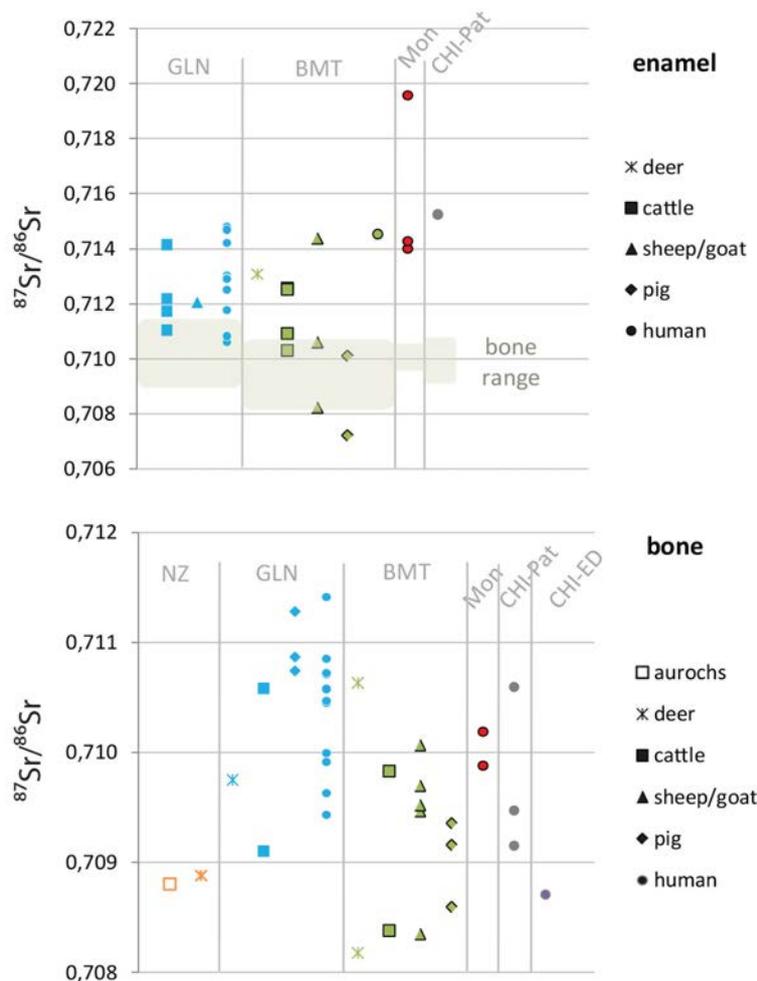


Figure C8. 4 : Distribution des valeurs moyennes individuelles nettoyées de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  pour chaque site et par espèce, dans l'émail (en haut) et dans l'os (en bas). Les zones grisées correspondent à la gamme de valeurs  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans l'os pour chaque site considéré et montrent que la majorité des valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de l'émail est supérieure aux valeurs dans l'os.

générale de l'ensemble des valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de l'email. Dans ce dernier cas, le seuil de 0,4 V de  $^{88}\text{Sr}$  devrait, pour nos échantillons, être revu à la hausse. Les deux phénomènes peuvent également se cumuler.

#### II.4. Nouvelles analyses du Sr isotopique

En combinaison des nouveaux résultats génétiques sur le sexe des humains et les relations de parenté permettant de reconstituer un arbre généalogique à Gurgy « Les Noisats » (Rivollat *et al.* 2021b), de **nouvelles analyses du Sr** de l'email dentaire de plusieurs humains pour lesquels nous n'avions pas obtenu de bons résultats ont été entreprises afin de **caractériser les individus « non-locaux »** d'un point de vue génétique. Ces derniers se définissent sur la base d'une **absence d'apparentement à l'une des deux familles** mises en évidence via l'analyse des liens de parenté. L'analyse combinée du Sr isotopique (nouveaux résultats à paraître ; Rivollat *et al.*, en préparation) indique une signature exogène de ces sujets non-locaux, principalement des femmes, ainsi qu'une signature différente pour les sujets des premières générations (Rivollat *et al.* 2021a).

Dans le but de comparer ces nouveaux résultats à ceux obtenu dans la présente étude et d'**évaluer l'impact du faible signal de  $^{88}\text{Sr}$**  obtenu sur les premières valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de l'email (dans ce travail), plusieurs échantillons ont été ré-analysés (Tableau C8. 1). Cette nouvelle session a été conduite à l'aide d'un spectromètre de masse isotopique Neptune nouvelle génération plus sensible et plus performant (Rivollat *et al.*, en préparation). Les nouvelles acquisitions présentent toutes une tension de  $^{88}\text{Sr}$  supérieure à 1V (contrairement aux précédentes qui étaient majoritairement inférieures à 0,4V) et les valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ne sont pas corrélées au  $^{88}\text{Sr}$  (Balter, comm. pers.), ce qui indique que la tension est suffisante pour considérer qu'il n'y a pas d'interférence Ca-P-O pouvant altérer les valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .

ID	sex	anciennes valeurs				nouvelles valeurs	
		moy $^{87/86}\text{Sr}$ os	SD $^{87/86}\text{Sr}$ os	moy $^{87/86}\text{Sr}$ email	SD $^{87/86}\text{Sr}$ email	moy $^{87/86}\text{Sr}$ email	SD $^{87/86}\text{Sr}$ email
GLN 212	F			0.71292	0.00103	0.71225	0.00050
GLN 248	F			0.71061	0.00116	0.71000	0.00077
GLN 202	M			0.71479	0.00128	0.71327	0.00052
GLN 221B	M	0.71141	0.00130	0.71469	0.00148	0.70951	0.00110
GLN 237A	M			0.71082	0.00086	0.70840	0.00088
GLN 241	M			0.71420	0.00139	0.71055	0.00074
GLN 276	M			0.71468	0.00169	0.71087	0.00062

Tableau C8. 1 : Tableau de comparaison des nouveaux résultats Sr par rapport aux précédentes valeurs mesurée dans le cadre de ce travail pour 7 échantillons d'email humain.

### II.4.a. Comparaison des anciennes et nouvelles valeurs de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 7 échantillons

Le Tableau C8. 1 présente les anciennes et les nouvelles valeurs moyennes de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  pour les sept échantillons ré-analysés. La Figure C8. 5 représente graphiquement les différences mesurées entre la nouvelle session et la précédente. Les **anciennes valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  sont toujours plus élevées** que les nouvelles. Les anciennes mesures donnent une moyenne de  $0,71325 \pm 0,00184$  et les nouvelles une moyenne de  $0,71069 \pm 0,00165$ . De plus, la majorité des anciens écart-types sont supérieurs aux nouveaux, signifiant que les nouvelles valeurs sont plus précises. En revanche, sur les sept échantillons comparés, l'écart entre la valeur minimale et la valeur maximale de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  moyen reste sensiblement le même :  $0,00417$  et  $0,00487$  respectivement (de  $0,71061$  à  $0,71479$  pour les anciennes valeurs et de  $0,70840$  à  $0,71327$  pour les nouvelles). La différence observée entre ces deux séries de données indique que lors de la première session d'acquisition, des interférences de Ca-P-O ont induit une augmentation générale du  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (Horstwood *et al.* 2008 ; Simonetti *et al.* 2008): le **signal de  $^{88}\text{Sr}$  était dans l'ensemble trop bas** pour ces échantillons comportant une **faible quantité de Sr**. À la lumière des nouveaux résultats, **ils doivent donc être rejetés**.

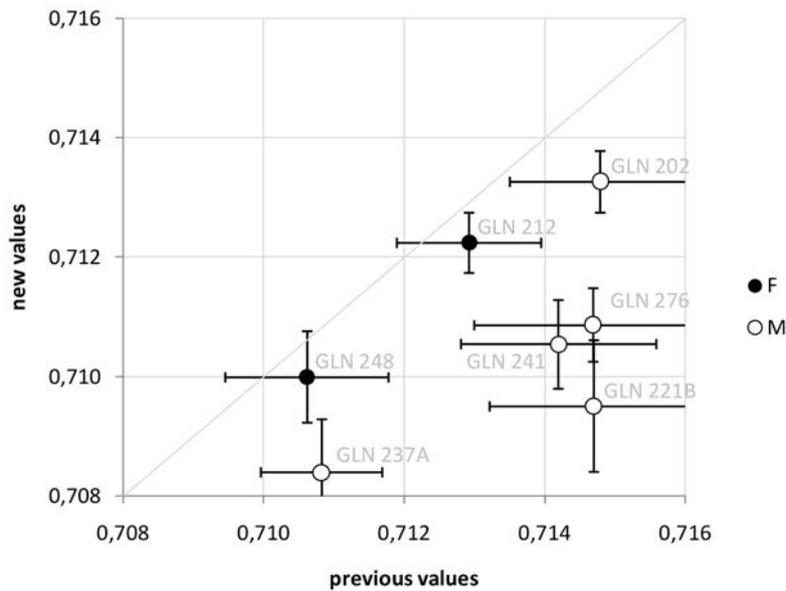


Figure C8. 5 : Graphique de comparaison des valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  mesurées dans ce travail (previous values) et des nouvelles valeurs récemment acquise (new values) pour sept échantillons. F = femmes (female) et M = hommes (male).

### II.4.b. À propos des valeurs de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans l'os

D'autre part, si la moyenne des anciennes valeurs dans l'os ( $0,71040 \pm 0,00056$ ,  $n = 12$ ) est proche de la nouvelle moyenne dans l'email ( $0,71069 \pm 0,00165$ ,  $n = 7$  et proche de  $0,71065 \pm 0,00146$ ,  $n = 57$  lorsque l'on considère l'ensemble des nouveaux résultats ; Balter, comm. pers.), l'écart-type dans l'os est trois fois plus petit que celui de l'email, bien que les effectifs soient déséquilibrés. Ce résultat peut témoigner de la part des signatures non-locales dans l'email qui augmente la variabilité, ou bien d'une

plus grande homogénéité des valeurs de l'os due à un phénomène de diagénèse qui lisserait toutes les valeurs autour du  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  du sol environnant (les deux propositions ne s'excluent pas nécessairement). Dans l'os, il est **très difficile d'évaluer l'impact de la diagénèse**, comme les corrélations post-hoc avec les éléments diagénétiques ne sont pas réalisables à l'échelle intra-os de la même façon que dans l'email en raison d'une **plus grande diffusivité des éléments dans l'os**. Si l'os non contaminé contient une plus grande quantité de Sr initial que l'email – permettant des mesures plus précises grâce à un bien meilleur signal de tension ( $^{88}\text{Sr}$  en V) –, son caractère nettement plus poreux et sensible aux altérations *post-mortem* ne peut pas garantir que les valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  mesurées soient bien celles enregistrées du vivant des individus. D'ailleurs, l'ensemble des résultats TE et Sr isotopique dans l'os (après nettoyage) indique que **l'empreinte de la diagénèse ne peut être totalement exclue**, même si une partie des résultats au moins semble avoir conservé son intégrité (cf. I et II.5.a et b).

Il en est de même pour les analyses en solution : bien que des prétraitements des échantillons osseux soient possibles et permettent de diminuer le risque de diagénèse, celui-ci n'est jamais tout à fait exclu. En l'état actuel des données, l'impact de la diagénèse n'est donc pas quantifiable, d'autant qu'il n'est pas possible de comparer les profils Sr et TE selon la même approche que dans l'email en raison de la diffusivité de la diagénèse dans l'os. Néanmoins, les différences interspécifiques observées au sein d'un même site, entre les os de bœuf et de cochon de GLN, semblent témoigner d'une certaine intégrité des données (cf. Figure C8. 4, p.437 et Rey *et al*, 2022, Fig. 6 ; cf. I, p.428). Ce résultat met en avant l'hypothèse précédemment avancée concernant la possible gestion des cochons de GLN maintenus dans un environnement différent de celui des bovins (cf. Chap5.I et Chap7.I). Si l'on considère ces résultats intègres, la signature  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans l'os de l'ensemble des échantillons s'avère légèrement variable entre les sites (la différence est notamment observée entre GLN et BMT, les deux sites qui comptent le plus grand nombre d'échantillons ; cette différence est également visible dans l'email). Il est probable que, si une éventuelle empreinte diagénétique a pu lisser l'ensemble des résultats en en modifiant les valeurs absolues, elle n'ait pas complètement altéré la variabilité réelle, l'ayant simplement amoindrie, la faisant tendre vers la signature du sol environnant. De plus, l'ensemble des signatures dans l'os, de **0,708 à 0,712**, s'insère dans la gamme de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  locale définie par la géologie à partir des mesures de plantes : **entre 0,7075 et 0,7145** (cf. Chap3.IX.2).

### II.4.c. Conclusions sur les précédentes analyses du Sr isotopique

D'après la comparaison entre nos précédentes analyses et celles récemment effectuées, **l'ensemble des résultats  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de l'email acquis dans le présent travail doit être rejeté** et les interprétations en termes de mobilité via l'analyse du Sr isotopique ne seront pas poussées plus avant. Néanmoins, de **nouvelles acquisitions sont prévues sur nos échantillons** (déjà préparés) et les nouveaux résultats pourront être comparés directement avec les profils des TE déjà obtenus. Nous savons d'ores et déjà

que les nouveaux réglages permettent une mesure fiable du  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans nos échantillons (Rivollat *et al*, en préparation).

D'autre part, le présent travail aura permis de **mettre en œuvre** pour la première fois **un protocole semi-automatisé de traitement des données** par acquisition LA-ICP-MS, en **association avec les éléments traces**, et de **démontrer l'intérêt** d'une telle approche pour **l'identification de zones diagénétiques** à l'intérieur même des profils de l'émail dentaire. Ces zones peuvent être exclues du **calcul de la moyenne** permettant d'obtenir des données individuelles aisément comparables dans le cadre d'une **approche inter et intra-populationnelle** et permettent également et surtout de pouvoir identifier des **modifications non biogéniques** qui ne doivent pas être interprétées en termes de mobilité dans le cadre d'une **approche intra-profil**.

Enfin, nos résultats soulignent la **nécessité de comparer la variabilité du  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  au signal de  $^{88}\text{Sr}$**  dans l'émail et d'**établir un seuil minimum parfois largement supérieur à 0,4V** au-delà duquel le  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  n'est pas corrélé au  $^{88}\text{Sr}$  indiquant que les interférences de Ca-P-O sont éliminées et que les valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  peuvent être interprétées en termes de mobilité. Le présent exemple démontre l'importance d'adopter une **posture très préservative** vis-à-vis de la fiabilité des données. Toute corrélation du  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  avec le  $^{88}\text{Sr}$  doit être strictement éliminée, celles-ci étant d'autant plus visibles sur de gros corpus comme celui considéré ici. Dans notre cas, si dans un premier temps le seuil a été fixé à 0,4V pour tenter de conserver un maximum de résultats exploitables (cf. I), les récents résultats confirment que la tension n'était pas suffisante pour l'ensemble de ce jeu de données – celle-ci dépend du type d'échantillon et de l'instrumentation utilisée et doit être évaluée spécifiquement pour chaque jeu de données – et qu'elle aurait dû ici, non seulement être fixée à un seuil nettement supérieur, mais également conduire à **l'élimination de l'ensemble du corpus  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$** , en considérant la corrélation générale (cf. Rey *et al*, 2022, Fig. 2 ; I, p.424), dans le but de préserver au maximum l'intégrité des données (le signal idéal se situait plutôt entre 0,6 et 0,9V comme cela a été proposé, laissant une très faible quantité de données potentiellement exploitables ; cf. Rey *et al*, 2022, Fig. 2 ; I, p.424).

Pour ce qui est des valeurs de  **$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans l'os, l'impact de la diagénèse** reste, nous l'avons dit, difficilement évalué et évaluable – en particulier sans prétraitement possible pour l'ablation laser – et les analyses à venir dans l'émail permettront sans doute d'établir une nouvelle gamme locale de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , à l'échelle de la région et de chaque site, voire de chaque espèce (cf. la différence entre bovins et porcins à GLN et la possibilité d'espaces occupés séparés). La comparaison avec les données de l'os permettra de mieux évaluer l'impact de la diagénèse dans celui-ci.

## II.5. Discussion autour des régimes alimentaires à partir des éléments traces (TE)

### II.5.a. Le traitement de la diagénèse

Suite au nettoyage effectué au sein de chaque profil (élimination des zones de corrélations entre proxies biogéniques et diagénétiques ; cf. I et Figure C8. 1, p.435), nous avons généré une nouvelle analyse en composantes principales (ACP) pour l'ensemble des données élémentaires nettoyées,

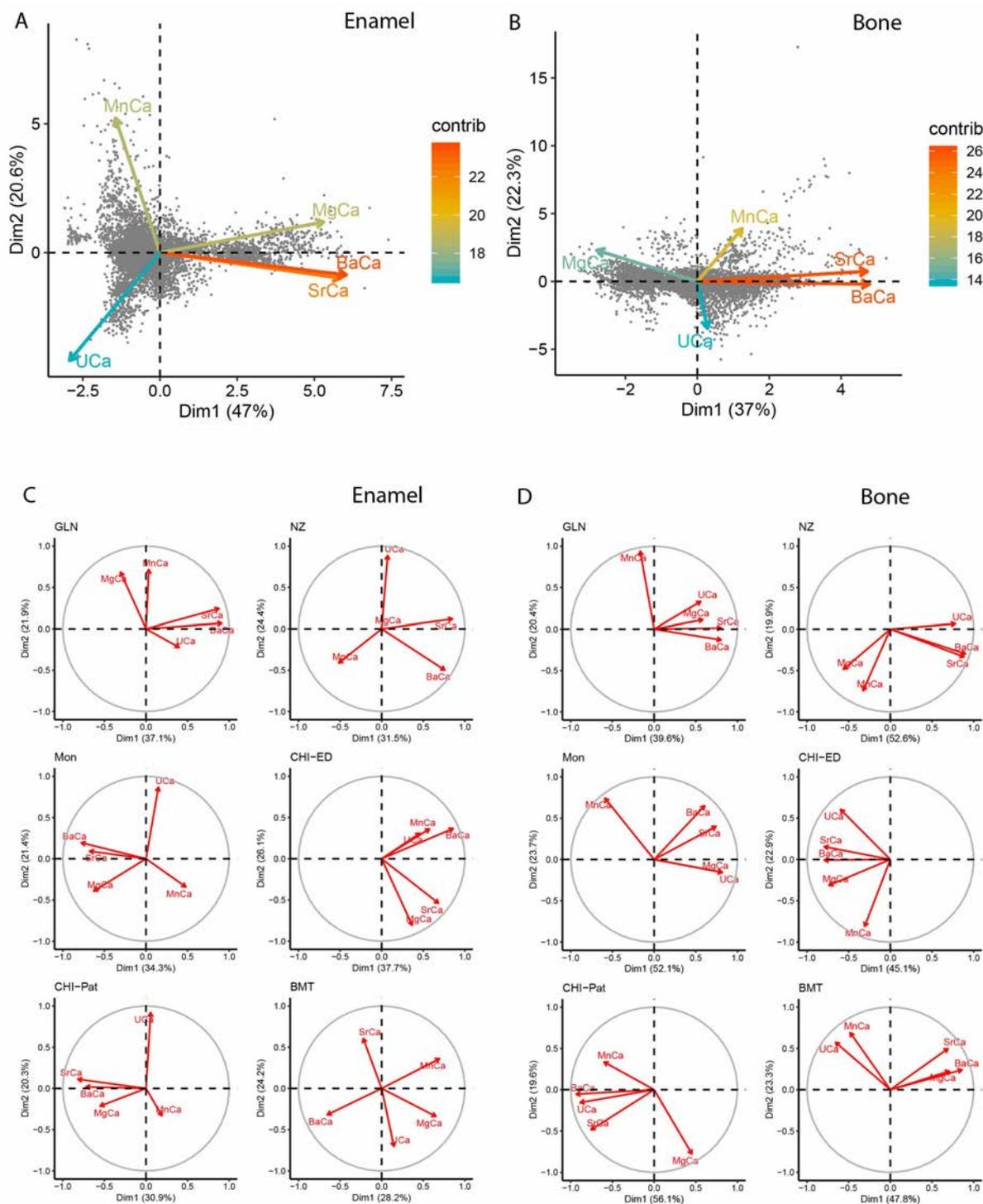


Figure C8. 6 : Analyses en composantes principales de l'ensemble des données nettoyées dans l'émail (A) et dans l'os (B) puis pour chaque site individuellement dans l'émail (C) et dans l'os (D).

pour l'émail et pour l'os individuellement, puis site par site. Le résultat des ACP est donné sur la Figure C8. 6. En comparaison de la figure 3 de l'article Rey *et al*, 2022 (cf. I, p.425), les résultats de l'ensemble des données, en particulier dans l'émail (A) montrent clairement que les **variables Sr/Ca et Ba/Ca ne sont plus corrélées aux variables diagénétiques Mn/Ca et U/Ca**. L'image est un peu **moins claire dans l'os** où l'on peut suspecter qu'une **partie des résultats soit encore altérée**. En effet, la composition de l'os étant plus diffuse, le traitement des données des profils dans l'os ne permet pas d'identifier et d'éliminer un « ensemble osseux » diagénétique, à l'inverse des pics ponctuels dans l'émail.

Lorsque l'on observe les **ACP site par site**, l'image est à nouveau plus compliquée.

- *Le cas de l'émail, site par site*

Dans l'émail, on peut noter dans certains cas des corrélations rémanentes entre proxies biogéniques et diagénétiques, indiquant a priori qu'un impact diagénétique est toujours présent. C'est le cas par exemple de **CHI-ED** pour lequel Ba/Ca est corrélé à U/Ca et Mn/Ca, mais ce site ne comporte qu'un seul profil (CHI-ED 5) et le faible nombre de données rend moins puissante l'interprétation de l'ACP. Lorsque l'on observe le profil en question, aucune corrélation (augmentation ou diminution concomitante des ratios biogéniques et diagénétiques) n'est visible (Figure C8. 7).

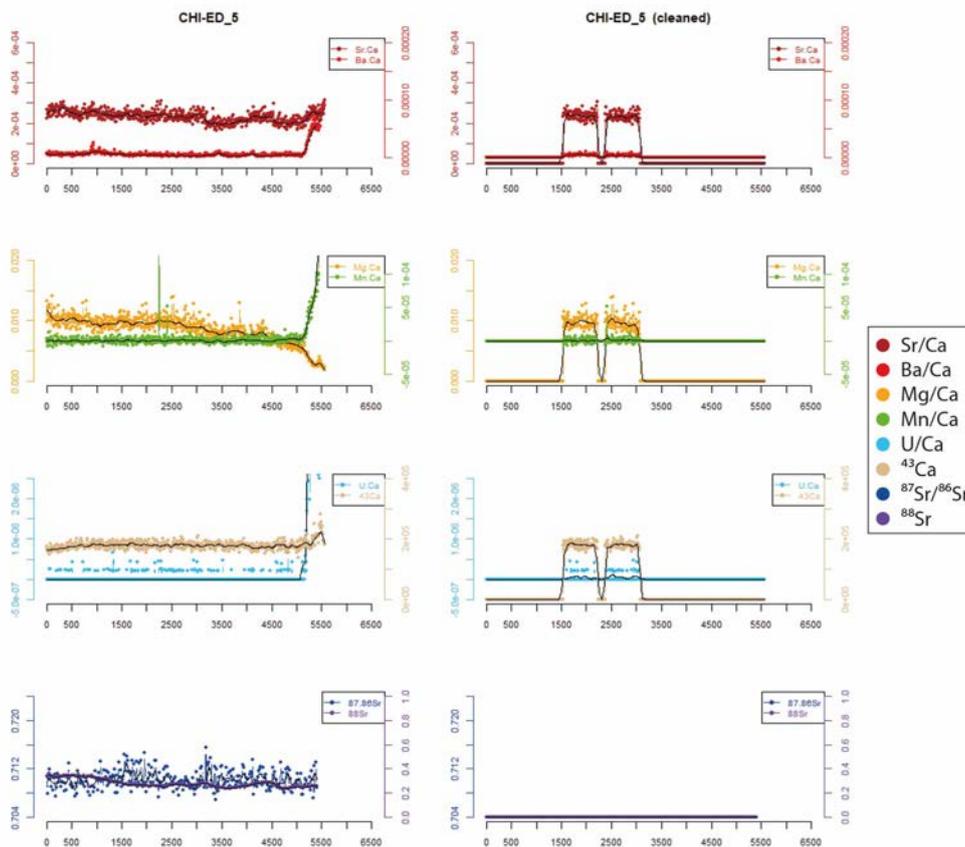


Figure C8. 7 : Courbes de valeurs mesurées par ablation laser pour le profil dans l'émail de l'échantillon CHI-ED 5 avant (à gauche) et après nettoyage (à droite) illustrant le peu de données restantes après le nettoyage.

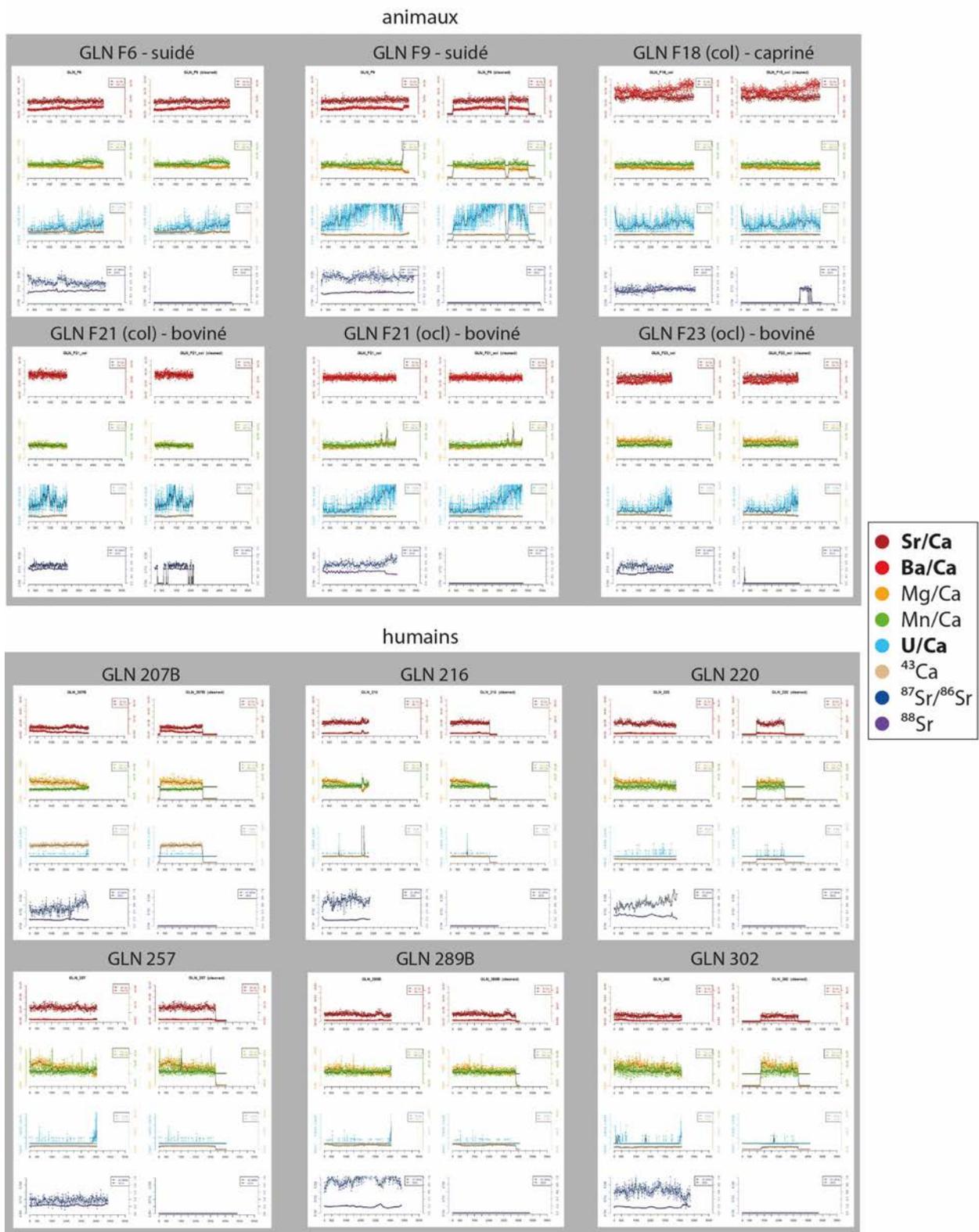
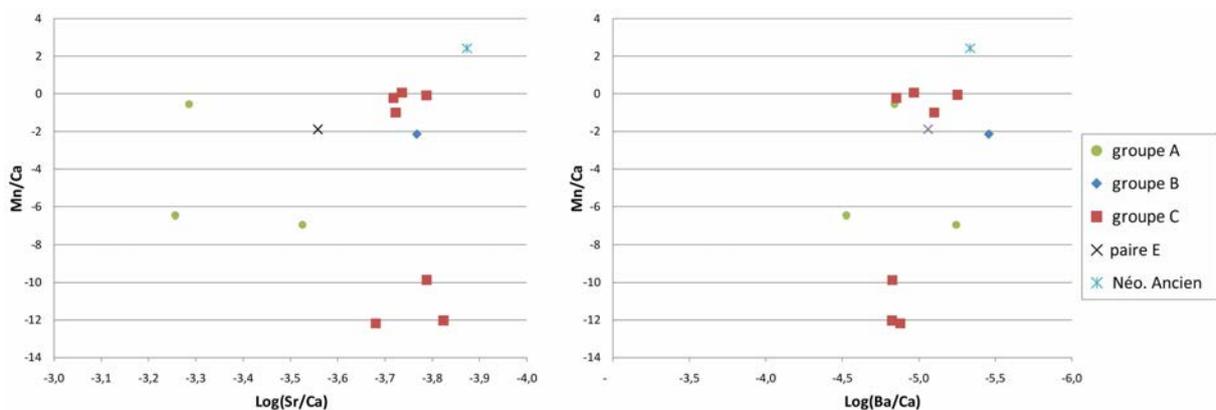


Figure C8. 8 : Exemple de corrélation dans l'émail entre, d'une part, des ratios élevés de Sr/Ca et Ba/Ca (en rouges) ainsi que U/Ca (bleu clair) chez les animaux de GLN (en particulier les herbivores ; en haut) et, d'autre part, des ratios faibles de Sr/Ca, Ba/Ca et U/Ca chez les humains du même site (en bas). Les ratios Sr/Ca et Ba/Ca s'expliquent par la position trophique des animaux et des humains, alors que la raison des différences en U/Ca sont inconnues, peut-être dues aux conditions d'inhumations.

Dans le cas de **GLN**, Ba/Ca et Sr/Ca semblent légèrement corrélés à U/Ca (la longueur de la flèche d'U/Ca reste faible) et ce résultat peut représenter un biais analytique, probablement dû au fait qu'un ensemble de données – certains profils animaux et herbivores en l'occurrence – présente une plus forte concentration d'U en même temps qu'un Ba/Ca en moyenne plus élevé, sans pour autant qu'il n'existe de corrélation à l'intérieur de ces profils (Figure C8. 8 ; voir aussi Annexe N10). Si la différence en Sr/Ca et Ba/Ca entre ces animaux et les humains s'explique par des régimes alimentaires distincts, les causes d'une plus grande concentration en U chez ces animaux ne sont pas précisément connues (le type de contamination ayant entraîné de l'U n'a toutefois pas altéré les concentrations en Sr, Ba et Ca). Cette contamination différentielle en U est peut-être due à des différences structurelles et/ou de composition des dents, ou bien à des différences inhérentes aux conditions taphonomiques (d'enfouissement) entre les humains et les animaux. Ce résultat confirme que l'élimination de la diagénèse doit se faire par l'observation des profils au cas par cas. Une ACP par profil rendrait sans doute compte de l'absence de corrélation significative intra-profil entre ratios biogéniques et diagénétiques, comme le montrent les matrices de corrélation (Annexe N10).

NB : Une étude réalisée par R. Joannes-Boyau et collaborateurs (2019) a mis en évidence une accumulation de U dans l'émail à la jonction émail-dentine, sans rapport avec les ratios Sr/Ca et Ba/Ca.

À **Mon**, Sr/Ca et Ba/Ca sont légèrement anti-corrélés à Mn/Ca. La Figure C8. 9 montre la distribution des ratios Sr/Ca et Ba/Ca en fonction de Mn/Ca en fonction des groupes identifiés dans ce site (séparés spatialement et indépendants d'un point de vue archéologique). Il apparaît que les (somme toute faibles) corrélations observées sont dues au fait que l'individu du Néolithique ancien se détache des autres par un Mn/Ca plus élevé et un Sr/Ca plus faible, d'une part, et d'autre part probablement parce que les individus du groupe A présentent un Sr/Ca supérieur aux autres. Cependant, la majorité des valeurs de Mn/Ca sont négatives, indiquant que la concentration en Mn était insuffisante pour être



**Figure C8. 9 : Distribution des ratios Mn/Ca dans l'émail en fonction de Sr/Ca et Ba/Ca à Monéteau « Macherin » pour chaque groupe archéologique. La corrélation (faible) mise en évidence par l'ACP (Fig. 4\_PCA clean) est due à la variabilité de Sr/Ca et Ba/Ca entre les groupes et au bruit de Mn/Ca : les valeurs négatives excluent l'apport de Mn diagénétique.**

mesurée précisément, provoquant un net bruit de fond, supérieur au signal. Les corrélations illustrées par l'ACP à Mon sont donc le fait d'un biais analytique et les profils peuvent être interprétés en termes biogéniques.

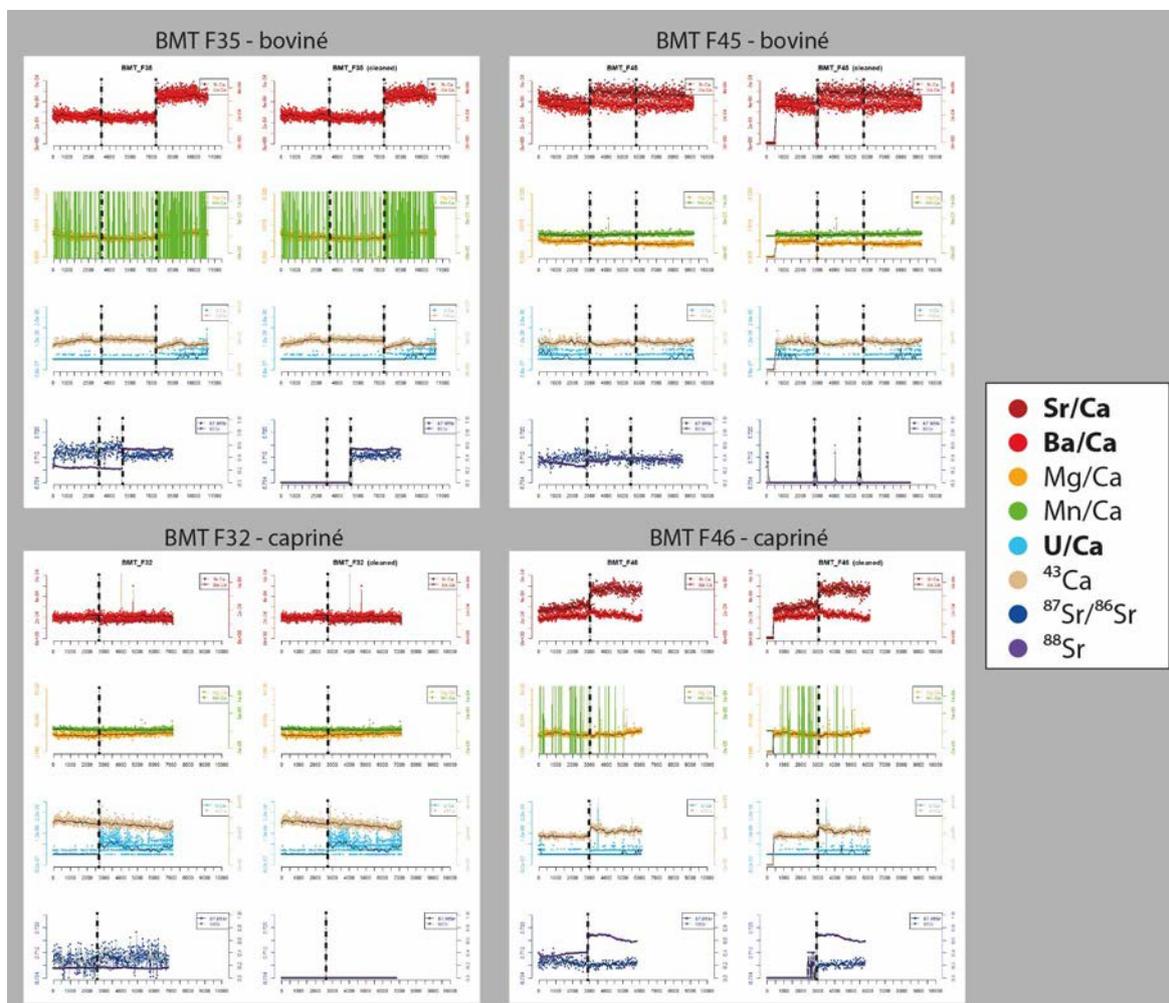


Figure C8. 10 : Exemple de profils d'herbivores (émail) pour lesquels les ratios biogéniques (Sr/Ca et Ba/Ca) ou diagénétiques (U/Ca et Mn/Ca) varie (indifféremment et de façon non corrélée) entre différents profils au sein d'une même dent. Les lignes pointillées indiquent la séparation entre les différents profils, successifs mais non joints.

Pour le site de BMT, l'ACP se présente « en étoile », montrant Ba/Ca anticorrélé à Mn/Ca et Sr/Ca anticorrélé à U/Ca, alors que Sr/Ca et Ba/Ca apparaissent non corrélés. En observant les profils individuels, on constate que ce résultat semble également refléter un biais analytique dû à certains échantillons (animaux) qui présentent une plus forte concentration de U que d'autres, mais sans corrélation intra-profil avec Sr/Ca ni Ba/Ca (voir par exemple Figure C8. 10). D'autre part, la majorité des valeurs de Mn/Ca de BMT sont négatives (Figure C8. 11), témoignant d'un bruit en raison de trop faibles concentrations de Mn pour être détectées (les traits verticaux sur la Figure C8. 10 rendent compte de ce bruit). Ces résultats ne peuvent donc pas être pris en considération pour témoigner d'un quelconque effet diagénétique que l'ACP semble mettre en évidence. Aussi, la non corrélation entre

Sr/Ca et Ba/Ca semble provenir du fait que peu d'individus d'espèces et de niveau trophique différents sont pris en considération : ce corpus compte une majorité d'herbivores, dont le nombre et la longueur des profils – et donc le nombre de données – est par ailleurs bien supérieur aux cochons et aux humains, comptant donc plus fortement dans l'ACP. Au demeurant, les herbivores font l'objet de plusieurs profils par dent et l'on observe parfois des différences dans les ratios élémentaires biogéniques et diagénétiques (sans aucune récurrence ni corrélation apparente) entre les profils au sein d'un même individu (Figure C8. 10). En revanche, les moyennes individuelles de Sr/Ca et Ba/Ca ne sont pas corrélées à U/Ca ni Mn/Ca (Figure C8. 11). Bien que les effectifs soient déséquilibrés, seuls les animaux présentent, comme à GLN, un fort U/Ca. Pour toutes ces raisons, la forme de l'ACP est donc certainement le seul fait d'un biais analytique.

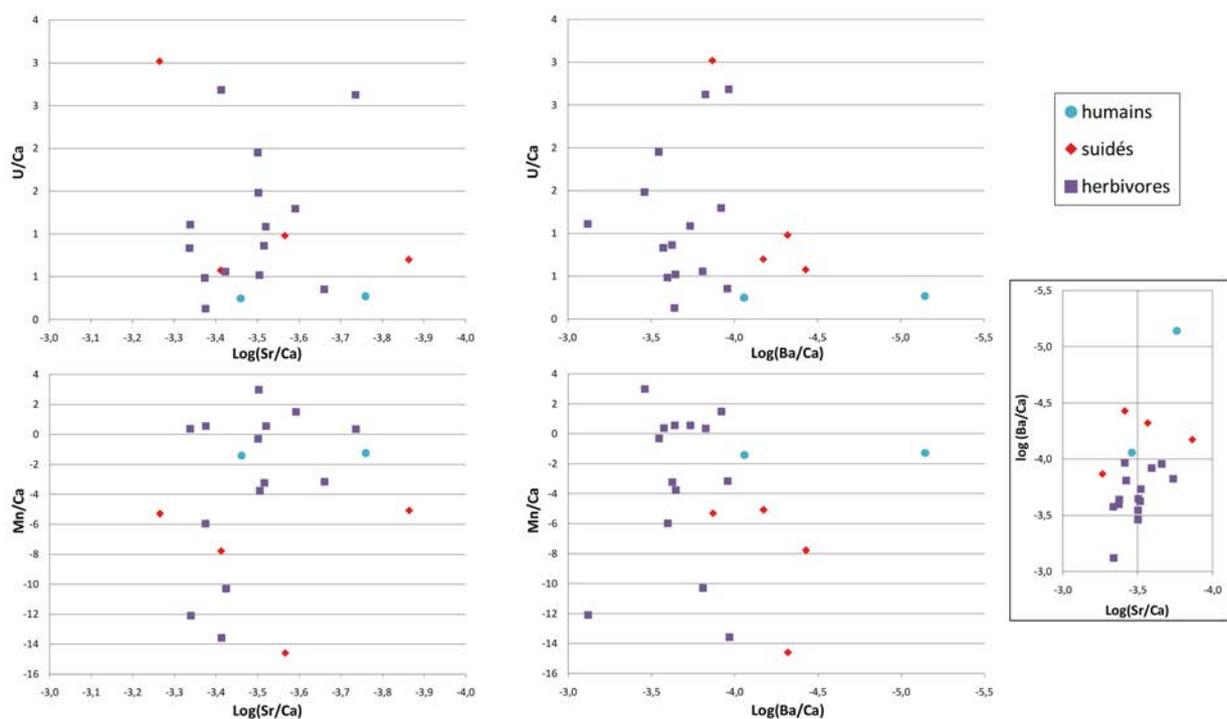


Figure C8. 11 : Distribution des ratios U/Ca et Mn/Ca dans l'émail en fonction de Sr/Ca et Ba/Ca à Beaumont «Le Crot aux Moines» pour chaque catégorie d'espèce.

À **CHI-Pat** et **NZ**, les ACP ne révèlent pas de corrélation entre Sr/Ca - Ba/Ca et Mn/Ca - U/Ca. Le site de **Bon** n'est pas représenté dans les ACP mais, ne comportant qu'un seul individu, il est possible de se référer uniquement aux graphiques et matrices de corrélation en Annexe N10.

La Figure C8. 12 illustre graphiquement la distribution des ratios U/Ca et Mn/Ca en fonction des ratios Sr/Ca et Ba/Ca pour tous les sites et montrent que les corrélations observées à GLN et à BMT sont dues à des différences entre les profils animaux et humains d'une part, et d'autre part que les corrélations observées à Mon relèvent d'un biais analytique puisque les ratios Mn/Ca induisant la corrélation sont négatifs et n'impliquent donc pas de diagénèse.

Ces résultats montrent bien la complexité de la prise en charge et du traitement des données : profil par profil ou en fonction du type d'analyse considéré, du site et de l'espèce, aucun schéma récurrent n'apparaît. Néanmoins, l'ensemble de ces observations suggère que les profils de l'émail nettoyés ne comportent plus de diagénèse et reflètent bien les variations biogéniques, enregistrées du vivant des individus.

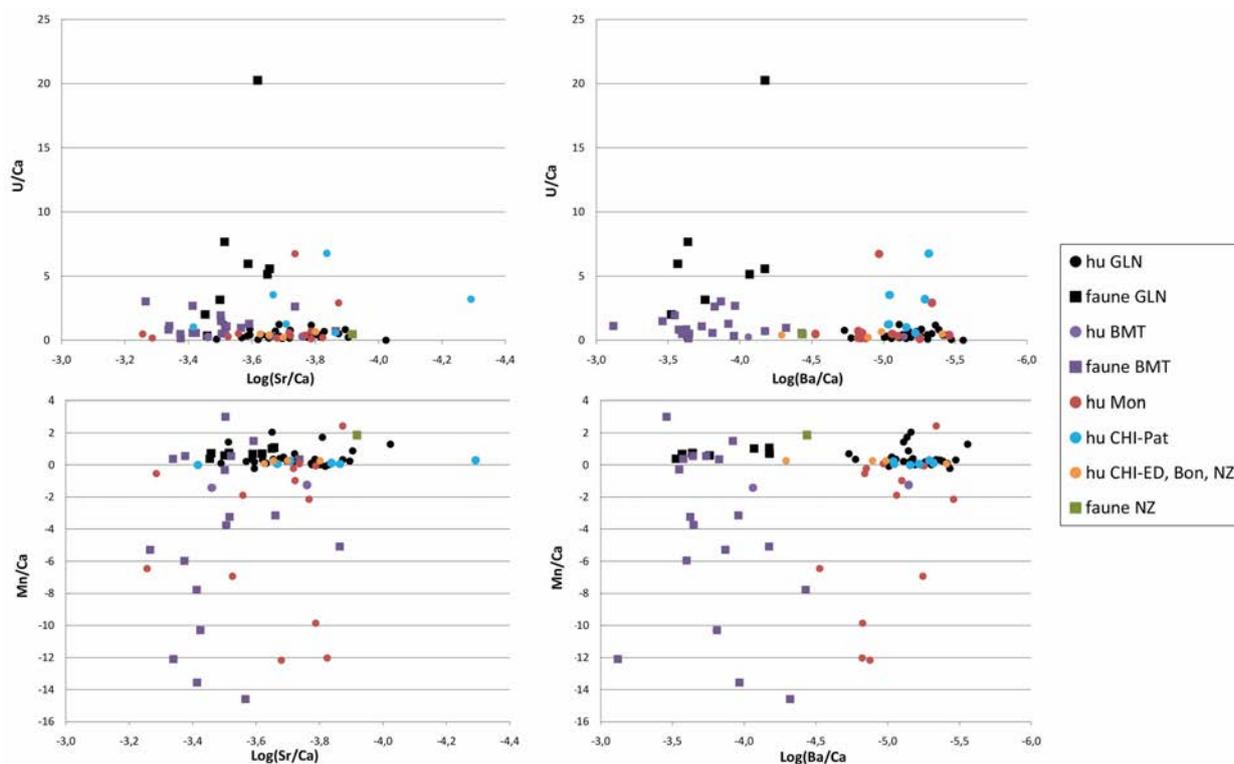


Figure C8. 12 : Distribution des ratios U/Ca et Mn/Ca dans l'émail en fonction des ratios Sr/Ca et Ba/Ca par site. Ces graphiques montrent que les corrélations observées à GLN et à BMT sont dues à des différences entre les humains (ronds) et la faune (carrés) d'une part, et d'autre part que les corrélations observées à Mon relèvent d'un biais analytique puisque les ratios Mn/Ca induisant la corrélation sont négatifs et n'impliquent donc pas de diagénèse.

- *Le cas de l'os*

Dans l'os, le nettoyage de la diagénèse est plus délicat. La seule **corrélation intra-profil** entre les ratios biogéniques Sr/Ca et Ba/Ca et les ratios diagénétiques U/Ca et Mn/Ca **ne permet pas d'éliminer les altérations**, celles-ci étant **plus diffuses**. D'ailleurs, les profils ont été très peu nettoyés, comme le montrent les courbes (Annexe N9b) ainsi que la similitude entre les ACP site par site générées avant et après nettoyage (Figure C8. 13). En effet, des variations de U/Ca ou Mn/Ca au sein des courbes dans l'os n'entraînent généralement pas de variation de Sr/Ca ni Ba/Ca, ces dernières variables étant d'ailleurs plutôt stables.

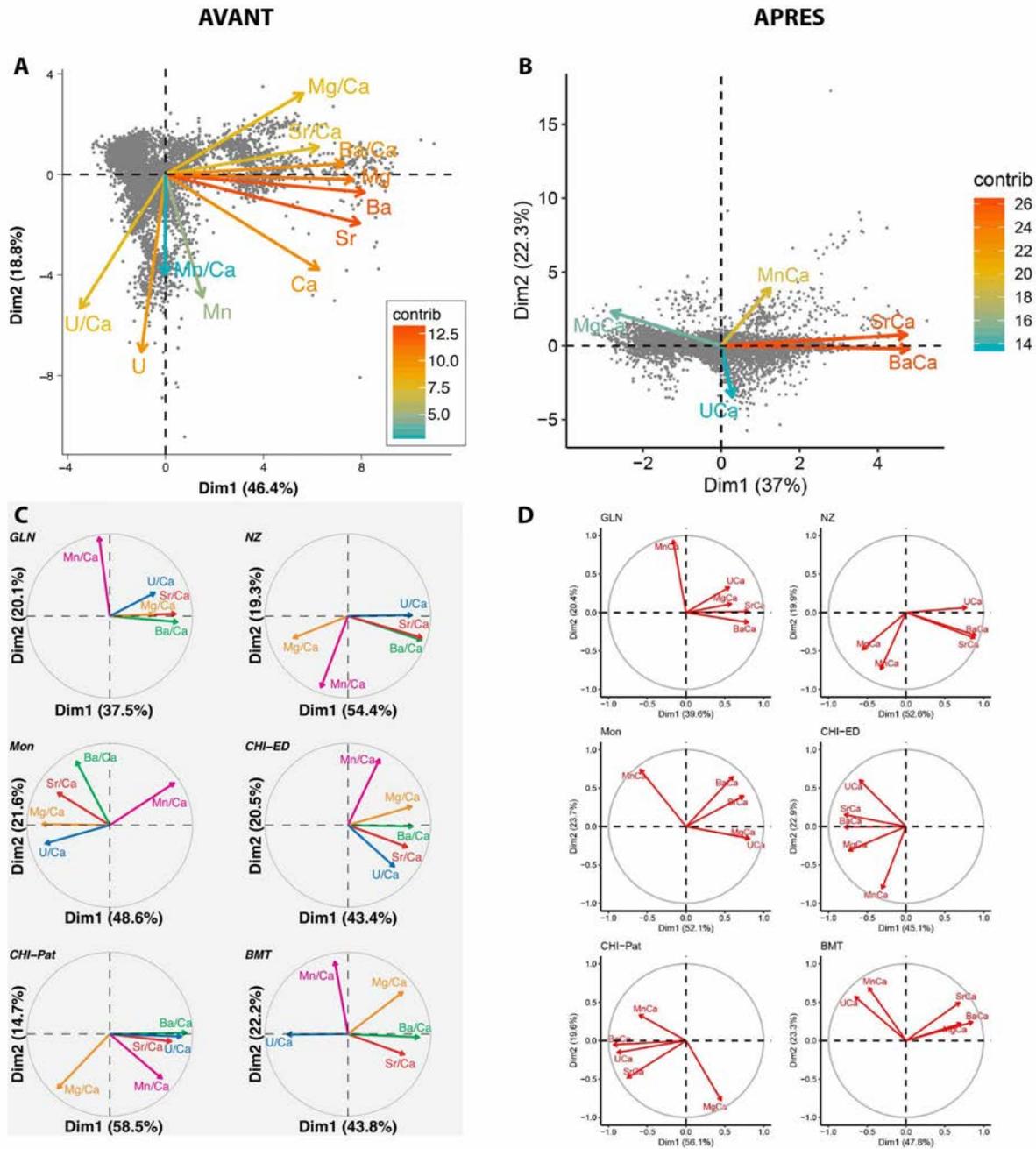


Figure C8. 13 : Analyses en composantes principales de l'ensemble des données dans l'os, avant (A) et après (B) nettoyage, puis pour chaque site individuellement avant (A) et après (B) nettoyage.

Toutefois, nous avons cherché à voir si des corrélations existaient **entre les moyennes** biogéniques et diagenétiques de ces profils, à l'échelle individuelle, humains et faune séparément et en fonction du site : les résultats sont représentés dans la Figure C8. 14. Aucune corrélation n'est visible hormis pour le site de BMT et en particulier pour Mn/Ca, sensiblement corrélé à Sr/Ca et Ba/Ca. Ce site présente par ailleurs des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca nettement supérieures aux autres sites. Si l'on exclue les valeurs négatives de Mn/Ca (relevant plutôt d'un biais analytique), la corrélation est encore visible (coef. correl. = 0.692 avec les valeurs de Mn/Ca négatives et coef. correl. = 0.765 sans les 4 valeurs négatives). Ce résultat semble indiquer que **l'impact de la diagenèse à BMT** a altéré les valeurs

biogéniques. Par ailleurs, rappelons que la corrélation mise en évidence entre  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  et Sr/Ca dans l'os (cf. I) indiquait déjà que ces échantillons puissent être emprunts de diagenèse. Néanmoins, ce site présente les plus faibles taux de U/Ca et de Mn/Ca de l'ensemble du corpus, laissant supposer qu'il ait été moins soumis aux atteintes diagenétiques. De plus, lorsque le Mn/Ca augmente, le Ba/Ca diminue et se rapproche des valeurs des autres sites. Cela voudrait-il dire que de la diagenèse est également présente dans les autres sites, alors même qu'aucune corrélation n'a été enregistrée ?

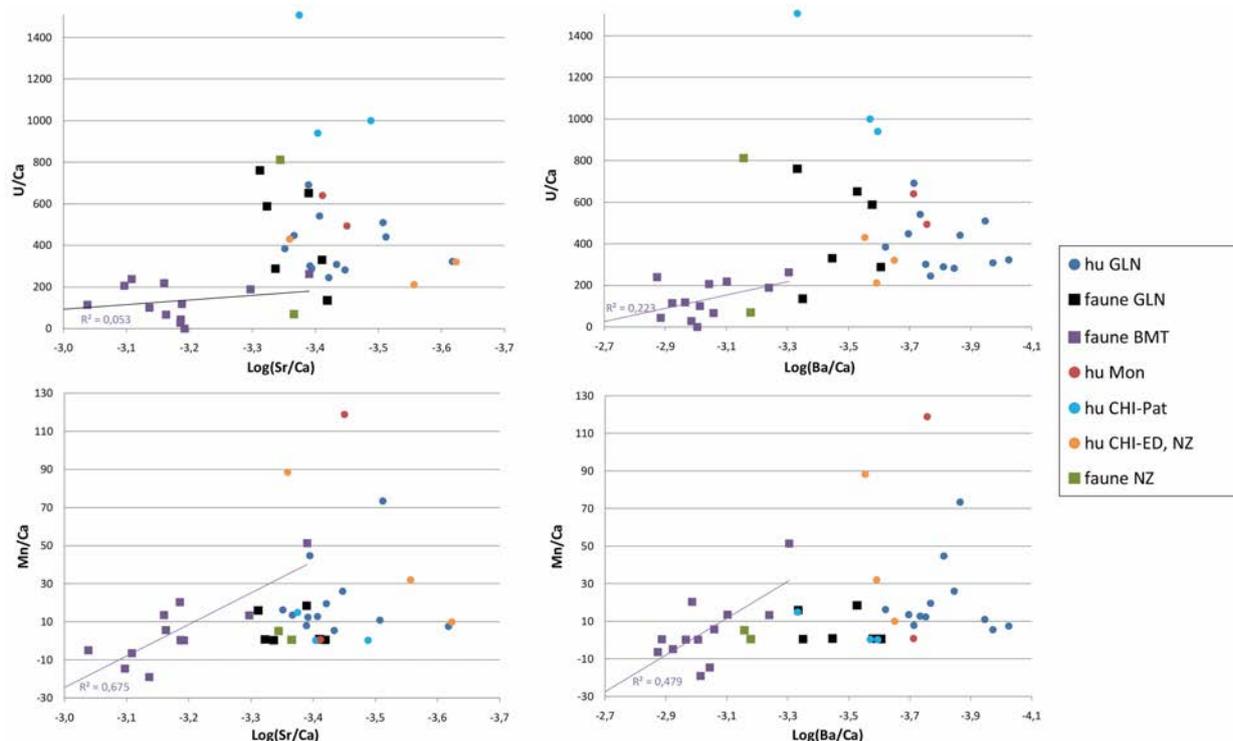


Figure C8. 14 : Distribution des ratios U/Ca et Mn/Ca dans l'os en fonction des ratios Sr/Ca et Ba/Ca par site et pour les humains et la faune séparément. On observe surtout une corrélation entre les ratios biogéniques et diagenétiques pour le site de BMT (violet).

Si l'on observe les ACP générées site par site après nettoyage des données dans l'os, on constate que toutes indiquent de la diagenèse (les vecteurs Sr/Ca et/ou Ba/Ca sont corrélés aux vecteurs diagenétiques U/Ca et/ou Mn/Ca) **sauf celle de BMT** (Figure C8. 13). Ces résultats sont-ils le fait de biais analytiques ? Ces types d'analyses sont-ils les plus appropriés dans le cas présent pour évaluer l'impact de la diagenèse ? Quelles sont les échantillons dont les valeurs biogéniques ont été altérées : ceux de BMT ou ceux des autres sites, voire tous ou aucun ? Les différences observées entre BMT et les autres sites – et en particulier GLN – relèvent-elles de schémas alimentaires distincts ou d'un biais diagenétique ? En l'état actuel des connaissances, il est difficile de conclure mais la piste diagenétique semble la plus probable pour expliquer les différences inter-sites, sans que n'en puisse être définie la direction. Des analyses ciblées visant à évaluer l'impact de la diagenèse permettraient sans doute de répondre à ces questions (analyses macro- et microscopiques, chimiques et structurales – degré de cristallinité ou de porosité – par spectroscopie Raman, fluorescence ou diffraction aux

rayons X, micro-tomographie par exemple ; e.g. Balter 2015 ; Dauphin 2015 ; Garot *et al.* 2017 ; Hedges *et al.* 1995 ; López-Costas *et al.* 2016 ; Reiche *et al.* 2007 ; Reiche *et al.* 2003 ; Zazzo 2014).

- *Des concentrations variables*

Les Tableau C8. 2 et Tableau C8. 3 indiquent les différences de concentrations élémentaires moyennes entre les profils par espèce et par site, dans l'os et dans l'email. On note notamment de faibles concentrations en  $^{43}\text{Ca}$  et en  $^{88}\text{Sr}$  à GLN, dans l'email comme dans l'os, comparativement aux autres sites. Et à l'inverse de fortes concentrations en  $^{43}\text{Ca}$  et en  $^{88}\text{Sr}$  à BMT dans les deux tissus. On constate également, pour l'email, un ratio élevé de U/Ca chez les animaux de GLN comparativement aux humains et aux animaux des autres sites. Une analyse plus poussée de ces résultats, relativement aux concentrations attendues dans les tissus modernes ou archéologiques non contaminés (cf. Chap2.VI.4.a) et au regard des corrélations précédemment identifiées permettra peut-être de mettre en évidence de nouveaux indices de contaminations possibles.

	species	site	mean (log Sr/Ca) bone	SD (log Sr/Ca) bone	mean (log Ba/Ca) bone	SD (log Ba/Ca) bone	mean <sup>43</sup> Ca bone	SD <sup>43</sup> Ca bone	mean <sup>88</sup> Sr bone	SD <sup>88</sup> Sr bone	mean Mg/Ca *10 <sup>3</sup> bone	SD Mg/Ca *10 <sup>3</sup> bone	mean Mn/Ca *10 <sup>5</sup> bone	SD Mn/Ca *10 <sup>5</sup> bone	mean U/Ca *10 <sup>3</sup> bone	SD U/Ca *10 <sup>3</sup> bone
Min	aurochs	NZ	-3.34	0.05	-3.16	0.07	185757	41954	126509	30541	1.526	0.516	5.343	4.408	812.947	131.362
Moyenne	aurochs	NZ	-3.34	0.05	-3.16	0.07	185757	41954	126509	30541	1.526	0.516	5.343	4.408	812.947	131.362
Écartype	aurochs	NZ														
Max	aurochs	NZ	-3.34	0.05	-3.16	0.07	185757	41954	126509	30541	1.526	0.516	5.343	4.408	812.947	131.362
Min	caprine	BMT	-3.30	0.04	-3.24	0.06	164906	20346	151676	17717	2.884	0.399	-4.866	4.093	0.280	0.890
Moyenne	caprine	BMT	-3.18	0.05	-3.01	0.07	246296	28790	231895	25500	4.046	0.978	5.956	6.372	75.084	20.247
Écartype	caprine	BMT	0.09	0.01	0.14	0.01	82592.981	10039.304	76293.956	5468.1231	1.1588716	0.619085	10.503012	6.0870597	75.916273	13.293476
Max	caprine	BMT	-3.04	0.05	-2.89	0.09	347615	43146	318653	31804	5.390	1.881	20.355	15.594	187.833	34.294
Min	cattle	BMT	-3.16	0.04	-3.06	0.06	179607	19717	178111	19101	3.078	0.438	-14.472	4.672	66.305	26.929
Moyenne	cattle	BMT	-3.13	0.04	-3.05	0.07	189770	23842	195506	23638	3.352	1.119	-4.386	7.556	136.255	41.849
Écartype	cattle	BMT	0.05	0.00	0.01	0.01	14372.794	5833.2575	24601.477	6416.4176	0.3867111	0.962264	14.264294	4.0784313	98.923631	21.099974
Max	cattle	BMT	-3.10	0.04	-3.04	0.07	199933	27967	212902	28175	3.625	1.799	5.701	10.440	206.204	56.769
Min	cattle	GLN	-3.42	0.05	-3.35	0.07	44732	11244	36009	7997	3.126	0.783	0.672	0.749	134.926	36.941
Moyenne	cattle	GLN	-3.37	0.05	-3.34	0.07	111242	21396	68895	13711	3.208	0.848	8.395	13.508	448.357	125.505
Écartype	cattle	GLN	0.08	0.01	0.01	0.00	94059.293	14357.726	46507.671	8081.6705	0.1159548	0.0919086	10.922014	18.04424	443.25811	125.24865
Max	cattle	GLN	-3.31	0.06	-3.33	0.07	177752	31549	101781	19426	3.290	0.913	16.118	26.268	761.788	214.069
Min	deer	BMT	-3.39	0.05	-3.30	0.05	162686	17685	98957	17890	2.525	0.359	0.309	0.339	117.269	24.029
Moyenne	deer	BMT	-3.29	0.05	-3.13	0.06	195057	22416	153744	22692	2.612	0.406	25.808	18.133	190.243	67.285
Écartype	deer	BMT	0.14	0.01	0.24	0.01	45779.813	6690.5001	77480.816	6790.8501	0.1223439	0.0664749	36.060117	25.164181	103.20084	61.174513
Max	deer	BMT	-3.19	0.06	-2.96	0.07	227428	27147	208532	27494	2.698	0.453	51.306	35.927	263.217	110.542
Min	deer	GLN	-3.41	0.05	-3.45	0.08	205114	26103	116935	17529	2.587	0.899	0.782	0.760	331.657	72.839
Moyenne	deer	GLN	-3.41	0.05	-3.45	0.08	205114	26103	116935	17529	2.587	0.899	0.782	0.760	331.657	72.839
Écartype	deer	GLN														
Max	deer	GLN	-3.41	0.05	-3.45	0.08	205114	26103	116935	17529	2.587	0.899	0.782	0.760	331.657	72.839
Min	deer	NZ	-3.37	0.05	-3.18	0.07	200004	22595	127737	16910	2.078	0.543	0.707	2.577	70.266	24.600
Moyenne	deer	NZ	-3.37	0.05	-3.18	0.07	200004	22595	127737	16910	2.078	0.543	0.707	2.577	70.266	24.600
Écartype	deer	NZ														
Max	deer	NZ	-3.37	0.05	-3.18	0.07	200004	22595	127737	16910	2.078	0.543	0.707	2.577	70.266	24.600
Min	human	CHI-ED	-3.36	0.05	-3.55	0.10	159385	44477	96187	28209	2.207	1.000	88.351	46.487	429.386	112.009
Moyenne	human	CHI-ED	-3.36	0.05	-3.55	0.10	159385	44477	96187	28209	2.207	1.000	88.351	46.487	429.386	112.009
Écartype	human	CHI-ED														
Max	human	CHI-ED	-3.36	0.05	-3.55	0.10	159385	44477	96187	28209	2.207	1.000	88.351	46.487	429.386	112.009
Min	human	CHI-Pat	-3.49	0.04	-3.60	0.05	162165	19489	80460	10750	1.300	0.265	0.265	0.779	939.983	111.591
Moyenne	human	CHI-Pat	-3.42	0.04	-3.50	0.06	186269	22919	100753	14250	1.659	0.447	5.209	9.263	1148.577	157.891
Écartype	human	CHI-Pat	0.06	0.01	0.15	0.01	28613.721	3785.1775	27892.657	5223.9098	0.3155845	0.303596	8.4546171	13.583141	311.49764	58.381433
Max	human	CHI-Pat	-3.37	0.06	-3.33	0.06	217891	26980	132560	20255	1.890	0.797	14.971	24.929	1506.640	223.474
Min	human	GLN	-3.62	0.03	-4.03	0.05	51519	5583	29124	2611	1.617	0.264	5.583	4.419	245.280	45.485
Moyenne	human	GLN	-3.44	0.05	-3.81	0.07	95954	11365	54225	7872	2.202	0.436	20.918	18.927	396.826	86.343
Écartype	human	GLN	0.08	0.01	0.12	0.01	52615.102	7200.1514	28593.027	6234.8555	0.5048092	0.1127074	19.683675	16.566477	133.08575	41.880515
Max	human	GLN	-3.35	0.07	-3.62	0.09	185771	26659	116672	24430	3.115	0.673	73.515	64.833	690.983	199.512

Tableau C8. 2 : Synthèse par espèce et par site des concentrations élémentaires moyennes (<sup>43</sup>Ca et <sup>88</sup>Sr) et des ratios Mg/Ca, Mn/Ca et U/Ca mesurés dans l'os. Les valeurs en rouges sont supérieures à la moyenne, celles en bleu sont inférieures à la moyenne. Les ratios biogéniques Sr/Ca et Ba/Ca sont indiqués à titre comparatif.

	species	site	mean (log Sr/Ca) bone	SD (log Sr/Ca) bone	mean (log Ba/Ca) bone	SD (log Ba/Ca) bone	mean <sup>43</sup> Ca bone	SD <sup>43</sup> Ca bone	mean <sup>88</sup> Sr bone	SD <sup>88</sup> Sr bone	mean Mg/Ca * 10 <sup>3</sup> bone	SD Mg/Ca * 10 <sup>3</sup> bone	mean Mn/Ca * 10 <sup>5</sup> bone	SD Mn/Ca * 10 <sup>5</sup> bone	mean U/Ca * 10 <sup>7</sup> bone	SD U/Ca * 10 <sup>7</sup> bone
Min	human	Mon	-3.45	0.04	-3.76	0.06	196862	19735	111833	14594	1.306	0.294	0.771	2.313	493.899	81.489
<b>Moyenne</b>	<b>human</b>	<b>Mon</b>	<b>-3.43</b>	<b>0.04</b>	<b>-3.73</b>	<b>0.06</b>	<b>217808</b>	<b>23567</b>	<b>117746</b>	<b>16078</b>	<b>1.753</b>	<b>0.319</b>	<b>59.812</b>	<b>30.262</b>	<b>566.669</b>	<b>93.011</b>
Écartype	human	Mon	0.03	0.01	0.03	0.00	29622.624	5419.5432	8362.9229	2099.4727	0.6334169	0.034141	83.49686	39.525496	102.91172	16.29543
Max	human	Mon	-3.41	0.05	-3.71	0.06	238755	27399	123660	17563	2.201	0.343	118.853	58.211	639.439	104.534
Min	human	NZ	-3.62	0.04	-3.65	0.07	184490	24311	64991	8592	2.073	0.367	9.949	17.016	211.898	46.349
<b>Moyenne</b>	<b>human</b>	<b>NZ</b>	<b>-3.59</b>	<b>0.04</b>	<b>-3.62</b>	<b>0.07</b>	<b>201277</b>	<b>25371</b>	<b>76999</b>	<b>9902</b>	<b>2.254</b>	<b>0.442</b>	<b>20.965</b>	<b>36.038</b>	<b>266.252</b>	<b>49.686</b>
Écartype	human	NZ	0.05	0.00	0.04	0.01	23740.912	1499.0167	16981.711	1853.2684	0.2552853	0.1059031	15.578002	26.901534	76.868511	4.719907
Max	human	NZ	-3.56	0.04	-3.59	0.08	218065	26431	89007	11213	2.434	0.517	31.980	55.061	320.606	53.024
Min	pig	BMT	-3.16	0.05	-3.10	0.05	183769	24484	189034	30112	2.419	0.341	-18.989	6.759	99.830	25.203
<b>Moyenne</b>	<b>pig</b>	<b>BMT</b>	<b>-3.14</b>	<b>0.05</b>	<b>-3.00</b>	<b>0.06</b>	<b>214494</b>	<b>25702</b>	<b>221946</b>	<b>31106</b>	<b>2.777</b>	<b>0.407</b>	<b>-3.952</b>	<b>8.228</b>	<b>185.723</b>	<b>44.453</b>
Écartype	pig	BMT	0.03	0.01	0.12	0.01	40796.188	1090.6458	32240.775	1293.0205	0.4806168	0.0939959	16.422737	2.0955619	75.044612	16.801419
Max	pig	BMT	-3.11	0.06	-2.87	0.07	260781	26588	253470	32568	3.323	0.514	13.573	10.628	238.592	56.168
Min	pig	GLN	-3.39	0.05	-3.61	0.06	52212	7997	40503	6299	1.559	0.339	0.584	0.821	288.835	67.805
<b>Moyenne</b>	<b>pig</b>	<b>GLN</b>	<b>-3.35</b>	<b>0.06</b>	<b>-3.57</b>	<b>0.07</b>	<b>74417</b>	<b>11653</b>	<b>49932</b>	<b>7416</b>	<b>1.887</b>	<b>0.404</b>	<b>6.722</b>	<b>6.785</b>	<b>510.174</b>	<b>102.229</b>
Écartype	pig	GLN	0.03	0.00	0.04	0.01	29817.228	5944.3763	11914.827	1886.1172	0.0591425	0.0591425	10.31986	10.306477	194.32094	30.275038
Max	pig	GLN	-3.32	0.06	-3.53	0.08	108307	18512	63323	9593	2.214	0.454	18.637	18.686	652.743	124.718
Min			-3.62	0.03	-4.03	0.05	44732	5583	29124	2611	1.300	0.264	-18.989	0.339	0.280	0.890
<b>Moyenne</b>			<b>-3.35</b>	<b>0.05</b>	<b>-3.45</b>	<b>0.07</b>	<b>159726</b>	<b>20737</b>	<b>115530</b>	<b>16138</b>	<b>2.509</b>	<b>0.578</b>	<b>15.528</b>	<b>14.926</b>	<b>388.264</b>	<b>78.664</b>
Écartype			0.14	0.01	0.34	0.01	75082.028	10422.673	76686.808	9588.3447	0.8932366	0.3705219	26.72976	16.764844	308.75186	52.489346
Max			-3.04	0.07	-2.87	0.10	347615	44477	318653	32568	5.390	1.881	118.853	64.833	1506.640	223.474

(suite)

	species	site	mean (log Sr/Ca) enamel	SD (log Sr/Ca) enamel	mean (log Ba/Ca) enamel	SD (log Ba/Ca) enamel	mean <sup>43</sup> Ca enamel	SD <sup>43</sup> Ca enamel	mean <sup>88</sup> Sr enamel	SD <sup>88</sup> Sr enamel	mean Mg/Ca *10 <sup>3</sup> enamel	SD Mg/Ca *10 <sup>3</sup> enamel	mean Mn/Ca *10 <sup>5</sup> enamel	SD Mn/Ca *10 <sup>5</sup> enamel	mean U/Ca *10 <sup>7</sup> enamel	SD U/Ca *10 <sup>7</sup> enamel
Min	caprine	BMT	-3.74	0.03	-3.92	0.04	177909	11833	70188	5110	5.450	0.671	-12.105	0.326	0.127	0.618
<b>Moyenne</b>	<b>caprine</b>	<b>BMT</b>	<b>-3.50</b>	<b>0.06</b>	<b>-3.66</b>	<b>0.08</b>	<b>205094</b>	<b>16607</b>	<b>95632</b>	<b>13537</b>	<b>7.312</b>	<b>0.962</b>	<b>-2.819</b>	<b>2.756</b>	<b>1.250</b>	<b>2.108</b>
Écartype	caprine	BMT	0.14	0.02	0.27	0.04	27892.4455	4800.95597	28202.8638	10045.6284	1.62203598	0.26637983	5.77307193	3.11845959	0.83343784	0.856222
Max	caprine	BMT	-3.34	0.11	-3.12	0.17	259628	23469	141085	34701	9.644	1.399	1.496	7.327	2.625	3.289
Min	caprine	GLN	-3.59	0.08	-3.57	0.09	59771	4449	26710	4427	5.937	1.126	0.702	0.740	5.977	5.166
<b>Moyenne</b>	<b>caprine</b>	<b>GLN</b>	<b>-3.59</b>	<b>0.08</b>	<b>-3.57</b>	<b>0.09</b>	<b>59771</b>	<b>4449</b>	<b>26710</b>	<b>4427</b>	<b>5.937</b>	<b>1.126</b>	<b>0.702</b>	<b>0.740</b>	<b>5.977</b>	<b>5.166</b>
Écartype	caprine	GLN	-3.59	0.08	-3.57	0.09	59771	4449	26710	4427	5.937	1.126	0.702	0.740	5.977	5.166
Max	caprine	GLN	-3.66	0.05	-3.97	0.05	149956	12659	48275	8727	4.361	0.607	-13.573	0.422	0.355	1.164
Min	cattle	BMT	-3.47	0.07	-3.73	0.13	175270	19187	87938	18502	5.843	0.893	-4.883	9.798	0.957	1.687
<b>Moyenne</b>	<b>cattle</b>	<b>BMT</b>	<b>-3.47</b>	<b>0.07</b>	<b>-3.73</b>	<b>0.13</b>	<b>175270</b>	<b>19187</b>	<b>87938</b>	<b>18502</b>	<b>5.843</b>	<b>0.893</b>	<b>-4.883</b>	<b>9.798</b>	<b>0.957</b>	<b>1.687</b>
Écartype	cattle	BMT	0.12	0.04	0.18	0.08	18199.8465	8197.86141	24434.7075	9686.2906	1.0308671	0.26152316	4.72006647	5.80774489	0.86925112	0.72111706
Max	cattle	BMT	-3.34	0.14	-3.57	0.25	202822	35074	114041	31165	7.308	1.362	0.380	16.597	2.683	3.091
Min	cattle	GLN	-3.51	0.05	-3.76	0.06	44804	4837	25312	2991	6.756	0.998	0.405	0.855	0.373	1.049
<b>Moyenne</b>	<b>cattle</b>	<b>GLN</b>	<b>-3.48</b>	<b>0.07</b>	<b>-3.64</b>	<b>0.08</b>	<b>64640</b>	<b>18923</b>	<b>35599</b>	<b>11127</b>	<b>7.254</b>	<b>1.191</b>	<b>0.619</b>	<b>3.709</b>	<b>3.319</b>	<b>4.955</b>
Écartype	cattle	GLN	0.03	0.05	0.10	0.04	28121.9813	25676.1879	15907.7973	13064.7621	0.76685361	0.24476957	0.15565115	3.96370122	3.13442088	3.37237466
Max	cattle	GLN	-3.45	0.14	-3.52	0.15	105824	57365	59100	30574	8.376	1.547	0.741	9.518	7.694	9.280
Min	deer	BMT	-3.50	0.06	-3.46	0.05	65891	4970	33311	4374	7.130	1.113	2.994	11.587	1.482	2.769
<b>Moyenne</b>	<b>deer</b>	<b>BMT</b>	<b>-3.50</b>	<b>0.06</b>	<b>-3.46</b>	<b>0.05</b>	<b>65891</b>	<b>4970</b>	<b>33311</b>	<b>4374</b>	<b>7.130</b>	<b>1.113</b>	<b>2.994</b>	<b>11.587</b>	<b>1.482</b>	<b>2.769</b>
Écartype	deer	BMT	-3.50	0.06	-3.46	0.05	65891	4970	33311	4374	7.130	1.113	2.994	11.587	1.482	2.769
Max	deer	BMT	-3.50	0.06	-3.46	0.05	65891	4970	33311	4374	7.130	1.113	2.994	11.587	1.482	2.769
Min	human	BMT	-3.76	0.05	-5.14	0.09	184633	24421	50284	6226	7.157	1.118	-1.401	0.430	0.248	0.714
<b>Moyenne</b>	<b>human</b>	<b>BMT</b>	<b>-3.61</b>	<b>0.06</b>	<b>-4.60</b>	<b>0.13</b>	<b>194461</b>	<b>25608</b>	<b>71350</b>	<b>9514</b>	<b>7.399</b>	<b>1.254</b>	<b>-1.328</b>	<b>0.451</b>	<b>0.260</b>	<b>0.736</b>
Écartype	human	BMT	0.21	0.01	0.77	0.06	13898.1838	1678.6145	29791.2042	4650.80971	0.34168628	0.19251757	0.10385366	0.02887309	0.01631649	0.03079022
Max	human	BMT	-3.46	0.06	-4.06	0.17	204288	26795	92415	12803	7.641	1.390	-1.254	0.471	0.271	0.758
Min	human	Bon	-3.70	0.05	-4.89	0.17	169494	19786	49812	7217	10.843	2.402	0.252	0.391	0.221	0.759
<b>Moyenne</b>	<b>human</b>	<b>Bon</b>	<b>-3.70</b>	<b>0.05</b>	<b>-4.89</b>	<b>0.17</b>	<b>169494</b>	<b>19786</b>	<b>49812</b>	<b>7217</b>	<b>10.843</b>	<b>2.402</b>	<b>0.252</b>	<b>0.391</b>	<b>0.221</b>	<b>0.759</b>
Écartype	human	Bon	-3.70	0.05	-4.89	0.17	169494	19786	49812	7217	10.843	2.402	0.252	0.391	0.221	0.759
Max	human	Bon	-3.70	0.05	-4.89	0.17	169494	19786	49812	7217	10.843	2.402	0.252	0.391	0.221	0.759
Min	human	CHI-ED	-3.63	0.04	-5.41	0.17	180727	10575	60739	4624	9.702	1.052	0.081	0.497	0.477	1.032
<b>Moyenne</b>	<b>human</b>	<b>CHI-ED</b>	<b>-3.63</b>	<b>0.04</b>	<b>-5.41</b>	<b>0.17</b>	<b>180727</b>	<b>10575</b>	<b>60739</b>	<b>4624</b>	<b>9.702</b>	<b>1.052</b>	<b>0.081</b>	<b>0.497</b>	<b>0.477</b>	<b>1.032</b>
Écartype	human	CHI-ED	-3.63	0.04	-5.41	0.17	180727	10575	60739	4624	9.702	1.052	0.081	0.497	0.477	1.032
Max	human	CHI-ED	-3.63	0.04	-5.41	0.17	180727	10575	60739	4624	9.702	1.052	0.081	0.497	0.477	1.032
Min	human	CHI-Pat	-4.29	0.04	-5.32	0.12	123795	8195	11977	1669	8.786	0.744	0.004	0.288	0.604	1.778
<b>Moyenne</b>	<b>human</b>	<b>CHI-Pat</b>	<b>-3.80</b>	<b>0.05</b>	<b>-5.18</b>	<b>0.18</b>	<b>163606</b>	<b>11052</b>	<b>43946</b>	<b>4067</b>	<b>9.521</b>	<b>1.455</b>	<b>0.136</b>	<b>0.738</b>	<b>2.732</b>	<b>4.187</b>
Écartype	human	CHI-Pat	0.29	0.01	0.12	0.06	26219.4781	2135.47158	25811.2138	1713.506	0.63881343	0.49146786	0.11162936	0.55068976	2.31677988	2.56610415
Max	human	CHI-Pat	-3.42	0.06	-5.04	0.29	199318	13035	84478	6478	10.298	2.024	0.306	1.526	6.776	8.542
Min	human	GLN	-4.02	0.05	-5.56	0.14	23731	2382	3993	800	7.719	0.938	-1.265	0.372	0.001	0.402
<b>Moyenne</b>	<b>human</b>	<b>GLN</b>	<b>-3.72</b>	<b>0.07</b>	<b>-5.15</b>	<b>0.20</b>	<b>48641</b>	<b>4741</b>	<b>15251</b>	<b>1997</b>	<b>9.694</b>	<b>1.815</b>	<b>0.421</b>	<b>1.720</b>	<b>0.472</b>	<b>1.584</b>
Écartype	human	GLN	0.13	0.02	0.23	0.04	28713.5915	2476.00967	6745.23576	774.683799	1.12894495	0.56932283	0.62269051	2.2225979	0.35496729	0.72107845
Max	human	GLN	-3.49	0.11	-4.56	0.29	191111	14211	34941	4214	12.055	3.353	2.046	10.330	1.227	3.549

**Tableau C8. 3 : Synthèse par espèce et par site des concentrations élémentaires moyennes ( $^{43}\text{Ca}$  et  $^{88}\text{Sr}$ ) et des ratios Mg/Ca, Mn/Ca et U/Ca mesurés dans l'émail. Les valeurs en rouges sont supérieures à la moyenne, celles en bleu sont inférieures à la moyenne. Les ratios biogéniques Sr/Ca et Ba/Ca sont indiqués à titre comparatif.**

	species	site	mean (log Sr/Ca) enamel	SD (log Sr/Ca) enamel	mean (log Ba/Ca) enamel	SD (log Ba/Ca) enamel	mean <sup>43</sup> Ca enamel	SD <sup>43</sup> Ca enamel	mean <sup>86</sup> Sr enamel	SD <sup>86</sup> Sr enamel	mean Mg/Ca *10 <sup>3</sup> enamel	SD Mg/Ca *10 <sup>3</sup> enamel	mean Mn/Ca *10 <sup>5</sup> enamel	SD Mn/Ca *10 <sup>5</sup> enamel	mean U/Ca *10 <sup>7</sup> enamel	SD U/Ca *10 <sup>7</sup> enamel
Min	human	Mon	-3.87	0.04	-5.46	0.07	136243	8407	28280	2903	7.538	0.782	-12.174	0.355	0.099	0.244
<b>Moyenne</b>	human	Mon	<b>-3.66</b>	<b>0.05</b>	<b>-5.01</b>	<b>0.15</b>	<b>186451</b>	<b>14175</b>	<b>65013</b>	<b>6498</b>	<b>8.892</b>	<b>1.487</b>	<b>-3.909</b>	<b>2.504</b>	<b>1.047</b>	<b>1.581</b>
Écartype	human	Mon	0.20	0.01	0.26	0.05	33430.6434	4796.81575	34462.3317	2997.7972	0.96675244	0.597388782	4.97578879	2.82857023	1.85794313	1.42031129
Max	human	Mon	-3.26	0.06	-4.52	0.26	254968	25702	139226	13548	10.852	2.650	2.420	10.742	6.743	5.457
Min	human	NZ	-3.80	0.05	-4.99	0.19	156390	8875	36200	5051	7.012	0.802	0.249	0.364	0.409	1.037
<b>Moyenne</b>	human	NZ	<b>-3.73</b>	<b>0.06</b>	<b>-4.64</b>	<b>0.22</b>	<b>184413</b>	<b>13861</b>	<b>51966</b>	<b>6423</b>	<b>7.333</b>	<b>1.027</b>	<b>0.252</b>	<b>1.032</b>	<b>0.526</b>	<b>1.432</b>
Écartype	human	NZ	0.10	0.01	0.49	0.04	39630.8665	7052.14683	22296.9939	1941.22867	0.45363708	0.31813418	0.00399282	0.94478579	0.1648508	0.55897078
Max	human	NZ	-3.65	0.06	-4.29	0.25	212436	18848	67733	7796	7.653	1.252	0.255	1.700	0.642	1.827
Min	pig	BMT	-3.86	0.04	-4.43	0.08	143724	11061	27983	2700	8.097	0.743	-14.590	6.279	0.577	1.433
<b>Moyenne</b>	pig	BMT	<b>-3.53</b>	<b>0.05</b>	<b>-4.20</b>	<b>0.13</b>	<b>166705</b>	<b>14510</b>	<b>83340</b>	<b>8948</b>	<b>9.787</b>	<b>1.177</b>	<b>-8.188</b>	<b>14.969</b>	<b>1.319</b>	<b>1.972</b>
Écartype	pig	BMT	0.26	0.01	0.24	0.05	34244.4626	2760.36487	57954.119	6154.73046	1.77840113	0.53765137	4.44058801	6.05878083	1.14607326	0.56744937
Max	pig	BMT	-3.27	0.06	-3.87	0.18	217102	17603	162309	17374	12.275	1.954	-5.081	20.089	3.019	2.760
Min	pig	GLN	-3.66	0.05	-4.18	0.09	56797	4162	20389	2266	5.301	0.777	0.726	0.889	5.134	4.374
<b>Moyenne</b>	pig	GLN	<b>-3.64</b>	<b>0.06</b>	<b>-4.14</b>	<b>0.09</b>	<b>67312</b>	<b>6491</b>	<b>23557</b>	<b>2797</b>	<b>5.912</b>	<b>0.964</b>	<b>0.949</b>	<b>0.985</b>	<b>10.309</b>	<b>7.407</b>
Écartype	pig	GLN	0.02	0.01	0.06	0.01	18045.6318	2321.23009	3844.74973	493.458718	0.5348506	0.18190524	0.19374258	0.09178948	8.60102935	4.87215901
Max	pig	GLN	-3.62	0.07	-4.07	0.10	88149	8804	27835	3243	6.296	1.140	1.077	1.072	20.237	13.027
Min	pig	NZ	-3.92	0.06	-4.44	0.08	78748	4876	15207	1718	7.165	0.865	1.852	0.847	0.493	0.789
<b>Moyenne</b>	pig	NZ	<b>-3.92</b>	<b>0.06</b>	<b>-4.44</b>	<b>0.08</b>	<b>78748</b>	<b>4876</b>	<b>15207</b>	<b>1718</b>	<b>7.165</b>	<b>0.865</b>	<b>1.852</b>	<b>0.847</b>	<b>0.493</b>	<b>0.789</b>
Écartype	pig	NZ	0.18	0.02	0.66	0.06	71125.0096	8544.52833	36847.0592	6933.13533	1.72306047	0.58699237	3.86753128	4.54703438	2.6655177	2.02597978
Max	pig	NZ	-3.26	0.14	-3.12	0.29	259628	57365	162309	34701	12.275	3.353	2.994	20.089	20.237	13.027

(suite)

II.5.b. Schéma général

Une synthèse des résultats des éléments traces est donnée dans le Tableau C8. 4 pour la faune, par site et par espèce.

site	espèce	émail								os									
		N	log Sr/Ca				log Ba/Ca				N	log Sr/Ca				log Ba/Ca			
			min	moy	SD	max	min	moy	SD	max		min	moy	SD	max	min	moy	SD	max
GLN	vache	4	-3.5	<b>-3.5</b>	0.0	-3.4	-3.8	<b>-3.6</b>	0.1	-3.5	2	-3.4	<b>-3.4</b>	0.1	-3.3	-3.3	<b>-3.3</b>	0.0	-3.3
	mouton/chèvre	1	-3.6	<b>-3.6</b>		-3.6	-3.6	<b>-3.6</b>		-3.6	0								
	TOT herbiv	5	-3.6	<b>-3.5</b>	0.1	-3.4	-3.8	<b>-3.6</b>	0.1	-3.5	2	-3.4	<b>-3.4</b>	0.1	-3.3	-3.3	<b>-3.3</b>	0.0	-3.3
	cochon	3	-3.7	<b>-3.6</b>	0.0	-3.6	-4.2	<b>-4.1</b>	0.1	-4.1	3	-3.4	<b>-3.3</b>	0.0	-3.3	-3.6	<b>-3.6</b>	0.0	-3.5
	TOT dom	8	-3.7	<b>-3.5</b>	0.1	-3.4	-4.2	<b>-3.8</b>	0.3	-3.5	5	-3.4	<b>-3.4</b>	0.0	-3.3	-3.6	<b>-3.5</b>	0.1	-3.3
	cerf/chevreuil	0									1	-3.4	<b>-3.4</b>		-3.4	-3.4	<b>-3.4</b>		-3.4
	TOT humain	31	-4.0	<b>-3.7</b>	0.1	-3.5	-5.5	<b>-5.1</b>	0.2	-4.5	12	-3.6	<b>-3.4</b>	0.1	-3.4	-4.0	<b>-3.8</b>	0.1	-3.6
BMT	vache	6	-3.7	<b>-3.5</b>	0.1	-3.3	-3.9	<b>-3.7</b>	0.2	-3.6	2	-3.2	<b>-3.1</b>	0.0	-3.1	-3.1	<b>-3.0</b>	0.0	-3.0
	mouton/chèvre	7	-3.7	<b>-3.5</b>	0.1	-3.3	-3.9	<b>-3.6</b>	0.3	-3.1	5	-3.3	<b>-3.2</b>	0.1	-3.0	-3.2	<b>-3.0</b>	0.1	-2.9
	TOT herbiv	13	-3.7	<b>-3.5</b>	0.1	-3.3	-3.9	<b>-3.7</b>	0.2	-3.1	7	-3.3	<b>-3.2</b>	0.1	-3.0	-3.2	<b>-3.0</b>	0.1	-2.9
	cochon	4	-3.9	<b>-3.5</b>	0.3	-3.3	-4.4	<b>-4.2</b>	0.2	-3.9	3	-3.2	<b>-3.1</b>	0.0	-3.1	-3.1	<b>-3.0</b>	0.1	-2.9
	TOT dom	17	-3.9	<b>-3.5</b>	0.2	-3.3	-4.4	<b>-3.8</b>	0.3	-3.1	10	-3.3	<b>-3.2</b>	0.1	-3.0	-3.2	<b>-3.0</b>	0.1	-2.9
	cerf/chevreuil	1	-3.5	<b>-3.5</b>		-3.5	-3.5	<b>-3.5</b>		-3.5	2	-3.4	<b>-3.3</b>	0.1	-3.2	-3.3	<b>-3.1</b>	0.2	-3.0
	TOT humain	2	-3.8	<b>-3.6</b>	0.2	-3.5	-5.1	<b>-4.6</b>	0.8	-4.0	0								
NZ	cochon	1	-3.9	<b>-3.9</b>		-3.9	-4.4	<b>-4.4</b>		-4.4	0								
	TOT dom	1	-3.9	<b>-3.9</b>		-3.9	-4.4	<b>-4.4</b>		-4.4	0								
	aurochs	0								1	-3.3	<b>-3.3</b>		-3.3	-3.2	<b>-3.2</b>		-3.2	
	cerf/chevreuil	0								1	-3.4	<b>-3.4</b>		-3.4	-3.2	<b>-3.2</b>		-3.2	
	TOT humain	2	-3.8	<b>-3.7</b>	0.1	-3.7	-4.9	<b>-4.6</b>	0.5	-4.2	2	-3.6	<b>-3.6</b>	0.0	-3.6	-3.6	<b>-3.6</b>	0.0	-3.6

Tableau C8. 4 : Synthèse des résultats élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) moyens par espèce et par site. SD : écart-types, TOT herbiv : total des herbivores domestiques (vaches, moutons, chèvres), TOT dom : total des animaux domestiques (herbivores et cochons).

- Dans l'os

Lorsque l'on considère la **distribution des valeurs moyennes au sein de chaque site**, on note que les **moyennes de BMT** sont **similaires et homogènes** pour toutes les espèces animales et, comme nous l'avons vu, généralement supérieures à celles des autres sites (Figure C8. 15 ; valeurs en ordre inverse sur les graphiques). D'autre part, la **distinction** observée en Ba/Ca (et dans une moindre mesure Sr/Ca) **entre les espèces à GLN et NZ** (rappelant la distribution observée dans l'émail ; cf. Figure C8. 17, p.463) semble indiquer que ces échantillons ont conservé au moins en partie leur intégrité. Si la diagénèse a pu lisser en partie les résultats pour les faire tendre vers une valeur commune, celle du sol environnant, et ainsi réduire les écarts entre les espèces et les individus, la variation relative reste visible à GLN et NZ. Il n'en est pas moins que l'homogénéité des valeurs à BMT peut également refléter une alimentation commune à tous ces animaux et pas nécessairement un lissage dû à la diagénèse. La différence observée entre GLN et BMT a déjà été mise en évidence à travers les analyses des isotopes stables (CNS ; cf. Chap5.I).

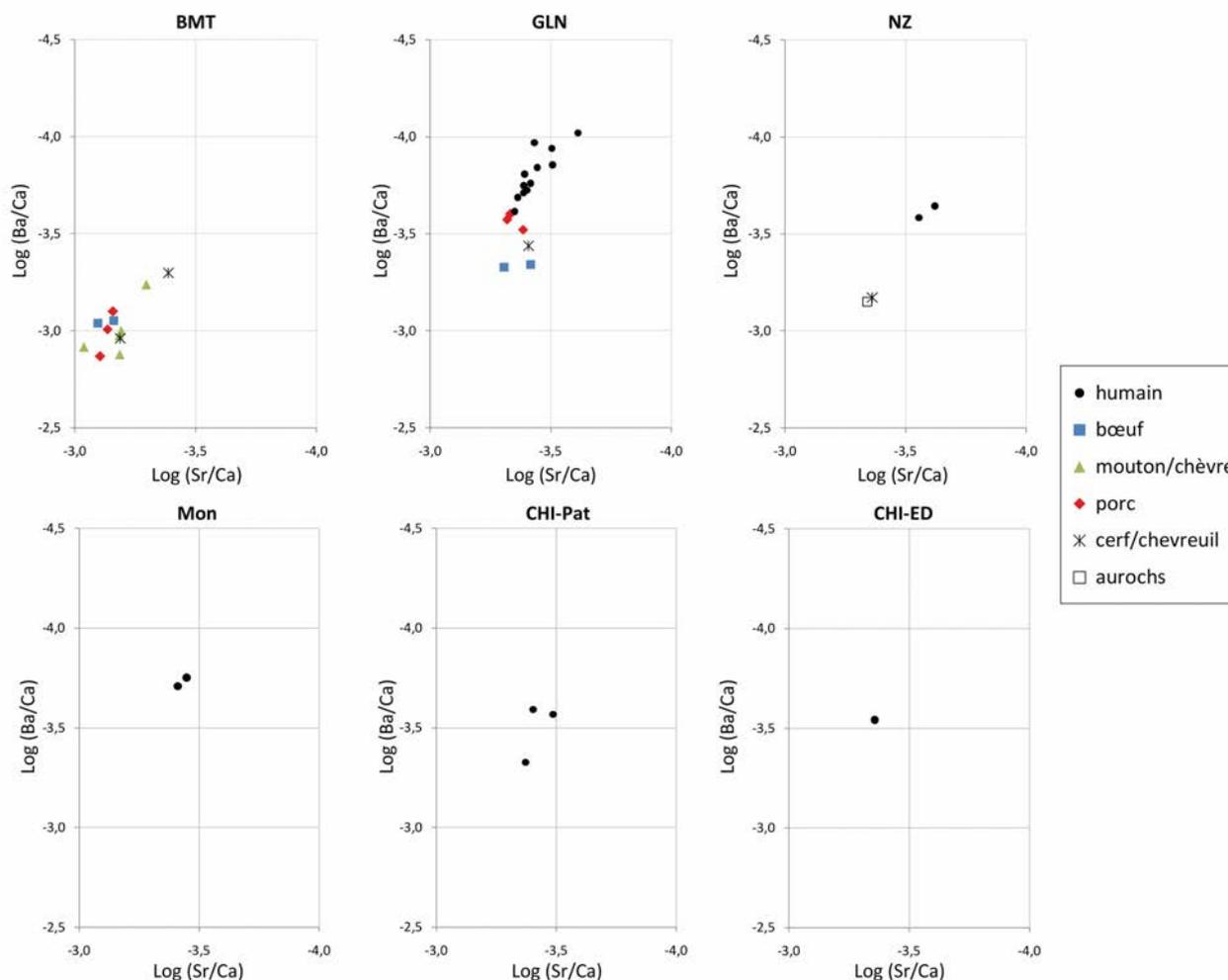


Figure C8. 15 : Distribution des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca des os humains et animaux par site.

En termes de valeurs absolues, s'il est difficile de comparer des données d'environnements et de contextes différents, une revue de la littérature confirme que nos valeurs d'herbivores sont comprises dans la gamme généralement observée et que les humains se situent à un niveau inférieur ou égal à celui des carnivores mesurés ailleurs (cf. Figure C8. 16 ; e.g. Balter *et al.* 2001 ; Burton *et al.* 1999 ; Elias *et al.* 1982 ; Gilbert *et al.* 1994).

Tout en gardant en mémoire les possibles conséquences de la diagenèse, nous avons replacé graphiquement les droites de régression de référence par rapport à nos données (Figure C8. 16). Il est essentiel de rappeler que la place des plantes locales sur ce graphique est inconnue. Néanmoins, nous avons tenté d'estimer la **gamme de valeurs des plantes consommées par les herbivores domestiques** de GLN et BMT, ainsi que la **gamme théorique des carnivores** se nourrissant des animaux domestiques des mêmes sites, à partir de l'OR connu et en considérant nos données exemptes d'altérations diagénétiques significatives (voir encadré p.462). Ces gammes de valeurs sont représentées sur le graphique de la Figure C8. 16a. Ces estimations, si empiriques soient-elles, ont l'avantage de permettre d'observer l'amplitude de variation de nos échantillons (notamment entre les espèces) au regard de l'ordre de grandeur théorique attendu entre deux niveaux trophiques.

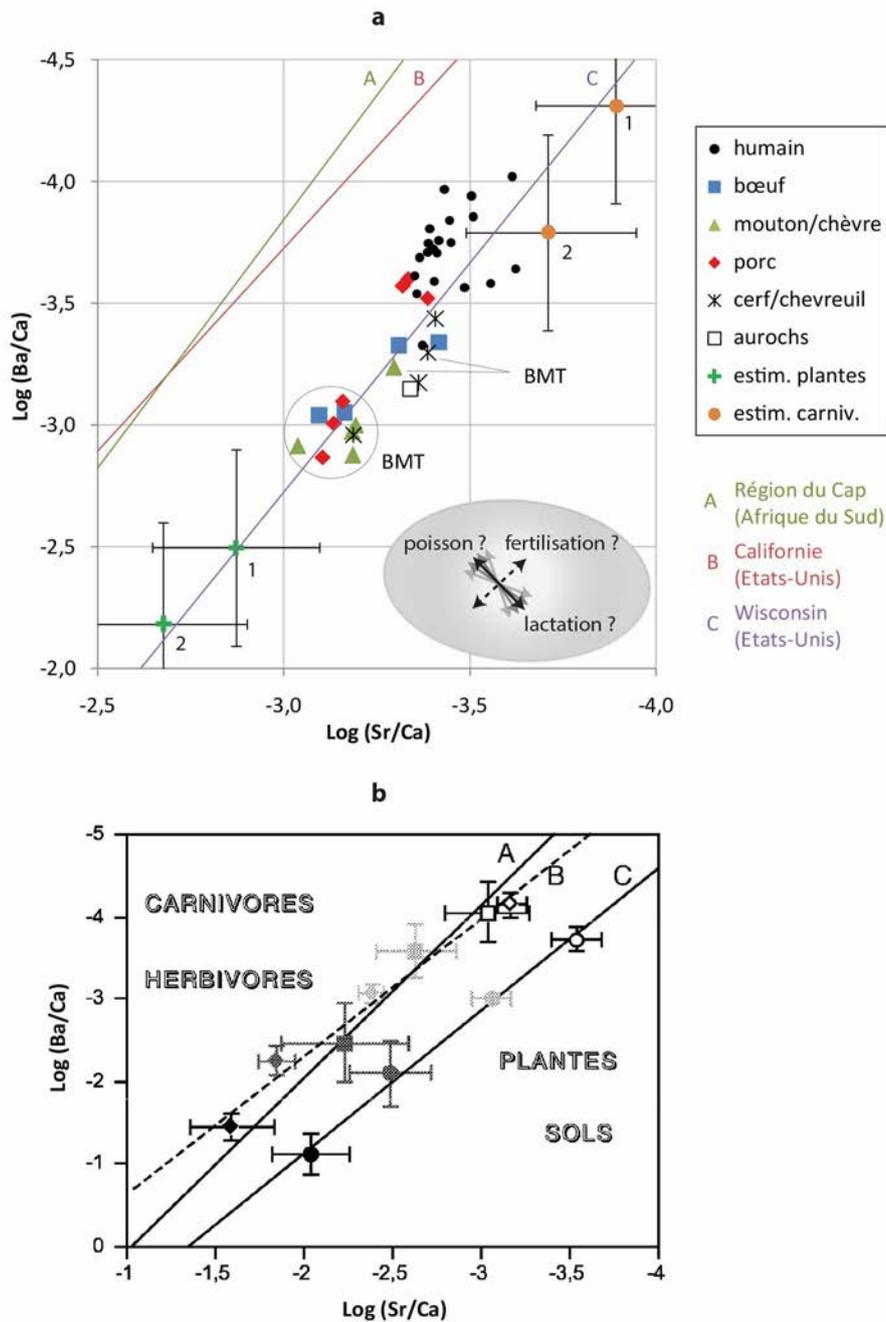


Figure C8. 16 : Distribution de l'ensemble des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca des os humains et animaux de ce corpus (a) et représentation des différents niveaux trophiques dans les écosystèmes de référence pour comparaison, d'après la synthèse de Balter *et al.*, 2001. Les droites de régression de référence sont représentées sur chacun des graphiques à partir des données de Gilbert *et al.*, 1994 (A, en vert), Elias *et al.*, 1982 (B, en rouge) et Burton *et al.*, 1999 (C, en violet). Sont également représentées sur le graphique de gauche : une estimation de la gamme des plantes consommées par les herbivores de GLN (1) et BMT (2) ainsi qu'une estimation de la gamme de valeurs de carnivores ayant consommé les animaux domestiques de GLN (1) et de BMT (2).

Les gammes de valeurs estimées pour les plantes et les carnivores sont du **même ordre de grandeur** que les valeurs mesurées dans d'autres contextes et disponibles dans la littérature (Balter *et al.* 2001 ; Burton *et al.* 1999 ; Elias *et al.* 1982 ; Gilbert *et al.* 1994), bien que celles des carnivores de GLN soient globalement inférieures en Ba/Ca et plus encore en Sr/Ca par rapport aux gammes connues en Afrique du Sud ou aux États-Unis (Figure C8. 16b). Il est à noter toutefois que **les plantes**

**consommées par les herbivores ne sont généralement pas les mêmes que celles consommées par les humains, ni par les cochons.** En particulier, les cochons pourraient consommer plus de glands et autres fruits d'arbres par exemple, qui présentent des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca inférieures aux herbacées (Sponheimer et Lee-Thorp 2006, cf. Chap2.VI.3). Plusieurs auteurs ont également rapporté que les **organes de réserve** (bulbes et tubercules) ou les **graines d'herbacées** (dont céréales) pouvaient présenter un haut Sr/Ca et un faible Ba/Ca (Comar *et al.* 1957 ; Sponheimer et Lee-Thorp 2006). Cela pourrait expliquer les valeurs de Ba/Ca des cochons inférieures à celles des herbivores à GLN, bien qu'un régime omnivore puisse également expliquer cette différence (cf. II.5.c). Il en est de même pour l'interprétation des valeurs des humains, dont la consommation, par exemple, d'une plus grande quantité de céréales (graines d'herbacées) conduirait à une augmentation du Sr/Ca et une diminution du Ba/Ca (augmentation vers le haut et la gauche sur le graphique).

D'autre part, une meilleure absorption du Sr et du Ba chez **les ruminants** en raison de leur système digestif digastrique induirait une augmentation du Sr/Ca et du Ba/Ca par rapport aux non-ruminants (Balter *et al.* 2002). Ce phénomène pourrait participer à la distinction entre les signatures élémentaires des cochons (non ruminants) et des bovidés à GLN. Si ce phénomène était avéré, l'homogénéité des valeurs de cochons et des herbivores à BMT relèverait plutôt de la diagénèse.

Selon les estimations obtenues pour les plantes et les carnivores, et toujours si l'on considère que ces données n'ont pas été altérées par la diagénèse, ces résultats indiquent un **niveau trophique des humains intermédiaire entre les herbivores et les carnivores**, en accord avec la consommation mixte de viande de bœuf et de porc, en complément des ressources végétales. La corrélation linéaire entre les niveaux trophiques étant respectée. Selon que l'on considère les données de BMT ou de GLN, la part relative des produits végétaux et animaux dans l'alimentation des humains varie. Néanmoins, la proportion de viande reste en deçà des interprétations proposées sur la base des résultats de CSIA-AA (Chap7) qui indiquent un fort degré de carnivorie. Ce résultat peut exprimer la plus grande contribution des plantes dans la signature Sr/Ca et Ba/Ca que dans la signature  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  en raison de leur plus grande concentration en Ca et de leur plus faible concentration en protéines, respectivement, par rapport aux ressources carnées. De plus, la **plus grande variabilité des valeurs des humains** par rapport à la faune semble indiquer que d'autres ressources ont dû entrer dans la composition des repas des humains en complément de la viande de bœuf et de porc, sans quoi la variabilité des consommateurs devrait être inférieure à celle de l'alimentation, selon le principe d'homogénéisation des signatures biochimiques avec l'augmentation du niveau trophique. L'apport de ressources végétales diversifiées offrant des ratios élémentaires plus variables que ceux des animaux pourrait expliquer la variabilité observée chez les humains.

Dans ce schéma manquent toutefois de nombreuses données pour conclure sur le régime des humains : en premier lieu **l'impact inconnu de la diagénèse**, qui pourrait atténuer les différences

interspécifiques et modifier la signature non seulement des animaux consommés, mais également des humains, condamnant toute reconstitution fiable – le gommage des différences pourrait notamment mener à la position intermédiaire observée pour les humains, s'écartant ainsi du résultat obtenu par CSIA-AA ; ensuite et seulement une fois ce problème écarté, les **différentes sources alimentaires non renseignées ici**, qui pourraient entraîner une variation des valeurs des consommateurs dans différentes directions, et éventuellement se combiner entre elles (Figure C8. 16 ; cf. Chap2.VI.3).

- **Les plantes** d'abord, peuvent présenter des valeurs très variables selon leur espèce, leur environnement, la partie anatomique considérée et probablement le type de stratégie culturelle employée par les néolithiques, en particulier l'utilisation de **fumier organique**, dont l'effet sur les ratios élémentaires n'est pas connu (Burton *et al.* 1999 ; Comar *et al.* 1957 ; Sponheimer et Lee-Thorp 2006 ; cf. II.5.c).
- La consommation de **produits laitiers** riches en Ca, supposée dans la région (Balasse et Tresset 2002), est difficile à tracer ici, en l'absence d'éléments de comparaison. Celle-ci pourrait être notamment masquée par une combinaison de facteurs. L'analyse d'autres indicateurs tels que le  $\delta^{44}\text{Ca}$  serait plus pertinente pour répondre à cette question (Tacail *et al.* 2021).
- La consommation de **ressources aquatiques** et en particulier de **poisson d'eau douce** ne semble pas non plus mise en évidence ici de façon significative, si tant est que ces ressources aient des rapports élémentaires Sr/Ca et Ba/Ca distincts de la faune terrestre, comme cela est observé dans d'autres contextes (Burton et Price 1990 ; Peek et Clementz 2012b). L'analyse directe d'échantillons de poisson ou la mesure de nouveaux indicateurs récemment expérimentés, tels que le  $\delta^{26}\text{Mg}$  permettant de détecter la consommation de poisson, apporteraient d'intéressants renseignements complémentaires à la reconstitution des régimes alimentaires.

Ainsi nous bornons-nous, dans l'attente notamment de plus amples informations quant au stade de dégradation biochimique de l'os, à exposer ces quelques hypothèses et pistes interprétatives concernant le schéma général observé dans l'os, sans tenter d'approche quantitative via par exemple l'utilisation de modèle inverse par la méthode des moindres carrés (Balter et Simon 2006), qui ne nous semble pas pertinente ici. La variabilité individuelle des humains sera discutée indépendamment ci-après (§ II.5.e).

**Estimation de la gamme de valeurs possible des plantes locales consommées par les herbivores**

Si l'on considère

$$OR_{Sr} = \frac{Sr/Ca_{os}}{Sr/Ca_{alimentation}} \quad \text{et} \quad OR_{Ba} = \frac{Ba/Ca_{os}}{Ba/Ca_{alimentation}}$$

soit :  $\log(OR_{Sr}) = \log(Sr/Ca_{os}) - \log(Sr/Ca_{alimentation})$  et  $\log(OR_{Ba}) = \log(Ba/Ca_{os}) - \log(Ba/Ca_{alimentation})$

on a :  $\log(Sr/Ca)_{plantes} = \log(Sr/Ca)_{herbiv.} - \log(OR_{Sr})$  et  $\log(Ba/Ca)_{plantes} = \log(Ba/Ca)_{herbiv.} - \log(OR_{Ba})$

avec  $OR_{Sr} = 0,30 \pm 0,08$  et  $OR_{Ba} = 0,16 \pm 0,08$

donc  $\log(OR_{Sr}) = -0,52 \pm 0,13$  et  $\log(OR_{Ba}) = -0,80 \pm 0,30$

et avec :

$\log(Sr/Ca)_{herbiv. GLN} = -3,4 \pm 0,1$  et  $\log(Ba/Ca)_{herbiv. GLN} = -3,3 \pm 0,1$  (herbiv. pour les herbivores domestiques) ;

$\log(Sr/Ca)_{herbiv. BMT} = -3,2 \pm 0,1$  et  $\log(Ba/Ca)_{herbiv. BMT} = -3,0 \pm 0,1$  (herbiv. pour les herbivores domestiques).

Ainsi, on a :

**$\log(Sr/Ca)_{plantes GLN} = -3,4 (\pm 0,1) + 0,52 (\pm 0,13) = -2,88 (\pm 0,23)$**  et  **$\log(Ba/Ca)_{plantes GLN} = -3,3 (\pm 0,1) + 0,80 (\pm 0,30) = -2,50 (\pm 0,4)$**  ;

**$\log(Sr/Ca)_{plantes BMT} = -3,2 (\pm 0,1) + 0,52 (\pm 0,13) = -2,68 (\pm 0,23)$**  et  **$\log(Ba/Ca)_{plantes BMT} = -3,0 (\pm 0,1) + 0,80 (\pm 0,30) = -2,20 (\pm 0,4)$** .

**Estimation de la gamme de valeurs possible des carnivores locaux**

De la même façon, nous avons estimé la gamme de valeurs possible des **carnivores ayant consommé les animaux domestiques** (herbivores et cochons) de GLN et de BMT.

Avec :

$\log(Sr/Ca)_{dom. GLN} = -3,4 \pm 0,1$  et  $\log(Ba/Ca)_{dom. GLN} = -3,5 \pm 0,1$  (dom. pour les animaux domestiques) ;

$\log(Sr/Ca)_{dom. BMT} = -3,2 \pm 0,1$  et  $\log(Ba/Ca)_{dom. BMT} = -3,0 \pm 0,1$  (dom. pour les animaux domestiques)

on a :

**$\log(Sr/Ca)_{carniv. GLN} = -3,4 (\pm 0,1) - 0,52 (\pm 0,13) = -3,92 (\pm 0,23)$**  et  **$\log(Ba/Ca)_{carniv. GLN} = -3,3 (\pm 0,1) - 0,80 (\pm 0,30) = -4,10 (\pm 0,4)$**  ;

**$\log(Sr/Ca)_{carniv. BMT} = -3,2 (\pm 0,1) - 0,52 (\pm 0,13) = -3,72 (\pm 0,23)$**  et  **$\log(Ba/Ca)_{carniv. BMT} = -3,0 (\pm 0,1) - 0,80 (\pm 0,30) = -3,80 (\pm 0,4)$** .

• Dans l'émail

La situation est différente dans l'émail : d'une part **l'impact - ponctuel - de la diagénèse a été éliminé** et les valeurs reflètent donc bien celles enregistrées du vivant des individus, mais d'autre part **l'OR<sub>émail-alimentation</sub> n'est pas connu** car les valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca sont variables dans l'émail selon le type de dent. Il n'est donc pas possible de reconstituer le régime alimentaire des humains à partir de ces données. Néanmoins, la distribution des valeurs entre les espèces mérite d'être discutée. À BMT et plus fortement à GLN, on observe une **nette distinction** entre les **herbivores** (bovinés, caprinés et cervidé), les **suidés omnivores** et les **humains** (Figure C8. 17), confirmant les résultats obtenus pour les isotopes stables de C, N et S dans le collagène osseux (cf. Chap5.I). Cette distinction n'est pas observée à NZ mais le faible effectif ne permet pas d'inférer un schéma réellement singulier pour ce site.

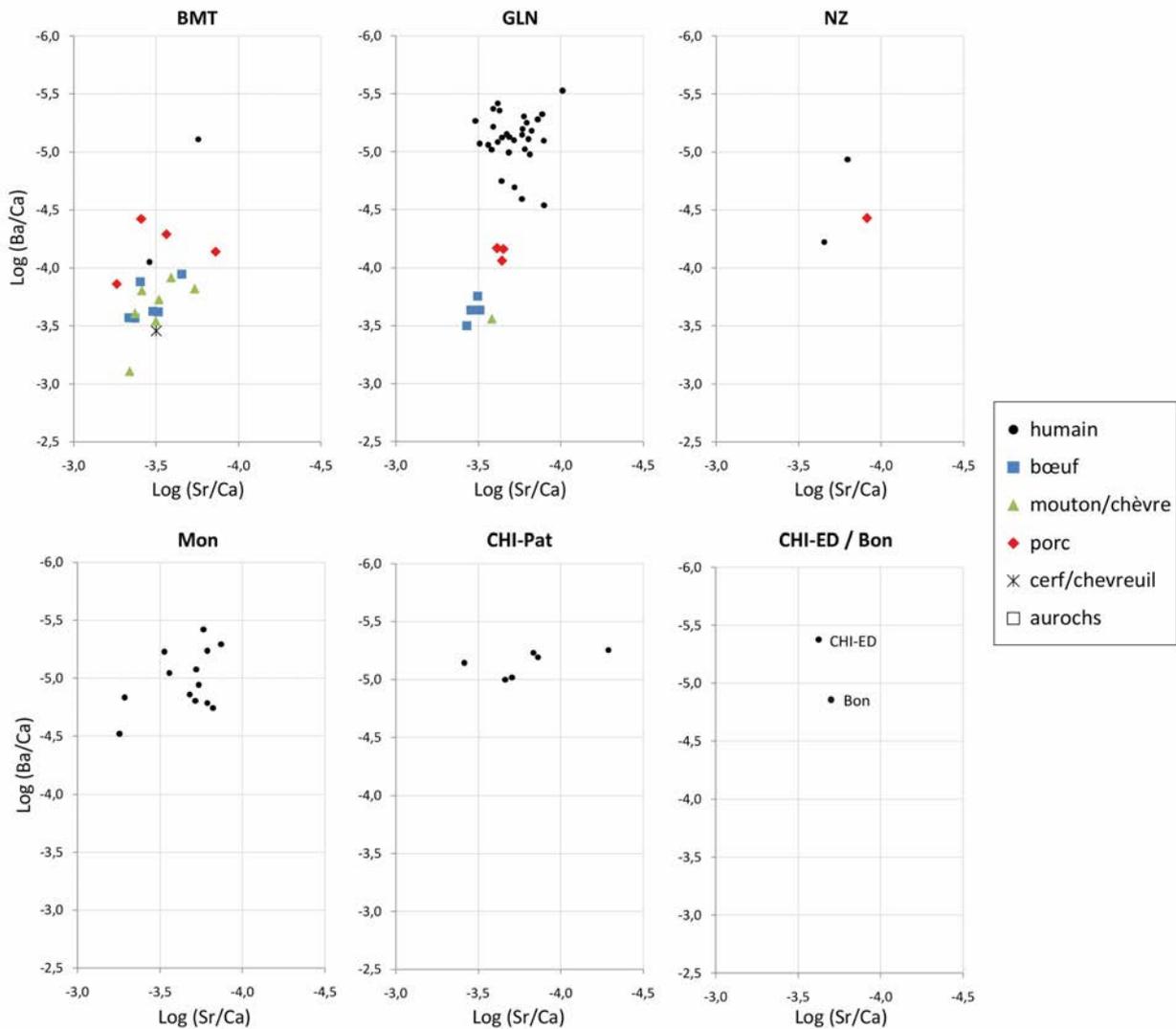


Figure C8. 17 : Distribution des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca de l'émail dentaire des humains et des animaux par site.

D'une part, la **très faible variabilité observée pour chaque espèce à GLN** témoigne de la grande homogénéité déjà mise en évidence pour ce site, à l'inverse de la plus grande variabilité observée à

BMT au sein de chaque groupe d'espèces, alors que le même découpage écologique est observé et les moyennes de chaque espèce sont similaires entre GLN et BMT (Tableau C8. 4, p.457).

D'autre part, la **position intermédiaire des cochons** entre les herbivores et les humains semble refléter un régime probablement constitué de plantes principalement (des herbacées mais aussi des glands et autres fruits d'arbres par exemple ; cf. *supra*) et peut-être de petits animaux. En comparaison des résultats de CSIA-AA qui semblent indiquer (quoiqu'à partir d'un échantillon seulement) un régime plutôt herbivore pour le(s ?) cochon(s ?), cette **division entre les cochons et les herbivores** souligne, si ce n'est le régime omnivore des cochons, qu'ils aient pu **consommer des végétaux différents** – ayant des signatures isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) et élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) distinctes. La question de l'affouragement des cochons avec des plantes fertilisées au fumier animal est discutée ci-après (cf. II.5.c). L'hypothèse d'une différence en Sr/Ca et Ba/Ca entre les ruminants et les non-ruminants doit également être prise en considération.

À GLN, les valeurs de Sr/Ca **des humains et des cochons** sont assez proches, alors que celles de Ba/Ca diffèrent en moyenne de presque une unité, en particulier si l'on exclue les quatre valeurs de Ba/Ca les plus basses du groupe humain qui présentent peut-être un régime particulier (allaitement ? ; cf. II.5.e). Ce résultat indique probablement un environnement similaire (les cochons pouvant être gardés à proximité des habitations alors que les herbivores pouvaient pâturer plus loin) et des ressources végétales partagées mais un niveau trophique différent : celui des humains étant nettement supérieur, bien qu'on ne connaisse pas l' $\text{OR}_{\text{email-alimentation}}$ .

La comparaison des **ratios Sr/Ba** entre les espèces, qui semble être un indicateur plus puissant du niveau trophique (Sponheimer et Lee-Thorp 2006 ; cf. Chap2.VI.3.c), confirme la corrélation linéaire observée graphiquement pour Sr/Ca et Ba/Ca et met en exergue la **différence entre les trois groupes** : humains, cochons et herbivores (Figure C8. 18). Ce résultat suggère que les trois groupes occupent des niveaux trophiques différents.

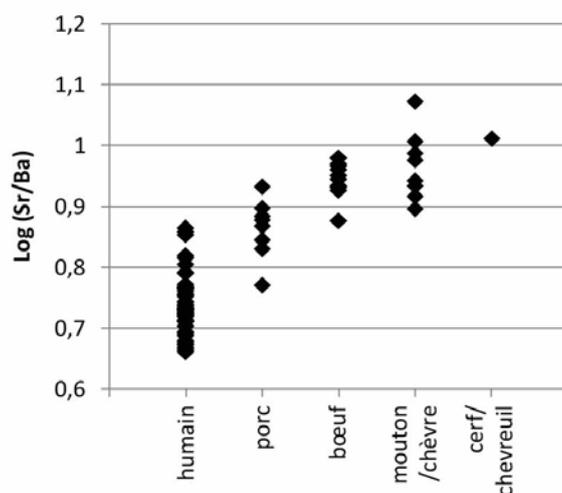


Figure C8. 18 : Représentation graphique du log(Sr/Ba) dans l'émail de chaque espèce, tous sites confondus.

L' $OR_{\text{email-alimentation}}$  n'étant pas connu et étant variable d'une dent à l'autre et d'une espèce à l'autre (cf. Chap2.VI.1.c), l'ordre de grandeur attendu pour les consommateurs de viande d'herbivore ne peut, en l'état actuel des connaissances, pas être déterminé (voir encadré). Il n'est donc **pas possible de connaître la position relative des humains et des cochons** par rapport à une gamme de valeurs attendue entre les herbivores et les carnivores et d'évaluer ainsi la part relative des plantes et de la viande dans leur alimentation respective, au-delà même de la complexité d'un système alimentaire mixte (pour les humains en particulier). En revanche, l'étude de la variabilité inter-individuelle ne requiert pas nécessairement de connaître les différentes sources alimentaires et permet d'accéder à un autre type d'informations (cf. II.5.e).

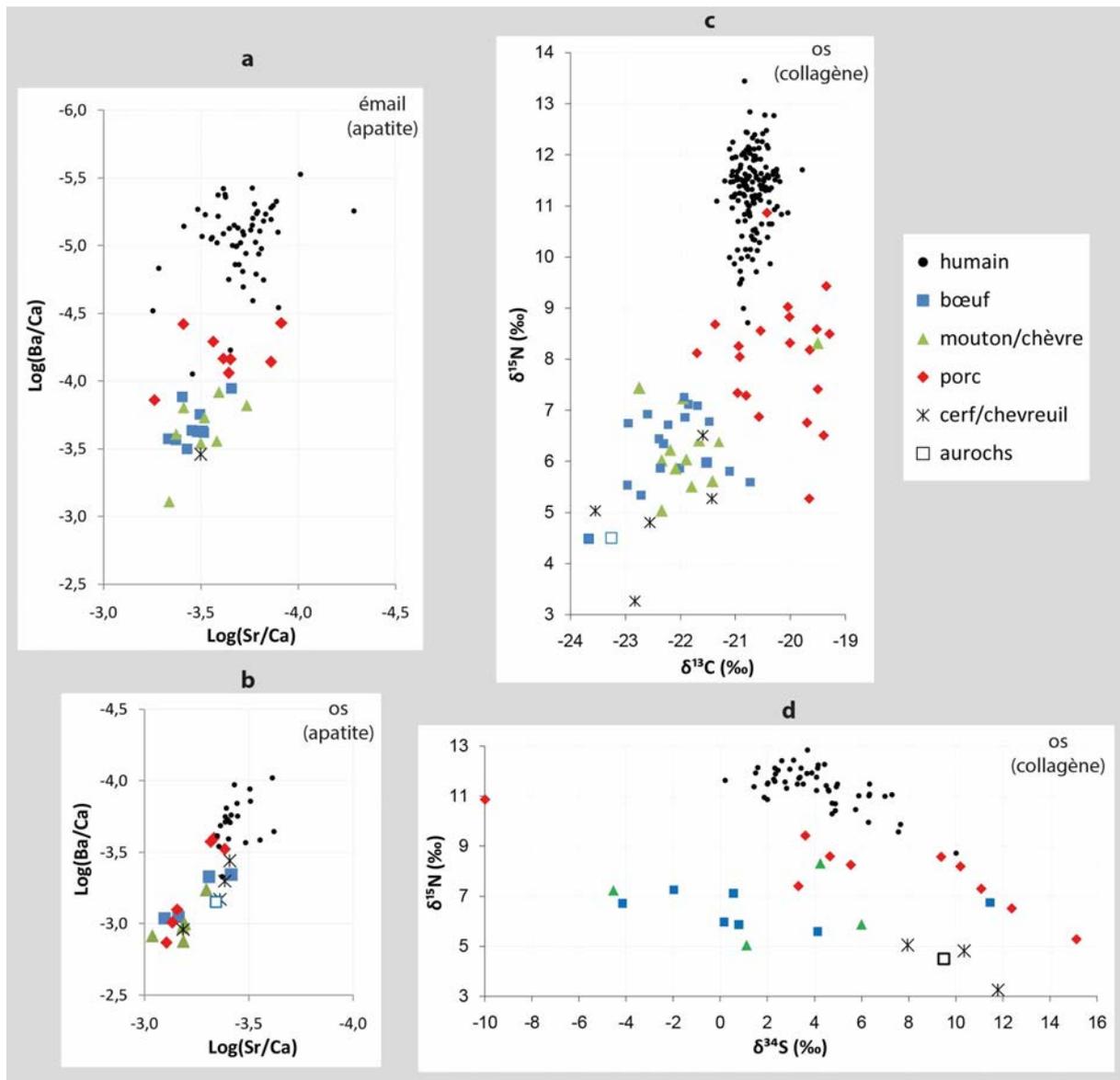


Figure C8.19 : Graphiques montrant la dispersion des ratios élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) des humains au regard des autres espèces dans l'apatite de l'émail dentaire (a) et dans l'apatite de l'os (b) et des ratios isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ) dans le collagène osseux (c, d).

Notamment, la **plus grande variabilité des humains** par rapport à la faune (en dépit des effectifs déséquilibrés) indique, comme pour l'os, une alimentation plus variée pour les humains que pour les cochons et les herbivores, à l'inverse de ce qui est observé pour les isotopes stables dans le collagène osseux (Figure C8. 19). Dans une chaîne trophique simple, les consommateurs présentent théoriquement une variabilité inférieure à celle de leur alimentation, moyennant le signal dans leurs tissus. Ce résultat souligne probablement la **part non négligeable des plantes**, de nature certainement **plus variée** que pour les animaux domestiques, dans le régime des humains en supplément des ressources carnées. Les végétaux, moins riches en protéines que la viande, sont souvent masqués dans le collagène par les ressources carnées, en particulier lorsque ces dernières constituent une importante proportion de l'alimentation. À l'inverse, les végétaux sont généralement plus riches en Ca et sont donc mieux représentés par la signature en Sr/Ca et Ba/Ca de l'organisme. L'analyse du  $\delta^{13}\text{C}$  de l'apatite de l'os, au regard de ces résultats, offrirait un point de comparaison intéressant pour discuter de cette question.

#### Un $\text{OR}_{\text{email-alimentation}}$ variable

À GLN, la différence mesurée entre les humains et les herbivores de notre corpus est largement supérieure à l' $\text{OR}_{\text{Ba}}$  proposé par M. Sponheimer et J.A. Lee-Thorp (2006) pour les carnivores (ce dernier correspond en réalité à l'écart observé entre l'email des consommateurs et celui des consommés). En effet, on a pour GLN :

$$\Delta \log(\text{Ba/Ca})_{\text{humains-herbivores}} = -5,1 - (-3,6) = -1,5$$

et M. Sponheimer et J.A. Lee-Thorp (2006) proposent :

$$\text{OR}_{\text{Ba carnivores}} = 0,26 \text{ soit } \log(\text{OR}_{\text{Ba}}) = -0,59.$$

Ainsi, à partir des herbivores de GLN et de cet  $\text{OR}_{\text{Ba}}$  estimé pour les carnivores d'Afrique du Sud, une estimation des valeurs des carnivores de GLN donnerait :

$$\text{Log}(\text{Ba/Ca})_{\text{carnivores}} = -3,6 + (-0,59) = -4,19.$$

La moyenne des valeurs de Ba/Ca des humains de GLN étant de -5,1, ces derniers occuperaient un niveau trophique supérieur à celui des carnivores, ce qui est peu probable à moins de considérer l'apport non négligeable d'autres ressources de niveau trophique supérieur (et/ou de produits laitiers, riches en Ca et pouvant avoir un impact significatif sur les ratios Sr/Ca et Ba/Ca ? ; cf. Lugli *et al*, 2017). L'explication la plus pertinente viendrait du fait que l' $\text{OR}_{\text{Ba}}$  considéré ne peut être transposé dans d'autres situations, faisant intervenir différentes espèces (dont l'humain) et différentes dents. En effet, il a été démontré que les valeurs de Ba/Ca et Sr/Ca sont très variables dans l'email selon la dent considérée et sa position (Peek et Clementz 2012a ; cf. Chap2.VI.1.c). Davantage d'analyses dans l'email de différentes dents et différentes espèces sont nécessaires pour établir la gamme de variation de l' $\text{OR}_{\text{email-alimentation}}$ .

La différence est moins flagrante pour l'OR<sub>Sr</sub> (soulignant la moindre discrimination du Sr) mais toujours visible :

$$\Delta \log(\text{Sr/Ca})_{\text{humains-herbivores}} = -3,7 - (-3,5) = -0,2 \text{ pour GLN et}$$

OR<sub>Sr carnivores</sub> = 0,53 soit  $\log(\text{OR}_{\text{Sr}}) = -0,28$  d'après M. Sponheimer et J.A. Lee-Thorp (2006).

### Un ordre de grandeur variable ?

En réalité, la variabilité de l'OR<sub>émail-alimentation</sub> mise en évidence ici serait due notamment à une légère différence d'ordre de grandeur des valeurs absolues ; les carnivores fossiles d'Afrique du Sud présentent un  $\log(\text{Ba/Ca})$  moyen de -3,8 et les herbivores un  $\log(\text{Ba/Ca})$  moyen de -3,6 pour les brouteurs à -3,2 pour les pâtureurs (Sponheimer et Lee-Thorp 2006 ; cf Chap2.VI.3.c) alors que les herbivores de l'Yonne présentent un  $\log(\text{Ba/Ca})$  moyen de l'ordre de -3,6.

Pour comparaison, d'autres échantillons herbivores fossiles d'Afrique du Sud présentent un  $\log(\text{Ba/Ca})$  moyen similaire aux autres échantillons de cette région, entre -3,5 et -3,3 pour les brouteurs et les pâtureurs respectivement (Balter *et al.* 2012). Les premiers humains (Early Homo) du même site présentent un  $\log(\text{Ba/Ca})$  compris entre -4,1 et -3,7.

En revanche, des échantillons d'émail humain moderne se rapprochent des valeurs enregistrées ici avec un  $\log(\text{Ba/Ca})$  autour de -5 (Tacail *et al.* 2017). Hormis pour cette dernière étude, les précédents résultats utilisés pour comparaison n'ont pas porté essentiellement sur des mesures réalisées le long de la jonction émail-dentine et peuvent inclure des parties d'émail moins bien conservées ayant pu altérer en partie les résultats. D'autre part, ces études portent sur différentes dents, ce qui peut participer à expliquer la variabilité des valeurs.

NB : selon les publications, les valeurs logarithmiques sont calculées à partir des ratios\*10<sup>3</sup> ou des ratios unitaires indifféremment, ne permettant pas toujours de comparaisons directes.

- *Sur la différence entre l'os et l'émail*

Nos résultats confirment que les valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca ne sont pas comparables entre l'os et l'émail. On ne peut donc pas comparer directement les signaux biologiques entre ces deux tissus à la recherche de modifications alimentaires ou de mobilité entre l'enfance et l'âge adulte. En revanche, la comparaison entre plusieurs dents ou encore l'analyse intra-profil de l'émail dentaire permettent de tracer des modifications au cours d'une période de vie durant l'enfance (cf. II.6).

### **II.5.c. De l'alimentation des cochons et de la fertilisation des plantes**

La question de la **consommation de plantes fertilisées au fumier animal** a été soulevée par l'analyse du  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  du collagène osseux. Il a été suggéré que les cochons puissent être de même niveau trophique que les herbivores mais nourris à partir de céréales fertilisées, faisant augmenter leur  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$

et  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  (cf. Chap7.I). Si l'idée est séduisante ici pour expliquer la différence de signature en Sr/Ca et Ba/Ca entre cochons et herbivores (partant de l'hypothèse qu'ils occupent un même niveau trophique), il est difficile de la vérifier. **Les excréments étant enrichis en Sr et Ba** par rapport à l'organisme, ils présentent des ratios Sr/Ca et Ba/Ca supérieurs à ceux des muscles, des os et à plus forte raison de l'émail dentaire (Figure C8. 20). Cependant, si malgré cet enrichissement ils présentent des ratios inférieurs à ceux des plantes, comme ce peut être le cas pour des excréments de martre (petit mammifère carnivore) dans l'exemple de la Figure C8. 20, ces mêmes plantes fertilisées avec cet engrais organique pourraient voir leur signature en Sr/Ca et Ba/Ca diminuée (et donc augmenter dans la chaîne trophique). La consommation de ces plantes fertilisées induirait selon cette hypothèse une diminution de Sr/Ca et Ba/Ca dans les tissus du consommateur et donc une augmentation dans la chaîne trophique. Dans le cas contraire (fertilisation par des excréments de Sr/Ca et Ba/Ca supérieurs aux valeurs de plantes), la signature des plantes pourrait augmenter (baisser dans la chaîne trophique).

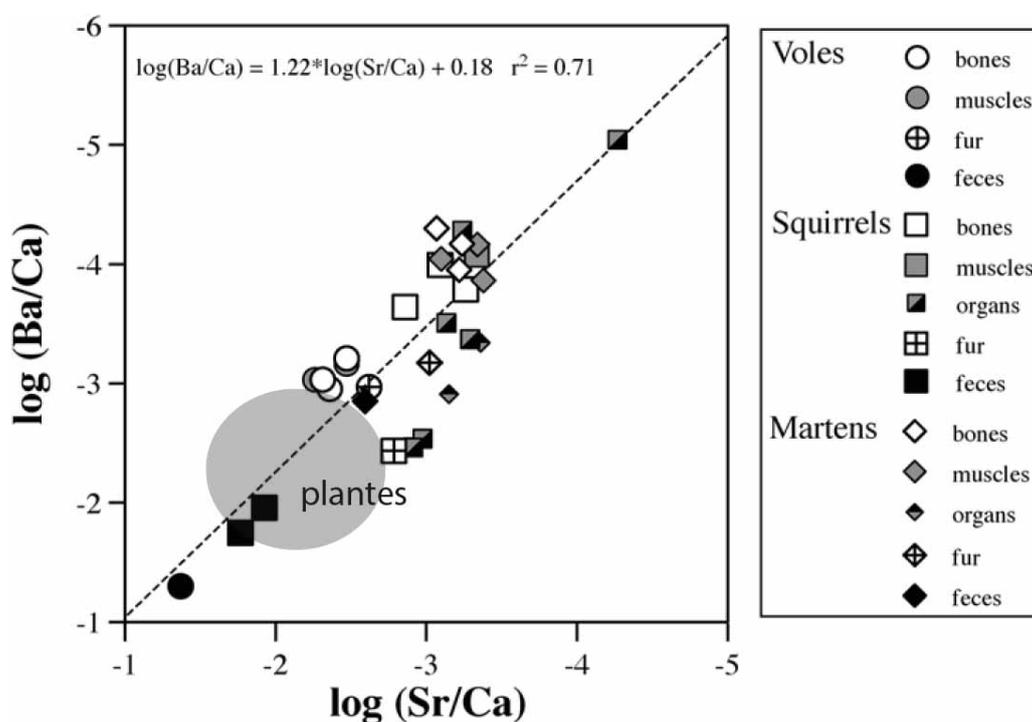


Figure C8. 20 : Distribution des valeurs de sr/Ca et Ba/Ca de différents tissus de mammifères, dont les excréments, enrichis en Sr et Ba en raison de leur élimination préférentielle, au regard de la gamme de valeurs des plantes de différents écosystèmes, d'après les données d'Elias *et al*, 1982, Burton *et al*, 1999 et Gilbert *et al*, 1994. Modifié d'après Balter 2004.

L'écart entre les ratios Sr/Ca et Ba/Ca des os et muscles, d'une part, et des **féces**, d'autre part, semble **varier d'une espèce à l'autre**. La Figure C8. 20 montre des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca similaires pour l'os et les muscles des martres et des écureuils alors que leurs féces présentent des signatures différentes de près d'une unité pour le Ba/Ca et le Sr/Ca. L'analyse de féces de bovins et caprinés en comparaison de l'analyse de l'os et de leur émail dentaire, de même que la mesure directe de plantes fertilisées ou non au fumier organique, offrirait sans doute des éléments de réponse à cette question soulevant un intérêt tout particulier dans le cadre de l'étude des pratiques agricoles au Néolithique. En

l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible, sur la base de ces résultats (Sr/Ca et Ba/Ca), d'étayer l'hypothèse de la fertilisation des cultures pour l'alimentation des cochons ou des humains.

Comme nous l'avons déjà souligné, le principe métabolique sur lequel repose la différence entre herbivores **ruminants et non-ruminants** mise en évidence chez des mammifères paléolithiques (Balter *et al.* 2002), s'il doit encore être démontré dans d'autres contextes, pourrait également participer de la différence entre cochons et herbivores et masquer une alimentation végétale des cochons (nourris avec des céréales fertilisées ?). L'analyse d'échantillons de cochons et herbivores présentant un  $\delta^{15}\text{N}$  similaire dans leur collagène osseux par exemple – suggérant une alimentation essentiellement végétale des cochons comme cela a été rapporté à plusieurs reprises pour le Néolithique français (e.g. Goude et Herrscher 2018 ; Goude *et al.* 2020b ; Goude *et al.* 2013 ; Le Bras-Goude *et al.* 2010) – permettrait de vérifier cette hypothèse.

### II.5.d. Des chèvres ou des moutons ?

Pour l'ensemble des échantillons, dans l'os comme dans l'email, les valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca des **caprinés** sont **indistinctes de celles des bovinés** (cf. Figure C8. 16, p.459 et Figure C8. 17, p.463). Si la différence mise en évidence en Afrique du Sud entre les « brouteurs » et les « pâtureurs » (Balter *et al.* 2012 ; Sponheimer et Lee-Thorp 2006 ; cf. Chap2.VI.3.c) venait à être confirmée dans un plus grand nombre d'échantillons modernes et actuels de différents contextes environnementaux, ce résultat pourrait indiquer que les caprinés de GLN et de BMT seraient des pâtureurs comme les bovinés, et donc **des moutons plutôt que des chèvres**. Cette question sera brièvement ré-abordée à travers l'observation des variations intra-profil (cf. II.6.a).

### II.5.e. Variabilité inter-individuelle chez les humains

Une synthèse des résultats est donnée dans le Tableau C8. 5 pour les humains, par site et par âge et sexe.

Alors que les valeurs Sr/Ca et Ba/Ca des humains sont globalement **similaires entre tous les sites pour l'email** (cf. Figure C8. 17, p.463), **celles de l'os varient** légèrement (cf. Figure C8. 15, p.458). Les trois sites ayant livré le plus de spécimens humains sont présentés sur la Figure C8. 21, en fonction du sexe des sujets, pour l'os et l'email.

La **variabilité observée dans l'os entre les sites** rappelle celle qui fut mise en évidence par les isotopes stables, en particulier le  $\delta^{15}\text{N}$ , indiquant notamment un niveau trophique sensiblement plus élevé à GLN. En revanche, on ne note **aucune différence significative en fonction du sexe** ( $p > 0,05$  d'après le test U de Mann-Whitney), à l'inverse de ce qui a été observé pour les isotopes stable C, N et S (cf. Chap5.I). Si les quelques échantillons de Mon et CHI-Pat semblent présenter des valeurs diffé-

site	âge et sexe	émail								os									
		N	log Sr/Ca				log Ba/Ca				N	log Sr/Ca				log Ba/Ca			
			min	moy	SD	max	min	moy	SD	max		min	moy	SD	max	min	moy	SD	max
GLN (37)	M	15	-4.0	<b>-3.7</b>	0.1	-3.6	-5.5	<b>-5.1</b>	0.2	-4.6	6	-3.6	<b>-3.4</b>	0.1	-3.4	-4.0	<b>-3.8</b>	0.1	-3.7
	F	9	-3.9	<b>-3.8</b>	0.1	-3.6	-5.4	<b>-5.0</b>	0.3	-4.5	4	-3.5	<b>-3.4</b>	0.1	-3.4	-4.0	<b>-3.8</b>	0.1	-3.6
	I	5	-3.8	<b>-3.6</b>	0.1	-3.5	-5.4	<b>-5.2</b>	0.1	-5.1	1	-3.4	<b>-3.4</b>		-3.4	-3.7	<b>-3.7</b>		-3.7
	TOT adulte	29	-4.0	<b>-3.7</b>	0.1	-3.5	-5.5	<b>-5.1</b>	0.2	-4.5	11	-3.6	<b>-3.4</b>	0.1	-3.4	-4.0	<b>-3.8</b>	0.1	-3.6
	5-14	2	-3.6	<b>-3.5</b>	0.1	-3.5	-5.2	<b>-5.1</b>	0.1	-5.1	1	-3.4	<b>-3.4</b>		-3.4	-3.7	<b>-3.7</b>		-3.7
	TOT humain	31	-4.0	<b>-3.7</b>	0.1	-3.5	-5.5	<b>-5.1</b>	0.2	-4.5	12	-3.6	<b>-3.4</b>	0.1	-3.4	-4.0	<b>-3.8</b>	0.1	-3.6
Mon (13)	M	7	-3.9	<b>-3.7</b>	0.1	-3.5	-5.3	<b>-4.9</b>	0.3	-4.2	0	-3.6	<b>-3.6</b>	0.0	-3.6	-3.6	<b>-3.6</b>	0.0	-3.6
	F	6	-3.8	<b>-3.6</b>	0.3	-3.3	-5.4	<b>-4.9</b>	0.3	-4.5	2	-3.4	<b>-3.4</b>	0.0	-3.4	-3.8	<b>-3.7</b>	0.0	-3.7
	TOT humain	13	-3.9	<b>-3.7</b>	0.2	-3.3	-5.4	<b>-5.0</b>	0.3	-4.5	2	-3.4	<b>-3.4</b>	0.0	-3.4	-3.8	<b>-3.7</b>	0.0	-3.7
CHI-Pat (6)	M	2	-3.7	<b>-3.6</b>	0.2	-3.4	-5.1	<b>-5.1</b>	0.1	-5.0	2	-3.5	<b>-3.4</b>	0.1	-3.4	-3.6	<b>-3.6</b>	0.0	-3.6
	F	2	-3.8	<b>-3.7</b>	0.1	-3.7	-5.2	<b>-5.1</b>	0.2	-5.0	1	-3.4	<b>-3.4</b>		-3.4	-3.3	<b>-3.3</b>		-3.3
	I	2	-4.3	<b>-4.1</b>	0.3	-3.9	-5.3	<b>-5.2</b>	0.0	-5.2	0								
	TOT humain	6	-4.3	<b>-3.8</b>	0.3	-3.4	-5.3	<b>-5.1</b>	0.1	-5.0	3	-3.5	<b>-3.4</b>	0.1	-3.4	-3.6	<b>-3.5</b>	0.1	-3.3
BMT (2)	indet	2	-3.8	<b>-3.6</b>	0.2	-3.5	-5.1	<b>-4.6</b>	0.8	-4.0	0								
	TOT humain	2	-3.8	<b>-3.6</b>	0.2	-3.5	-5.1	<b>-4.6</b>	0.8	-4.0	0								
CHI-ED (1)	indet	1	-3.6	<b>-3.6</b>		-3.6	-5.4	<b>-5.4</b>		-5.4	1	-3.4	<b>-3.4</b>		-3.4	-3.5	<b>-3.5</b>		-3.5
	TOT humain	1	-3.6	<b>-3.6</b>		-3.6	-5.4	<b>-5.4</b>		-5.4	1	-3.4	<b>-3.4</b>		-3.4	-3.5	<b>-3.5</b>		-3.5
Bon (1)	indet	1	-3.7	<b>-3.7</b>		-3.7	-4.9	<b>-4.9</b>		-4.9	0								
	TOT humain	1	-3.7	<b>-3.7</b>		-3.7	-4.9	<b>-4.9</b>		-4.9	0								
NZ (2)	adulte M	2	-3.8	<b>-3.7</b>	0.1	-3.7	-4.9	<b>-4.6</b>	0.5	-4.2	2	-3.6	<b>-3.6</b>	0.0	-3.6	-3.6	<b>-3.6</b>	0.0	-3.6
	TOT humain	2	-3.8	<b>-3.7</b>	0.1	-3.7	-4.9	<b>-4.6</b>	0.5	-4.2	2	-3.6	<b>-3.6</b>	0.0	-3.6	-3.6	<b>-3.6</b>	0.0	-3.6

Tableau C8. 5 : Synthèse des résultats élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) moyens des humains par site et par catégorie d'âge et de sexe. SD : écart-types, M : sexe masculin, F : sexe féminin, I : sexe indéterminé, indet : âge et sexe indéterminés, TOT = total. Les chiffres entre parenthèses indiquent l'effectif total d'individus analysés pour chaque site.

rentes entre les sexes (Figure C8. 21), les effectifs sont déséquilibrés et trop faibles pour conclure. Ce résultat, tout du moins à GLN, indique que la différence entre les sexes fait intervenir  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  mais probablement pas Sr/Ca ni Ba/Ca. Alors que la division entre les espèces a été observée pour Sr/Ca et Ba/Ca comme pour les isotopes stables, il est possible que la division sexuelle de l'alimentation ne concerne qu'un **aspect des pratiques** (modes de préparations, choix des morceaux et parties de végétaux) plutôt qu'une distinction entre le type de ressources consommées (différence de consommation relative du bœuf ou du porc selon le sexe par exemple). Une **consommation différente en végétaux**, non quantifiable ni qualifiable ici, pourrait sans doute impacter différemment les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  et non celles de Sr/Ca et Ba/Ca. En outre, une **différence de mobilité** pourrait également marquer sensiblement les ratios isotopiques sans influencer les ratios élémentaires. Enfin, l'influence éventuelle de la **diagénèse** ayant pu estomper la différence sexuelle (déjà relativement faible) est aussi à prendre en compte. Néanmoins, il est à noter que l'individu **GLN 221B** se démarque une fois encore par des valeurs extrêmes de Sr/Ca et Ba/Ca lui conférant le plus haut niveau trophique de tous les humains de ce site, peut-être en lien à un statut social particulier (cet individu occupant une position centrale dans la nécropole et une tombe de très grande taille). Ce résultat rejoint ce qui avait été observé pour le  $\delta^{15}\text{N}$  du collagène osseux (cf. Chap5.I) et tend à exclure l'hypothèse d'une altération des résultats qui aurait totalement gommé les différences sexuelles.

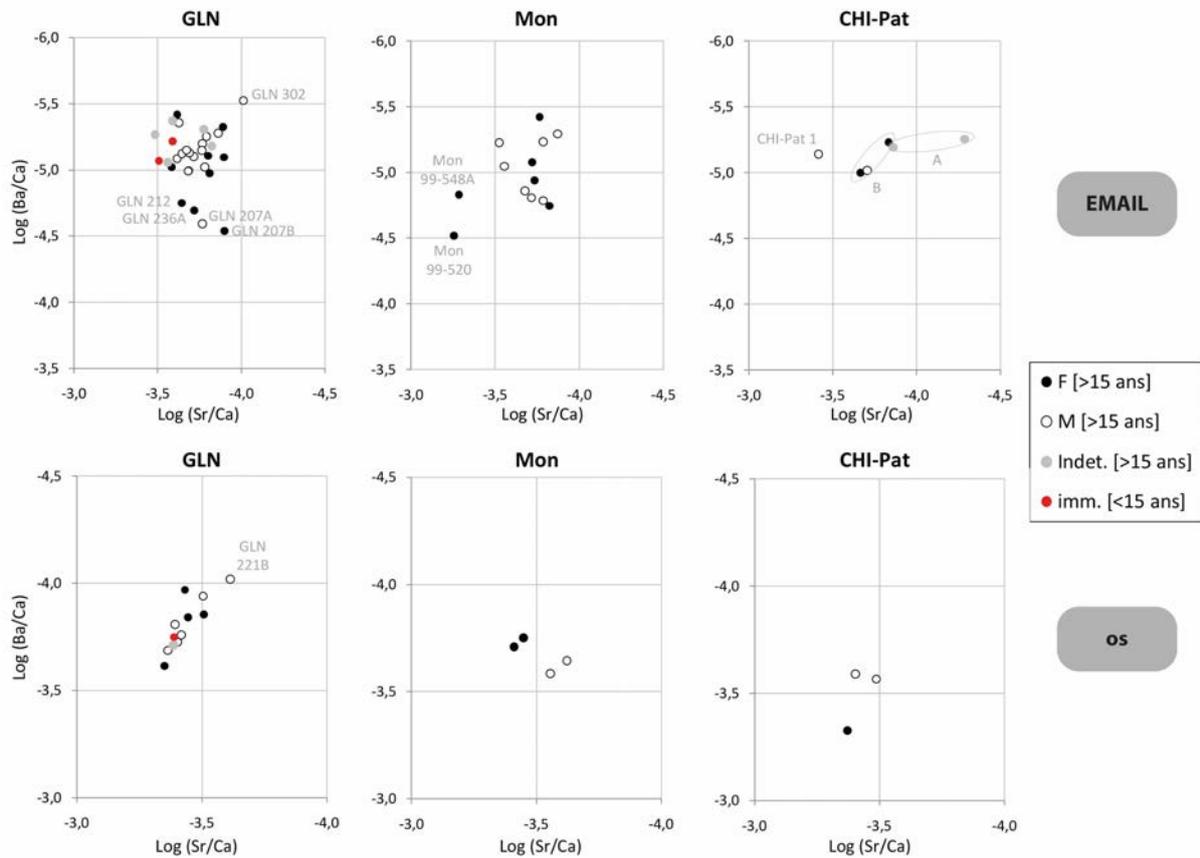


Figure C8. 21 : Distribution des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca de l'émail dentaire des humains par site et par sexe.

Dans l'émail, la signature en Sr/Ca et Ba/Ca des humains de **tous les sites** semble **plus homogène** (cf. Figure C8. 17, p.463 ; la différence entre les sites n'est pas statistiquement significative d'après le test ANOVA de Kruskal-Wallis,  $p > 0,05$ ). Ce résultat suggère que les enfants de tous ces sites, avant 8 ans, avaient une alimentation globalement similaire, qui, si les valeurs de l'os sont inaltérées, pouvait varier ensuite avec l'âge en fonction du site ; probablement à partir de 8-9 ans ou après 14 ans comme cela a été montré précédemment (cf. Chap6.I). Si en revanche la différence entre les sites dans l'os est due à des altérations diagénétiques, les résultats de l'émail indiquent seulement que les ratios Sr/Ca et Ba/Ca ne sont pas impactés par les mêmes facteurs qui font varier le  $\delta^{15}\text{N}$  (et le  $\delta^{34}\text{S}$ ) du collagène osseux entre les sites.

Au sein de chaque site, les ratios **Sr/Ca et Ba/Ca ne varient pas en fonction du sexe** (Figure C8. 21 ;  $p > 0,005$  d'après le test U de Mann-Whitney), mais ce schéma ne semble pas lié à l'âge, comme le même résultat est observé dans l'os (si toutefois les valeurs de l'os s'avéraient empruntées d'altérations diagénétiques qui lisseraient les différences, les résultats de l'émail indiqueraient que la différence en Sr/Ca et Ba/Ca entre les sexes adviendrait après 8-9 ans, comme pour les ratios isotopiques – cf. Chap6.I – et ne serait donc pas visible ici). En revanche, certains individus se distinguent de la masse.

À **GLN**, **quatre sujets** (3 femmes et un homme, morts après 20 ans) présentent des valeurs de **Ba/Ca nettement supérieures** à la moyenne et se détachent du reste du groupe (Figure C8. 21, panneau en

haut à gauche). Parmi eux se trouvent les deux individus pour lesquels la **première molaire permanente** (M1) a été exceptionnellement échantillonnée (GLN 207A et GLN 207B) reflétant un signal enregistré pendant la période comprise entre 0,5 et 3,5 ( $\pm 0,5$ ) ans, à la différence des autres échantillons. Au cours de cette période, ces individus pouvaient être encore **allaités**, induisant une augmentation du Ba/Ca (cf. Chap2.VI.1.e ; voir l'interprétation intra-profil ci-après II.6.d). Pour les **deux autres sujets** (212 et 236A), dont la deuxième molaire (M2) a été échantillonnée comme le reste des humains, il est possible qu'un **allaitement tardif** ait eu lieu, ou qu'ils aient consommé une **plus grande quantité de lait** que leurs homologues au même âge. Au Néolithique, le sevrage est attendu autour de 2-3 ans mais peut être retardé pour différentes raisons, en cas de disette ou de maladie notamment (Ash *et al.* 2016 ; Goude *et al.* 2020a). Il est également possible que ces sujets aient eu une alimentation plus végétarienne que les autres sujets du même site au même âge. Les variations intra-profils de ces échantillons peuvent permettre de se prononcer grâce à l'identification d'un signal de sevrage (diminution du Ba/Ca ; cf. II.6.d). Pour les quatre sujets, l'anti-corrélation entre Sr/Ca et Ba/Ca semble soutenir l'hypothèse de la lactation, peut-être en quantités relatives : les plus hautes moyennes de Ba/Ca (et les plus basses de Sr/Ca) pourraient correspondre à une consommation de lait plus importante (cf. Chap2.VI.1.e). Aucune valeur dans l'os n'est disponible pour ces quatre individus-là, mais il serait intéressant de vérifier si celles-ci s'intégreraient dans la moyenne globale correspondant au régime « adulte » moyen.

NB : Le ratio isotopique (C, N, S) de la dentine de ces individus n'a pas non plus été analysé ; sauf GLN 212, qui présente des valeurs isotopiques dans la moyenne des autres sujets.

Par ailleurs, l'individu **GLN 302** (un homme décédé après 50 ans) présente la moyenne **la plus faible de Sr/Ca et Ba/Ca**, suggérant un régime particulier, de plus haut niveau trophique que les autres, entre 2,5 et 8,5 ( $\pm 0,5$ ) ans. Aucune valeur isotopique n'est disponible pour la dentine de cet individu mais le  $\delta^{34}\text{S}$  de son **collagène osseux** présente la valeur **la plus basse** de l'ensemble du corpus : ces spécificités seraient-elles le fait d'un statut social particulier ? Aucun autre argument (biochimique ou archéologique) à la faveur de cette hypothèse n'a été relevé. Elles pourraient être seulement le fait de spécificités alimentaires ou de mobilité propres à cet homme, peut-être uniquement au début et à la fin de sa vie.

NB : L'identification d'individus atypiques (*outliers*) à partir d'une caractéristique seule ne permet pas de discuter d'un statut spécifique ; c'est la combinaison de valeurs extrêmes de plusieurs indicateurs au regard des paramètres bioarchéologiques qui le permet.

À **Mon**, les deux individus **99-548A et 99-520** (ce dernier en particulier) se distinguent du reste du groupe (Figure C8. 21, en haut au milieu). Malheureusement, peu d'analyses ont été conduites sur ces individus et aucun autre indicateur mesuré ne met en évidence de spécificité (cf. Annexe A34 et Annexe C). Ces deux individus sont des femmes appartenant au groupe A de Mon. Il est possible

qu'elles aient eu une alimentation différente du reste du groupe avant leurs 8-9 ans, voire qu'elles viennent d'ailleurs comme cela a été suggéré par des valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  nettement distinctes des autres pour Mon 99-520 (cf. I). Pour ce site, on observe une légère **différence entre les groupes**, en particulier une grande homogénéité du groupe C (Figure C8. 22), rappelant les résultats obtenus pour les isotopes stables CNS (cf. Chap5.I). L'ensemble des résultats de ce site sera discuté dans la section Chap10.II.

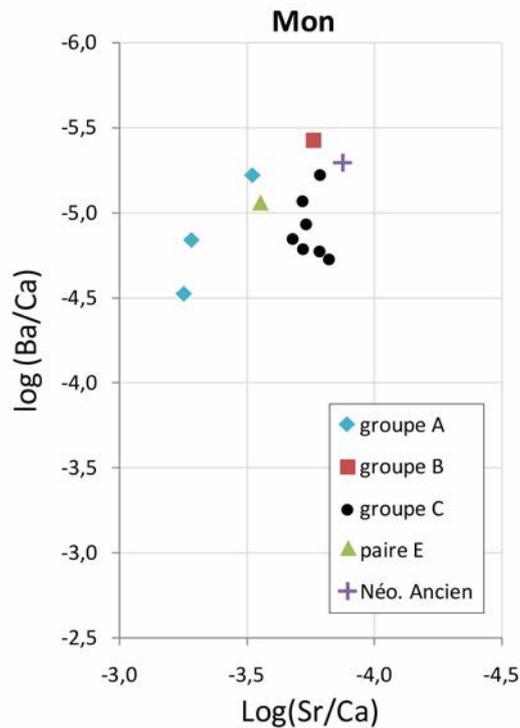


Figure C8. 22 : Distribution des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca de l'émail dentaire des humains de Monéteau « Macherin » en fonction des groupes archéologiques.

Enfin, s'il est difficile d'identifier de réelles valeurs atypiques à **CHI-Pat** en raison du faible effectif, il est notable que la variabilité en Sr/Ca est supérieure à la variabilité en Ba/Ca (et supérieure à celle des autres sites, relativement aux effectif totaux). De même que pour les rapports isotopiques  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  du collagène osseux (cf. Chap5.I), on observe une sensible différence entre les groupes A et B, et avec l'individu 1 isolé (Figure C8. 21, en haut à droite). Ce résultat sera discuté plus en détail dans la section Chap10.III au regard des autres paramètres.

Lorsque l'on considère l'ensemble des sites, les sujets atypiques repérés et discutés ci-avant ressortent clairement (Figure C8. 23). De plus, d'autres individus s'écartent de la moyenne. Les sujets **BMT H14** et **NZ H239** présentent les moyennes de Ba/Ca les plus élevées de tout le corpus, pouvant refléter un **régime végétarien** ou un **signal d'allaitement**. En particulier, l'identification de la molaire de BMT H14 n'est pas certaine : s'il s'agit probablement d'une M2, il est aussi possible que ce soit une M1, auquel cas, un signal d'allaitement d'autant plus fort pourrait expliquer le Ba/Ca élevé (la diminution de Sr/Ca due à l'allaitement semble moins clair mais n'exclut pas cette possibilité ; cf. Chap2.VI.1.e).

L'observation des courbes de ces profils permettra peut-être de trancher (cf. II.6). D'autre part, l'individu **CHI-Pat 9** présente le plus faible Sr/Ca moyen, nettement distinct du reste du corpus. Ce résultat pourrait indiquer une origine distincte de cet individu, ou un régime particulier, mais aucun autre argument en faveur de cette hypothèse ne permet de l'étayer. Sa dentine n'a pas été analysée (pour les isotopes stables) et les valeurs isotopiques dans l'os sont dans la moyenne des humains de ce site, lequel sera discuté plus en détail dans la section Chap10.III au regard de l'ensemble des données disponibles.

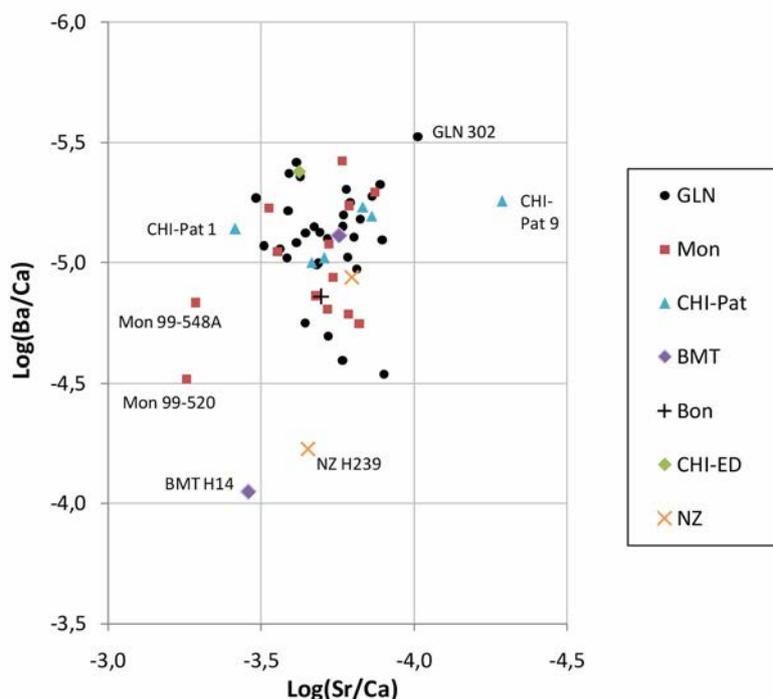


Figure C8. 23 : Distribution des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca de l'émail dentaire des humains de tous les sites mettant en évidence les individus « atypiques ».

- Comparaison entre les ratios isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) et élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) de la dentine et de l'émail

Pour l'ensemble des humains dont les **ratios isotopiques** ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) ont été mesurés dans la **dentine** (cf. Chap6.I), il apparaît que ces ratios ne sont **pas corrélés** avec les **ratios élémentaires** (Sr/Ca et Ba/Ca) mesurés dans **l'émail** des mêmes couronnes dentaires (correspondant au même signal chronologique ;  $p > 0,05$  d'après le test de corrélation de Spearman ; Tableau C8. 6). Quelques croisements les plus pertinents sont illustrés sur la Figure C8. 24 :  $\delta^{15}\text{N}$  - Ba/Ca -  $\delta^{34}\text{S}$  pour leur intérêt trophique et  $\delta^{13}\text{C}$  - Sr/Ca -  $\delta^{34}\text{S}$  pour leur intérêt environnemental. Ainsi, les éventuelles différences inter-individuelles mises en évidence à travers l'analyse des indicateurs élémentaires de l'émail ne concernent apparemment pas les mêmes aspects de l'alimentation que celles mises en évidence par les indicateurs isotopiques dans la dentine, du moins pour ce qui concerne les individus pour lesquels les deux tissus ont été analysés. Ce résultat indique, d'autre part, une certaine homogénéité globale des pratiques alimentaires des sujets avant l'âge de 9 ans.

Coeff. de corrélations de rangs de Spearman  
 Corrélations significatifs marquées à  $p < 0.05$

Variable	$\delta^{13}\text{C}$ col dentine	$\delta^{15}\text{N}$ col dentine	$\delta^{34}\text{S}$ col dentine	moy (log Sr/Ca) émail	moy (log Ba/Ca) émail
$\delta^{13}\text{C}$ col dentine	1.0000	<b>0.6446</b>	-0.0117	-0.4737	0.0831
$\delta^{15}\text{N}$ col dentine	<b>0.6446</b>	1.0000	0.1232	-0.1728	0.0618
$\delta^{34}\text{S}$ col dentine	-0.0117	0.1232	1.0000	0.1371	0.1828
moy (log Sr/Ca) émail	-0.4737	-0.1728	0.1371	1.0000	<b>0.5377</b>
moy (log Ba/Ca) émail	0.0831	0.0618	0.1828	<b>0.5377</b>	1.0000

Tableau C8. 6 : Matrice de corrélation de Spearman montrant que les valeurs isotopiques du C, N et S de la dentine et les ratios élémentaires Sr/Ca et Ba/Ca de l'émail ne sont pas corrélés entre eux. Les corrélations significatives ( $p < 0,05$  en rouge) concernent  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  entre eux d'une part et Sr/Ca et Ba/Ca entre eux d'autre part.

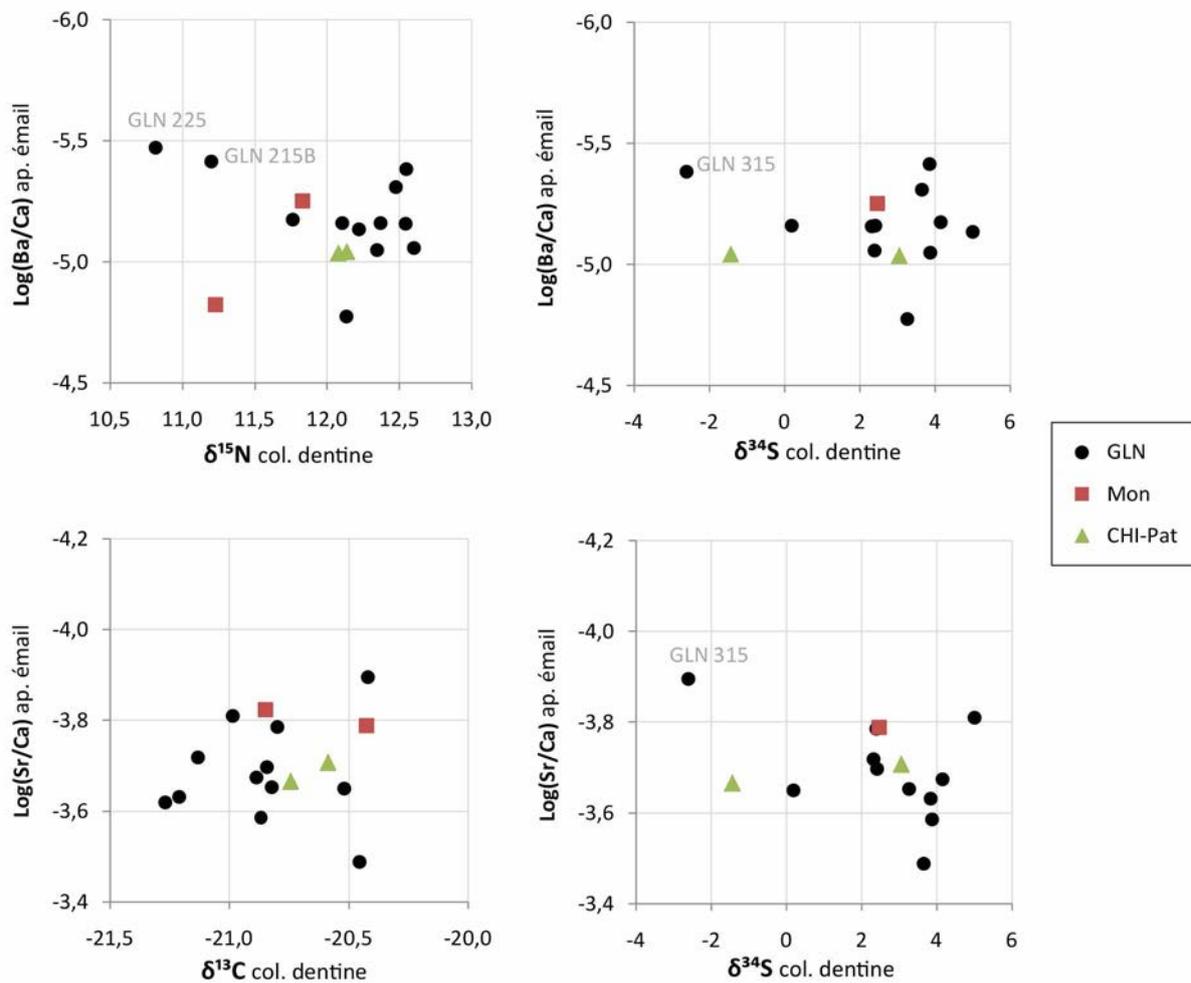


Figure C8. 24 : Distribution des ratios élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) de l'apatite de l'émail au regard des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ) du collagène dentinaire montrant que ces indicateurs ne sont pas corrélés entre eux.

Cependant, il apparaît que les deux individus présentant les plus faibles  $\delta^{15}\text{N}$  dentinaires présentent également les plus faibles Ba/Ca dans l'émail (GLN 225 et GLN 215B, en haut à gauche de la figure). Néanmoins, leur moyenne de Ba/Ca, rapportée à la variabilité globale du groupe, ne se détache pas des autres valeurs et ces individus ne sont pas significativement différents du reste du groupe, pour

Ba/Ca<sub>émail</sub> ( $p > 0,05$  d'après le test U de Mann-Whitney) ; ils le sont en revanche pour  $\delta^{15}\text{N}_{\text{dentine}}$  ( $p < 0,05$  d'après le test U de Mann-Whitney). Les valeurs plus basses de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{dentine}}$  pourraient être dues à des causes physiologiques liées à la croissance de ces enfants, n'entraînant pas nécessairement de modification du Ba/Ca, qui serait également faible pour d'autres raisons (cf. Chap6.I).

Les autres sujets, ensemble, présentent en moyenne un Ba/Ca et un  $\delta^{15}\text{N}$  plus élevés. Ce résultat témoigne-t-il d'une plus grande consommation de lait maternel, chez des enfants âgés de 2,5 à 8,5 ans ? Comprend-il un signal d'allaitement suffisamment long pour impacter les moyennes sur l'ensemble de la couronne ? Comme énoncé précédemment, les individus GLN 215B et GLN 225 semblent exclus de ce schéma. Pour le sujet GLN 215B, l'échantillonnage pour l'analyse du  $\delta^{15}\text{N}$  du collagène a été effectué exceptionnellement dans la racine dentaire et correspond à une période plus tardive de sa vie (de 8,5 à 12 ans environ) mais l'analyse de l'émail concerne bien la couronne et donc la période précédente. Cela ne semble pas être la raison pouvant expliquer les différences observées. D'autre part, l'individu GLN 315 (une femme) se démarque du reste du groupe par sa combinaison de valeurs de Sr/Ca et  $\delta^{34}\text{S}$ , ce qui pourrait indiquer une origine différente. Quoiqu'il en soit, nous l'avons dit, si ces sujets semblent se démarquer, il n'existe aucune corrélation significative entre les éléments trace et les ratios isotopiques du collagène dentaire et ces propositions sont à considérer avec prudence.

### II.6. Variabilité intra-individuelle : quelles perspectives ?

L'observation des courbes de chaque profil individuel ne montre **aucun schéma récurrent**. Néanmoins, plusieurs observations ont relevé notre attention. Le Tableau C8. 7 rappelle les dents analysées pour chaque échantillon et les âges relatifs à la période de formation de l'émail (cf. Chap2.III.4.b).

Tout d'abord, on observe **plus de variabilité** dans les dents **d'humains et de cochons** que chez les **herbivores**, qui présentent des **profils plus « plats »**, plus constants (Figure C8. 25). Cela suggère une alimentation plus variable au cours du temps – et sur des temps plus courts – pour les cochons et les humains, peut être en fonction des saisons lorsqu'une rythmicité de type cyclique peut être observée. Néanmoins, chez les **herbivores**, des différences sont parfois visibles entre plusieurs profils d'une même dent, pouvant refléter un **signal d'allaitement** ou de **mobilité** au cours de la période de formation de la dent. Il serait intéressant de comparer ces profils avec ceux du  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  pour voir si les modifications entre profils d'une même dent correspondent à une mobilité de l'animal. Des différences peuvent également être dues à un changement dans l'alimentation des herbivores. Sans pour autant changer de niveau trophique, une **modification dans les végétaux consommés** (impliquant ou non un changement d'environnement) peut induire un changement de Sr/Ca et Ba/Ca (cf. Chap2.VI.3).

ID	espèce	sexe	âge au décès	dent	âge approx. correspondant à la formation de l'émail
GLN 202	humain	M	20-49	M2inf(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 207A	humain	M	>30	M1sup(D)	0,5 - 3,5 ans
GLN 207B	humain	F	>20	M1sup(G)	0,5 - 3,5 ans
GLN 210	humain	-	7-12 [5-14]	M2inf(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 212	humain	F	20-29	M2inf(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 215B	humain	-	8-14 [5-14]	M2inf(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 216	humain	M	>30 (>50*)	M2inf(D)	2,5 - 8,5 ans
GLN 220	humain	M	20-59	M2inf(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 221B	humain	M	>30	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 225	humain	F	>30	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 231A	humain	M	>20	M2inf(D)	2,5 - 8,5 ans
GLN 236A	humain	F	>20	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 237A	humain	M	20-49	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
GLN 241	humain	M	20-49	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
GLN 243A	humain	M	>30	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 243B	humain	F	>20	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
GLN 248	humain	I	>40	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 249	humain	I	>20	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 250	humain	M	>20	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
GLN 257	humain	M	>30 (<50*)	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
GLN 264	humain	F	15-29	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 269	humain	I	>20	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
GLN 276	humain	M	>20	M2inf(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 277	humain	I	15-29	M2inf(D)	2,5 - 8,5 ans
GLN 284	humain	F	>20	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
GLN 285A	humain	I	>15	M2inf(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 289B	humain	F	>30	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 292	humain	F	20-29	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
GLN 294	humain	M	>20	M2inf(D)	2,5 - 8,5 ans
GLN 295	humain	F	>20		
GLN 300	humain	M	>40	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 301	humain	-	6-12 [5-14]	M2inf(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 302	humain	M	>50	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
GLN 315	humain	F	>20	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
GLN 317	humain	M	>30	M2inf(G)	2,5 - 8,5 ans
GLN 320	humain	M	20-59		
GLN 323	humain	F	>30		
GLN F3	vache		-	M1inf ou 2(D)	in ut. - 13 mois
GLN F4	vache		adult	M1inf ou 2(G)	in ut. - 13 mois
GLN F6	porc		young (weaned ?)	M1inf ou 2(G)	in ut. - 8 mois
GLN F7	porc		-	M1inf(D)	in ut. - 3 mois
GLN F9	porc		-	M1inf(D)	in ut. - 3 mois
GLN F16	chevreuil		adult		
GLN F18	mouton/chèvre		adult	M3sup(D)	1 - 2 ans
GLN F21	vache		young (weaned)	M3sup(G)	9 - 24 mois
GLN F23	vache		adult	Minf(D)	in ut. - 24 mois
Mon 99-520	humain	F	mature [>20]	M2sup(D)	3 - 8 ans

Tableau C8. 7 : Récapitulatif des dents analysées et âges approximatifs correspondants à la période de formation de l'émail pour chaque individu.

ID	espèce	sex e	âge au décès	dent	âge approx. correspondant à la formation de l'émail
Mon 99-521	humain	M	mature [20-39]	M2inf(G)	2,5 - 8,5 ans
Mon 99-548A	humain	F	adult [>15]	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
Mon 99-240	humain	F	mature [>30]	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
Mon 04-87	humain	F	young adult [>20]	M2inf(G)	2,5 - 8,5 ans
Mon 04-94A	humain	M	mature [>30]	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
Mon 04-94B	humain	M	old [>30]	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
Mon 04-99	humain	M	old [>30]	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
Mon 04-104	humain	F	young adult [>15]	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
Mon 04-110	humain	M	mature [>30]	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
Mon 04-217B	humain	F	mature [>30]	M2sup(D)	2,5 - 8,5 ans
Mon 00-05	humain	M	young adult [15-29]	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
Mon 99-374	humain	M	mature [>30]	M2inf(D)	2,5 - 8,5 ans
CHI-Pat 1	humain	M	>30	M2inf(G)	2,5 - 8,5 ans
CHI-Pat 2	humain	M	30-39	M2inf(D)	2,5 - 8,5 ans
CHI-Pat 3	humain	F	30-49	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
CHI-Pat 4	humain	F	>25 (<50*)	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
CHI-Pat 7	humain	I	15-19	M2inf(D)	2,5 - 8,5 ans
CHI-Pat 9	humain	I	>20 (<50*)	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
BMT H14	humain	?	>10	M2sup(R?)	2,5 - 8,5 ans
BMT H15	humain	?	?	M2inf(G)	2,5 - 8,5 ans
BMT F11	cerf		-		
BMT F14	cerf		-		
BMT F18	mouton/chèvre		young adult	M1inf(D)	in ut. - 9 mois
BMT F24	vache		young	M1inf(D)	in ut. - 3 mois
BMT F26	mouton/chèvre		adult	M2inf(G)	0 - 1 an
BMT F27	mouton/chèvre		young adult	d4inf(D)	in utero ?
BMT F32	mouton/chèvre		<1 year	M1inf(G)	in ut. - 9 mois
BMT F35	vache		adult	M3sup(G)	9 - 24 mois
BMT F36	vache		adult	M1inf ou 2(D)	in ut. - 13 mois
BMT F37	vache		adult	P4sup(G)	?
BMT F38	vache		juvenile	M1inf(D)	in ut. - 3 mois
BMT F39	chevreuil		adult	P3inf(G)	?
BMT F40	mouton/chèvre		adult	M1sup ou 2(G)	in ut. - 1 an
BMT F41	porc		adult	M2sup(D)	1 - 8 mois
BMT F42	porc		adult	M2inf(G)	1 - 8 mois
BMT F43	porc		adult	M3sup(G)	3 mois - 1 an
BMT F44	porc		juvenile	M1sup(D)	in ut. - 3 mois
BMT F45	vache		-	M3inf(D)	9 - 24 mois
BMT F46	mouton/chèvre		-	Msup(D)	in ut. - 2 ans
BMT F48	mouton/chèvre		adult	M3inf(G)	1 - 2 ans
CHI-ED 5	humain	?	9,5-18 ?	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
Bon PFPM i2	humain	?	?	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
NZ H238	humain	M	>20	M2inf(G)	2,5 - 8,5 ans
NZ H239	humain	M	>20	M2sup(G)	2,5 - 8,5 ans
NZ F4	cerf		-		
NZ F5	aurochs		-		
NZ F7	porc		-	Iinf	?

(Suite)

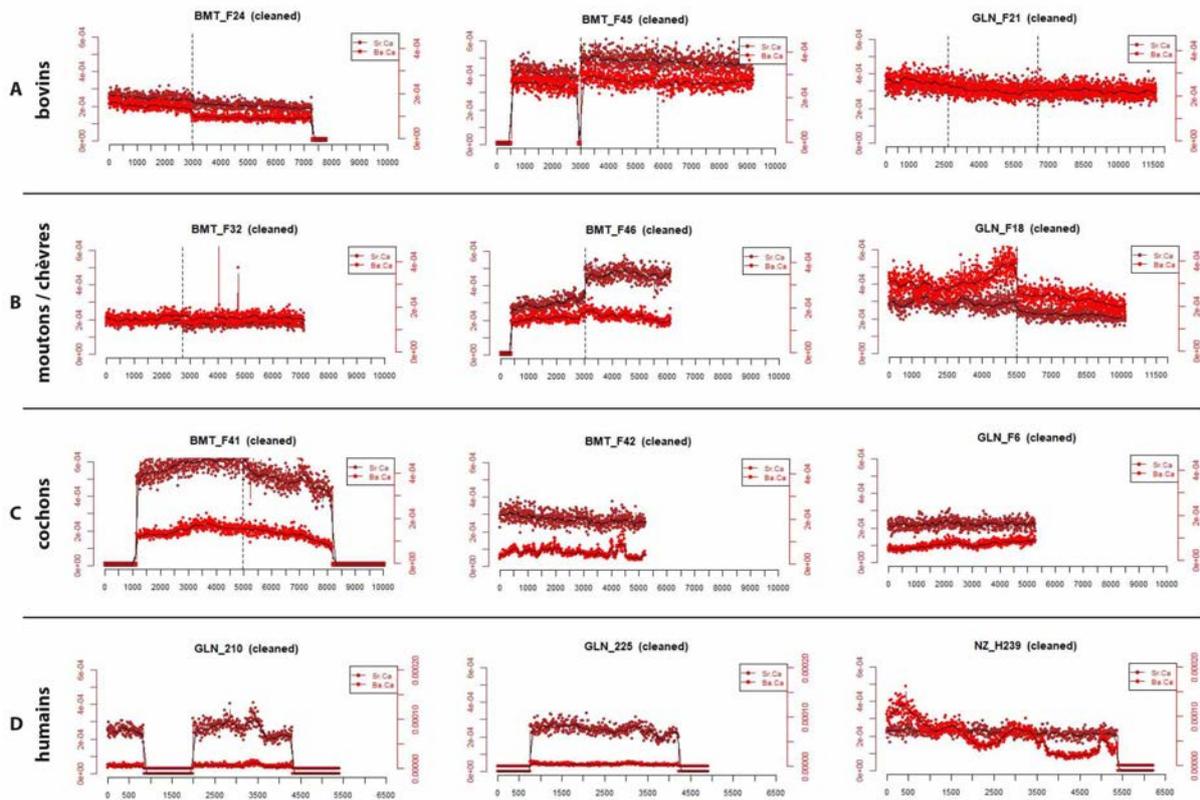


Figure C8. 25 : Différences de variabilité intra-profil entre des dents de bovins (A), de caprinés (B), de suidés (C) et d'humains (D). Les lignes pointillées indiquent la séparation entre les différents profils d'une même dent, successifs mais non jointifs. Les profils d'herbivores pâtureurs (A) sont relativement « plats », hormis quelques variations entre les profils pouvant témoigner de mobilité ou différences de pâturages. Les profils de caprinés (B) peuvent être plats ou plus variables, témoignant peut-être de la différence entre chèvres et moutons, respectivement brouteurs et pâtureurs. Les profils des cochons (C), à l'image de ceux des humains (D) présentent de nettes variations en Sr/Ca et/ou Ba/Ca, de différentes formes et rythmicité, révélant de probables modifications alimentaires et/ou de mobilité.

NB : Il est à noter que plus les valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca sont basses, moins les variations sont visibles (le passage en log permet de réduire cette tendance).

### II.6.a. Chèvres et moutons : une piste à suivre ?

Chez les **caprinés**, les profils les plus variables pourraient correspondre à des **brouteurs (chèvres)**, dont l'alimentation est *a priori* plus variée<sup>1</sup>, plutôt que des **pâtureurs (moutons)**. Par exemple, dans la Figure C8. 25B, le profil de gauche (BMT F32), stable, pourrait être celui d'un mouton, alors que celui de droite (GLN F18), de Ba/Ca plus variable, pourrait être celui d'une chèvre (un doute persiste néanmoins sur un possible impact diagénétique résiduel) ; celui du milieu (BMT F46) étant plus contestable : la variation en Sr/Ca entre les deux profils pouvant représenter des milieux de pâturage différents au cours du temps. Ce résultat vient nuancer les propositions interprétatives de la section

<sup>1</sup> En contexte domestique, un affouragement plus varié pour les pâtureurs peut être envisagé, notamment pendant les périodes de disette, où un fourrage d'arbre (feuilles et petit branchage) peut être apporté en complément de l'herbe (Thiébaud 2005). Cette section propose des pistes de discussion et doit faire inéluctablement l'objet d'une expertise archéozoologique avant toute poursuite de la recherche.

II.5.d stipulant que les valeurs similaires entre bovins et caprinés pourraient témoigner d'un même type de régime alimentaire de pâtureurs.

Nous avons donc cherché à savoir si les courbes les plus variables des caprinés présentaient des moyennes différentes des courbes les plus plates, permettant de distinguer deux types de régimes entre, potentiellement, des chèvres et des moutons (Figure C8. 26). En considérant les profils de BMT F18, F32, F46 et F48 stables (à gauche, pas de pic de variation net) et ceux de BMT F26, F40 et GLN F18 variables (sur la base de l'observation des courbes uniquement, à droite), les moyennes de ces deux groupes sont différentes (Figure C8. 26B) et la différence est statistiquement significative pour Ba/Ca (test de Kruskal-Wallis,  $p = 0,04$ ). Il est de plus intéressant de remarquer que les **valeurs moyennes des « moutons probables »** sont tout à fait **dans la variabilité des bovins**, également pâtureurs, alors que celles des « chèvres probables » s'en détachent. Il est également possible que les différences observées relèvent d'une gestion pastorale particulière (affouragements ou fréquentation de milieux différents, entre les espèces ou pour une même espèce au cours du temps) et ces considérations doivent être discutées après une étude approfondie des données issues de l'archéozoologie concernant la gestion des cheptels au Néolithique.

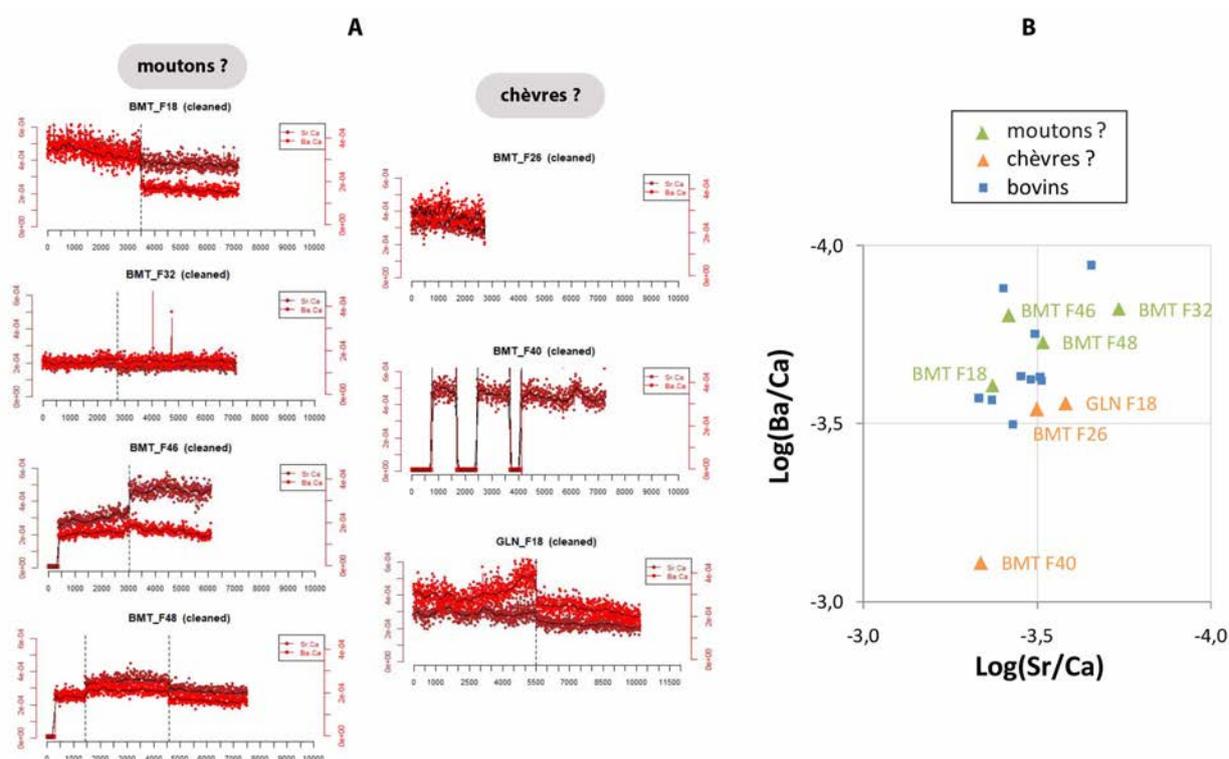


Figure C8. 26 : Différence de variabilité intra-profil chez les caprinés (A) pouvant témoigner de possibles différences de régime alimentaire entre des moutons, pâtureurs et consommateurs d'herbes, et des chèvres, herbivores brouteurs à la consommation plus variée d'herbacées, feuilles et écorces d'arbres. La ligne pointillée indique la séparation entre plusieurs profils d'une même dent, non jointifs. Un profil est considéré « plat » s'il ne présente pas de pic net de variation ; il peut néanmoins légèrement varier dans le temps de façon continue. (B) Différences entre les moyennes individuelles des deux groupes identifiés précédemment sur la base de la variabilité intra-profil, au regard des valeurs moyennes de bovins, pâtureurs.

Dans cet exemple, la différence de variabilité se fonde sur l'aspect général de chaque profil : continu ou irrégulier, sans prendre en considération les possibles différences enregistrées entre plusieurs profils d'une même dent. Néanmoins, la **variabilité des profils** doit être **testée statistiquement** (cf. II.6.e) afin de confirmer la distinction entre ces groupes. La prise en compte ou non de l'individu BMT F46 notamment, discutable, contredirait le résultat. Enfin, le **faible effectif** invite à la prudence et, sans porter de conclusions démonstratives, nous nous contentons ici de proposer des pistes de travail, à expérimenter plus avant à partir d'échantillons de chèvres et moutons actuels de contextes différents. Par ailleurs et pour finir, il est essentiel de rappeler que les connaissances concernant les régimes alimentaires des caprinés néolithiques sont limitées et variables en fonction des régions et, ces espèces étant anciennement domestiquées, elles diffèrent par de nombreux aspects des espèces actuelles. Il serait également intéressant de savoir si la distinction entre les deux espèces peut être réalisée à partir des dents (parfois d'une dent isolée) pour cette période (voir par exemple Balasse et Ambrose 2005 et Buckley *et al.* 2010).

### II.6.b. Des profils d'allaitement chez les herbivores ?

Dans certains cas, la variation observée entre plusieurs profils d'une même dent d'herbivore peut refléter le **signal de l'allaitement**. C'est sans doute le cas du jeune **capriné BMT F18** par exemple (Figure C8. 27) : les ratios élémentaires ont été mesurés dans la couronne d'une première molaire permanente, dont la formation débute *in utero* et se termine vers 9 mois. Dans la Figure C8. 27A, la courbe de gauche correspond au profil tracé approximativement au milieu de la couronne, la dent (hypsodonte ; cf. Chap2.III.4.b) n'ayant pas tout à fait émergé dans la bouche – elle n'a pas été mesurée (Figure C8. 27B et C). Les plus fortes valeurs de Ba/Ca du profil de gauche, correspondant à quelques mois de vie de l'animal, pourraient refléter la consommation de lait maternel, comme cela a été mis en évidence à plusieurs reprises (Austin *et al.* 2013 ; Joannes-Boyau *et al.* 2019 ; Tacail *et al.* 2017).

De même, plusieurs **profils de bovinés** pourraient refléter un **signal d'allaitement** (Figure C8. 28). Plusieurs dents (isolées, parfois mal conservées) n'ont pu être déterminées avec certitude. Par exemple, pour le sujet adulte BMT F36 (Figure C8. 28A), la dent échantillonnée est une première ou une deuxième molaire permanente (M1 ou M2), dont la période de formation de la couronne débute *in utero* et s'achève vers 3 mois pour la M1 ou s'étend d'un à 13 mois pour la M2. Le jeune bovin BMT F38 (Figure C8. 28B) a fourni une M1 *in situ* (couronne complète). La similitude entre les courbes des deux échantillons BMT F36 et F38 (Figure C8. 28A et B) suggère que le premier concerne une M1, de même que le second. L'augmentation du Ba/Ca après la naissance et peu avant 3 mois reflète vraisemblablement le signal d'allaitement de ces sujets. Pour l'individu BMT F35 (bovin adulte ; Figure C8. 28C), la dent considérée est une troisième molaire dont la couronne commence à se former à partir de

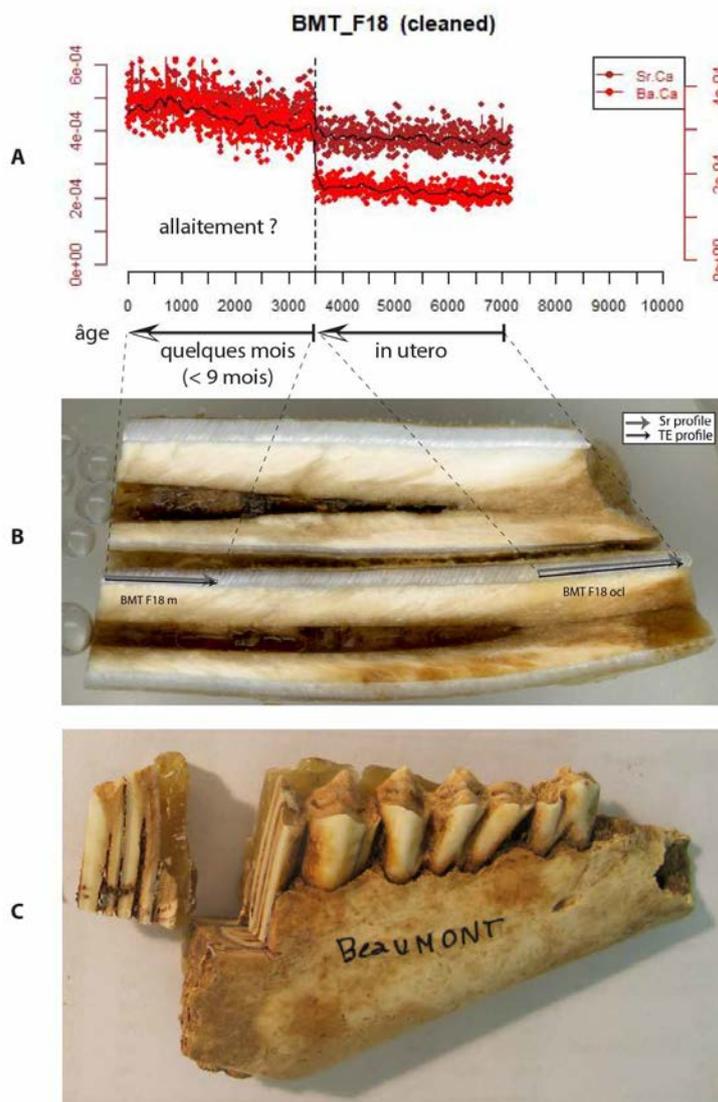


Figure C8. 27 : Courbes de Sr/Ca et Ba/Ca (A) correspondant aux profils d'ablation (B) réalisés à différentes hauteurs d'une première molaire inférieure (M1inf) de capriné (BMT F18) et vue de la dent coupée (C) incluse dans la mandibule (la cire visible sur la photo a permis de maintenir l'échantillon fixe au cours de la découpe). La M1inf des caprinés commence généralement sa formation *in utero* et termine autour de 9 mois. Celle-ci n'étant pas coupée à la base du collet mais plus haut (éruption dentaire en cours), le début du profil ne correspond pas au début du collet. D'autre part, les profils ont été réalisés dans la direction opposée du sens de croissance dentaire et les flèches sous les courbes (A) indiquent l'évolution dans le temps en âge approximatif. Les plus fortes valeurs de Ba/Ca (profil de gauche) indiquent possiblement le signal de l'allaitement.

9 mois. Le sevrage des bovins au Néolithique advenant vraisemblablement autour de 6 à 10 mois (Balasse et Tresset 2002), il est possible que le profil occlusal de plus haut Ba/Ca corresponde à une période où le veau était encore allaité. Une détermination erronée de la dent (M3 à la place de M2 ; la dent était isolée) est également à considérer : la M2 se formant entre un et 13 mois, un signal d'allaitement visible à partir d'un mois et absent dans les profils suivants serait cohérent. Pour le sujet GLN F3 (D), il est probable que la dent considérée soit une M2 plutôt qu'une M1 : la M2 se formant entre un et 13 mois, un signal d'allaitement visible à partir d'un mois et absent dans les profils suivants (approximativement autour de 6 et 13 mois respectivement) serait cohérent. Cependant,

l'augmentation de Ba/Ca au niveau du collet reste inexpliquée. S'il s'agit d'un phénomène diagénétique, il n'est pas visible par l'analyse des ratios U/Ca ni Mn/Ca.

Au contraire, les courbes de profil du jeune bovin GLN F21 (M3 = 9-24 mois) et du bovin BMT F45 (M3 = 9-24 mois) sont plutôt constantes, reflétant le signal des animaux sevrés (Annexe A40).

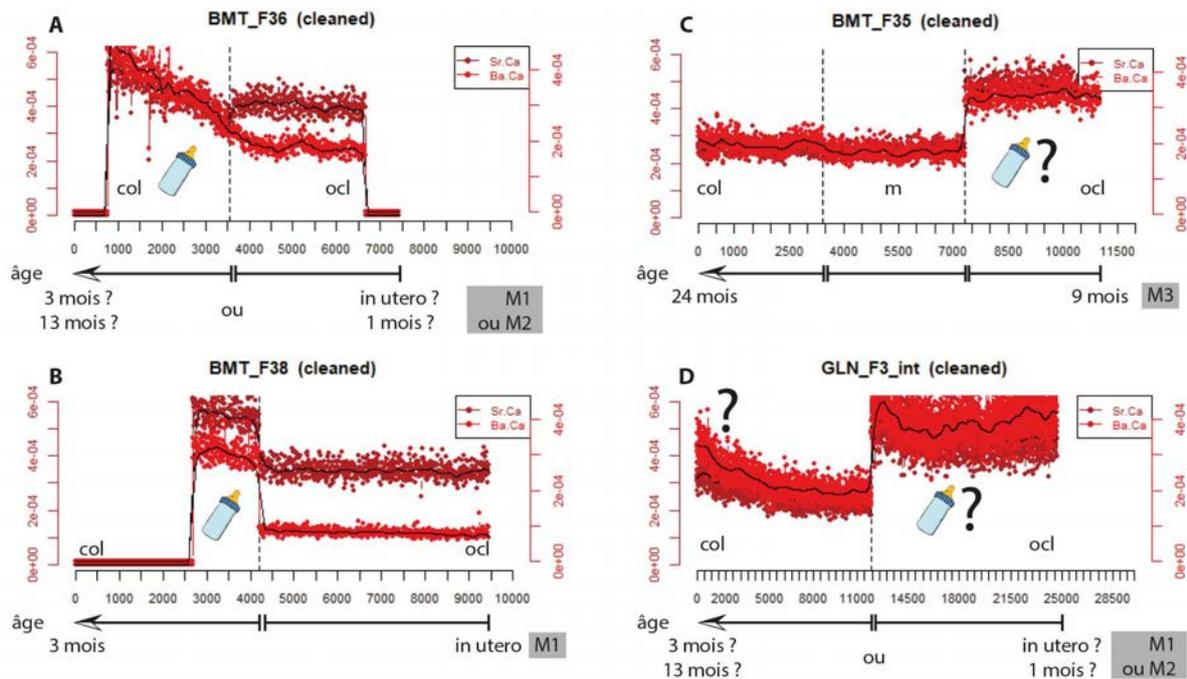


Figure C8. 28 : Courbes de Sr/Ca et Ba/Ca correspondant aux profils d'ablation dans l'émail de différents dents de bovinés domestiques (A à D) et âge probable (approximatif) correspondant. Les lignes pointillées indiquent la séparation entre les différents profils d'une même dent, successifs mais non jointifs, tracés depuis le collet (col) jusqu'à l'extrémité occlusale (ocl ; les profils sont donc à considérer en sens inverse), incluant parfois un profil intermédiaire (m). Le type de dent est indiqué dans l'encadré gris : M1, M2 ou M3 pour première, deuxième ou troisième molaire permanente. Le biberon indique le possible signal de lactation et le point d'interrogation la non compatibilité avec un signal d'allaitement.

Afin de **recaler précisément** ce possible **signal d'allaitement en fonction de l'âge**, les dents devront être déterminées avec précision et l'âge correspondant estimé à partir du **degré d'usure** et de la **hauteur de la couronne**, d'après les références connues pour le Néolithique (voir par exemple Balasse 2003). La combinaison entre ce type d'analyse dans l'émail et le dosage séquentiel (micro-échantillonnage) des isotopes stables dans la dentine, ainsi que le croisement de ces informations avec les profils d'abattage (saisonnalité, abattage post-lactation) identifiés à partir des ossements dans la région, apportera une lumière nouvelle sur les modalités de sevrage et plus largement sur les stratégies de gestion de l'élevage bovin et ovicaprin au Néolithique (e.g. Balasse 2003 ; Balasse *et al.* 2001 ; Balasse *et al.* 2012 ; Vigne et Helmer 2007).

### II.6.c. ... et les cochons ?

Le même schéma peut raisonnablement être signalé chez les cochons : le profil de BMT F44 dans une première molaire, en diminution de Ba/Ca au cours de ses trois premiers mois de vie, reflète

probablement la période de sevrage de cet animal (Figure C8. 29). Chez les suidés, la couronne de la M1 débute sa formation *in utero* et se poursuit jusqu'à 3 mois. Le signal *in utero* ne semble pas visible ici mais la position de la ligne néonatale n'est pas connue par rapport à ce profil et, la dent étant usée jusqu'à la dentine, il est possible que le signal reflète une période déjà postérieure à la naissance. Dans la deuxième partie du profil, la nette diminution du Ba/Ca indique vraisemblablement une réduction de la lactation.

D'autre part, la plus grande variabilité des courbes des cochons par rapport à celles des herbivores (cf. Figure C8. 25C, p.479) reflète probablement un régime mixte et plus varié que ces derniers. Le détail de ces variations ne sera cependant pas discuté ici.

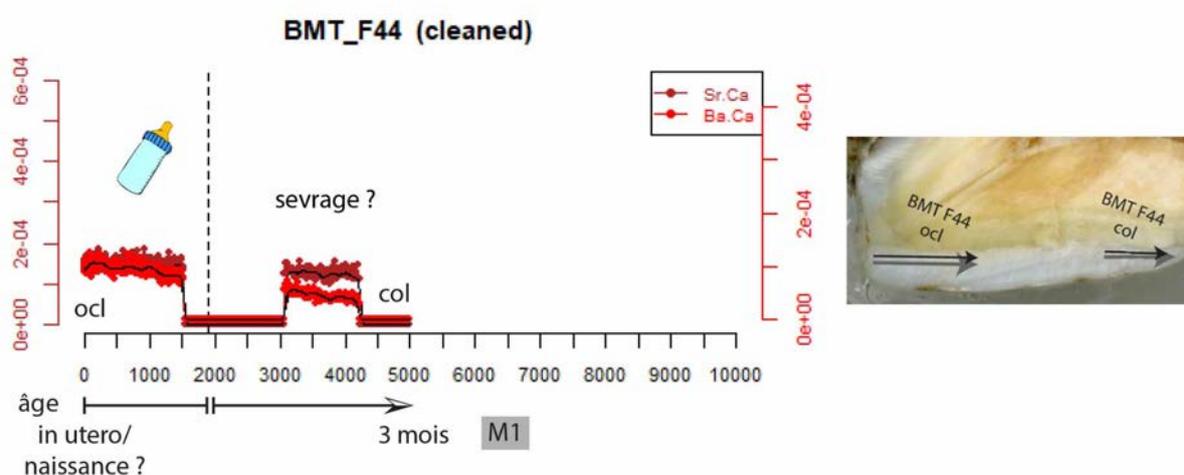


Figure C8. 29 : Courbes de Sr/Ca et Ba/Ca (à gauche) correspondant aux profils d'ablation dans l'émail d'une première molaire permanente (M1, à droite) du cochon BMT F44 et âge approximatif correspondant. La dent étant usée jusqu'à la dentine (cf. photographie à droite), l'âge correspondant au début du profil est postérieur à l'âge théorique du début de formation de la couronne. La ligne pointillée (à gauche) indique la séparation entre les deux profils de la même dent, successifs mais non jointifs, tracés depuis l'extrémité occlusale (ocl) au collet (col). La position de la ligne néonatale par rapport à ce profil n'est pas connue. Le biberon indique le possible signal de lactation au début du profil et la diminution de Ba/Ca laisse envisager la période de sevrage.

#### II.6.d. Quelles variations chez les humains ?

Chez les humains, différents types de variations peuvent être observés : certains profils sont « plats » (par exemple GLN 264 ou 315 ; Figure C8. 30A), d'autres voient leur Ba/Ca ou leur Sr/Ca varier (par exemple GLN 210 ou Mon 04-87 ; Figure C8. 30B). Ces variations sont d'amplitude et de rythmes différents, sans récurrence apparente, bien qu'il soit en l'état actuel de nos connaissances difficile de les quantifier et de les caractériser statistiquement (cf. II.6.e). Nous présentons ici quelques uns des profils discutés ci-avant (cf. II.5.e).

NB : Dans les dents humaines comme pour les cochons, les profils ont été tracés de l'apex au collet et se lisent à l'endroit sur les figures (contrairement à ceux des herbivores) comme le montrent les flèches de correspondance avec l'âge sur les Figure C8. 27 à 32.

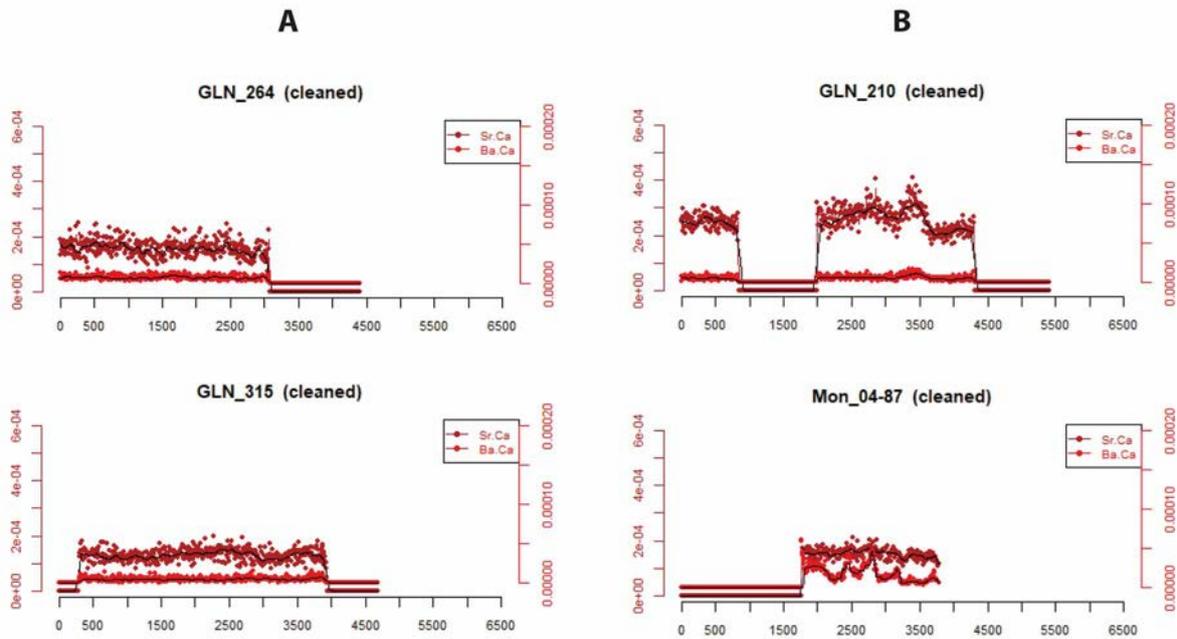


Figure C8. 30 : Exemples de différents types de variations de Sr/Ca et Ba/Ca dans quelques profils d'émail humain. A : profils « plats » et B : profils « variables ».

Les profils de **GLN 207A** et **GLN 207B** réalisés dans la M1 **confirment le signal de l'allaitement** mis en évidence par des moyennes élevées de Ba/Ca (et plus basses de Sr/Ca). La **diminution du ratio Ba/Ca** au cours du temps, sur une période comprise grossièrement entre 6 mois et 3,5 ans, indique probablement une **réduction de l'allaitement** pouvant correspondre à la **période de sevrage** de ces individus (Figure C8. 31). Si la diminution de Ba/Ca semble moins nette pour GLN 207B, le passage en logarithme accentue la variation (Figure C8. 32). La moyenne de  $\log(\text{Ba/Ca})$  des 40 premiers points des profils de GLN 207A et GLN 207B est de -4,4 alors que la moyenne des 40 derniers points est de -4,8 pour GLN 207A et -4,7 pour GLN 207B. Rapporté à la variabilité individuelle globale enregistrée dans ce site, ces différences sont significatives (Figure C8. 32B). Néanmoins, le Ba/Ca enregistré à la fin de ces profils reste dans la moyenne basse par rapport aux moyennes individuelles de ce site. Est-il possible que le sevrage ne soit pas terminé à la fin de la période couverte par le profil, c'est-à-dire que ces individus aient pu être allaités encore en partie après 3,5 ans ?

Pour les deux autres échantillons du même site ayant présenté un fort Ba/Ca, le schéma est différent. Pour **GLN 212**, le profil est stable bien que l'amplitude de variation générale soit similaire (les valeurs de Ba/Ca s'étendent de -4,4 à -5,2 environ, de même que les profils précédents, mais semblent dus au bruit analytique ; Figure C8. 32 ; cf. II.6.e). Le fort Ba/Ca moyen de cet individu par rapport au reste du groupe serait semble-t-il plutôt représentatif d'un plus bas niveau trophique – et d'un **régime plus végétarien** ? – que les autres et non d'un signal de lactation. Pour **GLN 236A**, la M2 analysée montre un profil de Ba/Ca en diminution (Figure C8. 31), de même que GLN 207A et B, mais plus variable, pouvant indiquer des périodes de sevrage plus intenses et alternativement des périodes de retour à

l'allaitement, peut être en lien avec les saisons. Ce schéma rappelle le profil observé dans la dentine d'une canine d'Australopithèque de Sterkfontein (StS 51B) qui montre des pics réguliers interprétés comme des périodes de stress saisonnier (Figure C8. 33 ; Joannes-Boyau *et al.* 2019). En considérant l'âge correspondant au profil de GLN 236A (jusqu'à environ 8,5 ans), l'hypothèse d'une modification alimentaire autre que la lactation induisant une augmentation cyclique du Ba/Ca (régime plus végétarien ?) ne peut être écartée.

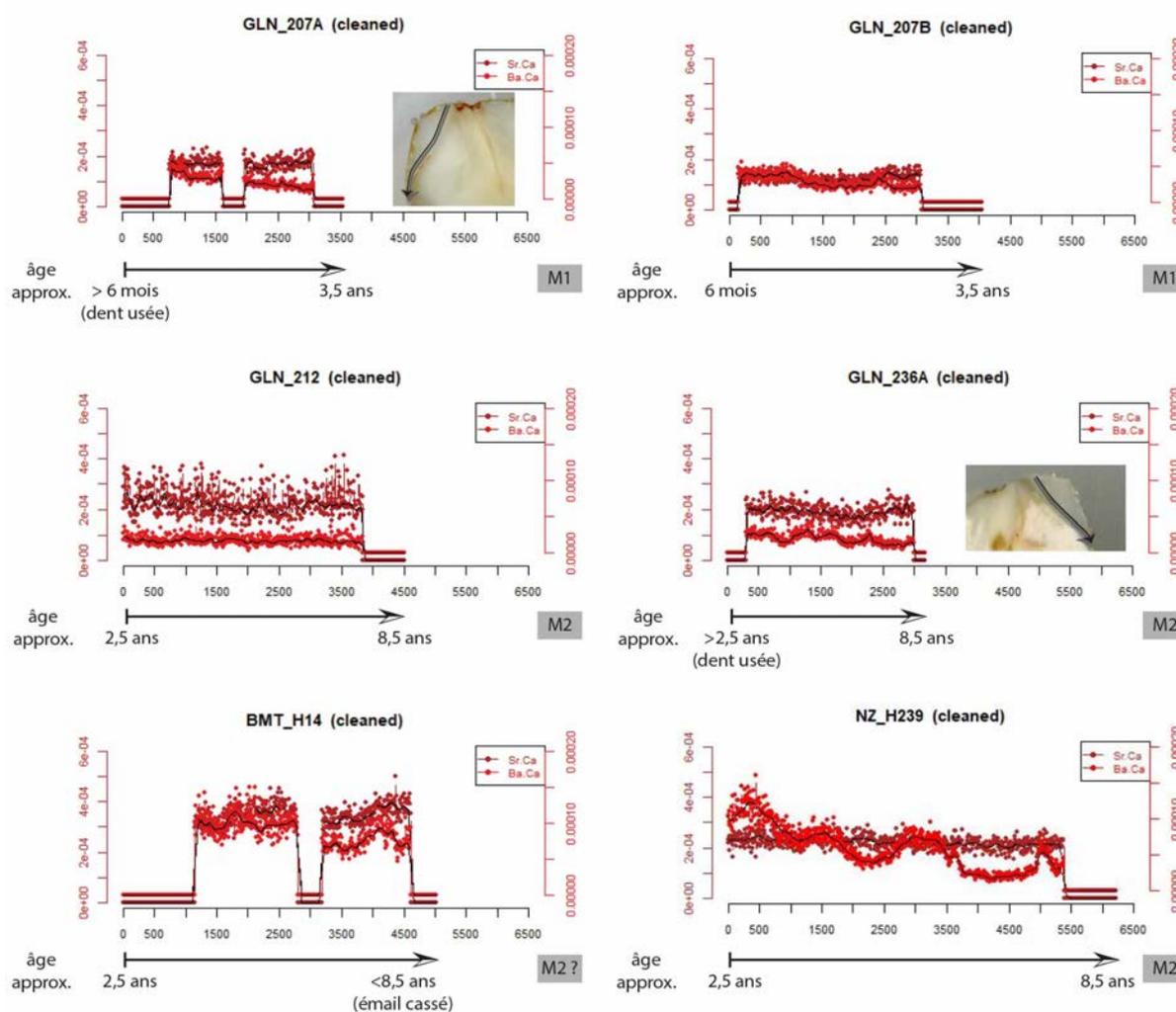


Figure C8. 31 : Courbes de variations de Sr/Ca et Ba/Ca dans les profils des humains discutés dans la section II.5.e en fonction de l'âge approximatif correspondant. La mention « dent usée » indique que la présence d'un ilot dentinaire révèle la perte d'émail au niveau de l'apex (photographie à l'appui) : il manque donc le signal du début de la formation de la couronne. Le type de dent concerné est indiqué dans l'encadré gris : M1 ou M2 pour première ou deuxième molaire permanente.

Il en est de même pour le profil de NZ H239. La courbe décroissante, par « à coups », de Ba/Ca entre 2,5 et 8,5 ans (Figure C8. 31) pourrait indiquer un sevrage tardif « par étapes » ou des **modifications alimentaires périodiques** en lien possible avec les saisons. Pour BMT H14, la variation en Ba/Ca est relativement faible bien que sensiblement décroissante (log(Ba/Ca) de -4 à -4,1 entre le début et la fin du profil). Ce résultat semble être en faveur d'une alimentation somme toute assez peu variable dont la moyenne très élevée de Ba/Ca (et basse de Sr/Ca) pourrait témoigner d'un régime différent des autres

humains – **plus végétarien ?** – et non d’un signal d’allaitement. La grande variabilité apparente de ce profil sur la Figure C8. 31 au regard des autres profils montre bien **l’intérêt du passage en logarithme** qui réduit les écarts entre les niveaux trophiques. Ainsi, le passage en logarithme des profils des animaux, et en particulier des herbivores, de Ba/Ca plus élevé, réduit d’autant les variations déjà faibles observées dans les profils unitaires de ces espèces de plus bas niveau trophique.

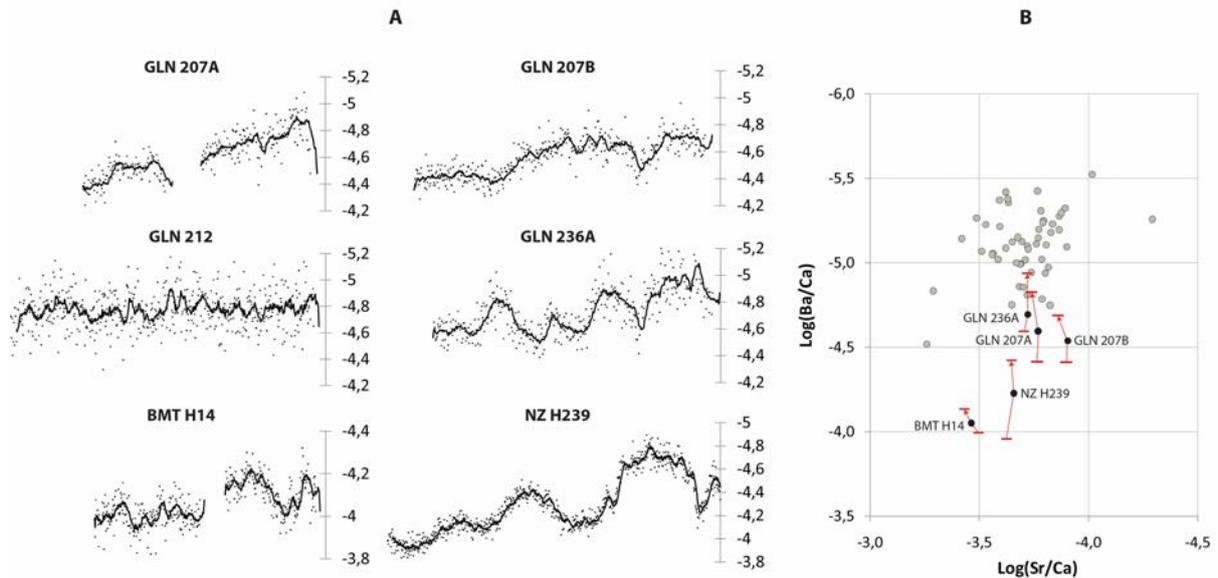


Figure C8. 32 : (A) Courbes de variations du Ba/Ca (valeurs en logarithmes et inversées) et moyenne mobile de période 10 dans les profils des humains. Les échelles ne sont pas identiques pour tous les profils afin d’accentuer les variations observées. (B) Différence moyenne en Ba/Ca entre les quarante premiers et les quarante derniers points du profil des individus représentés à gauche (A) pour lesquels une variation significative a été enregistrée au cours du temps – relativement aux valeurs moyennes de l’ensemble des individus (points gris). Les flèches rouges indiquent le sens de la variation entre le début et la fin du profil illustrant la diminution du Ba/Ca (valeurs inversées sur le graphique) correspondant au possible sevrage de ces individus.

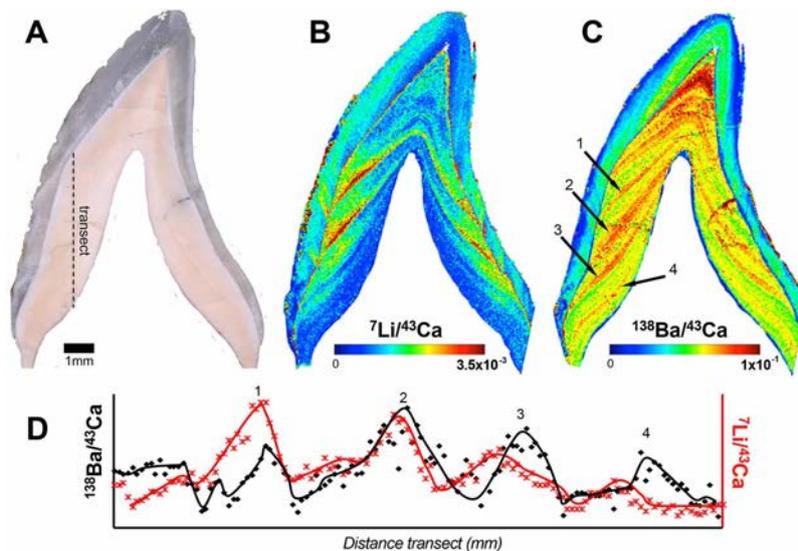


Figure C8. 33 : (A) Micrographie ( $\times 10$ ) de la canine inférieure permanente de l’Australopithèque StS 51B. (B) Cartographie élémentaire associée de  $^7\text{Li}/^{43}\text{Ca}$  et (C)  $^{138}\text{Ba}/^{43}\text{Ca}$ . Les canines permanentes commencent leur développement seulement quelques mois après la naissance et la formation de la couronne s’achève entre 3 et 4 ans. (D) Comparaison de la périodicité temporelle de Ba/Ca (ligne noire et losanges) et Li/Ca (ligne rouge et Xs) accentuée des lignes 1, 2, 3 et 4, le long du transect (A). La récurrence Li/Ca montre un léger décalage temporel par rapport à la périodicité Ba/Ca. D’après Joannes-Boyau *et al*, 2019.

### II.6.e. Quantifier et caractériser statistiquement les variations

Le problème de la caractérisation des variations intra-profil est complexe. D'abord, la **variation diminue avec le niveau trophique** en raison d'une homogénéisation du signal de l'alimentation dans l'organisme par les processus métaboliques. Ensuite, il existe **différents types de variations intra-profil** pouvant donner lieu à un même résultat lors du calcul de l'écart-type global. C'est ce que l'on observe par exemple entre les profils de GLN 212, d'une part, et de GLN 207A, GLN 236A ou encore NZ H239, d'autre part (Figure C8. 32) : dans la première catégorie, les profils restent stables dans le temps – la moyenne mobile est constante – mais la variation entre deux points successifs est très importante et probablement caractéristique d'un **fort bruit analytique** (comme pour GLN 212) ; dans la seconde catégorie, les profils varient dans le temps – la moyenne mobile est variable, on peut parler de variations localisées – et la variation autour de cette moyenne est moins grande (par exemple pour NZ H239). Entre deux extrêmes (caractérisés par exemple par GLN 212 d'un côté et NZ H239 de l'autre ; Figure C8. 32) existe un panel de possibilités. Il n'est donc pas possible de comparer simplement les variances de différents profils pour en apprécier la variation biogénique dans le temps. Le calcul d'un « écart-type mobile » rendrait compte en partie de ces différents schémas. Enfin, la **rythmicité des variations** doit rentrer en ligne de comptes pour comparer différents profils. À ce jour et à notre connaissance, aucun modèle suffisant n'a pu être développé pour comparer statistiquement les différents types de variation intra-profil.

### II.7. L'apport de notre étude au développement de la méthode : synthèse et perspectives

L'étude réalisée dans ce travail est parfaitement novatrice, combinant pour la **première fois** l'analyse par ablation laser du **Sr isotopique et des éléments traces** dans l'émail dentaire de près d'une **centaine d'individus** issus d'un contexte bien connu. Si la mesure du Sr isotopique s'est avérée peu fructueuse ici du fait d'un signal instrumental insuffisant pour le matériel considéré, les récentes avancées techniques permettent désormais d'acquérir ce type d'informations de façon fiable et de les traiter en un temps nettement inférieur (voir Rivollat *et al.*, en préparation). En dépit de cela, notre étude est incroyablement encourageante et prometteuse par un certain nombre d'aspects que nous énumérons ci-après, au regard des limites méthodologiques de la méthode.

**D'une façon générale**, notre étude a permis de constater/démontrer :

- **L'intérêt d'un gros corpus** dans ce type d'étude.
- L'importance de croiser **différents indicateurs (éléments traces et Sr)** dans l'émail pour supprimer les parties de profils diagenétiques (zone collet et extrémité occlusale, fissures).

- L'obtention d'une **quantité exceptionnelle de données** en un **temps record** (une fois le protocole de nettoyage mis en place).
- Un **traitement des données long** pour la mise en place du protocole qui nécessite la maîtrise des **outils de programmation**.
- La possibilité de travailler sur les **moyennes et écart-types** issus de profils énamélaire « propres » (a priori exempts de diagénèse) ainsi que sur les **variations intra-profils**.
- **L'inadaptabilité de l'os** pour l'ablation laser, plus sensible à la diagénèse → les contaminations diffuses ne peuvent être éliminées par un prétraitement qui nécessite de pulvériser le matériel et sont difficilement identifiables en traitement post-hoc.

### Pour le Sr isotopique :

- Le **seuil du signal à 0,4V** n'est pas toujours suffisant pour éliminer le risque d'interférences → nécessité de croiser le signal de  $^{88}\text{Sr}$  avec l'écart-type de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .

### Pour les éléments traces :

- **La mise en place d'un traitement post-hoc adapté** → identification des corrélations entre indicateurs biogéniques et diagénétiques sur le corpus global et au sein des courbes avec suppression des parties corrélées, nouveaux tests de corrélations pour vérification de l'absence de diagénèse, suppression des restes de corrélation si nécessaire jusqu'à l'obtention de profils propres, calcul des moyennes et écart-types. Le nettoyage s'est fait manuellement ou semi-automatisé et de façon itérative.
- **La difficile reconstitution des régimes alimentaires** à partir des résultats par ablation laser dans l'os comme dans l'émail → sensibilité à la diagénèse pour l'un,  $\text{OR}_{\text{alimentation-émail}}$  variable pour l'autre.
  - o Dans l'os, les variations individuelles et inter-spécifiques indiquent que les échantillons ont maintenu au moins une partie de leur **intégrité**. Les résultats sont discutés avec précaution et plusieurs remarques se dégagent :
    - Le schéma trophique **herbivores > cochons > humains** est préservé.
    - La comparaison avec des données connues indiquent un régime des humains **moins carnivore** que précédemment supposé mais la possible empreinte diagénétique a pu impacter ce résultat. La **part des plantes** peut également être mieux représentée que par les indicateurs du collagène.
    - L'interprétation des résultats (différence entre BMT et GLN notamment) suppose une **empreinte diagénétique** ayant altéré (homogénéisé) une partie

des valeurs. L'analyse en **solution** reste mieux adaptée, après prétraitements, bien qu'elle n'exclue pas tout à fait ce risque à prendre en considération. Une étude de I. Scharlotta et collaborateurs (2013) propose de **cibler des zones** exemptes de diagénèse à l'intérieur même **des ostéons**. Une piste à suivre ?

- Dans l'émail :
  - Le schéma trophique **herbivores > cochons > humains** est préservé.
  - Le **calcul d'un OR<sub>alimentation-émail</sub>** est discuté à partir de ces nouvelles données.
- Dans l'ensemble :
  - La part relative des **ressources carnées vs végétales** dans l'alimentation des humains ne peut être correctement estimée, de même que celle des **produits laitiers**.
  - La consommation de **ressources aquatiques** n'est pas mise en avant mais ne peut être rejetée.
  - L'alimentation et la gestion de **l'élevage des cochons** est discutée.
- **De nouvelles questions** émergent :
  - Quel est l'impact de la **fertilisation des plantes** au fumier animal sur les ratios Sr/Ca et Ba/Ca ?
  - Peut-on différencier **chèvres** (brouteurs) et **moutons** (pâturiers) ?
- L'étude de la **variabilité inter-individuelle** chez les humains apporte une vision complémentaire aux autres indicateurs :
  - Pas de différences en Sr/Ca ni Ba/Ca **entre les sexes** avant 8-9 ans (ni après ?)
  - Des différences **entre les sites** pour l'os (signature du sol ?) mais pas pour l'émail
  - L'identification d'**individus atypiques** à partir des valeurs de l'os (GLN 221B) ou de l'émail (e.g. GLN 207A et 207B, Mon 99-520 et 99-548A, BMT H14) → statuts sociaux particuliers, allaitement, origine exogène ?
- L'identification des **modifications au cours du temps** par l'observation des **variations intra-profil** :
  - Signal d'**allaitement et modalités de sevrage** chez les humains et les animaux → stratégie de gestion du bétail

- Différence de variabilité entre les espèces → des **régimes alimentaires plus ou moins variés** (vaches et moutons vs chèvres vs cochons ?)
- **Modifications alimentaires cycliques** chez les humains → avec les saisons ?

**Perspectives** – de nombreuses applications sont possibles à partir de ces résultats, par exemple :

- Croisement avec les **nouvelles données**  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  pour discuter des changements alimentaires au regard de la mobilité, notamment en termes de cyclicités ou d'origines exogènes.
- Recalage précis de l'âge en **histologie** (lames minces aisément réalisables, avec profils d'ablation visibles).
- Création d'un **seuil de détection** des modifications biogéniques et **caractérisation statistique** de la variabilité pour l'identification semi-automatisée des modifications intra-profils.
- Analyse d'**autres éléments traces** mesurées par l'ablation laser (e.g. Zn, Fe, Pb).
- Étude approfondie des **concentrations U (et Mn)** : R. Joannes-Boyau et collaborateurs (2019) ont montré que l'U est plus diffusif, notamment au niveau de la jonction émail dentine. Les corrélations pourraient-elles parfois s'avérer moins claires que celles identifiées au sein de certains profils ? → mapping de certaines dents douteuses pour voir l'étendue de la diagénèse ?
- Meilleure **caractérisation** de la **diversité des ressources alimentaires** → ressources aquatiques néolithiques, ressources végétales (dont céréales) et impact de la fertilisation, différences entre ruminants et non-ruminants (dont bovidés vs cochons), différences entre brouteurs et pâtureurs (dont chèvres et moutons).
- Étude des **modalités de sevrage des humains** au Néolithique en lien avec le système économique et les stratégies de subsistance.
- Étude des **modalités de sevrage du bétail** pour discuter du **type d'exploitation pastorale** (laitière, bouchère, mixte) → nécessaire détermination précise des dents et de leur période de formation (voir par exemple les travaux sur les isotopes stables de M. Balasse 2003 ou sur le Sr isotopique de C. Gerling et collaborateurs 2017, N. Lazzarini et collaborateurs 2021).

## Chapitre 9. Analyses complémentaires

En supplément des analyses biochimiques menées sur les humains et les animaux, nous avons souhaité élargir le champ de recherches à d'autres disciplines afin de répondre à des questions spécifiques en lien avec notre étude. Les premières concernent les régimes alimentaires, les secondes les relations avec l'extérieur. D'une part, nous voulions savoir si l'étude de la texture de la micro-usure dentaire permettrait d'apporter des éléments supplémentaires à la reconstitution du régime alimentaire des humains et à la variabilité interindividuelle. Cette démarche portait sur plusieurs sites de notre corpus. D'autre part, nous désirions savoir s'il était possible de connaître la provenance des haches en roche tenace de Gurgy « Les Noisats » ainsi que l'origine de la matière première composant la céramique du même site, voire des vases eux-mêmes en tant qu'objets finis. L'étude de la composition de ces objets et de leur facture permet en outre d'accéder à des aspects culturels et techniques, comme cela a été fait pour plusieurs autres sites de la vallée de l'Yonne (cf. Chap3).

Ces approches offriraient, nous l'espérons, de nouveaux éléments à mettre en relation avec nos indicateurs alimentaires et de mobilité. Pour ce faire, nous avons fait appel à la compétence de spécialistes ; les résultats issus de ces collaborations sont présentés ci-après.

### **I. Analyse texturale des micro-usures dentaires (DMTA) – collaboration A. Souron et M. Le Luyer**

---

L'analyse texturale de la micro-usure dentaire en trois dimensions (DMTA pour *Dental Microwear Texture Analysis*) a été réalisée sur 20 secondes molaires permanentes afin de mieux définir le type d'aliments consommés par les humains. Ce travail a été réalisé en collaboration avec A. Souron et M. Le Luyer, tous deux alors post-doctorants à PACEA (Université de Bordeaux). Les résultats de ce travail ont été **présentés au World Archaeological Congress à Kyoto** (Rey *et al.* 2016). Nous proposons ici de les interpréter au regard de nos résultats biochimiques afin d'affiner la discussion sur les comportements alimentaires des groupes humains étudiés. Les principes méthodologiques et le type d'analyse fractale multi-échelle « *Scale Sensitive Fractal Analysis* » (SSFA) utilisé ici sont décrits par ailleurs (Calandra et Merceron 2016 ; Schmidt *et al.* 2019 ; Scott *et al.* 2006 ; Ungar *et al.* 2003). Nous en présentons les grandes lignes ci-dessous.

### I.1. Réalisation des empreintes occlusales et analyses

Afin de conserver l'information avant destruction des dents dans le but d'étudier ultérieurement la texture de la micro-usure dentaire de cet échantillon populationnel, nous avons réalisé au laboratoire PACEA, avec l'aide d'A. Souron, des **empreintes de la surface occlusale** d'un maximum de **molaires prélevées**. Sur l'ensemble des dents humaines sélectionnées pour les analyses isotopiques et élémentaires, toutes celles qui présentaient une surface occlusale suffisamment bien conservée pour pouvoir analyser la texture de la micro-usure dentaire ont été moulées en suivant le protocole de R.S. Scott et collaborateurs (2006). Les dents cassées, cariées, abimées par des atteintes taphonomiques ou trop usées ont été exclues. Les surfaces occlusales ont été nettoyées à l'acétone afin d'éliminer les particules exogènes et poussières déposées. Les empreintes des surfaces occlusales ont été réalisées avec un élastomère polyvinylsiloxane Coltène® President MicroSystem Regular Body sur 31 dents – essentiellement des secondes molaires permanentes (Figure C9. 1 ; Annexe A5). Pour chaque dent, trois empreintes ont été réalisées successivement afin de retirer progressivement les éventuels débris restant coincés dans les fissures de l'émail. Les analyses sont réalisées sur la troisième empreinte, la plus nette.



Figure C9. 1 : Réalisation d'une empreinte de la surface occlusale d'une seconde molaire permanente avec un élastomère polyvinyle Coltène®. Photographie L. Rey.

Parmi les empreintes réalisées, 20 ont été sélectionnées pour être analysées à titre préliminaire et dans le but de les comparer avec les résultats biochimiques de notre travail. Cette étape a été effectuée par M. Le Luyer après un premier test réalisé ensemble à Bordeaux (PACEA – UMR 5199) lors d'une formation à la microscopie confocale. Les moulages ont été découpés pour sélectionner la facette 9 préservée (Figure C9. 2 ; Fiorenza *et al.* 2011), d'après le protocole en vigueur (Scott *et al.* 2006 ; Ungar *et al.* 2003, voir Calandra et Merceron 2016 pour une synthèse de la méthode). Les données de texture de micro-usure en 3D ont été produites à l'aide d'un microscope confocal Sensofar NEOX et les surfaces ont été traitées avec le logiciel SensoMap pour éliminer les entités non-microscopiques. Quatre scans jointifs ont été obtenus pour chaque surface, représentant une aire totale de 250x333 $\mu$ m avec un objectif 100x. Les **variables de micro-usure**, permettant de caractériser la texture de surface dentaire, ont été calculées de façon semi-automatisée à l'aide d'un logiciel d'analyse fractale multi-échelle (ToothFrax). Ces variables, de même que les principes généraux de la méthode et les résultats, sont brièvement décrits ci-après.

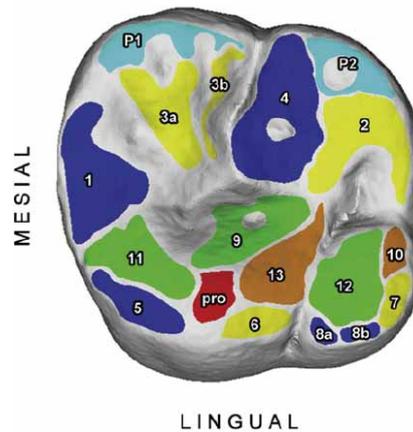


Figure C9. 2 : Identification des facettes d'usure. D'après Fiorenza *et al*, 2011.

### I.2. Le principe en bref

La consommation des aliments produit à la surface de l'émail dentaire des traces microscopiques de formes et de tailles variables **selon le type d'aliments**, leurs propriétés physiques et la présence de **particules dures** qu'ils contiennent (telles que les phytolithes riches en silice). Ces traces modifient la texture de la surface des différentes facettes occlusales des dents et sont peu impactées par la forme des dents, des forces masticatoires et de la microstructure de l'émail. Leur étude permet d'identifier des différences subtiles dans la composition du **bol alimentaire des dernières semaines de vie** d'un individu (Calandra et Merceron 2016 ; El Zaatari et Hublin 2014 ; Schmidt *et al.* 2019). Il est ainsi possible de distinguer par exemple des populations de chasseurs-cueilleurs au régime mixte composé d'aliments non transformés, d'agriculteurs consommant majoritairement des céréales (écrasées en farines sur meule de pierre notamment) ou d'éleveurs, mangeurs de viande (Schmidt *et al.* 2019). Ces analyses viennent en complément de l'étude biochimique, ne reflétant **pas les mêmes périodes de vie ni les mêmes aspects de l'alimentation** (voir par exemple Davis et Pineda-Munoz 2016). Notamment, là où la composition biochimique des tissus peut mettre en évidence la catégorie des ressources consommées (proportion de viande vs part végétale par exemple), la DMTA témoigne plutôt du **type de préparations culinaires** et des **propriétés physiques et texturales des aliments** ingérés (produits plus ou moins transformés, aliments durs ou mous, coriaces ou non, plus ou moins abrasifs, etc.).

### I.3. Les paramètres fractals des textures dentaires mesurés

Les **variables (fractales) de micro-usure** mesurées ici pour caractériser la texture des surfaces dentaires sont la **complexité** (**Asfc** pour *Area-scale fractal complexity*), l'**anisotropie** (**epLsar** pour *exact proportion Length-scale anisotropy of the relief*) et l'**hétérogénéité** (**HAsfc** pour *Heterogeneity of the Area-scale fractal complexity* ; Calandra et Merceron 2016 ; Scott *et al.* 2006).

- La **complexité** (ou **Asfc**) quantifie les variations de rugosité de surface : des stries et ponctuations de différentes tailles indiquent une forte complexité, souvent liée à la consommation d'aliments durs et craquants (fruits, noix, par exemple), particulièrement abrasifs comme des produits non transformés comportant des particules de terre ou de sable ou comme certains produits transformés incluant des particules exogènes telles que les céréales broyées sur meule de pierre par exemple. Chez l'homme moderne, la complexité varie généralement entre 0,5 et 3 (Schmidt *et al.* 2019) ; des valeurs supérieures ont été mesurées (El Zaatari et Hublin 2014 ; Syrikova *et al.* 2021a) et reliées à un impact taphonomique au-delà de 4,5 (Syrikova *et al.* 2021b).
- L'**anisotropie** (ou **epLsar**) mesure le type d'orientation des traces : une surface présentant une orientation préférentielle des micro-usures est fortement anisotrope et correspond généralement à une alimentation coriace (fibreuse, élastique et homogène), telle que la viande et autres produits non transformés (feuilles, racines). Une anisotropie élevée implique généralement un mouvement masticatoire unidirectionnelle et répétitif, à l'inverse de la mastication d'aliments peu coriaces dont les mouvements de la mâchoire peuvent s'effectuer selon plusieurs directions. Chez l'humain, on considère généralement des valeurs élevées autour de 0,0035 et des valeurs faibles en dessous de 0,003 (Schmidt *et al.* 2019).
- L'**hétérogénéité** (ou **HAsfc**) représente la variation de complexité de texture entre différentes zones de la facette : elle se mesure à différentes échelles en divisant la surface en plusieurs aires de nombre variable (le plus souvent 9 ou 81 – ici les mesures ont porté sur 16 aires). Une forte hétérogénéité est marquée par de grandes différences entre les zones observées et indique une importante diversité des particules provoquant l'usure.

La Figure C9. 3 montre schématiquement différents types de textures de micro-usure surfacique (Scott *et al.* 2006 ; Scott *et al.* 2005).

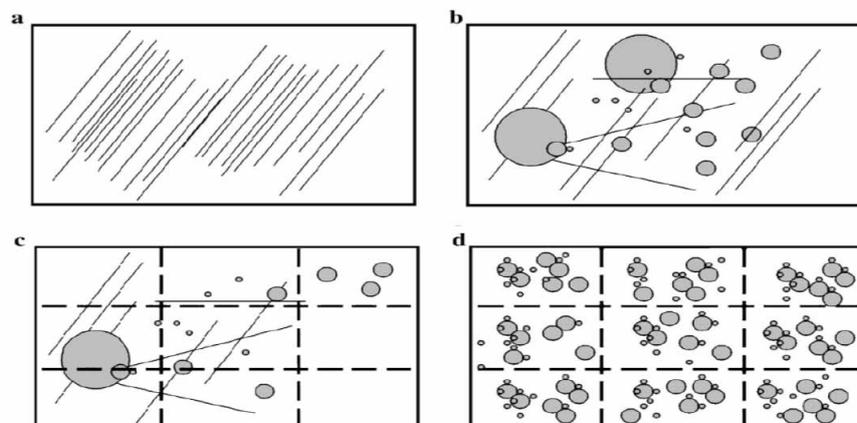


Figure C9. 3 : Surfaces hypothétiques schématiques de micro-usure montrant une texture a. anisotrope, b. complexe, c. hétérogène et d. homogène. D'après Scott *et al.*, 2005, 2006.

### I.4. Chez l'homme moderne, des textures variables pour des pratiques alimentaires différentes

Une étude récente de C.W. Schmidt et collaborateurs (Schmidt *et al.* 2019) compare les données de texture des micro-usures dentaires entre plusieurs populations de chasseurs-cueilleurs, d'agriculteurs et d'éleveurs à travers le globe et révèle des variations plus ou moins récurrentes selon les types de régimes alimentaires (Figure C9. 4). Globalement, les **chasseurs-cueilleurs** ont une plus forte complexité et une plus faible anisotropie que les agriculteurs et les éleveurs (Figure C9. 4 et Figure C9. 5 ; Schmidt *et al.* 2019). Ce type de micro-usures est sans doute dû aux particules de terre et de sable incluses dans leur alimentation peu transformée (forte complexité), vraisemblablement composée d'aliments moins coriaces, de plus de fruits sauvages par exemple (faible anisotropie). Les **agriculteurs** ont en général une complexité sensiblement plus faible et une anisotropie relativement élevée comparé aux chasseurs-cueilleurs, en raison de la consommation d'aliments coriaces et abrasifs tels que les produits céréaliers et la présence de particules exogènes issues du meulage (Schmidt *et al.* 2019 ; Scott *et al.* 2006). En revanche, si les valeurs d'anisotropie mesurées chez des agriculteurs et des éleveurs sont relativement similaires, la complexité chez les agriculteurs est plus forte que celle des éleveurs, ces derniers consommant majoritairement de la viande assez peu abrasive et impactant peu l'émail dentaire.

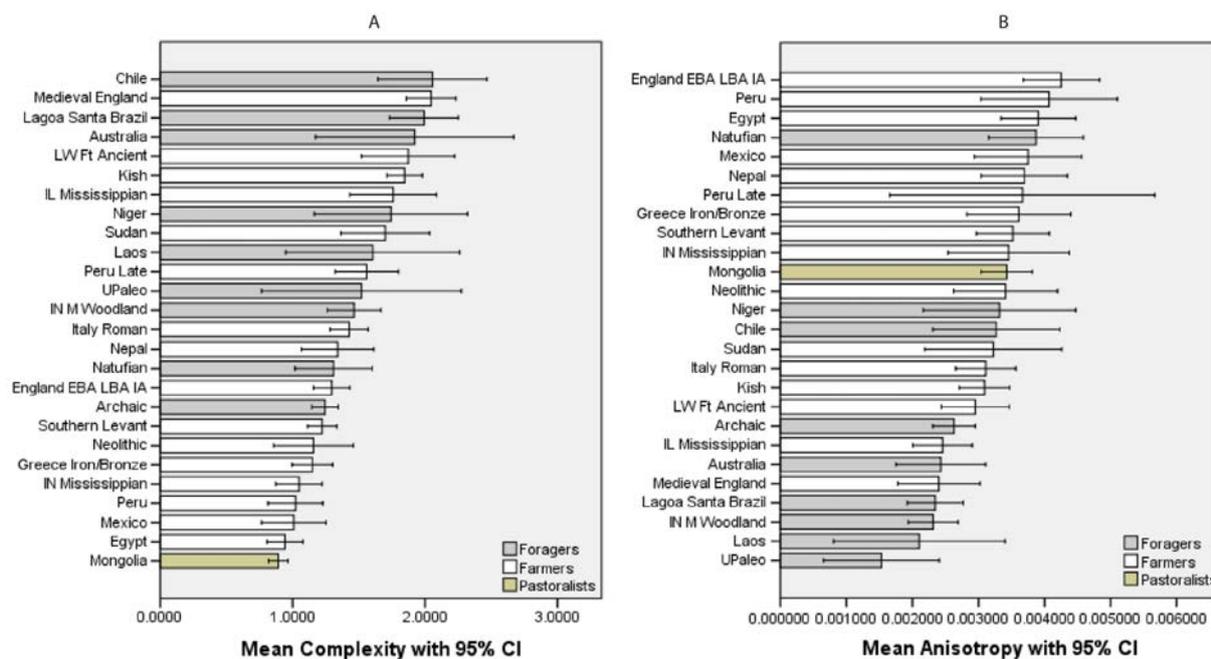


Figure C9. 4 : Diagramme de Schmidt et collaborateurs (2019) représentant les valeurs moyennes de complexité (A ; Asfc) et d'anisotropie (B ; epLsar) pour différentes populations de chasseurs-cueilleurs (gris), d'agriculteurs (blanc) et d'éleveurs (beige). La plupart des groupes de chasseurs-cueilleurs ont des valeurs de complexité élevées et des valeurs d'anisotropie faibles, alors que les agriculteurs et les éleveurs ont des valeurs de complexité plus faibles et d'anisotropie plus élevées. Certains groupes d'agriculteurs ont toutefois des valeurs de complexité élevées.

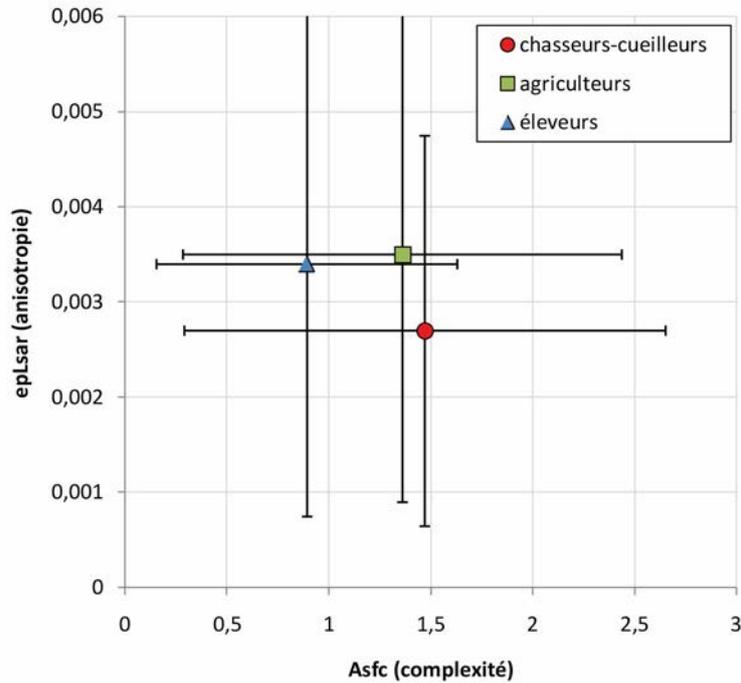


Figure C9. 5 : Répartition des valeurs moyennes de complexité et d'anisotropie entre les populations de chasseurs-cueilleurs, d'agriculteurs et d'éleveurs d'après les données répertoriées par Schmidt *et al.*, 2019 (table 2). Les barres d'erreurs représentent l'écart-type autour de la moyenne. Si des tendances sont observables, il est clair que les données se recoupent.

Néanmoins, **peu de données sont disponibles** quant à ce type de régimes, d'une part (notamment celui des éleveurs), et les études **concernant l'homme moderne** plus généralement, d'autre part, sont encore **assez rares**, portant le plus souvent sur la **comparaison entre chasseurs-cueilleurs et agriculteurs**, à savoirs sur un type de pratiques alimentaires plutôt que sur la composition de la diète. **Peu d'informations** sont disponibles sur le type de micro-usure que peut provoquer la consommation des mêmes denrées préparées différemment et en particulier sur **l'impact d'un type de préparation** par rapport à un autre (hormis l'usage de la meule qui augmenterait la complexité de texture). Peu d'informations notamment concernant les **produits transformés** comme les bouillies, les aliments cuits ou séchés de différentes façons, ou encore sur la consommation de produits laitiers ou de poisson (ces derniers qui induiraient a priori une faible complexité et une faible anisotropie). De surcroît, **très peu de données comparatives** existent pour le **Néolithique**, les seules données disponibles en France concernent la culture Cerny dans le Bassin parisien issu du mémoire de Master 2 de P. Syrikova (Syrikova inédit) récemment présentées aux Journées de la Société d'Anthropologie de Paris (Syrikova *et al.* 2021a), auxquelles s'adjoignent désormais les données de notre étude.

En outre, la méconnaissance, somme toute, des diètes et des pratiques alimentaires au Néolithique s'ajoutent à l'indigence des données expérimentales qui permettraient d'exploiter plus finement ces données de texture afin de préciser les types de préparations et d'aliments consommés. Néanmoins, les résultats que nous présentons ci-après seront comparés aux données connues dans la région et plus

largement dans d'autres contextes et nous tenterons ici de proposer des interprétations au regard des résultats des analyses biochimiques.

## I.5. Résultats et interprétations

### I.5.a. Variabilité générale

Les variables ont été mesurées et calculées par M. Le Luyer. Les résultats sont donnés dans le Tableau C9. 1 et représentés graphiquement sur la Figure C9. 6. L'analyse texturale des micro-usures dentaires montre globalement une **distribution homogène** pour l'ensemble des sites, notamment pour les individus entourés en pointillé sur le graphique (B), avec une **faible complexité** et une **faible anisotropie**. Cependant, certains échantillons se distinguent de cette variabilité principale (C), avec une plus grande complexité, couplée à une très faible anisotropie, qui pourrait témoigner d'une alimentation plus dure et moins coriace ou d'atteintes taphonomiques (cf. *infra*).

ID	Groupe	Sexe	Age	Asfc	epLsar	Hasfc: 4x4
GLN 221B		M	>30	0.70	0.00170	2.41
GLN 241		M	20-49	1.45	0.00239	1.99
GLN 248		F	>40	1.02	0.00218	1.00
GLN 249		F	>20	3.01	0.00075	0.93
GLN 257		M	>30 (<50*)	1.96	0.00041	0.98
GLN 302		M	>50	0.97	0.00255	1.39
GLN 315		F	>20	1.20	0.00199	0.63
GLN 317		M	>30	1.60	0.00211	0.95
Mon 99-521	A	M	>20	0.73	0.00214	0.69
Mon 04-94A	C	M	>30	0.83	0.00253	1.73
Mon 04-94B	C	M	>30	1.44	0.00138	1.32
Mon 04-104	C	F	>15	1.77	0.00135	0.78
Mon 04-217B	C	F	>30	1.30	0.00202	1.46
CHI-Pat 2	B	M	30-39	3.25	0.00119	1.02
CHI-Pat 3	B	F	30-49	4.27	0.00139	3.63
CHI-Pat 4	B	F	>25 (<50*)	0.84	0.00144	4.55
CHI-Pat 7	A	I	15-19	1.10	0.00342	0.82
CHI-Pat 9	A	I	>20 (<50*)	1.11	0.00194	1.10
BMT H14	B	?	?	1.07	0.00176	1.02
BON-i2	2	?	?	5.25	0.00118	5.05

**Tableau C9. 1 : Résultats de l'analyse texturale des micro-usures dentaires menées sur 20 sujets humains en collaboration avec A. Souron et M. Le Luyer. Les paramètres fractals observés (la complexité Asfc et l'anisotropie epLsar) sont décrits dans le texte.**

En moyenne, le **groupe B** présente une complexité de  $1,14 \pm 0,31$  et une anisotropie de  $0,0021 \pm 0,0006$  alors que le **groupe C** présente une anisotropie inférieure, proche de  $0,0010 \pm 0,004$  et une complexité plus élevée et beaucoup plus variable autour de  $3,55 \pm 1,26$ . L'hétérogénéité texturale de ces deux groupes est également différente, avec une moyenne de  $1,46 \pm 0,99$  pour le groupe B et une moyenne de  $2,32 \pm 1,91$  pour le groupe C. Les différences entre ces deux groupes sont statistiquement

significatives pour les deux variables de complexité et d'anisotropie ( $p < 0,05$  d'après le test U de Mann-Whitney).

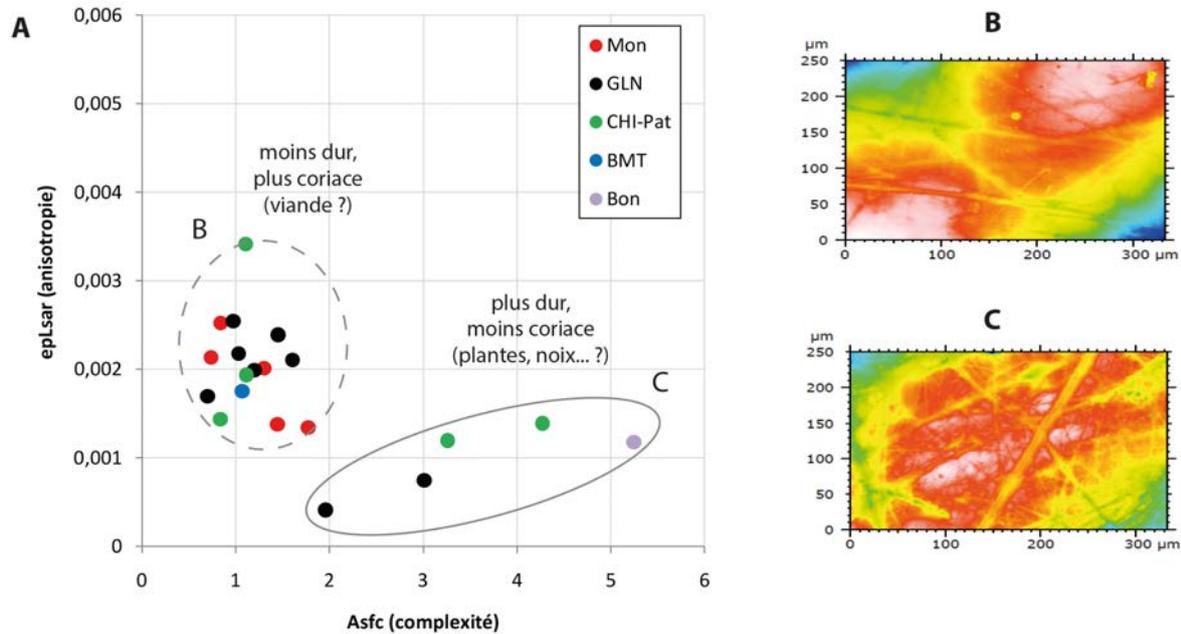


Figure C9. 6 : (A) Représentation graphique des données d'anisotropie (epLsar) et de complexité (Asfc) des micro-usures dentaires mesurées à partir des empreintes occlusales des dents analysées dans ce travail. (B) Représentation par microscopie confocale d'une surface plus anisotrope relativement à (C) une surface plus complexe. Ces deux types d'usures sont caractérisées par deux groupes distincts sur le graphique A.

Il est possible que les valeurs de **plus forte complexité** ( $> 3$  ?) soient aberrantes et relèvent plutôt d'un **signal taphonomique**. En effet, une étude récente sur des échantillons néolithiques du Bassin parisien a montré une forte corrélation entre altérations taphonomiques présumées et complexité élevée (Syrikova *et al.* 2021b). Au delà de 4,5, la complexité dépasse les valeurs attendues pour des populations humaines (hors régions côtières ou arides). Ainsi, les surfaces dentaires du groupe C pourraient faire l'objet d'altérations *post-mortem* masquant le signal réel de l'alimentation, en particulier pour les plus fortes valeurs ; toutefois, une seule est supérieure à 4,5. Par ailleurs, ces échantillons montrent également une grande hétérogénéité, supérieure à celle du groupe B, qui pourrait constituer un indice taphonomique. Si nous ne sommes pas en mesure de conclure en l'état actuel des données, la comparaison avec des résultats de contextes similaires (a priori exempts d'échantillons taphonomiques) permet néanmoins d'envisager qu'ils puissent bien refléter la micro-usure alimentaire, hormis peut-être l'échantillon Bon-i2 (cf. Figure C9. 8, p.504 ; I.5.d).

Les valeurs du **groupe B** semblent refléter une **alimentation peu abrasive** comme la viande par exemple, mais également **assez peu coriace**, pouvant témoigner d'aliments très transformés (viande bouillie ou séchée ?) ou d'autres ressources très peu abrasives comme ce pourrait être encore le cas pour le poisson ou les produits laitiers (cf. encadré), bien qu'aucune donnée ne soit disponible à ce sujet. En tout état de cause, la double combinaison « **faible complexité et faible anisotropie** » est

inconnue à ce jour et ne reflète ni les schémas habituellement décrits pour les agriculteurs, ni ceux des chasseurs-cueilleurs (cf. I.4). De surcroît, la **grande homogénéité des résultats** de ce groupe est particulièrement notable.

Pour le **groupe C** en revanche, des aliments plus durs ont pu entrer dans la composition des repas. La plus forte complexité couplée à une faible anisotropie rapproche ces individus des populations de chasseurs-cueilleurs qui incluent dans leur régime des aliments non transformés (ou peu) plus riches en particules exogènes.

### I.5.b. Croisement avec les données biochimiques

En considérant les **données individuelles**, nous avons cherché à croiser les **variables texturales de la micro-usure** d'une part (Asfc, epLsar et HASfc) et les **variables biochimiques** d'autre part ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  de l'os et de la dentine, Sr/Ca et Ba/Ca de l'émail) : bien qu'aucun lien ne soit attendu entre ces différentes variables, une éventuelle corrélation pourrait mettre en évidence des disparités individuelles impliquant aussi bien le type de régime alimentaire que le type de pratique. Ici, **aucune corrélation** n'est observée ( $p > 0,05$  d'après les tests de corrélation de Spearman) et les croisements ne seront pas discutés plus avant. Néanmoins, ces résultats **ne reflètent pas les mêmes périodes de vie** : la micro-usure témoigne des traces laissées par les aliments au cours des dernières semaines de vie des individus (voire quelques jours avant la mort) alors que les valeurs isotopiques et élémentaires mesurées dans les os et les dents constituent une moyenne enregistrée sur un temps plus long, plusieurs années à la fin de la vie ou pendant l'enfance selon que les analyses portent sur l'os ou les dents (cf. Chap2.III). D'autre part nous l'avons vu, les **données de textures** renseignent sur les **propriétés physiques des aliments**, alors que la **composition isotopique** renvoi plutôt à la **nature des ressources**, à leur propre composition biochimique. Ces deux aspects doivent donc être considérés **en regard l'un de l'autre et de façon complémentaire**, à l'échelle globale.

Ainsi, en combinaison des données biochimiques qui semblent indiquer pour ces populations un niveau trophique particulièrement élevé, avec une alimentation probablement **riche en viande ou en produits animaux** plus généralement, incluant possiblement **des produits laitiers ou du poisson**, ces données de la DMTA semblent tout à fait compatibles. Elles peuvent indiquer une faible part des ressources végétales riches en phytolithes, dont les particules liées au broyage sur meule de pierre ne sont de surcroît pas représentées, et semblent préciser que ces ressources aient pu être **très préparées (bouillies, viandes séchées finement, aliments fermentés)** induisant une faible complexité et une faible anisotropie (cf. encadré). Si la consommation de poisson et les produits laitiers, en théorie très peu abrasifs, ne sont pas mis en avant par les données archéologiques, leur consommation a pu entrer dans la composition de la diète de façon plus ou moins occasionnelle (notamment les produits laitiers ?) : les résultats biochimiques comme les données de la DMTA, s'ils ne peuvent le certifier, soulignent cette possibilité.

### Sur les préparations alimentaires

Parmi différents types de transformations alimentaires, le broyage, la cuisson (notamment bouillie), la fermentation ou le séchage peuvent rendre les aliments plus mous, moins coriaces, moins abrasifs. Or certaines préparations comme la fermentation ou le séchage rendent les nutriments plus concentrés voire mieux assimilables, à l'inverse de la cuisson qui induit des pertes nutritionnelles (Fofana *et al.* 2017 ; Husson *et al.* 2015), et peuvent en cela influencer les ratios isotopiques. Des variations isotopiques en fonction des préparations culinaires ont déjà été enregistrées mais leur impact sur les consommateurs après ingestion reste mal connu (cf. Chap2). B. Doering a notamment montré que la fermentation du poisson pouvait augmenter le  $\delta^{15}\text{N}$  (Doering 2019). Par ailleurs, la fermentation est un procédé alimentaire qui permet d'augmenter la teneur en protéines en les rendant plus digestes (plus solubles et mieux assimilables ; Fofana *et al.* 2017 ; Montemurro *et al.* 2019 ; Sozer *et al.* 2019 ; Tangyu *et al.* 2019). L'action des micro-organismes responsables de la fermentation augmente la composition et la biodisponibilité en acides aminés (Tanguy *et al.* 2019). Autant de facteurs pouvant faire varier sensiblement la signature biochimique des consommateurs, ajoutant des incertitudes à la reconstitution des régimes alimentaires mais permettant également et surtout de discuter ceux-ci plus en profondeur.

Si les processus de transformations alimentaires sont difficiles à mettre en évidence en archéologie, certains procédés comme la fermentation ont connu un regain d'intérêt depuis quelques années (e.g. Craig 2021 ; Liu *et al.* 2019 ; Liu *et al.* 2018). L'analyse de résidus piégés dans les poteries a notamment révélé que la fermentation et autres transformations culinaires étaient déjà utilisées au Néolithique (Fuller et Gonzalez Carretero 2018 ; Hendy *et al.* 2018 ; Sibbesson 2019 ; cf. Chap1.I.3.b). D'aucuns suggèrent d'ailleurs que la poterie pourrait avoir eu un rôle majeur dans l'évolution des pratiques culinaires, ayant pu servir très tôt à fermenter des aliments dans l'objectif de les stocker, dont le poisson dans les sociétés tournées vers les ressources aquatiques, mais également les produits laitiers et autres denrées (Craig 2021). En effet, tous les aliments peuvent être fermentés (céréales et légumineuses, fruits, oléagineux et autres végétaux divers, laitages, poissons et viandes) entrant dans la confection de préparations variées (boissons alcoolisées, pains et galettes, yaourts et fromages, « pickles », mixtures et autres préparations fermentées). La fermentation permettant non seulement d'augmenter la qualité nutritionnelle mais également de modifier les propriétés organoleptiques – en améliorant par exemple le goût – et de prolonger la durée de conservation, elle procure de nombreux avantages qui ont pu être recherchés très tôt dans les sociétés néolithiques (et même avant).

Bien sûr, il est difficilement concevable que la totalité de l'alimentation ait pu subir un tel traitement et, si la fermentation de certains aliments a été pratiquée, elle ne l'a sans doute pas été suffisamment pour augmenter substantiellement les valeurs isotopiques des humains. Néanmoins, il n'est pas

impensable que la majorité des aliments aient été très transformés selon d'autres procédés comme des bouillies par exemple – divers types de préparations ont pu se compléter –, comme le suggèrent les résultats de la DMTA. L'impact des différents types de préparations alimentaires (cuissons diverses, séchage) sur les valeurs isotopiques des consommateurs est assez mal connu mais a pu jouer, même très modérément, sur la signature isotopique des humains (cf. Chap2).

Il est difficile d'estimer la part **des ressources sauvages non transformées** à partir des données de texture de l'usure dentaire. D'une part, la faible complexité tend plutôt vers le schéma des agriculteurs-éleveurs (cf. I.4). Certaines denrées sauvages comme des racines ou tubercules, coquillages ou mollusques par exemple, comprendraient probablement une part non négligeable de particules exogènes induisant une forte complexité (Schmidt *et al.* 2019). D'autre part, la faible anisotropie se rapproche du schéma des chasseurs-cueilleurs. Des aliments mous et peu coriaces comme des fruits (poires sauvages, prunelles, baies de sureau, cenelles, cynorrhodons, etc. ; cf. Bouby *et al.* 2018) pourraient très bien être consommés. Les ressources sauvages sont par ailleurs très peu représentées par les résultats biochimiques ou les données archéologiques (cf. Chap1.II.5.a), mais elles sont aussi plus difficiles à mettre en évidence pour la sphère végétale.

En outre, étant donné que la micro-usure dentaire reflète la toute fin de la vie de ces humains, il est possible que leur **alimentation ait été spécifique pour répondre à des besoins de personnes malades et mourantes**, différente de celle des bien-portants. Néanmoins, il est peu probable que tous ces individus soient morts des suites d'une maladie, ou de blessures par exemple, les rendant trop faibles pour consommer une alimentation normale – et aucune corrélation n'a été mise en évidence avec l'âge au décès. Certains ont pu mourir subitement, ou devaient encore être en capacité de s'alimenter comme le reste du groupe. Si la question peut se poser pour quelques individus du groupe C, la forte homogénéité du reste de l'ensemble de ces sujets, quelque soit le site (cf. I.5.c) va plutôt dans le sens d'une micro-usure reflétant l'alimentation commune à tous.

### I.5.c. Variabilité individuelle

Alors que des disparités isotopiques ont été relevées entre les sexes et les sites (cf. Chap5), **aucune différence significative** n'est observée en termes de complexité ou d'anisotropie de texture **entre les sites** (Figure C9. 6 ;  $p > 0,4$  d'après le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis) ni **entre les hommes et les femmes** (Figure C9. 7 ; tous sites considérés ensembles  $p > 0,4$  d'après le test non-paramétrique de Mann-Whitney). La Figure C9. 7b montre la répartition graphique des valeurs de complexité et d'anisotropie entre les sexes pour chaque site. Bien que les effectifs soient plutôt faibles au sein de chaque groupe, aucune tendance ne semble observable en fonction du sexe intra-site. Si des tests statistiques plus robustes, incluant l'ensemble des variables et adaptés à des petits échantillons permettraient de préciser ce résultat, la simple observation graphique et les tests basiques effectués ne

révèlent aucune distinction entre ces groupes. L'analyse statistique n'a pas été portée plus avant dans le cadre de ce travail.

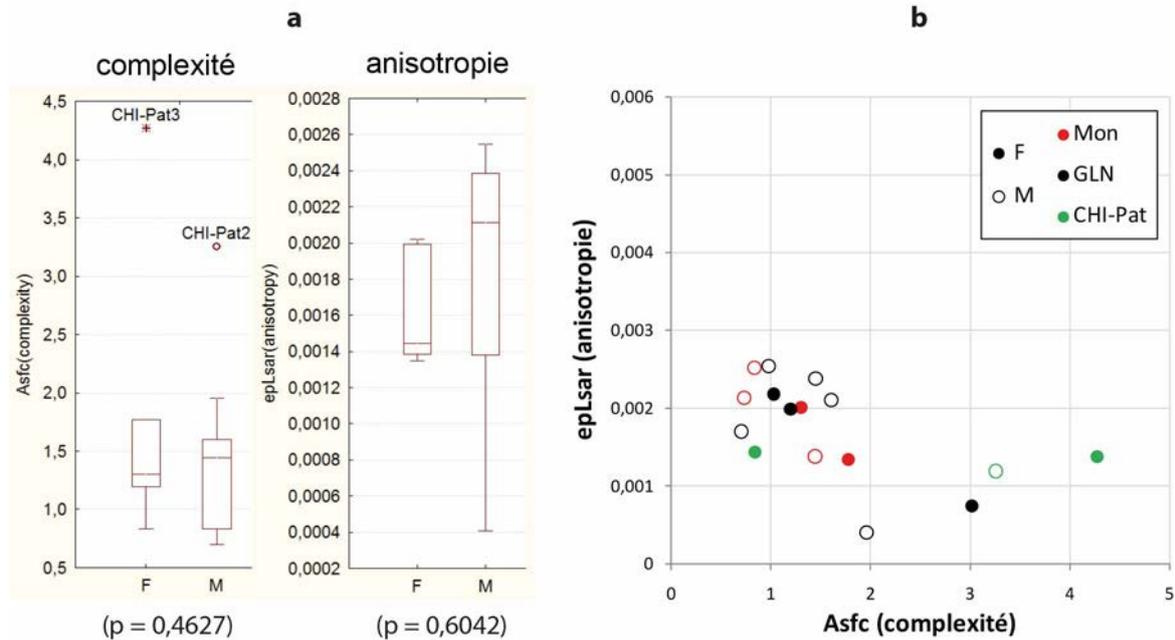


Figure C9. 7 : (a) Boîtes à moustaches représentant la médiane et la dispersion (premier et troisième quartile ; minimum et maximum) des valeurs de complexité (Asfc) et d'anisotropie (epLsar) des hommes et des femmes tous sites confondus et (b) répartition des valeurs de complexité et d'anisotropie entre les sexes pour chaque site. La valeur p du test de Kruskal-Wallis donnée sous les boîtes à moustaches indique qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les sexes (a).

Ce résultat pourrait indiquer que tous ces humains aient consommé des **aliments préparés de la même façon**, bien que quelques divergences en termes de ressources aient pu exister, comme en témoignent les données isotopiques. Tout du moins, l'alimentation a impactée de façon similaire la texture de la micro-usure dentaire de l'ensemble des individus analysés ici sur le micro-territoire de la vallée de l'Yonne, sans distinction entre les groupes considérés, alors même qu'une certaine variabilité isotopique a été mise en évidence entre les sites, d'une part et, pour GLN et Mon notamment, entre les sexes, d'autre part.

Au sein de chaque site, s'il est difficile d'interpréter les résultats avec un si faible effectif, les résultats seront discutés au regard de l'ensemble des autres variables considérées dans ce travail dans la section correspondante à chaque site (cf. Chap10).

#### I.5.d. Comparaison avec la population Cerny

Lorsque l'on compare ces résultats avec ceux obtenus pour la population Cerny dans le Bassin parisien (Syrikova inédit ; Syrikova *et al.* 2021a), on observe tout d'abord une **plus grande homogénéité** dans la microrégion de la vallée de l'Yonne, ainsi qu'une **complexité et une anisotropie nettement inférieures** (Figure C9. 8). À notre connaissance, **toutes les données connues pour le Néolithique français** sont représentées sur ce graphique.

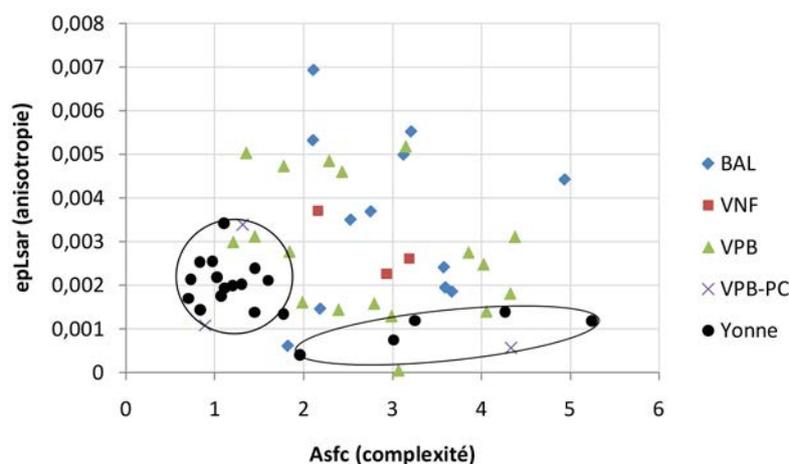


Figure C9. 8 : Comparaison des résultats de la DMTA des sujets de la vallée de l’Yonne (microrégion) avec les individus Cerny des sites de Balloy « Les Réaudins » (BAL), Vignely « La Noue Fénard » (VNF) et Vignely « La Porte aux Bergers » (VPB). Les croix représentent trois individus de comparaison post-Cerny (VPB-PC). Données Cerny issues du mémoire de Master 2 de P. Syrikova (2020).

Pour la **population Cerny**, les données de la DMTA indiquent la consommation d’**aliments durs et coriaces**, probablement issus des produits de l’agriculture, incluant des éléments abrasifs induits par le meulage par exemple, ou de produits peu transformés, potentiellement issus du monde sauvage également<sup>1</sup>. La consommation de viande est aussi envisagée, mais serait moins transformée que pour les individus de l’Yonne, couplant à l’anisotropie élevée une complexité plus forte. Leur usure dentaire, à l’échelle microscopique comme macroscopique, rappelle à la fois celles de populations d’agriculteurs et de chasseurs-cueilleurs. Les **résultats isotopiques** indiquent une distribution des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  globalement **dans la variabilité de celle de l’Yonne**, en particulier de celle du site Cerny de **Chichery « sur les Pâturaux »** (Cheung *et al.* 2021 ; Cheung *et al.* 2020 ; cf. Chap5.III.3). La différence en  $\delta^{15}\text{N}$  entre les humains et la faune semble cependant inférieure à celle observée à GLN et Mon (sauf groupe B), indiquant un régime probablement moins riche en produits animaux. Ces données, récemment publiées (Cheung *et al.* 2021) devront être plus amplement comparées avec celles de l’Yonne, site par site et espèce par espèce (étude en cours).

Concernant la DMTA, la **variabilité du Cerny** est considérablement **plus grande** que celle de l’Yonne, impliquant des pratiques plus variées. D’ailleurs, des **disparités** ont été observées entre différents groupes d’individus. Tout d’abord, les sujets inhumés dans la **nécropole non monumentale** de Vignely « La Porte aux Bergers » (VPB) présentent une complexité moindre, se rapprochant légèrement de l’Yonne, par opposition aux nécropoles monumentales (Vignely « La Noue Fénard » et Balloy « Les Réaudins » soit VNF et BAL ; Syrikova *et al.* 2021a). Certains individus de VPB se situent dans la variabilité de l’Yonne, évoquant un parallèle notamment avec Chichery « Sur les

<sup>1</sup> « le régime alimentaire des individus Cerny a probablement été composé des produits de l’agriculture, incluant des éléments abrasifs induits par le meulage par exemple, des aliments durs et résistants, ayant subi peu de transformation, probablement issus de la cueillette et de la chasse, et de la viande d’origine domestique et sauvage. » (Syrikova inédit)

Pâturaux », nécropole Cerny sans monument reconnu (Figure C9. 8). Les données isotopiques pourraient indiquer une plus grande consommation de viande pour les sujets inhumés dans les nécropoles sans monument (Cheung *et al.* 2021 ; Syrikova inédit), fournissant à nouveau un point de comparaison intéressant avec les sujets de l'Yonne.

Ensuite, l'étude de P. Syrikova a montré que **les femmes** présentaient **une plus forte complexité** que les hommes au Cerny, ayant sans doute consommé des aliments plus durs et plus abrasifs, en particulier dans les nécropoles monumentales. En revanche, les données isotopiques n'ont apparemment révélé aucune distinction significative pour le Cerny entre les sexes, excepté de légères variations du  $\delta^{13}\text{C}$  à VPB (faut-il y voir ici encore un rapprochement avec les sites de l'Yonne ?). Pour les nécropoles monumentales Cerny essentiellement, les données (DMTA et isotopiques) sont toutes deux en opposition avec les résultats obtenus dans l'Yonne (pas de différence de la micro-usure dentaire mais une légère distinction isotopique entre les sites et les sexes). Un schéma sensiblement distinct semble se dessiner en revanche pour les nécropoles sans monument (Vignely « La Porte aux Bergers » notamment) qui serait à mettre en lien avec les sites à influence Cerny de l'Yonne (cf. Chap5.III.3). En outre, les différences de micro-usure entre les sexes au Cerny concernent principalement les **sujets de moins de 20 ans** et s'estompent avec l'âge. Notre échantillon icaunais (gens de l'Yonne) comprend essentiellement des individus de plus de 20 ans et dix ont plus de 30 ans. Il serait intéressant d'étudier la micro-usure des immatures de l'Yonne, d'autant plus que l'étude des sujets Cerny semble avoir mis en évidence des différences intra-sexe liées à l'âge : entre filles et femmes d'une part, et entre garçons et hommes d'autre part (Syrikova inédit).

Par ailleurs, certains hommes Cerny présentant un statut social particulier, inhumés avec des pointes de flèches et identifiés comme des archers ou « chasseurs » (Thomas 2011, 2014), auraient une micro-usure texturale **plus complexe et plus anisotrope** que celle des hommes « ordinaires » (Syrikova *et al.* 2021a). Cette fois, les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  sont apparues légèrement supérieures pour les hommes « chasseurs » en comparaison des hommes « ordinaires » (*ibid.*). Ces résultats (isotopiques et DMTA) pourraient indiquer une plus forte consommation de viande et de produits non-transformés par les « chasseurs ». Ce type de distinction (statut de « chasseur ») n'a pas été observé dans les sites de l'Yonne et la comparaison isotopique serait pertinente entre les hommes de l'Yonne, notamment ceux de Chichery « Sur les Pâturaux » et Le Nouzeau (d'affinité Cerny), et les hommes « ordinaires » du Cerny, en prenant en compte la variabilité régionale et culturelle de ces sites (analyse en cours).

Enfin, les **trois individus post-Cerny** de Vignely « La Porte aux Bergers » se rapprochent de la variabilité de l'Yonne avec une micro-usure générale moins marquée (Figure C9. 8). Il serait intéressant de comparer leurs valeurs isotopiques avec les humains de la vallée de l'Yonne pour discuter d'une éventuelle évolution chronologique des pratiques alimentaires.

### I.6. Synthèse et perspectives

Les résultats de la DMTA obtenus sur les 20 molaires des sujets de l'Yonne indiquent une **surprenante homogénéité** à la différence des sujets Cerny qui présentent une importante variabilité texturale de leur micro-usure (Syrikova *et al.* 2021a). La combinaison « **faible complexité et faible anisotropie** » est par ailleurs inconnue à notre connaissance et diffère des schémas généralement observés pour les agriculteurs néolithiques et les chasseurs-cueilleurs. Ce schéma reflète une **alimentation peu abrasive, plutôt molle et peu coriace**, pouvant correspondre à la consommation **d'aliments très préparés**, fortement réduits mécaniquement, thermiquement ou chimiquement (e.g. viande séchée, bouillies, aliments fermentés). La question se pose quant à la consommation de produits laitiers et de poisson, qui ne semble pour autant pas majoritaire d'après les données archéologiques et que les données isotopiques n'ont pas pu confirmer ou infirmer en l'absence de restes analysés. En comparaison, la population Cerny propose des valeurs  $Asfc$  et  $epLsar$  plus élevées témoignant d'une alimentation moins transformée et un certain nombre de paramètres semblent rapprocher la nécropole non monumentale de Vignely « La Porte aux Bergers » des sites de l'Yonne et en particulier du site Cerny de Chichery « sur les Pâtureaux ». Dans l'Yonne, **aucune différence de texture de la micro-usure** n'est observée **entre les sites ou entre les sexes** – à l'inverse des données isotopiques où de légères tendances sont constatées – témoignant d'une grande homogénéité dans les pratiques alimentaires. Ce schéma s'oppose à celui du Cerny où l'on observe des distinctions entre le type de site, le sexe et le statut social, en particulier pour les nécropoles monumentales – mais pas de distinction [entre les sexes](#) d'un point de vue isotopique.

De **nombreuses perspectives** de travail s'offrent à nous à l'issue de ces conclusions. D'abord, il serait intéressant de comparer plus en détail les données isotopiques de la vallée de l'Yonne avec les résultats sur la population Cerny (Cheung *et al.* 2021 ; cf. Chap5.III.3). Ensuite, la comparaison avec les **données de la macro-usure** et des atteintes de la sphère bucco-dentaire, notamment la fréquence **des caries et du tartre**, permettrait d'accéder à un niveau plus fin d'analyse de l'alimentation (cf. Syrikova inédit). Enfin, l'étude de la **micro-usure des immatures** (moins de 20 ans) et des distinctions sexuelles chez les plus jeunes offrirait un parallèle pertinent avec les schémas sexuels observés dans la population Cerny.

## II. Analyse préliminaire des haches – collaboration A. Queffelec et P. Pétrequin

---

Dans le but de déterminer l'origine potentielle des deux haches retrouvées dans les sépultures 257 et 302 de la nécropole de Gurgy « Les Noisats » et de savoir si leur association avec les défunts pouvait témoigner d'un statut social particulier des inhumés, nous avons sollicité l'expertise de P. Pétrequin (MSHE C.-N. Ledoux, CNRS et Université de Bourgogne-Franche-Comté), spécialiste des haches

néolithiques en jade alpins (Pétrequin *et al.* 2012b ; Pétrequin *et al.* 2017). La connaissance de la zone d'origine de ces haches peut-elle permettre de renseigner les axes d'échanges et les relations culturelles afin de mieux comprendre la diversité des influences culturelles rencontrées à Gurgy « Les Noisats » ?

### II.1. L'origine des haches

Un premier examen à partir des **photographies** (Figure C9. 9) a permis d'identifier de la néphrite alpine pour la petite hache de la sépulture 302, pouvant provenir de deux gîtes possibles : des Grisons (Oberhalbstein) ou du Valais (Pétrequin, comm. pers.). L'origine de la seconde (sépulture 257), très encroutée, reste inconnue, mais elle ne provient vraisemblablement ni des Vosges ni des Alpes occidentales.

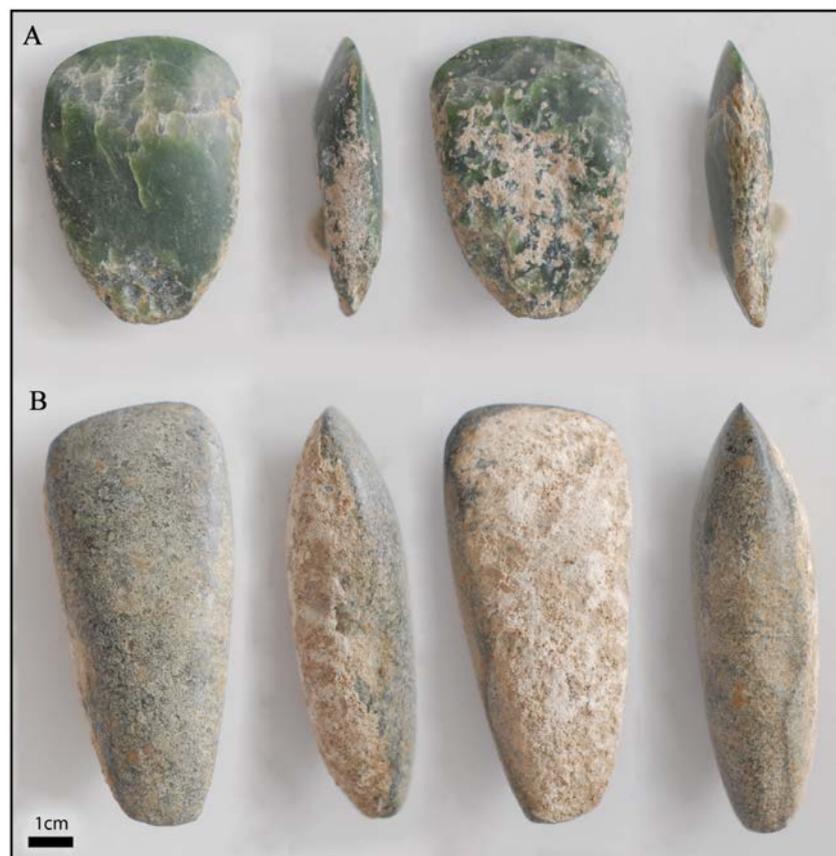


Figure C9. 9 : Déroulé des haches retrouvées dans les sépultures GLN 302 (A) et GLN 257 (B) de la nécropole de Gurgy « Les Noisats ». Photographie et DAO : L. Rey.

L'analyse par **spectroscopie Raman** réalisée par A. Queffelec (UMR 5199 - PACEA) a confirmé la constitution en néphrite de la première, et indique pour la seconde une roche composée essentiellement de diopside, orthoclase et actinolite (Figure C9. 10). Ces résultats ne permettent cependant pas d'en déduire une origine plus précise.

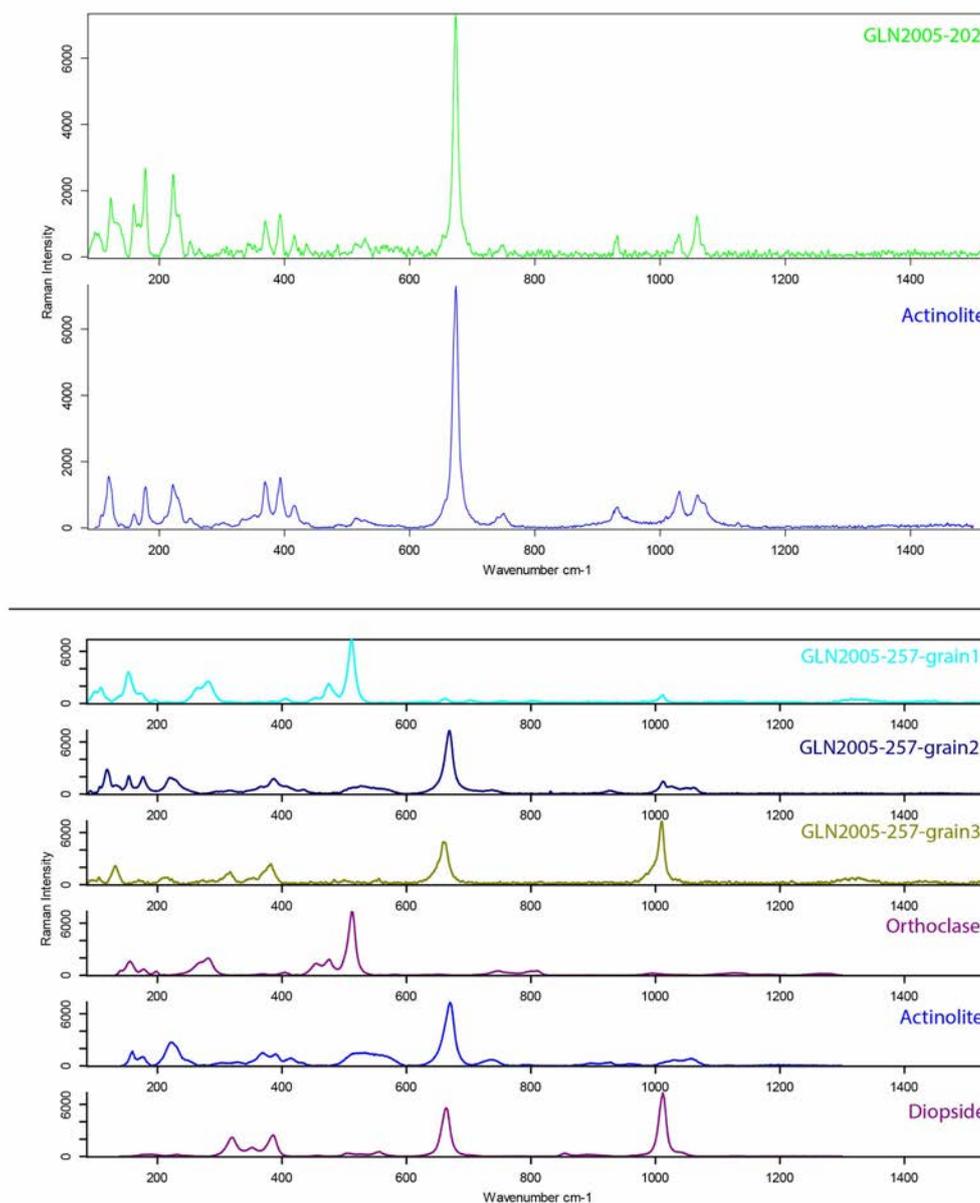


Figure C9. 10 : Résultats de la spectroscopie Raman des haches retrouvées dans les sépultures GLN 302 (A) et GLN 257 (B) de la nécropole de Gurgy « Les Noisats ». Analyses A. Queffelec.

## II.2. Contexte chronoculturel

Bien que ces sépultures aient été datées, leur **attribution chrono-culturelle reste incertaine**. La datation associée à la petite hache en roche verte (302) est aberrante (3498-3348 cal. BC), la seconde propose pour la plus grande hache un intervalle compris entre 4826 et 4609 cal BC, mais sa fiabilité n'étant pas certifiée (cf. Chap3.II.1.c), il faut la rattacher plus prudemment à un **Néolithique moyen indéterminé**. Ces haches constituent le seul mobilier contenu dans ces sépultures et aucun autre élément datant ne vient préciser leur attribution chrono-culturelle. Dans les sites voisins, une hache a été retrouvée à **Monéteau** associée à la sépulture 04-113. Celle-ci est en **éclogite alpine** (rappelant, nous l'avons dit, la sphère Chamblandes à travers l'arc alpin). Elle se trouve plutôt associé au **contexte**

**chasséen.** À **Beaumont** également, deux haches ont été mises au jour, elles-aussi en contexte chasséen mais fabriquées en **dolérite** et plutôt importées (à l'état fini) du **Massif armoricain** ou du **Massif central**.

Pour ce qui est des **haches en néphrite alpine**, la plus ancienne circulation est datée du milieu du Ve millénaire, soit en contexte carnacéen (Dépôt de Bernon à Arzon, par exemple), soit en contexte Roessen (Gonvillars, grotte de la Baume ; Pétrequin, comm. pers.). La petite hache de la sépulture 302 pourrait se trouver sur **l'axe de circulation entre les Alpes et la Bretagne**. Néanmoins, ce réseau concerne principalement les grandes haches en jades alpins retrouvées en contexte de forte structuration sociale, adossées à une fonction idéelle, ayant une portée sociale et symbolique puissante (Pétrequin *et al.* 2012a). Pour une comparaison régionale, la culture Cerny, dont les structures monumentales notamment reflètent une forte hiérarchisation sociale, n'a livré aucune hache en jade alpin et seuls de rares exemplaires de haches existent dans d'autres matériaux, plus locaux (grès, silex ; Giligny *et al.* 2012). En revanche dans cette culture, la « symbolique du chasseur » est avancée à travers les armatures de flèches associées à des hommes notamment (Sidéra 2003). Les nécropoles sans monument de cette culture, telles que Vignely « La Porte aux Bergers » ou Chichery « sur les Pâturaux », n'ont pas non plus livré de tels objets. Quoi qu'il en soit, de nouvelles datations permettraient sans doute de replacer ces haches dans un contexte chronologique voire chronoculturel plus précis, de même que le permettront les nouvelles discussions alimentées par les récentes données génomiques (Rivollat *et al.* 2021a ; Rivollat *et al.* 2021b).

### II.3. Objet pratique, symbolique ou de prestige ?

Un des premiers arguments « de taille » pour discuter de la fonction des haches en roche alpine, au-delà de leur matière première et de leur provenance/origine exogène, concerne semble-t-il la dimension de ces objets (additionné d'un polissage particulièrement soigné). La **dimension réduite** des haches de Gurgy, un peu plus de 6 cm pour la première et moins de 10 cm pour la seconde, n'en fait pas *a priori* des objets de prestiges, des biens valorisés tels que décrits pour les jades du Mont Viso dont les dimensions dépassent 13,5 cm de long (Pétrequin *et al.* 2012c).

Si certaines haches en jade de petite taille peuvent néanmoins revêtir un caractère socialement valorisé (outil-signe montrant un façonnage et un polissage très soigné ou objets de parure relevant d'un phénomène de recyclage des grandes haches), les plus petites haches telles que celles retrouvées à Gurgy seraient généralement plutôt des **outils de travail** (Giligny *et al.* 2012). Ainsi, en dépit de leur caractère isolé dans la nécropole, ces petites haches pourraient aussi bien relever d'activités techniques du quotidien. Des **analyses tracéologiques** pourraient indiquer d'éventuelles traces d'utilisation et renseigner sur leur caractère pratique et fonctionnel ou à l'inverse sur une absence d'utilisation témoignant d'une fonction symbolique de l'objet (e.g. Masclans Latorre *et al.* 2017).

**L'emploi symbolique** des haches a plusieurs fois été proposé pour ce type d'objet, généralement **associé aux hommes** (Pétrequin *et al.* 2012b ; Pétrequin et Jeunesse 1995). S'il est tentant de rapprocher ce type de symbole à la notion de l'homme chasseur avancée en contexte Cerny pour des associations avec des armatures de flèches, aucune hache en jade alpin n'a été retrouvée dans les sites rattachés à cette culture. Les haches de Gurgy seraient-elles plutôt à rapprocher de celles de Monéteau et de Beaumont, dans des matériaux différents, en contexte chasséen ? Dans le domaine funéraire, la hache de Monéteau a été retrouvée dans la sépulture 04-113, occupant une position centrale au sein du groupe C ; elle est apparemment associée à une femme, fait inédit pour ce type d'objet. À Gurgy, les sépultures accueillant ces haches **ne semblent pas occuper de place privilégiée dans la nécropole**, bien qu'il soit possible que **plusieurs tombes leur soit associées formant un regroupement**, peut-être de type familial (cf. Chap10.I.3). Aucun autre objet n'est associé aux défunts, ici deux hommes, et ces haches peuvent caractériser l'expression de la **division sexuelle du travail**, ou pourvoir une valeur symbolique masculine à ces tombes.

En l'état actuel de nos connaissances et en l'absence d'analyses et de comparaisons plus poussées, il est impossible de conclure quant à la fonction de ces haches exogènes. Il semble néanmoins qu'elles ne puissent être interprétées comme marqueur d'un statut social privilégié en raison de leurs dimensions très réduites (Pétrequin, comm. pers.).

### II.4. Croisement avec les indicateurs biochimiques

Au même titre que pour les autres objets « remarquables » associés aux défunts inhumés à Gurgy (n'ayant révélé aucune corrélation significative avec les indicateurs biochimiques ; cf. Chap10.I.3.e), nous avons tenté de voir si les individus enterrés avec ces haches présentaient des valeurs isotopiques ou élémentaires particulières. Trois remarques doivent être faites en préambule : - ces haches ne reflètent peut-être pas un statut social particulier ; - la diversité des objets et leur faible effectif rend difficile toute comparaison liée au mobilier funéraire à Gurgy ; - le statut social d'un individu n'est pas nécessairement visible à travers sa signature biochimique mais des différences interindividuelles corrélées à d'autres paramètres peuvent refléter une position particulière dans la société.

Globalement, les deux individus de Gurgy GLN 257 et GLN 302 n'ont pas la même signature isotopique ou élémentaire, ni dans l'os ni dans les dents, lorsque les données peuvent être comparées (Figure C9. 11). Cette différence indique qu'ils ne partageaient certainement pas les mêmes régimes alimentaires, voire qu'ils puissent avoir été mobiles (cf. *infra*). De récentes analyses génétiques ont révélé l'existence de deux familles à Gurgy : le sujet 257 appartient à la famille A et le 302 se trouve dans le secteur de répartition spatial des tombes de la famille B, au nord-est de la nécropole (Rivollat *et al.* 2021a).

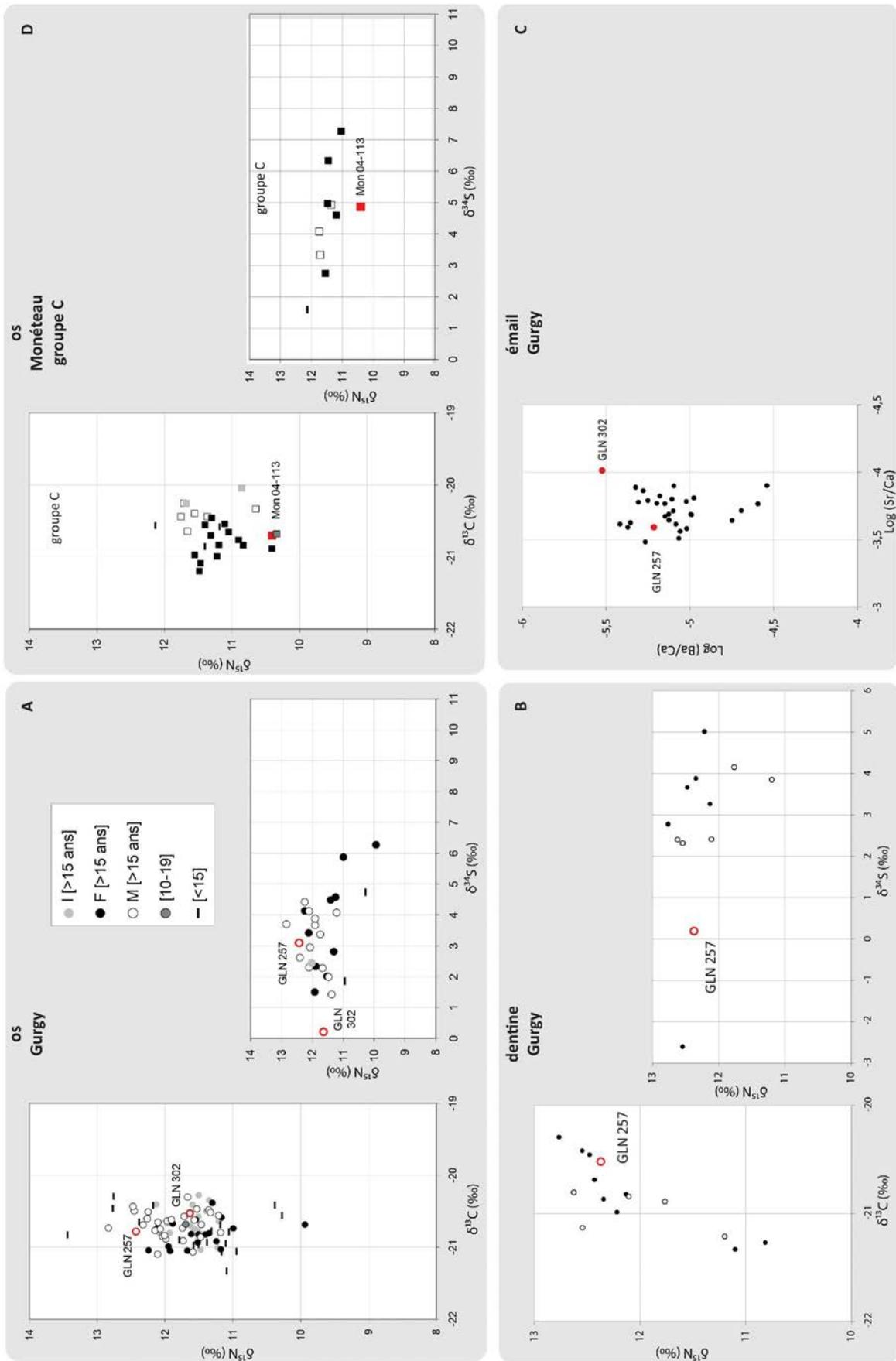


Figure C9.11 : Comparaison des valeurs isotopiques et élémentaires des individus inhumés avec des haches relativement à l'ensemble de la population de Gurgy « Les Noisats » (A à C) et de Monéteau « Macherin » (D).

D'une part, **le sujet GLN 257** présente des valeurs isotopiques dans la variabilité générale de Gurgy pour C, N et S, bien que son  $\delta^{15}\text{N}$  soit parmi les valeurs les plus élevées (Figure C9. 11A). Ses valeurs dentaires en C et N sont également dans la variabilité générale, cependant sa valeur de S dentinaire est la plus basse de celle des hommes de Gurgy (Figure C9. 11B). Ses valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca dans l'émail sont également dans la variabilité générale des humains du site (Figure C9. 11C).

D'autre part, **le sujet GLN 302** inhumé avec la petite hache verte présente des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  osseux dans la moyenne mais son  $\delta^{34}\text{S}$  osseux est le plus bas de l'ensemble du groupe (Figure C9. 11A). Aucune valeur n'est disponible pour la dentine, en revanche, ses valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca sont les plus basses de l'ensemble des humains de Gurgy (Figure C9. 11C ; valeurs en ordre inverse). Ces résultats semblent indiquer un schéma alimentaire ou de mobilité distinct des autres individus, mais son cas isolé permet difficilement de trancher.

À Monéteau, **la femme de la sépulture 04-113** présente une valeur de  $\delta^{15}\text{N}$  parmi les plus basses du groupe C mais son  $\delta^{13}\text{C}$  et son  $\delta^{34}\text{S}$  sont proche de la moyenne (Figure C9. 11D). Il est difficile de conclure à une quelconque interprétation sur la base de ce seul résultat.

### II.5. Synthèse et perspectives

L'analyse préliminaire des deux haches de Gurgy a permis de préciser leur composition minéralogique, leur origine possible dans un cas et leur caractère *a priori* plutôt usuel que symbolique, ou tout du moins éloigné de l'objet socialement valorisé représenté par les haches alpines du Mont Viso, de bien plus grande dimension et de facture plus soignée.

La **première hache (257)** est composée de **diopside, orthoclase et actinolite** dont l'origine n'a pu être précisée. La **seconde (302)**, en **néphrite**, provient **des Grisons ou du Valais** et se place probablement sur l'axe de circulation des haches entre les Alpes et la Bretagne. Leur **taille réduite** écarte *a priori* le symbole de prestige constitué par les grandes haches en jade alpins dépassant les 13cm. **Associées à des hommes**, elles constitueraient plutôt des **outils de travail**, symboliques ou usuels, pouvant être le témoin de la division sexuelle du travail, mais leur caractère isolé ne permet pas de trancher. Les sépultures ayant livré ces haches ne semblent pas occuper de place particulière au sein de la nécropole si ce n'est qu'elles sont entourées d'autres tombes pouvant constituer un noyau de type familial. La **composition biochimique des deux individus** associés aux haches est **différente**, indiquant vraisemblablement que l'objet n'est pas lié à un statut pourvoyant un régime alimentaire spécifique mais pourrait refléter des disparités alimentaires entre deux « familles », des pratiques propres au sein du groupe (compte tenu de la néanmoins grande homogénéité globale). La proximité isotopique avec les tombes proches (cf. Chap10.I.4) soulignent cet aspect structurel de type **regroupement familial** et les haches pourraient évoquer un statut particulier (figure masculine,

« chef » ?) au sein de ces petits groupes. Par ailleurs, les deux sujets inhumés avec les haches présentent chacun une combinaison de valeurs « extrêmes » (valeur élevée de  $\delta^{15}\text{N}$  dans l'os et basse de  $\delta^{34}\text{S}$  dans la dentine pour GLN 257 et valeurs minimum de  $\delta^{34}\text{S}$  dans l'os et de Sr/Ca et Ba/Ca dans l'émail pour GLN 302) pouvant peut-être témoigner d'une position particulière, indépendantes l'une de l'autre, au sein du groupe ou de chaque « famille ». En comparaison, la femme de Monéteau associée à la hache Mon 04-113 présente la plus faible valeur de  $\delta^{15}\text{N}$  dans l'os.

Attribuées à un **Néolithique moyen indéterminé**, ces haches seraient peut-être à rapprocher des haches retrouvées en contexte chasséen à Monéteau et Beaumont, composées d'autres matériaux et issues de l'arc alpin comme du Massif armoricain ou du Massif Central. **L'analyse tracéologique** de ces objets (les haches de Gurgy comme celles de Monéteau et de Beaumont notamment, dans le cadre d'une approche régionale croisée) permettrait sans doute de **caractériser leur fonction et leur usage**.

## III. Analyse pétrographique des récipients céramiques – collaboration F. Convertini

---

L'analyse pétrographique des vases en céramique de Gurgy « Les Noisats » s'inscrit en complément de notre travail de thèse qui a pour objectif de mieux comprendre les comportements des groupes humains ayant utilisé les sites de cette microrégion ainsi que les relations existant entre ces sites et avec l'extérieur, pour aborder la question de la gestion de ce micro-territoire et la place de la vallée de l'Yonne dans le contexte plus large du Néolithique français et limitrophe. De ce fait, et pour compléter l'image déjà obtenue à travers l'analyse des vases de plusieurs sites voisins dans le cadre du PCR portant sur cette portion de la vallée (Chambon *et al.* 2013), il nous semblait intéressant de fournir des informations pétrographiques sur les vases retrouvés à Gurgy, et de comparer les données avec celles des sites voisins (Gurgy « Le Nouzeau », Beaumont et Monéteau).

Si le vase entier retrouvé dans la sépulture 249 (Figure C9. 12) avait déjà été analysé, nous avons souhaité compléter le corpus en ajoutant les échantillons n°14, 23 et 44 de la structure 60. Cette dernière n'a pu être datée autrement que par le mobilier céramique qu'elle contenait et se rapporte à un Néolithique moyen indéterminé, ayant probablement fonctionné avec la nécropole. Les trois tessons analysés appartiennent à trois individus différents (étude K. Meunier) et les résultats sont présentés ci-après tels que communiqués par F. Convertini, de même que ceux du vase de la sépulture 249, déjà présentés dans le rapport du PCR de 2006. Ces résultats sont ensuite discutés dans le cadre de la problématique posée par ce travail en résonance avec les conclusions tirées de l'analyse biochimique.



Figure C9. 12 : Vase de la sépulture GLN 249. Photographie L. Rey.

### III.1. Résultats de l'analyse pétrographique (F. Convertini)

#### III.1.a. Le vase Cerny de la sépulture 249

- *Description pétrographique*

La terre à l'origine du vase est une argile à matrice phylliteuse, d'aspect cotonneux. Les inclusions sont moyennement abondantes et hétérométriques. Le quartz domine. Il est émoussé à usé. Le feldspath potassique est moyennement abondant, souvent altéré. Le plagioclase et les micas, blanc et noir, sont rares. Une zoïsite est présente.

Les fragments de roches d'origine plutonique sont moyennement abondants. Il s'agit d'éléments quartzo-feldspathiques associés parfois à du mica blanc ou noir. La structure granophyrique est présente. Le silex est rare et une calcédoine fibreuse est présente.

- *Proposition d'origine de la terre exploitée*

Le vase a été fabriqué avec une terre alluviale qui présente toutes les caractéristiques des terres de la vallée de l'Yonne. La préservation d'une bonne partie du cortège pétrographique indique un prélèvement dans la basse terrasse ou les dépôts holocènes.

- *Conclusion*

Cette terre présente les mêmes caractéristiques que les argiles à l'origine de la plupart des vases analysés du site Cerny du Nouzeau à Gurgy. En revanche, aucun ajout d'inclusion n'a été mis en évidence.

#### III.1.b. Tesson n°14 de la structure 60

- *Description pétrographique*

La matrice est phylliteuse, d'aspect cotonneux. Les inclusions sont moyennement abondantes et hétérométriques. Le quartz domine l'ensemble des inclusions. Il est anguleux à usé. Le feldspath potassique est moyennement abondant, n'est pas altéré et est parfois perthitique. Le plagioclase est peu abondant. Le mica blanc est rare tandis que le mica noir est très rare. En revanche, les fragments de roches d'origine plutonique constitués par ces minéraux sont relativement abondants. Différentes combinaisons sont présentes, la base étant quartz-feldspath potassique. Les deux micas, blancs et noirs, sont parfois associés dans les mêmes lithoclastes. Les autres inclusions sont très rares : une calcédoine fibroradiée, de probables fragments de silex et un fragment carbonaté sparitique détritique (quartz).

- *Proposition d'origine de la terre exploitée*

Hormis les très rares éléments d'origine sédimentaire, la terre ne renferme que des inclusions issues de l'altération d'un granite à deux micas. La structure granophyrique présente plaide pour une **origine dans le Morvan** pour ce type de roche. Cette altérite n'est toutefois **pas originaire directement de ce massif** car une fraction sédimentaire existe également. Elle a été recueillie probablement directement au nord des roches plutoniques à deux micas affleurant largement dans le **bassin versant de l'Yonne** et de ses affluents (notamment la Cure). Aucune origine précise ne peut être proposée, mais au vu de la fraîcheur et de la proportion de fragments de roches, elle ne doit **pas être éloignée d'un massif granitique**. Par la vallée de la Cure, ce domaine n'est distant que de **quelques dizaines de kilomètres**.

#### III.1.c. Tesson n°23 de la structure 60

- *Description pétrographique*

La matrice est phylliteuse, d'aspect cotonneux. Les inclusions sont moyennement abondantes et hétérométriques. Le quartz domine et constitue même l'intégralité de la fraction granulométrique de taille inférieure à 50 µm. Il est anguleux à faiblement usé. Le feldspath potassique est peu abondant, peu altéré et quelques grains sont perthitiques. Le plagioclase, à macle fine, et les micas sont très rares. Quelques fragments de roches d'origine plutonique associant le quartz et le feldspath potassique et parfois le mica blanc ou noir sont également présents. Un assemblage quartzo-feldspathique montre

une structure granophyrique typique des granites du Morvan. Les carbonates sont peu abondants mais variés : calcite, fragments de calcaires sparitiques pouvant être légèrement détritiques (quartz), fragments de couleur orangés altérés par une surcuisson. Enfin, un fragment usé de silex et une calcédoine complètent le cortège des inclusions naturelles.

- *Proposition d'origine de la terre exploitée*

Cette terre présente le cortège alluvial de l'Yonne qui prend sa source dans le massif du Morvan, situé au sud de Gurgy. En sont originaires les éléments rapportés au cortège granitique (quartz en grande partie, feldspaths potassiques et plagioclases, micas, fragments de roche associant ces minéraux). Les éléments siliceux résistants tels le silex et la calcédoine, sont issus des formations du Jurassique traversées par le cours d'eau, au nord du Morvan. Les carbonates sont probablement issus des terrains du Crétacé, situés encore plus au nord et proches du site. Dans le secteur de Gurgy, les prélèvements de terres alluviales n'ont pas montré de traces de carbonates. Néanmoins, ces derniers étant facilement détruits par la dissolution et le transport ne sont pas toujours représentés au cœur de la vallée mais sont plutôt présents en bordure des formations du Secondaire. On peut faire l'hypothèse que la **terre a été collectée** dans une de ces **zones alluviales, à la hauteur de Gurgy**.

### III.1.d. Tesson n°44 de la structure 60

- *Description pétrographique*

La matrice est phylliteuse, d'aspect cotonneux. Les inclusions sont moyennement abondantes et hétérométriques. Le quartz et les carbonates codominent en proportion égale. Au sein des carbonates, les fragments de coquilles de lamellibranches sont les plus abondants. Ils peuvent atteindre 4 ou 5 mm de long. Ces fragments appartiennent à des formations fossiles puisque plusieurs d'entre eux sont englobés dans des calcaires. Quelques fragments d'échinodermes sont également associés ou libres dans la matrice. D'autres carbonates, en quantité très restreinte, sont aussi présents : fragment de calcaires sparitique et micritique détritiques (quartz). Plusieurs carbonates présentent des traces de surcuisson. Le quartz est anguleux à usé. Enfin, une tourmaline jaune est visible.

- *Proposition d'origine de la terre exploitée*

Cette terre correspond très probablement à une **marne** dont la matrice a été décarbonatée naturellement. Ce type de ressource existe **au sud de Monéteau**, en bordure de la vallée de l'Yonne, soit à **environ 4 km en amont des Noisats**, dans le Barrémien inférieur (n4a).

### III.1.e. Synthèse de l'analyse pétrographique des vases

En préambule, rappelons que le **vase complet de la sépulture 249** a été fabriqué à partir d'une **argile alluviale de l'Yonne**. Sa pâte est **proche de celle du vase n° 23**, sans les carbonates. Les quelques

prélèvements de terre réalisés à Gurgy ont montré une absence de carbonate, mais qui n'est pas significative car ils ont été pris près du cours actuel, donc loin des affleurements de calcaires. En conclusion, **la terre à l'origine du vase n° 23 peut être tout à fait locale (moins d'un kilomètre)**.

En revanche, **les deux autres vases** ont été fabriqués avec des **terres plus éloignées** qualifiée de proche pour le n° 44 (plus d'un kilomètre mais moins de sept) et d'allochtone pour le dernier récipient. Contrairement à ce dernier, la question du **statut du vase n° 44** se pose. En effet, la distance relativement peu importante entre le site et les affleurements les plus proches situés **au sud de Monéteau (environ 4 km)** peut laisser envisager le fait que les néolithiques de Gurgy se soient approvisionnés directement en terre. Mais, l'hypothèse du **vase arrivé en tant qu'objet** peut également être proposée. Il est difficile de trancher entre les deux hypothèses, mais pour des raisons de disponibilité de matières premières sur place (et exploitées), la seconde sera privilégiée.

L'origine du **dernier vase (n°14)** ne souffre d'aucune contestation, la distance importante éliminant l'hypothèse du transport de terre du lieu de collecte jusqu'au site. Ce récipient est donc très probablement **arrivé à Gurgy sous une forme de vase pour lui ou pour son contenu**. Il témoigne donc de **circulations entre Gurgy et la haute vallée de l'Yonne** ou de l'un de ses affluents au Néolithique moyen I.

Dernière information, **aucun dégraissant** n'a été identifié dans les pâtes de ces vases, y compris dans celle du récipient de la sépulture 249. Ceci est en **rupture avec ce que l'on connaît par ailleurs pour la céramique du Néolithique moyen I du Bassin parisien largement dégraissée à l'os pilé** (cf. Chap3).

#### III.2. Éléments de conclusion au regard de l'analyse biochimique

La céramique retrouvée à Gurgy « Les Noisats » est particulièrement indigente et comporte, hormis de rares tessons dans le remplissage de quelques tombes, **un seul gobelet complet** mis au jour dans la sépulture 249 ainsi que **quelques tessons dans une structure non sépulcrale** (st. 60) associée à la nécropole qui se rapportent à au moins 3 vases distincts. L'analyse pétrographique a été menée sur ces **quatre échantillons**.

L'individu 249 inhumé avec le seul vase complet du gisement présente des **valeurs isotopiques et élémentaires** dans la variabilité globale et même proche de la moyenne pour l'ensemble des proxies (Figure C9. 13). Les analyses génétiques ont récemment attribué un sexe féminin à ce sujet (Rivollat et al, comm. pers.) et, par rapport au groupe féminin uniquement, les valeurs sont toujours dans la variabilité globale. En revanche, les données de **texture de sa micro-usure dentaire** (pour une molaire seulement, cf. I.5) révèlent une complexité Asfc significativement plus élevée que les autres sujets de Gurgy analysés (et une anisotropie epLsar inférieure à la moyenne), indiquant que

l'alimentation de ses derniers jours de vie devait être composée d'aliments plus durs et moins coriaces que le reste du groupe. Ce facteur est-il à mettre en rapport avec la présence du vase dans sa tombe ? Cette femme avait-elle une place ou un rôle particulier, une activité la conduisant à avoir des pratiques alimentaires légèrement différente des autres, incluant peut-être plus de particules exogènes ? Les propositions énoncées ici sont des pistes de discussion et ne doivent en aucun cas être considérées comme des interprétations argumentaires, étant basées sur un individu seulement et croisant des paramètres n'étant pas nécessairement comparables directement.

Quoi qu'il en soit, **la seule occurrence** de ce vase pour tout le site ne permet pas de tirer de conclusions quant à la place qu'il occupe, à sa fonction ou son usage. L'étude pétrographique doit être considérée en même temps que les autres échantillons céramiques dans une approche culturelle du site à la lumière d'une interprétation populationnelle de l'ensemble des résultats obtenus à Gurgy.

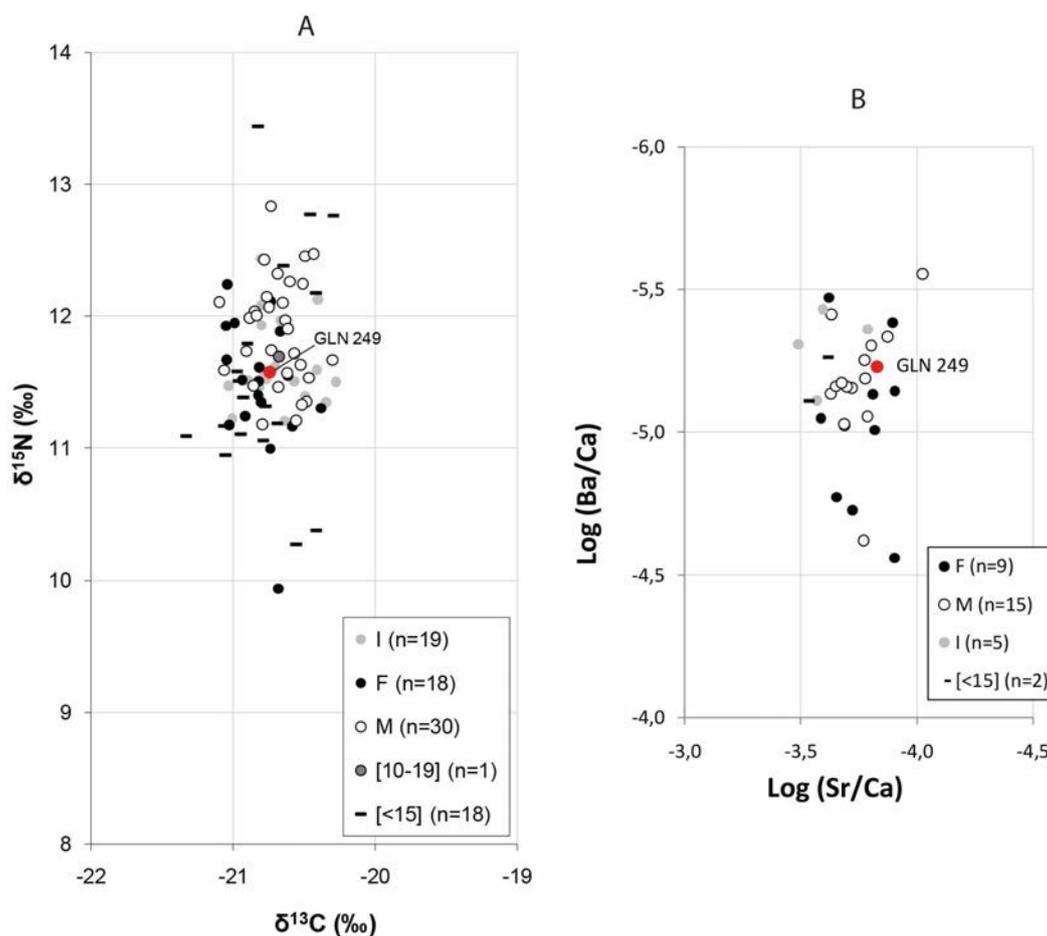


Figure C9.13 : Position relative de la signature isotopique de l'individu GLN 249 inhumé avec le vase par rapport à l'ensemble de la population de Gurgy « Les Noisats ».

La structure 60 n'étant rattachée à aucune sépulture, il convient de discuter de la provenance des tessons qu'elle contient au regard de l'ensemble de la population inhumée à Gurgy. Ainsi, les résultats pétrographiques indiquent **une gestion plutôt locale**, à l'échelle de la **vallée de l'Yonne**, ainsi que des **échanges possibles sur plusieurs kilomètres** avec la haute vallée notamment. Ces résultats

soulignent l'approvisionnement en ressources locales déjà mis en évidence par les résultats isotopiques : une grande homogénéité régionale et des variations entre les sites indiquant un fonctionnement interne à chacun. Ils soulignent également le **particularisme régional** et les **relations/échanges entre les sites de la vallée** déjà mis en évidence par les données archéologiques et isotopiques (nombreuses influences culturelles et spécificités locales partagées dans les dispositifs funéraires et le mobilier, ainsi que dans les signatures biochimiques des individus). **L'absence d'inclusion** anthropique dans les pâtes (comme le dégraissant à l'os pilé généralement trouvé dans la microrégion) reflète probablement une **spécificité très locale**, propre à Gurgy. Ce résultat est à mettre en parallèle avec la spécificité de ce site d'un point de vue biochimique : il présente les plus fortes valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  et les plus faibles de  $\delta^{34}\text{S}$  du collagène osseux par rapport à l'ensemble des sites de la vallée, ainsi que le rapport de Ba/Ca dans l'os le plus élevé (si toutefois on peut exclure l'influence de la diagénèse dans ce dernier cas ; cf. Chap8.II.5.a).

## Chapitre 10. Etudes intrasites : synthèses et éléments complémentaires

Si les principaux résultats sont traités dans les chapitres précédents par type d'analyses (intégrant plusieurs sites), ce chapitre réalise un bilan à l'échelle du site en proposant une brève synthèse de l'ensemble des résultats obtenus pour chaque gisement et en complétant éventuellement l'image par de récents développements et perspectives propres à chacun. Ce chapitre fait directement écho au chapitre 3 présentant les sites et le matériel échantillonné.

La totalité des résultats est illustrée graphiquement en Annexe A41 à 46 pour chaque proxy, avec le nom des échantillons animaux et humains, permettant d'identifier chacun d'entre eux par rapport à l'ensemble du corpus, par site et par groupe. Rappelons que le catalogue également disponible en Annexe C référence pour chaque individu l'ensemble des analyses conduites à son effet et permet de visualiser rapidement la position d'un échantillon précis au regard de l'ensemble du corpus.

### I. Gurgy « Les Noisats » (GLN)

---

Constituant l'ensemble le plus important de notre corpus (avec le plus large effectif d'échantillons humains et animaux, soit 116 individus au total), Gurgy « Les Noisats » a fait l'objet de toutes les analyses réalisées dans ce travail ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  dans l'os et la dentine,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  dans l'os,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\text{Sr}/\text{Ca}$  et  $\text{Ba}/\text{Ca}$  dans l'émail et dans l'os ; des analyses complémentaires – de la micro-usure dentaire, des haches et de la pétrographie des céramiques – ont également porté sur ce site). Abordés conjointement aux autres sites par le prisme de chaque type d'analyse individuellement dans les précédents chapitres, l'ensemble des résultats est synthétisé ci-après pour la seule nécropole des Noisats. Une révision des ratios isotopiques du C et N du collagène osseux est ensuite présentée à la lumière de la récente détermination du sexe génétique. Enfin, nous proposons de discuter plus avant la répartition spatiale des sépultures au regard des résultats isotopiques.

## I.1. Retour en bref sur l'ensemble des résultats

### I.1.a. Schéma général et économie de subsistance

La Figure C10. 1 reprend les principaux résultats isotopiques et élémentaires des humains en comparaison à la faune de GLN au regard de la variabilité de l'ensemble du corpus.

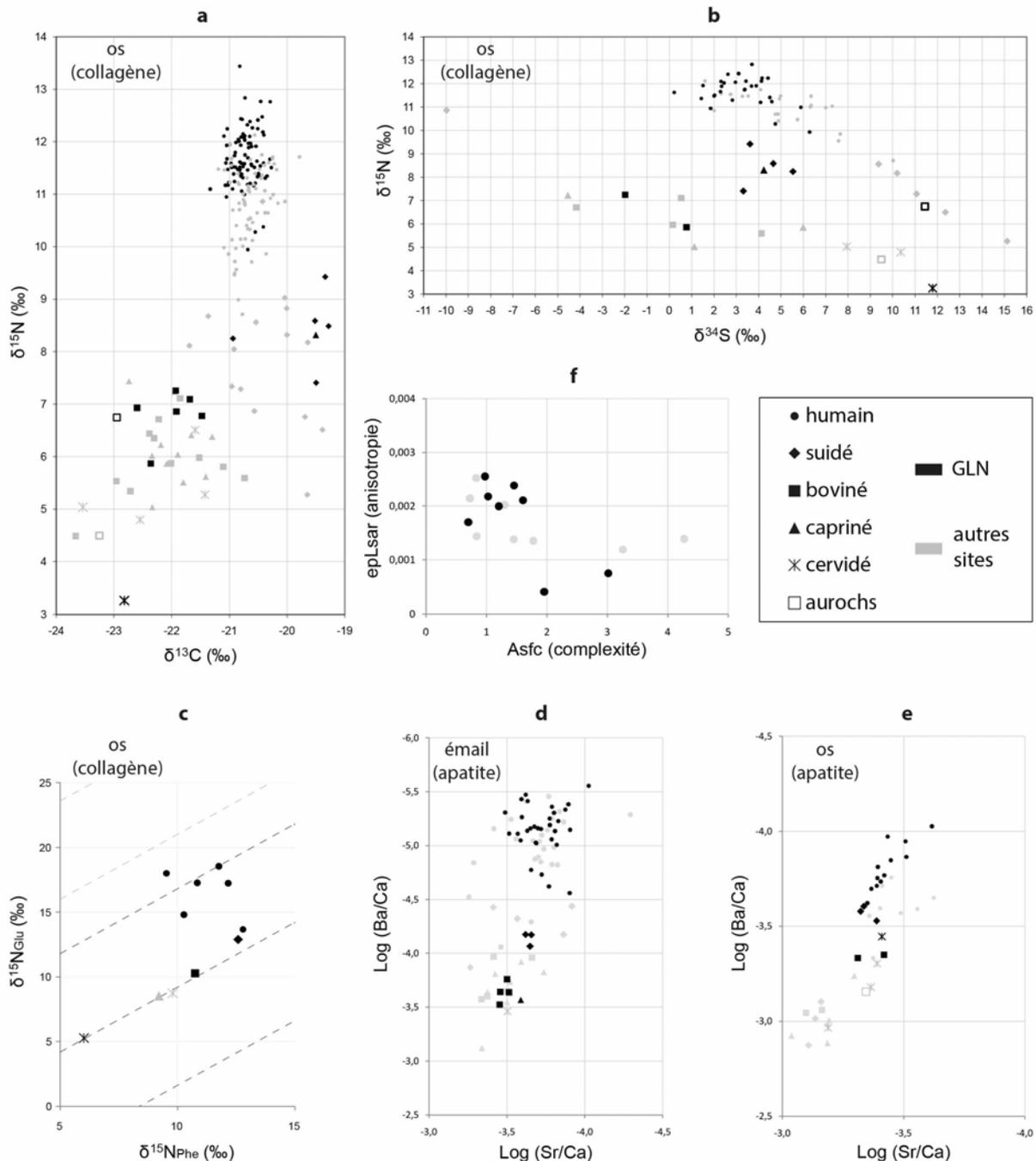


Figure C10. 1 : Récapitulatif de la distribution des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  du collagène global ; a et b ; et  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  ; c) et élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca ; d et e) dans l'os (a, b, c, e) et dans l'émail dentaire (d) des individus humains et animaux de Gurgy « Les Noisats » (en noir) par rapport à l'ensemble du corpus analysé (en gris). Les lignes pointillées (c) indiquent les niveaux trophiques terrestres (gris foncé, du bas vers le haut :  $\text{TP}_{\text{ter}} = 1, 2$  et 3) et aquatiques (gris clair, du bas vers le haut :  $\text{TP}_{\text{aqua}} = 1$  et 2) théoriques. f) Distribution des valeurs d'anisotropie et de complexité texturale de la micro-usure dentaire des humains de Gurgy (en noir) par rapport aux autres sites (en gris). Sur cette figure ne sont pas représentées les données isotopiques de la dentine.

Globalement, les résultats indiquent un **niveau trophique des humains élevé** par rapport à la faune du même site, en particulier  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}^1$  et  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  (Figure C10. 1a et c) signifiant une consommation importante de protéines animales issues des produits de l'élevage (viande de bœuf et de porc et peut-être produits laitiers bovins-ovins-caprins en accord avec les données archéozoologiques).

La **signature des bovins** est clairement **différente** de celle des **cochons** pour l'ensemble des indicateurs (Figure C10. 1a à e). Ce résultat indique une gestion différente du bétail : les uns et les autres devaient être nourris différemment et probablement gardés dans des espaces séparés. Le seul échantillon d'ovicaprin (adulte) ne permet pas de statuer sur la gestion de cette espèce mais les données montrent que ce spécimen occupe un même niveau trophique que les bovins (Sr/Ca et Ba/Ca ; Figure C10. 1d) et des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  ; Figure C10. 1a et b) proches de celles des cochons, pouvant refléter l'occupation d'un même espace (milieu plus ouvert, proche des habitations ?).

Ce **schéma général** entre bovins, porcs et humains est **similaire** à celui des **autres sites du micro-territoire** étudié.

D'autre part, les **animaux de GLN** présentent des valeurs isotopiques sensiblement **distinctes des autres sites** : le  $\delta^{15}\text{N}$  des bovins est supérieur aux autres sites, expliquant peut-être que le  $\delta^{15}\text{N}$  des **humains le soit également** (ces derniers ayant certainement consommé une quantité importante de protéines de bovins ; Figure C10. 1a) ; les cochons présentent un  $\delta^{13}\text{C}$  supérieur et un  $\delta^{34}\text{S}$  inférieur aux cochons des autres sites (à savoir principalement BMT ; Figure C10. 1a et b). Or, le  $\delta^{34}\text{S}$  des humains est également inférieur aux autres sites mais le  $\delta^{13}\text{C}$  est similaire. La différence plus importante en  $\delta^{34}\text{S}$  qu'en  $\delta^{13}\text{C}$  entre les cochons des différents sites pourrait se répercuter sur les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  (mais non de  $\delta^{13}\text{C}$ ) des humains, ces derniers ayant probablement consommé une certaine quantité de viande de porc en complément du bœuf. Ces résultats suggèrent peut-être aussi une certaine variabilité environnementale entre les sites (qui impliquerait différemment les bovins des cochons) et/ou vraisemblablement des différences dans la pratique d'élevage et les ressources consommées par chaque espèce : les variations observées entre les sites n'étant pas identiques pour toutes les espèces (le  $\delta^{15}\text{N}$  n'impacte pas les cochons autant que les bovins et les humains, le  $\delta^{13}\text{C}$  varie pour les cochons des différents sites mais pas pour les humains ni les bovins et enfin le  $\delta^{34}\text{S}$  varie pour les cochons et les humains, mais pas pour les herbivores). Autrement dit, le milieu occupé par les cochons ou leur type d'alimentation, distinct des autres sites, a pu impacter de même le  $\delta^{13}\text{C}$  et le  $\delta^{34}\text{S}$  (la grande différence en  $\delta^{34}\text{S}$  entre les cochons de GLN et BMT serait visible chez les humains qui en ont consommé une certaine quantité) alors que le milieu ou l'alimentation des bovins aurait plutôt impacté le  $\delta^{15}\text{N}$  et la consommation importante de protéines de bœuf (ou de lait de vache ?) impliquerait que cette variation du  $\delta^{15}\text{N}$  entre les sites se répercute sur les valeurs des humains.

---

<sup>1</sup> Le terme anglophone « *bulk* » est utilisé ici pour caractériser le  $\delta^{15}\text{N}$  du collagène global par opposition au  $\delta^{15}\text{N}$  mesuré dans les acides aminés spécifiques ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ ). Par la suite, si rien n'est précisé, il s'agit du  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ .

En revanche, les **ratios élémentaires** (Sr/Ca et Ba/Ca) ne sont pas fondamentalement différents entre GLN et les autres sites (excepté pour les valeurs de l'os qui sont suspectées être atteintes d'altérations diagénétiques ; Figure C10. 1d et e).

On note par ailleurs une **importante homogénéité globale** à GLN, pour les humains et pour chaque espèce animale, en comparaison de ce qui peut être observé dans d'autres sites (Figure C10. 1a, b, d, e, f). Ce résultat témoigne sans doute d'une grande homogénéité des pratiques alimentaires et agricoles au sein du groupe. La variabilité des humains est inférieure à celle de la faune pour  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  dans l'os (Figure C10. 1a et b), en revanche, elle est supérieure à celle de la faune pour  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  dans l'os (Figure C10. 1c) ainsi que pour Sr/Ca et Ba/Ca dans l'os (Figure C10. 1e) et surtout dans l'émail (Figure C10. 1d). Ces résultats reflètent certainement une grande homogénéité dans le type de protéines animales consommées (plus largement mises en évidence à travers l'analyse isotopique du collagène osseux) et une plus grande variabilité dans la consommation de plantes par exemple (mieux représentées par les ratios élémentaires et peut-être le  $\delta^{15}\text{N}$  des acides aminés spécifiques) et/ou d'autres ressources comme les produits laitiers (pour les éléments traces plus spécifiquement) ou le poisson. Il est à noter que la variabilité du  $\text{TP}_{\text{AA}}$  (Figure C10. 1c), bien que représentée par un faible nombre d'échantillons, est susceptible de refléter l'ensemble de la gamme de variation du groupe humain ou presque, comme les échantillons présentant des valeurs extrêmes de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  (parmi les valeurs des adultes) ont été analysés préférentiellement (GLN 284 et GLN 231A parmi ceux qui contenait suffisamment de collagène restant après les premières analyses).

Enfin, les données de **texture de la micro-usure dentaire** mesurées à Gurgy (Figure C10. 1f) indiquent probablement, indistinctement des autres sites de la micro-région, une alimentation très transformée avec la consommation d'aliments mous et peu coriaces, dans l'ensemble peu abrasifs (e.g. bouillies, viande séchée, produits laitiers, poisson ?). Ces résultats (faible anisotropie et faible complexité) se différencient des schémas connus pour des populations d'agriculteurs ou de chasseurs-cueilleurs et en particulier de celui des populations Cerny, pour le Néolithique du Bassin parisien (cf. Chap9.I.4.d).

### I.1.b. Variabilité intra-populationnelle et intra-individuelle des humains

Des **différences** en  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  ont été observées **entre les sexes** dans le collagène osseux mais pas dans la dentine. Aucune différence en fonction du sexe n'a été détectée à travers le  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  ou encore les ratios élémentaires Sr/Ca et Ba/Ca, ni dans l'émail ni dans l'os. Pas plus de différence n'a été mise en évidence dans la texture des micro-usures dentaires entre les hommes et les femmes. Ce résultat indique que des pratiques alimentaires différentes entre les sexes, chez les adultes en particulier, ont touché les ratios isotopiques de l'os mais pas les autres indicateurs. Des différences en termes de préparations alimentaires (mais produisant le même type d'usure), de parties de plantes ou morceaux de boucheries et/ou de végétaux eux-mêmes ont pu intervenir entre les hommes et les

femmes, sans que cela n'implique ni les ratios élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca), ni le niveau trophique (TP<sub>AA</sub>), ni la texture des micro-usures dentaires. Néanmoins, il faut garder en mémoire que les ratios élémentaires de l'os sont susceptibles d'être emprunts d'une signature diagénétique ayant pu altérer la diversité interindividuelle d'une part, et d'autre part les analyses isotopiques de l'azote des acides aminés spécifiques devraient être étendues à un plus large échantillon pour confirmer l'absence de différence entre les sexes.

Par ailleurs, l'analyse isotopique de la dentine et en particulier le micro-échantillonnage dentaire semble mettre en évidence des **modifications alimentaires ou de mobilité en fonction de l'âge** et du sexe. Conjointement aux changements identifiés dans les pratiques funéraires (Le Roy 2015), ces résultats soutiennent l'hypothèse d'une période de transition sociale autour de 8-9 ans et après 14 ans. Avant 8-9 ans, la différence isotopique entre les sexes n'est pas visible, indiquant que les pratiques alimentaires sexuées adviendraient après cette phase de transition, pour atteindre leur paroxysme après le passage à l'âge adulte (probablement autour de 14-15 ans). Après 15 ans, aucune corrélation n'a été identifiée entre l'âge et la signature biochimique (Annexe A47).

Les immatures de **moins de 15 ans** présentent une **plus grande variabilité du  $\delta^{15}\text{N}$  osseux** que les adultes, avec des valeurs extrêmes mesurées dans plusieurs cas et notamment chez les plus jeunes, pouvant témoigner d'un facteur physiologique lié à un métabolisme plus actif des enfants, voire dans certains cas d'un signal d'allaitement toujours visible dans l'os, et/ou de la mise en place de certaines organisations sociales (Rey *et al.* 2021).

Les **courbes intra-profil des ratios élémentaires** (Sr/Ca et Ba/Ca) dans l'émail des premières molaires (GLN 207A et 207B) montrent clairement le signal de l'allaitement et de sevrage avant 3 ans.

Enfin, certains sujets présentent des valeurs isotopiques et/ou élémentaires distinctes du reste du groupe suggérant peut-être un **statut social particulier** de ces individus, au regard de caractéristiques biologiques et/ou funéraires particulières. C'est le cas de l'homme GLN 221B par exemple, de plus haut niveau trophique et occupant une position centrale dans la nécropole dans une tombe de grande dimension, de la femme GLN 284, à l'inverse de plus bas niveau trophique et occupant une position marginale dans la nécropole, ou encore peut-être des hommes GLN 257 et 302, inhumés avec des haches et présentant des caractéristiques biochimiques singulières selon différents indicateurs. Les hommes GLN 237A et 317 inhumés dans de grandes fosses avec un mobilier particulièrement « riche » (cf. I.3.e) ne se distinguent pas du reste du groupe mais présentent des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  relativement élevées. Toutefois, si des cas particuliers peuvent être discutés à la lumière des arguments archéologiques, on n'observe pas de récurrence de l'ensemble des indicateurs (archéologiques comme biochimiques), rendant obsolète toute interprétation systématique d'un type de pratique alimentaire relié à des gestes funéraires (et par extension à un statut social) particuliers.

En effet, **aucune corrélation significative** n'a été observée entre les données biochimiques et les **paramètres funéraires** (types de tombe, positions et orientations des défunts, mobilier associé), bien que quelques tendances puissent être observées pour certaines caractéristiques atypiques comme certaines positions du corps des défunts (repliés sur le côté droit, membres légèrement fléchis ou étendus ; cf. I.3). Ces caractéristiques doivent donc être discutées à la lumière d'autres arguments de plus large portée comme le sexe et les relations familiales.

En revanche, des **proximités isotopiques** entre des **tombes regroupées** spatialement dans la nécropole ont été mises en évidence et offrent de nouveaux arguments pour discuter de la structuration sociale de ce groupe, plus encore au regard des récents résultats génétiques révélant les liens de parenté. Nous reviendrons sur cet aspect de la répartition spatiale des signatures isotopiques dans la section I.4.

NB : Si une certaine variabilité isotopique a pu être observée en fonction de la **chronologie** (par ailleurs problématique à divers niveaux), notamment par une signature en  $\delta^{15}\text{N}$  plus variée entre 4800 et 4500 cal BC (période d'occupation plus dense de la nécropole), les récentes applications génétiques permettant de reconstruire un **arbre généalogique sur plusieurs générations** auront plus de poids pour aborder les questions de modifications alimentaires et de mobilité au cours du temps (Rivollat *et al.* 2021a ; Rivollat *et al.* 2021b). Elles permettent d'ores et déjà de dire que la nécropole a été utilisée sur une période n'excédant pas 120 ans et de constater que quelques individus des premières générations sont nés ailleurs (signature  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  distincte) et seraient venus s'implanter à Gurgy, où ils sont enterrés, pour fonder une famille, sans que leur régime alimentaire (à travers leur signature en isotopes stables tout du moins) ne change fondamentalement par rapport à certains individus des générations suivantes. En revanche, si leur signature (notamment un  $\delta^{15}\text{N}$  élevé) se « transmet » de génération en génération, ce n'est le cas qu'à travers quelques individus de chaque génération, occupant peut-être une place spécifique dans la société (enfants et petits-enfants des fondateurs ?), alors que d'autres présentent une signature différente (un plus faible  $\delta^{15}\text{N}$ ). Cette étude est en cours.

## I.2. Nouveaux résultats prenant en compte le sexe génétique à GLN

L'analyse génomique récemment menée à Gurgy « Les Noisats » a permis de déterminer le sexe de nouveaux individus de plus de 15 ans préalablement indéterminé et de quelques immatures de moins de 15 ans (Rivollat *et al.*, en préparation). Ainsi nous avons croisé ces nouveaux résultats avec les données isotopiques C et N du collagène osseux (les résultats sont quasiment inchangés pour le S et ne seront pas présentés ici). La Figure C10. 2 illustre les différences de répartition isotopique enregistrées entre les sexes déterminés anatomiquement et génétiquement. Les nouveaux résultats confirment, d'une part, la distinction isotopique en C et N relevée entre les sexes des sujets de plus de 15 ans (test U de Mann-Whitney,  $p < 0.05$ ) et, d'autre part, montrent une **différence sexuelle chez les immatures décédés avant 15 ans**.

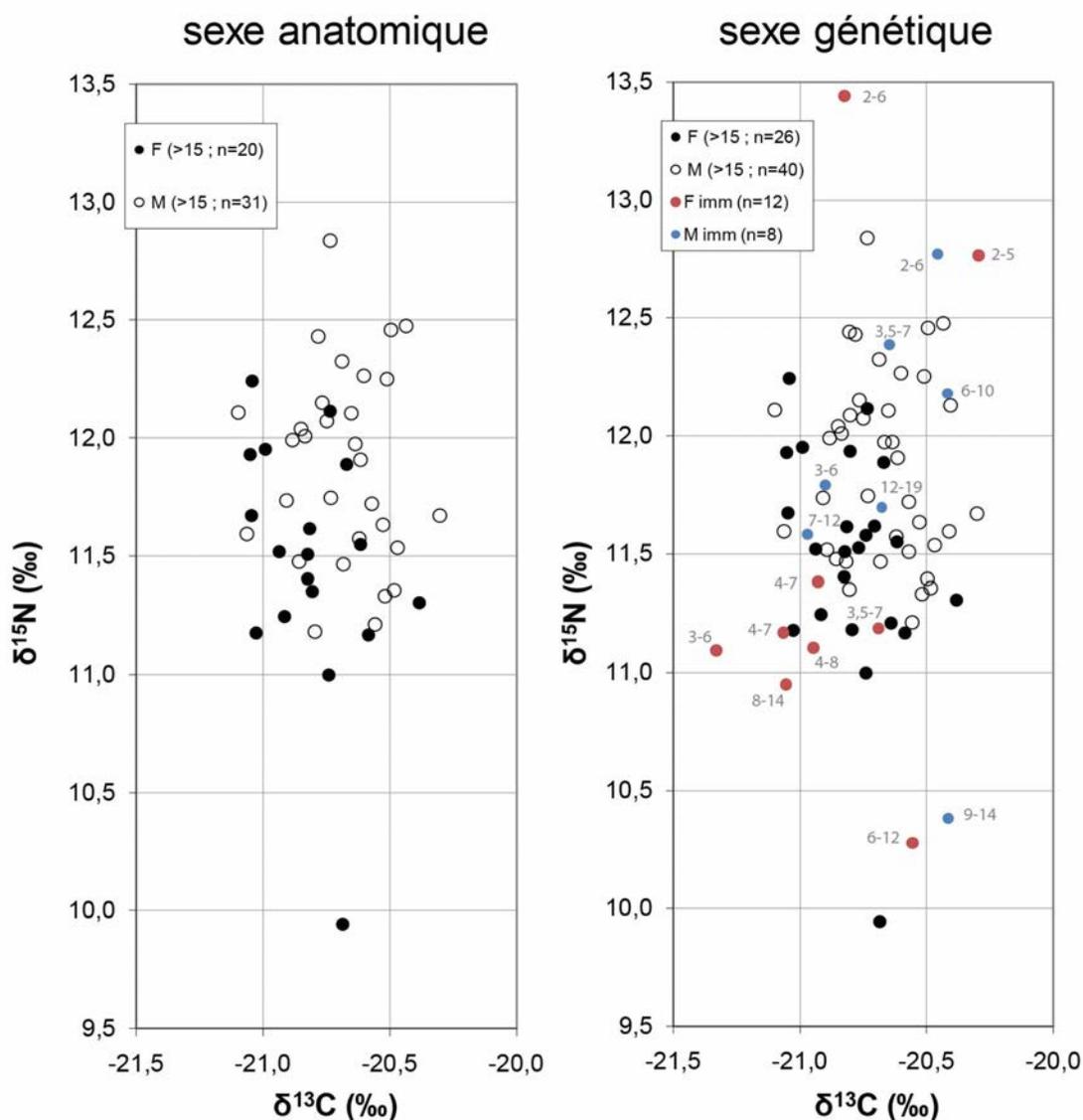


Figure C10. 2 : Distribution des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) du collagène osseux des sujets de Gurgy « Les Noisats » en fonction du sexe anatomique et génétique. « >15 » indique les sujets de plus de 15 ans ; « imm » les sujets immatures de moins de 15 ans ; « n » l'effectif de chaque catégorie.

Comme nous l'avons énoncé et discuté dans l'article du chapitre 6, ce dernier résultat à partir des données osseuses contraste avec les résultats obtenus dans la dentine des adultes qui ne révèle aucune différence entre les sexes avant 8-9 ans (la figure 4 de l'article Rey *et al*, 2021 – Chap6, p.391 – montre la variation isotopique dans l'os en fonction de l'âge au décès des enfants ; la différence entre les sexes s'observe déjà chez les enfants décédés entre 4 et 10 ans notamment). Il est particulièrement intéressant de constater que les filles les plus âgées (parmi les moins de 15 ans) présentent les valeurs les plus basses de  $\delta^{15}\text{N}$ . Cela pourrait indiquer soit un traitement différent des enfants morts jeunes – s'ils étaient malades par exemple, ils ont pu avoir accès à des soins et une alimentation différente en fonction de leur sexe – soit un processus physiologique lié à des causes de la mort différentes entre les sexes. Petites filles et garçons pouvaient être emportés par des raisons distinctes, peut-être en lien avec des activités différentes, même si leur alimentation était encore la même. Par exemple, un type de maladie pouvait toucher spécifiquement les petites filles et induire une baisse du  $\delta^{15}\text{N}$  alors que les

garçons (ou vice versa) seraient morts dans d'autres conditions n'impactant pas (ou pas de la même façon) le  $\delta^{15}\text{N}$ .

De telles hypothèses ne relèvent néanmoins que de conjectures qu'aucun paramètre archéologique ne nous permet actuellement d'étayer. Si l'analyse d'un plus grand nombre de sujets pourrait confirmer ou préciser la distinction observée entre les enfants morts jeunes et ceux ayant survécus, il n'en reste pas moins que ce résultat jette une lumière nouvelle sur ce type de comportement et revêt un aspect tout à fait inédit et précurseur qui devra être approfondi.

En outre, ce résultat interroge sur une possible **différence de modalité d'enregistrement du signal entre les os et les dents** (différence par ailleurs déjà mise en évidence dans une étude récente de Beaumont *et al.* 2018). Sinon due à une dissemblance de composition biochimique intrinsèque des tissus, celle-ci pourrait aussi refléter dans l'os une différence d'activité (perceptible dès le plus jeune âge) plutôt que de réelles divergences alimentaires. Ainsi la dichotomie observée entre l'os, indiquant une différence sexuelle, et la dentine (minéralisée avant 9 ans), n'indiquant pas de différence sexuelle, pourrait relever plutôt d'une conséquence de la plasticité du squelette par rapport aux conditions de vie et d'activité que d'une évolution des pratiques alimentaires avec l'âge. En d'autres termes, la différence observée ici entre os (signal de fin de vie) et dents (signal de l'enfance) ne serait peut-être pas à imputer à une variation due à l'âge mais plutôt à une divergence entre les tissus propre à leur nature. Dans ce cas, le changement de statut social perçu à travers les pratiques funéraires ne serait pas nécessairement accompagné de modifications du régime alimentaire avec l'âge. La différence isotopique observée dans l'os entre les sexes serait le témoin d'une division des tâches chez les adultes comme chez les enfants, division qui ne serait pas visible dans la dentine en raison du caractère moins perméable de la minéralisation dentaire aux conditions extérieures, dont l'influence de l'activité physique par exemple. Néanmoins cette hypothèse ne semble pas soutenue par les premiers résultats issus de **l'analyse isotopique séquentielle réalisée dans la dentine** des deux sujets GLN 221B et 284 (cf. Rey *et al.*, 2021 ; Chap6) qui **indiquent bien une modification du signal isotopique avec l'âge**. Ce résultat doit toutefois être confirmé sur un plus grand nombre d'échantillons.

NB : Le croisement des données isotopiques de **l'os avec l'âge au décès estimé** de ces enfants est délicat, d'une part parce que l'estimation de l'âge offre une précision de l'ordre de plusieurs années, d'autre part parce que l'os enregistre un signal moyenné, lui aussi, sur plusieurs années avant la mort et ne reflète pas une période de vie précise. L'analyse des **dents de ces enfants** pourrait fournir de meilleurs résultats pour tenter un recalage chronologique plus précis. Pour la majorité, les dents de ces enfants morts jeunes n'ont pas été échantillonnées dans le cadre de ce travail (seuls GLN 210, 215B et 301 l'ont été ; cf. Annexe A34). D'autre part, l'analyse des éléments traces (de l'os et de l'email) a porté presque essentiellement sur les sujets adultes. Il serait intéressant d'analyser des dents d'enfants morts jeunes pour les comparer à celles des sujets décédés à l'âge adulte.

### I.3. Précisions sur le croisement des indicateurs biochimiques avec les paramètres funéraires

Compte tenu de la diversité des dispositifs funéraires et du mobilier rencontrée à Gurgy, il est difficile de mettre en évidence des catégories de traitement. Aucun recrutement particulier n'a été identifié au sein de la nécropole en fonction de l'identité biologique des sujets ou de leurs dispositifs funéraires, ni aucun regroupement spatial selon ces caractéristiques, hormis les tombes à alcôves principalement rassemblées au sud-ouest de la nécropole (cf. Chap3.II.1.e). Néanmoins, nous avons souhaité croiser ces paramètres avec la signature biochimique des sujets pour tenter d'identifier d'éventuelles corrélations entre pratiques alimentaires et pratiques funéraires, pouvant témoigner de statuts sociaux particuliers. Pour la quasi-totalité des marqueurs, **aucune différence statistiquement significative** n'a été mise en évidence entre les catégories déterminées sur la base des différents paramètres funéraires testés (Tableau C10. 1).

paramètre de comparaison	catégories (n = effectif maximum)					test statistique	différence non signif. (valeur p)	différence significative (valeur p)
type de tombe	fosse simple (71)	alcôve (8)	cuvelée (4)			ANOVA de Kruskal-Wallis	>0,2	
position du sujet/tronc	fléchi gauche (56)	fléchi droit (3)	fléchi dos (23)	fléchi ventre (2)		ANOVA de Kruskal-Wallis	>0,1	
position des membres supérieurs	fléchis (8)	hyper-fléchis (37)	fléchis léger (3)	étendus (2)	différents (29)	ANOVA de Kruskal-Wallis	>0,2	
position des membres inférieurs	fléchis (30)	hyper-fléchis (51)	fléchis léger (3)	différents (1)		ANOVA de Kruskal-Wallis	>0,1	
orientation du sujet (tête)	sud (44)	sud-ouest (28)	ouest (7)	autres (7)		ANOVA de Kruskal-Wallis	>0,2	$\delta^{13}C_{dent}$ (0,04)
ocre	présence (16)	absence (67)				U de Mann-Whitney	>0,1	
faune	présence (25)	absence (58)				U de Mann-Whitney	>0,1	
parure	présence (16)	absence (67)				U de Mann-Whitney	>0,05	
lithique	présence (21)	absence (62)				U de Mann-Whitney	>0,08	
céramique	présence (11)	absence (72)				U de Mann-Whitney	>0,06	$\delta^{15}N_{dent}$ (0,01)
coquille	présence (12)	absence (71)				U de Mann-Whitney	>0,1	
exceptionnel	présence (16)	absence (70)				U de Mann-Whitney	>0,2	

**Tableau C10. 1 : Table de comparaison statistique de la signature biochimique des défunts en fonction des principales caractéristiques funéraires. Les variables biochimiques sont considérées (dès lorsque l'effectif le permet) indépendamment les unes des autres ( $\delta^{13}C$ ,  $\delta^{15}N$ ,  $\delta^{34}S$ ,  $\delta^{15}N_{AA}$ , Sr/Ca et Ba/Ca dans l'os et la dent). Une différence significative est observée pour  $\delta^{13}C$  et  $\delta^{15}N$  dans la dentine pour l'orientation de la tête et la présence ou non de céramique mais relève probablement d'un biais d'échantillonnage.**

NB : Si des contenants rigides tels que des coffres ont été identifiés dans la nécropole, les indices taphonomiques font souvent défaut pour le certifier et surtout pour distinguer clairement les sujets inhumés en coffre de ceux sans coffre. Dans la plupart des cas, des effets de paroi ont été observés sur un ou plusieurs côté, généralement accompagnés d'indices de couverture. Pour cette raison, ce caractère n'est pas pris en compte ici.

#### I.3.a. Des valeurs isotopiques dans l'os similaires pour des positions atypiques

Le résultat des principaux croisements effectués est donné dans la Figure C10. 3 et montre que, bien que l'analyse statistique n'ait révélé aucune différence significative, pour certaines positions atypiques

les individus semblent partager des valeurs isotopiques particulières. Par exemple, les trois sujets déposés en **position fléchie sur leur côté droit** (GLN 236A, 276 et 310A, respectivement une femme, un homme et un enfant) présentent un  $\delta^{15}\text{N}$  relativement faible, entre 11,2 et 11,5 ‰. Les deux femmes reposant **sur le ventre** (GLN 283 et 284) présentent également un  $\delta^{15}\text{N}$  compris dans la moitié inférieure de la dispersion globale du groupe (inférieur à 11,5‰). À l'inverse, les sujets inhumés avec les **membres supérieurs étendus** (GLN 209 et 212, un homme et une femme respectivement) dénotent un  $\delta^{15}\text{N}$  plus élevé, de 12,2 et 12,3‰. Pour trois sujets dont les **membres inférieurs** n'étaient que **légèrement fléchis** (GLN 212, 221B et 237A), le  $\delta^{15}\text{N}$  est aussi relativement élevé (supérieur à 12,1‰) et le  $\delta^{13}\text{C}$  plutôt bas, notamment pour GLN 212 et 237A.

### I.3.b. Des proximités isotopiques dans la dentine ?

Par ailleurs, deux différences statistiquement significatives ont été mises en évidence dans la dentine (Figure C10. 3 encadrés gris) : les deux sujets enterrés avec la **tête à l'ouest** (GLN 269 et 315) présentent un fort  $\delta^{15}\text{N}$  et surtout un  $\delta^{13}\text{C}$  plus élevé que la moyenne ; d'autre part, les trois individus enterrés avec de la **céramique** (GLN 220, 221B et 284) présentent un  $\delta^{15}\text{N}$  particulièrement élevé (l'association des tessons avec les défunts n'est cependant pas toujours avérée, ces-derniers se trouvant le plus souvent dans le remplissage). Néanmoins, ces différences sont ténues par rapport au reste du groupe et le faible effectif ne peut permettre de généraliser ces tendances qui pourraient refléter aussi un biais d'échantillonnage.

### I.3.c. Les éléments trace dans l'émail

De la même façon, nous avons cherché d'éventuelles parallèles entre les valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca dans l'émail dentaire (dernier jeu de données pour lequel nous avons suffisamment d'échantillons à comparer) et les paramètres funéraires, bien qu'aucune différence statistiquement significative n'ait été enregistrée. Comme pour la dentine, les sujets orientés la **tête à l'ouest** (à savoir les deux femmes GLN 269 et 315, ainsi que l'homme GLN 276) présentent des valeurs de Ba/Ca comparables et homogènes relativement à la variabilité générale (Annexe A48). Aucune autre spécificité n'est observée.

### I.3.d. Variabilité isotopique en fonction du dispositif funéraire pour chaque sexe

En outre, étant donnée la variation isotopique ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  osseux) mise en évidence entre les sexes et avec l'âge, additionné aux tendances funéraires observées plutôt – mais pas exclusivement – chez les hommes (e.g. outils lithiques, alcôves) ou chez les femmes (e.g. parures constituées d'un grand nombre

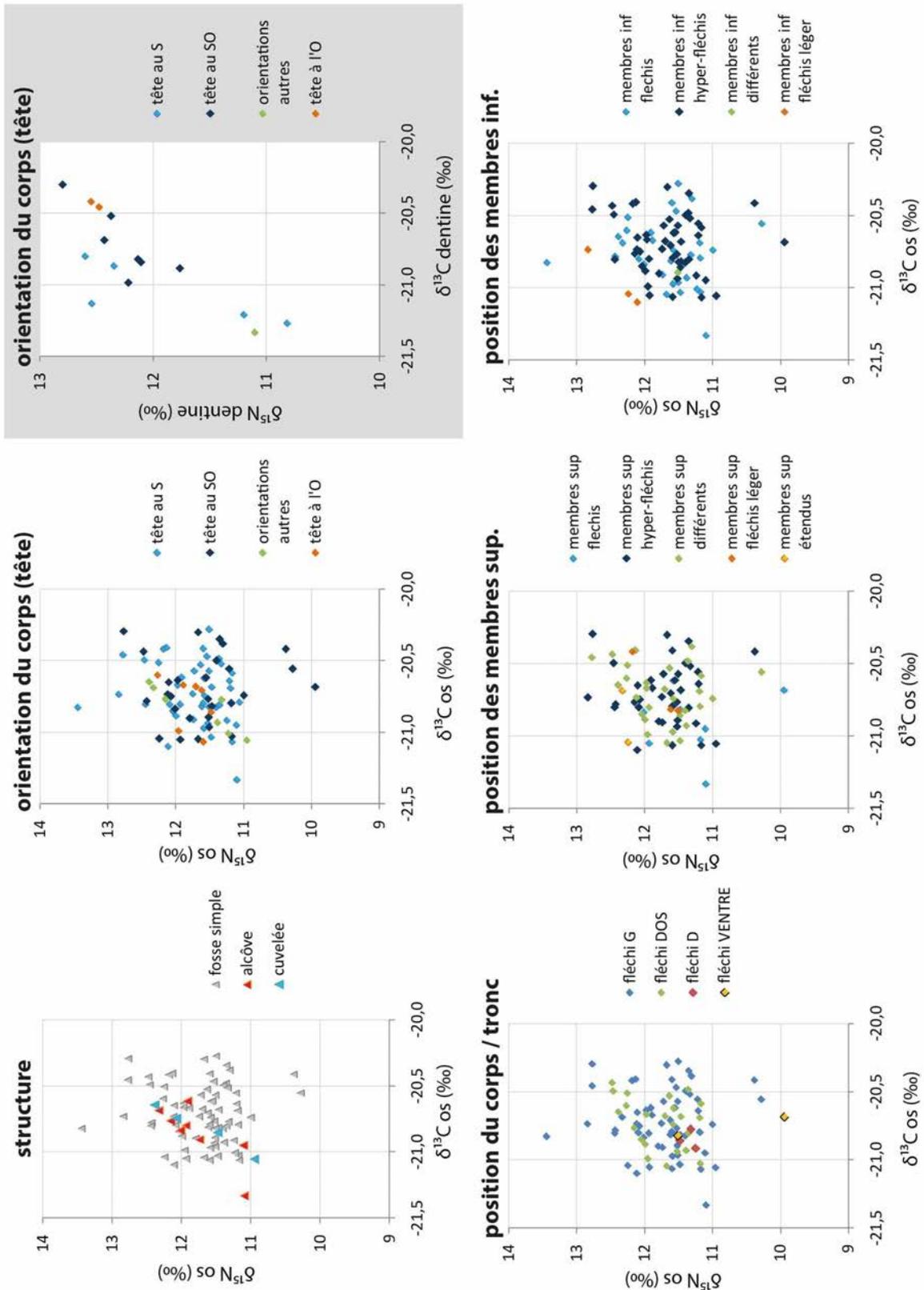
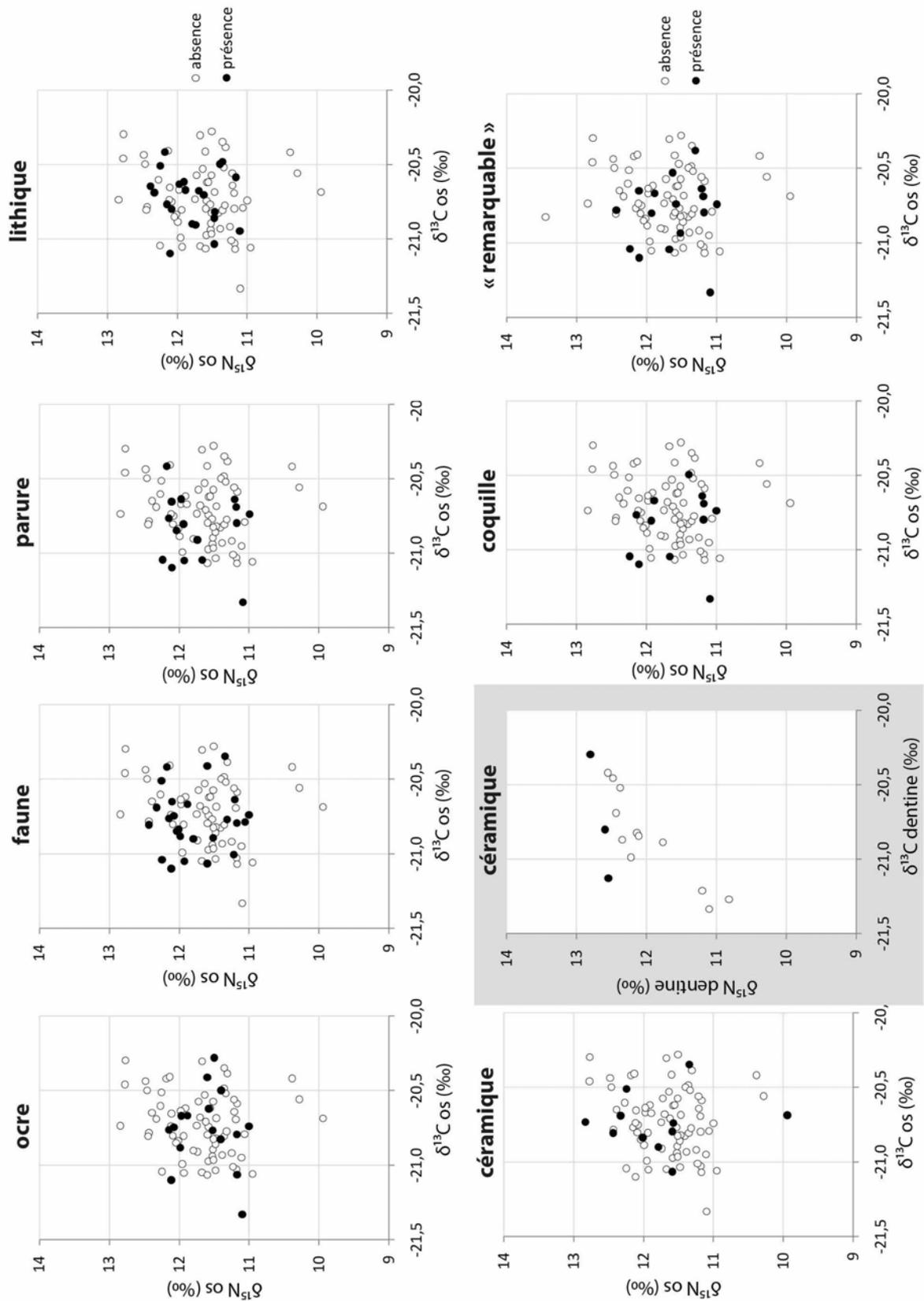


Figure C10. 3 : Répartition des valeurs isotopiques du carbone et de l'azote dans l'os (et dans la dentine, encadrés gris) selon plusieurs paramètres funéraires comme le type de structure, la position et l'orientation des défunts et le mobilier associé. Certaines positions atypiques du corps semblent associées à des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  spécifiques, comme la position fléchie sur le côté droit ou sur le ventre (faible  $\delta^{15}\text{N}$ ) ou les membres supérieurs étendus et les membres inférieurs légèrement fléchis ( $\delta^{15}\text{N}$  élevé). Toutefois, le faible effectif et le résultat statistique (suite page suivante)



(suite) non significatif doivent nuancer cette observation. Ces résultats doivent être discutés au regard d'autres paramètres comme la répartition spatiale dans la nécropole, l'âge, le sexe, la génération et les relations de parenté. Les éléments de mobilier sont également à observer sous forme de combinaisons (parure en coquillage et os de faune par exemple). Le mobilier « remarquable » est discuté plus en détail dans la section I.3.e. S : sud, SO : sud-ouest, O : ouest, G : gauche, D : droite, sup. : supérieurs, inf. : inférieurs.

de perles), il est apparu nécessaire d'observer cette distribution **pour chaque sexe séparément**. Les principaux résultats sont donnés en Annexe A49 et ne mettent **pas plus** en évidence **de distinction** au sein de chaque sexe. En d'autres termes, sur l'ensemble des femmes, celles inhumées avec de la parure, par exemple, ne présentent pas de valeurs isotopiques différentes de celles inhumées sans parure. D'un point de vue statistique, les effectifs sont le plus souvent insuffisants pour détecter de potentielles différences significatives au sein de chaque catégorie biologique (par âge au décès et/ou par sexe) – en particulier pour les dispositifs atypiques mentionnés plus haut – mais, lorsque cela a été possible, aucune distinction n'a été relevée.

### I.3.e. Croisements avec le mobilier « remarquable »

Pour finir, nous avons cherché à savoir si le mobilier dit « remarquable », par sa **provenance lointaine** (roche alpine, coquillage marin), sa **quantité** (certaines parures sont composées de nombreuses perles) ou son **caractère inédit dans la nécropole** (une seule meule a été retrouvée, un seul récipient complet en céramique ou encore un dépôt de manganèse) pouvait être mis en relation avec une signature biochimique particulière des inhumés. La Figure C10. 4 illustre les principaux croisements explorés entre les sujets ayant livré ce type de mobilier et les valeurs isotopiques  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  de leur collagène osseux. **Aucun schéma particulier** n'apparaît, quels que soient l'âge ou le sexe des défunts et le type d'objet considéré.

Les deux petites filles GLN 208 et 214 enterrées avec de nombreuses perles présentent un  $\delta^{15}\text{N}$  similaire mais un  $\delta^{13}\text{C}$  très différent. Nous avons vu précédemment que les filles (avant 15 ans), présentaient un  $\delta^{15}\text{N}$  très bas par rapport au reste du groupe et ce critère ne semble pas lié uniquement à la présence des perles dans leur tombe. La femme GLN 294 inhumé avec 136 dentales a une signature similaire à la fillette GLN 214 présentée ci-avant, mais la femme GLN 212 possédant une vingtaine de perles présente une signature nettement distincte de ces dernières. Par ailleurs, les coquilles de *Nucella lapillus* sont associées à des femmes de signature variable : GLN 294 et 277 sont proches entre elles mais différentes, ensemble, de GLN 246. Les femmes inhumées avec des coquilles (*Glycymeris*, *Unio* et *Nucella lapillus* ; GLN 212, 315 et les trois précédentes) présentent des valeurs isotopiques très variées. Nous avons vu précédemment que les hommes enterrés avec les haches ont des signatures distinctes (GLN 257 et 302 ; cf. Chap9.II.4). L'homme à la parure en roche verte et quartz (GLN 317) ne se démarque pas du reste du groupe (il présente néanmoins un  $\delta^{15}\text{N}$  relativement élevé) et n'indique pas particulièrement de similitudes avec l'homme à la hache en roche verte (GLN 302) bien que leurs moyennes de  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  ne soient pas éloignées (Annexe A34).

Par ailleurs, alors que trois femmes (GLN 264, 277 et 294) comportant dans leur sépulture des dents de faune sauvage présentent des valeurs isotopiques particulièrement proches (dont un faible  $\delta^{15}\text{N}$ ), une autre ayant livré le même type de mobilier (GLN 212) présente une signature nettement différente avec un  $\delta^{15}\text{N}$  élevé. On peut noter encore que le seul individu inhumé avec un vase en céramique complet

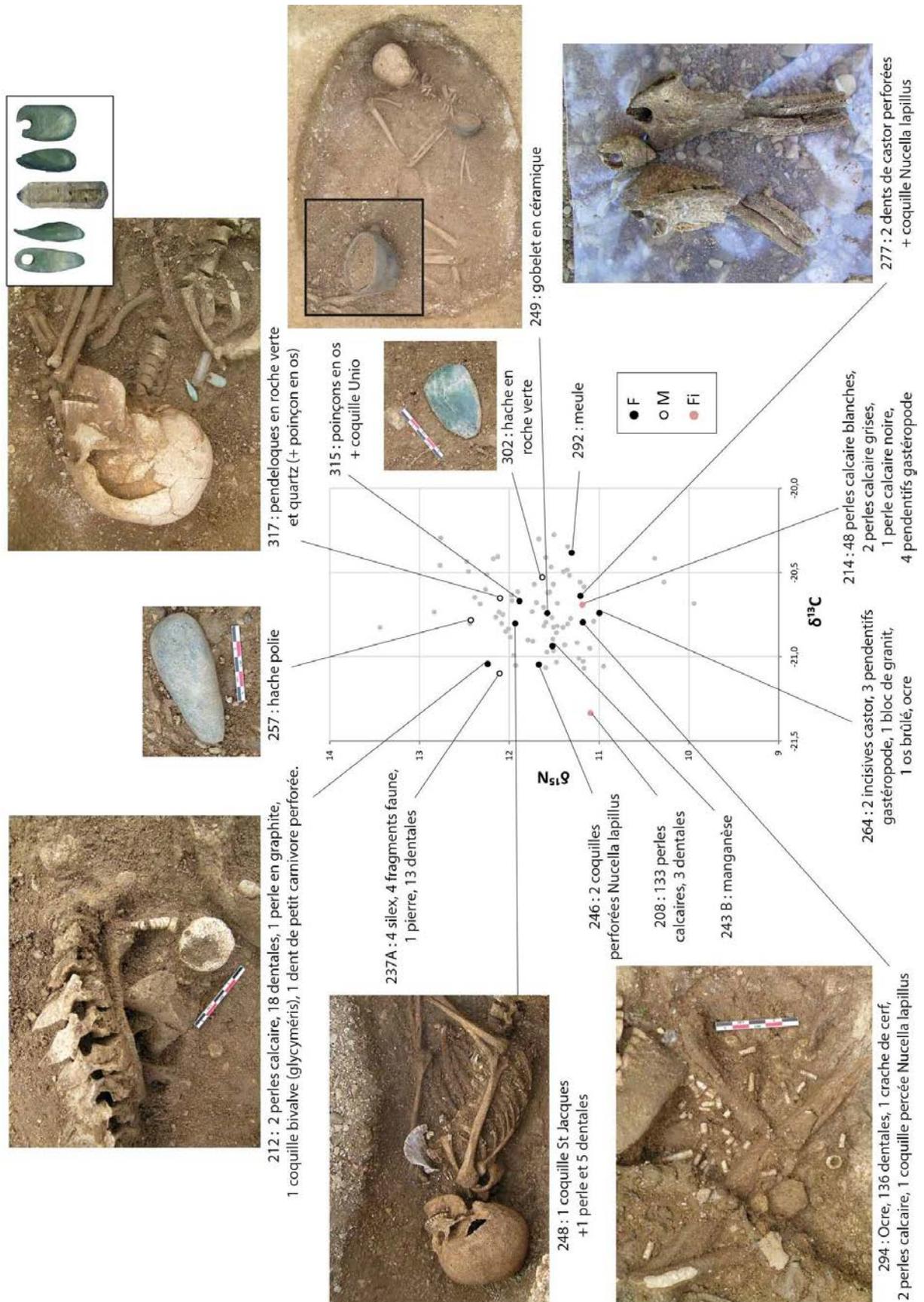


Figure C10. 4 : Distribution des valeurs isotopiques du carbone et de l'azote dans l'os des individus inhumés avec du mobilier « remarquable » par sa provenance, sa quantité ou son aspect inédit dans la nécropole. F : sujets féminins de plus de 15 ans, M : sujets masculins de plus de 15 ans, Fi : sujets féminins immatures (<15 ans).

(la femme GLN 249) présente une signature isotopique en plein cœur de la variabilité générale, comme de la variabilité des femmes uniquement (cf. Chap9.II.2).

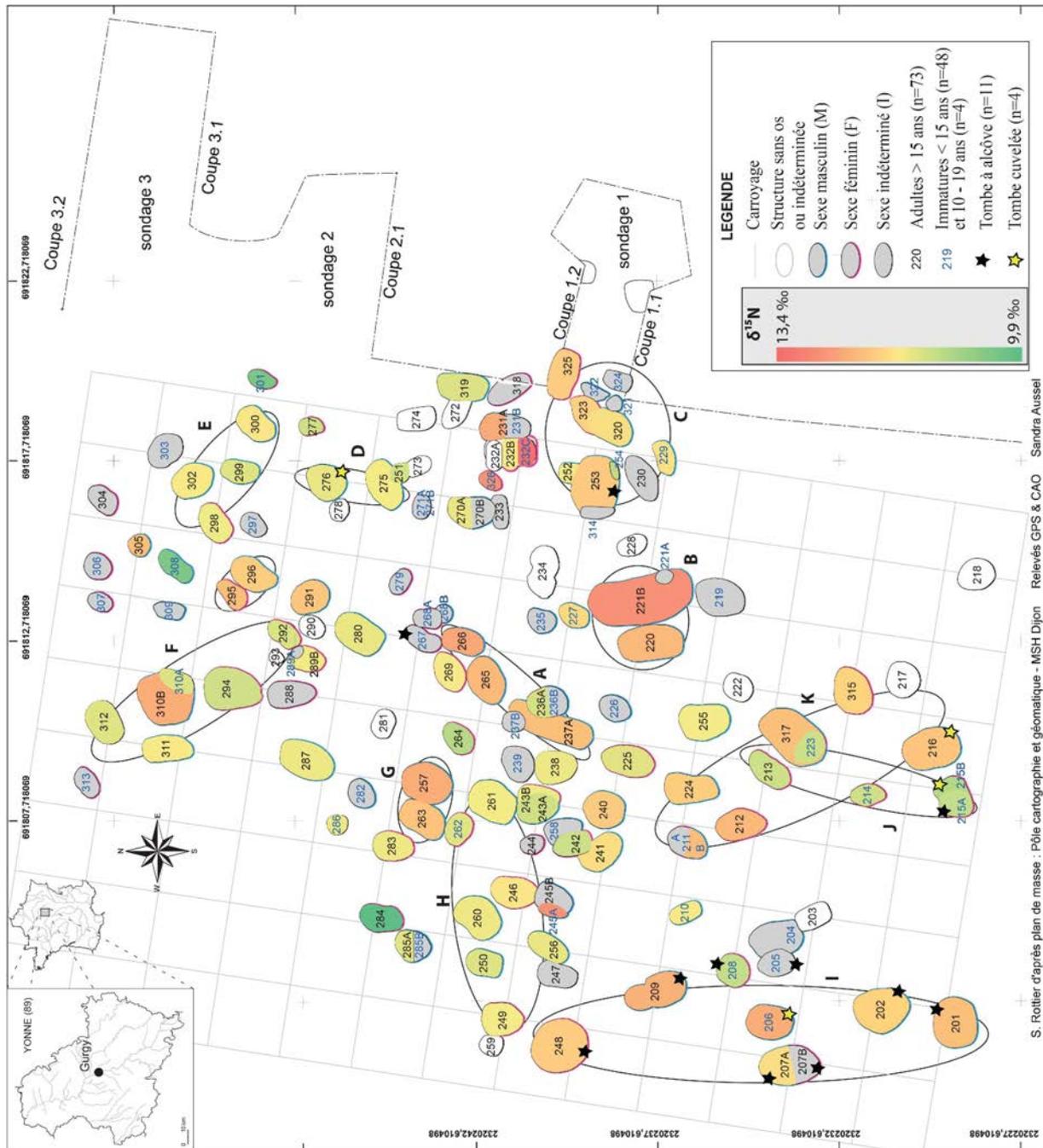
Évidemment, ces comparaisons ne concernent que **quelques individus isolés** et la corrélation avec les valeurs isotopiques est délicate, d'autant plus lorsque l'on considère l'incertitude liée à la mesure (cf. Chap2.IV.5.a). De plus, la définition du mobilier « remarquable » est subjective et englobe une large variété d'objets qui n'ont vraisemblablement pas le même sens symbolique et peut-être pas de portée « exceptionnelle » comme nous le suggérons ici.

### I.3.f. Conclusions

Globalement, il semble que la **répartition du mobilier et des dispositifs funéraires n'était pas liée à des régimes alimentaires distincts** ou du moins, une telle relation n'est pas visible par le biais de ces analyses. Les **rapprochements observés entre sujets atypiques** (positions minoritaires notamment) sont néanmoins à considérer au regard d'une combinaison de paramètres comme la répartition spatiale dans la nécropole, l'âge, le sexe, la génération et les relations de parenté (cf. I.4). Par ailleurs, les éléments de mobilier devraient aussi être considérés sous forme de combinaisons (parure en coquillage associé à os de faune par exemple), comme plusieurs combinaisons de ce type ont été observées antérieurement (Le Roy 2015). Il est essentiel de ne pas oublier que les dispositifs funéraires sont discutés ici par catégories construites arbitrairement qui ne reflètent probablement pas leur réelle signification, en particulier dans le cas de la grande diversité observée ici. Une analyse intégrative et multifactorielle prenant en compte les analyses biochimiques, les récentes données génétiques et la répartition spatiale apportera sans doute de nouveaux éléments de compréhension de l'organisation sociale ayant cours à Gurgy.

### I.4. Répartition spatiale des valeurs isotopiques

La répartition spatiale des tombes dans la nécropole semble révéler que certains individus sont regroupés entre eux dans des tombes proches. Ainsi, nous avons souhaité savoir s'ils partageaient également une signature isotopique similaire et avons représenté les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  dans l'os (les plus significatives en termes de différences interindividuelles) sous forme de dégradé de couleurs sur le plan de la nécropole (Figure C10. 5). Les principales informations biologiques (sexe et catégorie d'âge au décès) et archéologiques (taille des fosses, alcôves et fosses cuvelées) sont également représentées sur cette figure pour caractériser d'éventuelles disparités en fonction de ces critères au sein de chaque ensemble. Rappelons que ces groupes de tombes ne partagent a priori pas d'autres éléments bioarchéologiques que leur proximité spatiale, hormis le groupe de sépultures à alcôves rassemblées au sud-ouest de la nécropole (cf. Chap3.II.1.e). Rappelons également que des proximités dans leur microstructure dentaire ont été signalées (Le Luyer 2016 ; cf. encadré p.539-541).



**Figure C10. 5 : Plan de répartition spatiale des sépultures en fonction des valeurs isotopiques de l'azote et selon l'âge, le sexe et le type de tombe des sujets de Gurgy « Les Noisats ». Les ellipses représentent les clusters identifiés sur la base des regroupements de tombes et de la proximité en  $\delta^{15}N$  nommés de A à K.**

Comme cela a été évoqué dans l'article Rey *et al.* 2019 (Chap5.II), une première observation de la répartition des valeurs de  $\delta^{15}N$  osseux semble témoigner de **signatures isotopiques plus proches** entre individus identifiés **dans un même regroupement**. Ces proximités sont représentées par les ellipses sur la Figure C10. 5. Sur la base de ces regroupements, il est aisé d'imaginer une structuration par noyaux « familiaux » partageant les mêmes ressources, au sein desquels chacun occupe une place déterminée, par son sexe ou son âge, et peut-être une fonction spécifique qui sera marquée ou non par le mobilier déposé dans la tombe ou le dispositif sépulcral lui-même.

Dans certains cas, un **personnage central** (le « chef » de famille par exemple ?) pourrait occuper une tombe plus grande et présenter des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  supérieures témoignant peut-être d'un régime plus riche en protéine comme on peut l'observer pour le **groupe B** (221B – 220 – 227) ou encore le **groupe F** (310B – 312 – 311 – 294 – 292 – 289B).

Ce schéma n'est toutefois pas récurrent et d'autre part, au sein de chaque groupe, les **disparités hommes/femmes** ne sont pas toujours visibles et connaissent des variantes. Si l'on note une distinction dans le **groupe G** (257 – 263, deux hommes de  $\delta^{15}\text{N}$  similaire, et 283, une femme de  $\delta^{15}\text{N}$  inférieur) par exemple, ou encore dans le **groupe A** (237A – 265 – 266, trois hommes de  $\delta^{15}\text{N}$  similaire, et 236A – 269, deux femmes de  $\delta^{15}\text{N}$  inférieur), on ne constate **pas de différence** en revanche dans le **groupe K** (317 – 216 – 224 – 212 – 315, trois hommes et deux femmes respectivement qui présentent un  $\delta^{15}\text{N}$  similaire ; hormis la femme 213, nous y reviendrons) ni dans le **groupe C** (252 – 253 – 320 – 323 – 325, trois hommes et deux femmes), le **groupe E** (298 – 299 – 300 – 302, une femme et trois hommes), le **groupe H** (246 – 249 – 250 – 256 – 260 – 261, deux femmes et quatre hommes) ou encore dans le **groupe I** rassemblant hommes, femmes et enfants dans des alcôves (les adultes 201 – 202 – 207A – 209 – 248 présentent des valeurs similaires alors que l'enfant 208 présente un  $\delta^{15}\text{N}$  inférieur ; l'enfant 206 en fosse cuvelée a un  $\delta^{15}\text{N}$  similaire à celui des adultes).

Dans le **groupe K**, la femme 213 inhumée juste à côté de l'homme 317 présente toutefois un  $\delta^{15}\text{N}$  inférieur à ce-dernier, alors que les autres femmes de ce groupe, réparties plus à l'écart des autres tombes, présentent un  $\delta^{15}\text{N}$  semblable à celui des hommes. À côté de ce groupe et peut-être intriqué avec lui se trouve le **groupe J** constitué surtout d'immatures (de moins de 15 ans) qui présentent tous des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  inférieures au groupe K et similaires à celle de la femme 213. Dans cet **ensemble J et K**, il semble que l'on puisse individualiser deux sous-ensembles : l'homme 317 avec la femme 213 et l'enfant 223 d'une part et l'homme 216 avec les deux immatures 215 A et B (enfant et adolescent respectivement) d'autre part. Dans les deux cas, l'homme présente un  $\delta^{15}\text{N}$  supérieur.

Dans l'ensemble, cette figure met bien en évidence les similitudes et dissemblances pouvant exister entre les groupes d'une part et entre les individus selon leur âge et leur sexe au sein de chaque groupe d'autre part. S'il semble que l'on puisse aborder l'histoire et le fonctionnement de ces groupes par l'analyse du  $\delta^{15}\text{N}$  osseux notamment (malgré l'incertitude analytique, la structuration par groupe se dégage assez nettement), il apparaît évident que celle-ci doivent s'écrire indépendamment pour chaque groupe et être considérée à la lumière d'autres paramètres tels que les liens de parenté ou le mobilier.

Il serait intéressant de représenter sur ce plan le type de mobilier associé à chaque sépulture à l'aide de symboles choisis, de même que la position et l'orientation des défunts. Or ce travail a été réalisé par M. Le Roy dans le cadre de sa thèse de doctorat (2015) et toutes les cartes de répartition sont disponibles et peuvent être croisées entre elles par système d'information géographique (SIG). Ce type

d'analyse permet de conjuguer différents paramètres dans le but d'identifier des regroupements statistiquement significatifs : non seulement les caractéristiques biologiques (âge et sexe) et funéraires (type de tombe, positions et orientations, mobilier), mais également les données génétiques (relations de parenté) et biochimiques (plusieurs proxies simultanément). Ce travail est en cours de réalisation, en collaboration avec M. Le Roy (Queen's University, Belfast).

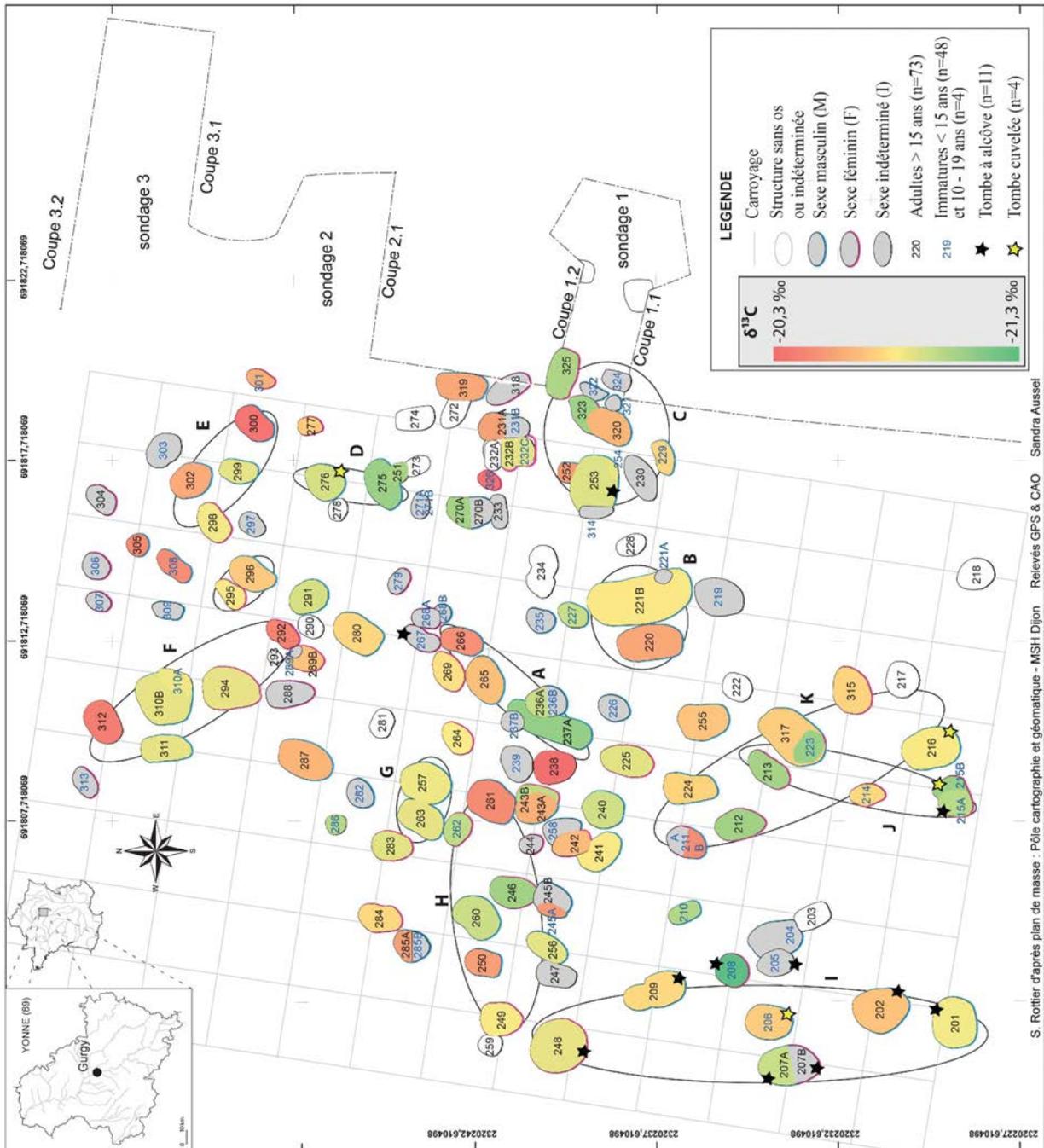


Figure C10. 6 : Plan de répartition spatiale des sépultures en fonction des valeurs isotopiques du carbone, selon l'âge, le sexe et le type de tombe des sujets de Gurgy « Les Noisats ». Les ellipses représentent les clusters identifiés précédemment (Figure C10. 5) sur la base des regroupements de tombes et de la proximité en  $\delta^{15}N$  nommés de A à K.

Les plans de répartition des valeurs isotopiques de  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  sont représentés sur les Figure C10. 6 et Figure C10. 7 à titre de comparaison, mais sont toutefois moins informatifs. La grande homogénéité des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$ , d'une part, autorise difficilement l'observation de rapprochements spécifiques entre individus ; les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$ , d'autre part, sont moins nombreuses et ne permettent que de rares comparaisons au sein des groupes A à K identifiés précédemment : dans certains cas (groupes B, K, E, F), elles mettent toutefois en évidence une certaine similitude déjà identifiée par le  $\delta^{15}\text{N}$ .

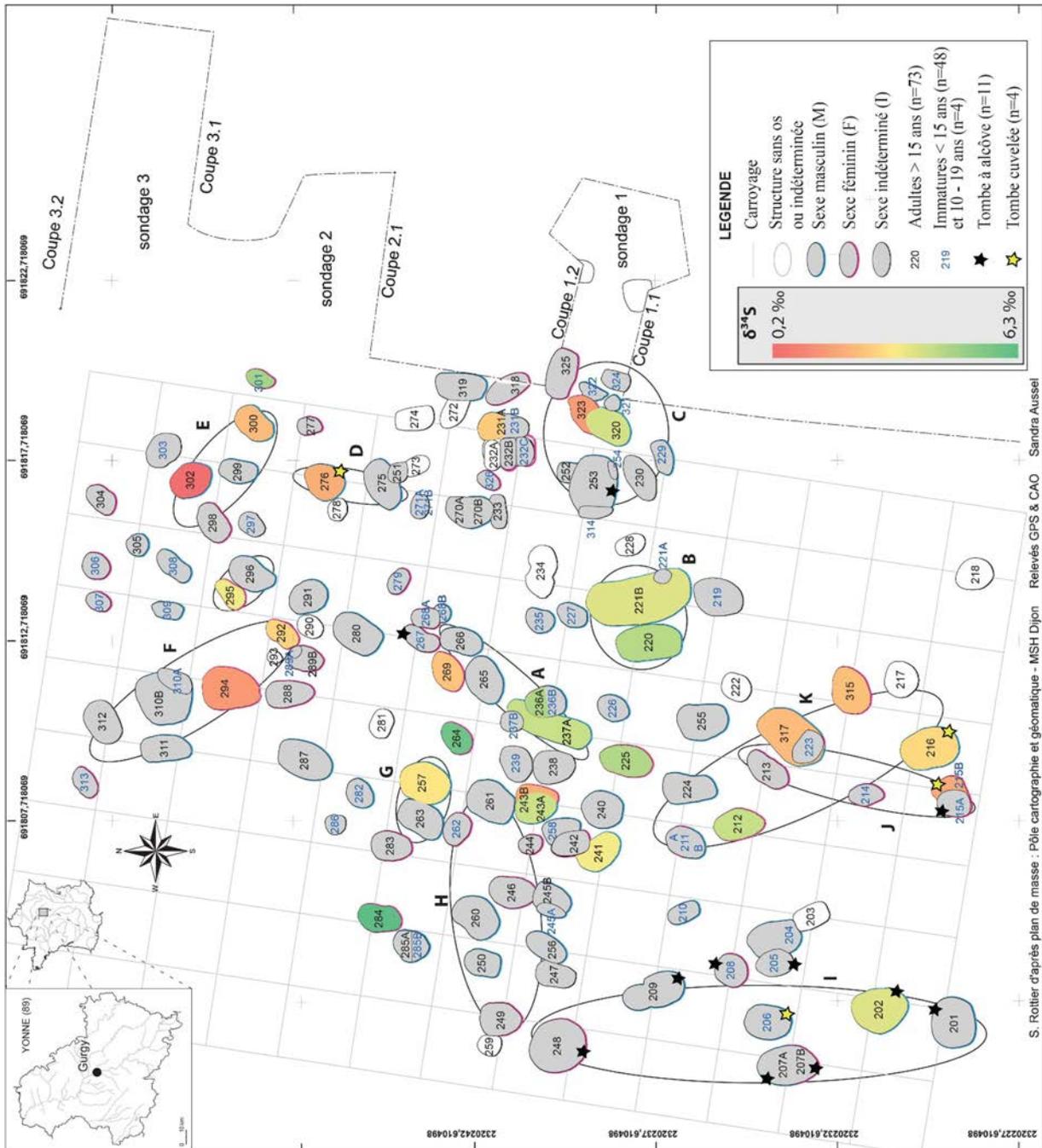


Figure C10. 7 : Plan de répartition spatial des sépultures en fonction des valeurs isotopiques du soufre, selon l'âge, le sexe et le type de tombe des sujets de Gurgy « Les Noisats ». Les ellipses représentent les clusters identifiés précédemment (Figure C10. 5) sur la base des regroupements de tombes et de la proximité en  $\delta^{15}\text{N}$  nommés de A à K.

### **Proximités de la microstructure dentaire, proximités biochimiques et proximité spatiale**

À partir des proximités identifiées sur la base des microstructures dentaires (Le Luyer 2016), nous avons cherché à savoir s'il pouvait également exister une proximité dans la signature biochimique de ces individus. La Figure C10. 8 illustre les comparaisons observées. Pour le premier groupe (201 – 229 – 253 – 223 – 257), il apparaît que les individus partageant les mêmes proportions de leurs tissus dentaires présentent également des signatures isotopiques similaires pour  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ . Le sujet 223 qui présente la plus faible valeur de  $\delta^{15}\text{N}$  est un sujet immature de moins de 8 ans et doit être considéré séparément. Ce schéma est similaire pour le deuxième groupe (289B – 308 – 301 – 277 – 292) dont les trois adultes partagent notamment des valeurs similaires de  $\delta^{15}\text{N}$  et les deux enfants également, entre eux et indépendamment des adultes (308 et 301 de 9-14 et 6-12 ans respectivement). Pour les autres groupes et les autres marqueurs, les rapprochements biochimiques sont moins évidents. Ces résultats confortent, pour **les deux premiers groupes**, une **origine familiale commune** d'une part (microstructure dentaire analogue) et d'autre part, des **pratiques alimentaires probablement similaires** (signature isotopique semblable). Il est à noter que les sujets du premier groupe sont des hommes (sauf l'enfant 223) et ceux du deuxième groupe sont des femmes et des enfants (301 et 308). Néanmoins les proximités relevées pour chacun de ces groupes sont quand-même parlantes.

Ces résultats sont reportés sur le plan de la nécropole (Figure C10. 9) et montrent que les individus de ces deux regroupements appartiennent à **deux ensembles différents de la nécropole** sans être inhumés à proximité les uns des autres. D'après les récentes données génétiques sur les liens de parenté, ces ensembles correspondent à deux familles distinctes dont la plus nombreuse (famille A) est réunie au sud-ouest de la nécropole et la plus modeste (famille B) au nord-est (Rivollat *et al.* 2021b). D'autre part, sur les cinq individus du premier groupe, trois sont de la dernière génération (Rivollat, comm. pers. ; Rivollat *et al.*, en préparation) ce qui renforce l'idée de cohérence entre ces sujets. Ils ont probablement vécu en même temps (ou dans un laps de temps court) et consommé les mêmes ressources. L'avancée récente des recherches permettant ce type de recoupements est très prometteur pour la suite de l'étude du site.

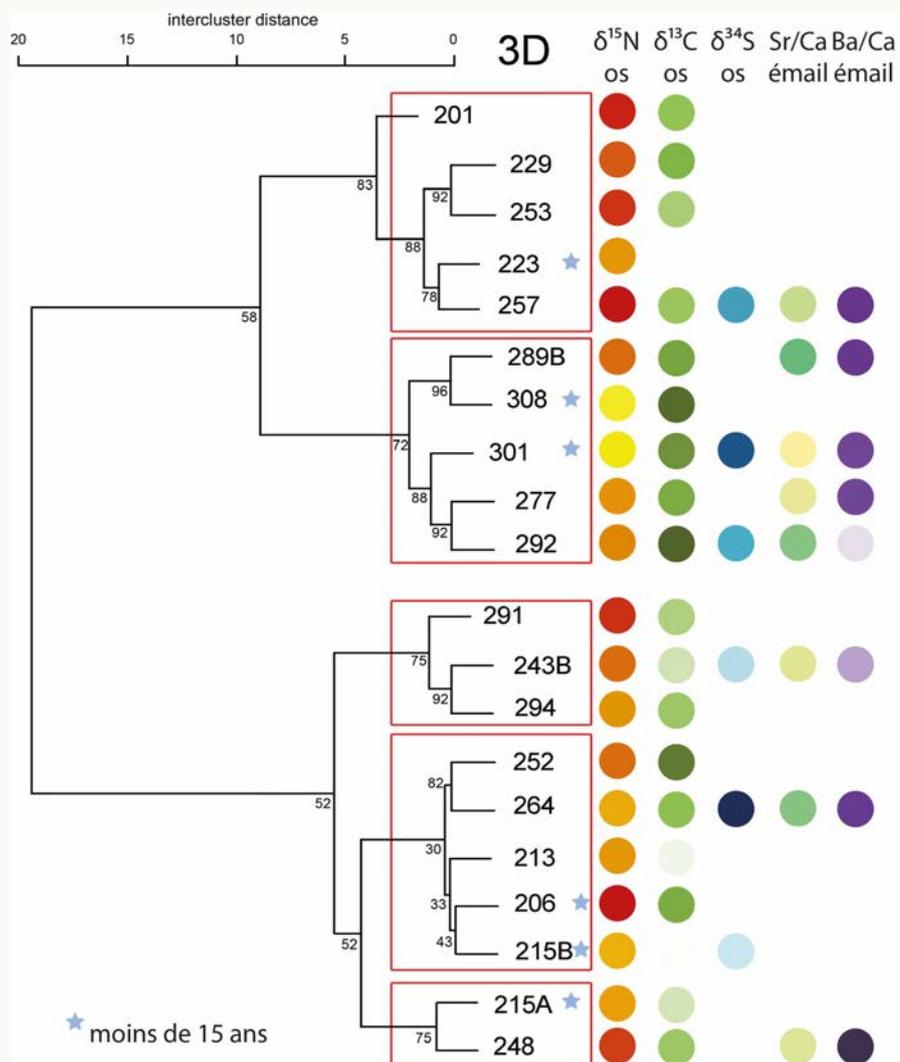


Figure C10. 8 : Dendrogramme illustrant les rapprochements proposés sur la base de la microstructure dentaire (issu d'une analyse de groupe basée sur les proportions de tissus dentaires en 3D ; les valeurs Bootstrap sont indiquées sur les nœuds ; d'après Le Luyer *et al*, 2016) et dégradés de couleurs illustrant la variabilité des valeurs biochimiques correspondantes. Les couleurs les plus foncées correspondent aux valeurs les plus élevées pour les rapports isotopiques et inversement pour les éléments traces. Les sujets de moins de 15 ans sont marqués d'une étoile bleue.

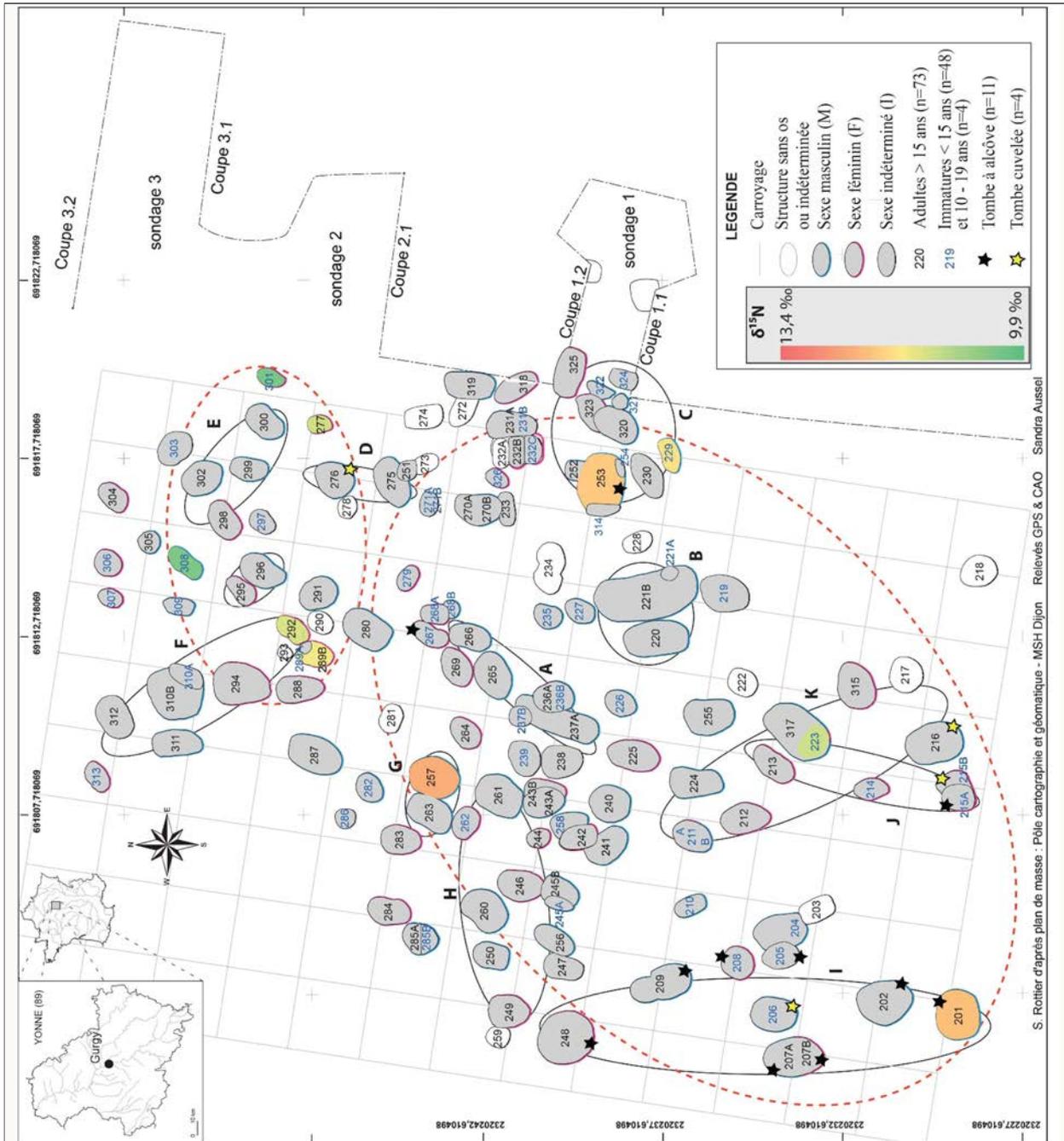


Figure C10. 9 : Plan de répartition spatial des sépultures des individus partageant des proportions similaires de leurs tissus dentaires (d'après Le Luyer *et al.*, 2016) et des valeurs isotopiques ( $\delta^{15}\text{N}$ ) proches. Les ellipses pointillées rouges caractérisent les deux ensembles identifiés, correspondant également aux deux familles génétiques (Rivollat *et al.*, 2021a).

## I.5. Synthèse et perspectives

### Matériel analysé :

- ✦ 95 humains et 21 animaux

### Principaux résultats mis en évidence :

- ✦ Importante homogénéité biochimique globale vs grande diversité des pratiques funéraires
- ☞ Homogénéité des pratiques alimentaires pour l'ensemble du groupe, ressources locales
- ✦ Valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  supérieures aux autres sites (pour les humains comme pour les herbivores)
- ✦ Niveau trophique élevé confirmé par  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$
- ✦ Valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  des humains légèrement inférieures aux autres sites (dû aux valeurs de cochons nettement inférieures à GLN ?)
- ✦ Valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  des humains identiques à tous les sites
- ✦ Texture des micro-usures dentaires faiblement anisotropes et faiblement complexes
- ✦ Schéma général similaire aux autres sites du micro-territoire
- ☞ Consommation importante de protéines animales – de bovins, puis porcins et enfin ovicaprins – (niveau trophique élevé des humains), gestion différentielle des bovins et des cochons, stratégies de subsistance globalement similaires aux autres sites de la microrégion.
- ✦ Distinctions isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) entre les sexes dans l'os mais pas dans la dentine
- ✦ Pas de distinction entre les sexes en  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  dans l'os
- ✦ Pas de distinction entre les sexes en éléments traces (Sr/Ca et Ba/Ca) dans l'os ni dans l'émail
- ✦ Variations isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) avec l'âge des immatures (entre dentine et os et en intra-dentine)
- ☞ Distinctions alimentaires entre les sexes touchant certains aspects de l'alimentation et pas d'autres, périodes de transitions sociales avec modifications alimentaires ou de mobilité en fonction de l'âge et du sexe autour de 8-9 ans et 14-15 ans
- ✦ Pas de corrélation significative avec les dispositifs funéraires
- ✦ Regroupements de tombes avec valeurs isotopiques proches (notamment  $\delta^{15}\text{N}$ )
- ✦ Identification de sujets atypiques par leur signature biochimique et leur identité bio-archéologique
- ☞ Regroupements en cellules « familiales » avec pratiques alimentaires communes, distinction de certains individus (statut social différencié ?)
- ✦ Plus grande variabilité du  $\delta^{15}\text{N}$  osseux des sujets décédés avant 15 ans avec valeurs extrêmes
- ☞ Signal d'allaitement visible dans l'os des plus jeunes et facteur physiologique lié à la croissance ou à la cause de la mort ?
- ✦ Modification des ratios élémentaires (notamment Ba/Ca) généralement avant 3 ans -> signal d'allaitement

### Perspectives :

- ✦ Comparaison avec les indicateurs biologiques de l'état sanitaire squelettique et bucco-dentaire
- ✦ Nouvelles analyses de Sr isotopique
- ✦ Traitement des nombreux éléments traces mesurés conjointement à Sr, Ba, Ca, Mg, Mn et U
- ✦ Croisement de l'ensemble des données (biochimiques, archéologiques, bio-anthropologiques, génétiques) sur la base de l'arbre généalogique et de la répartition spatiale

## II. Monéteau « Macherin » (Mon)

---

Nécropole chasséenne subdivisée en différents ensembles sépulcraux ayant fonctionnés conjointement ou non, place des coffres au sein de ces ensembles, incertitudes de la chronologie, voici trois des grandes questions que renferme ce gisement et auxquelles nous tenterons d'apporter des éléments de réponse ici. Cet ensemble, constitué d'humains uniquement, a principalement fait l'objet d'analyses isotopiques (C, N et S) du collagène osseux (53 individus), auxquelles s'ajoutent deux analyses isotopiques de la dentine pour comparaison et le dosage des éléments traces et du Sr isotopique dans l'os et l'émail d'une dizaine de sujets. Nous revenons ci-après sur l'ensemble des résultats obtenus pour ce gisement et proposons quelques clés de compréhension via l'analyse biochimique.

### II.1. Retour en bref sur l'ensemble des résultats

La Figure C10. 10 illustre les principaux résultats isotopiques et élémentaires des humains de Monéteau pour chaque groupe de sépultures relativement aux valeurs de l'ensemble du corpus humain. Si globalement la variabilité de Monéteau s'inscrit dans celle de la microrégion pour tous les indicateurs, la **différence nette** existant **entre les groupes** (en particulier entre les groupes B et C) invite à considérer les résultats de chaque ensemble indépendamment. Alors que l'étude anthropologique n'a révélé aucune distinction nette entre les individus des cinq groupes, suggérant des conditions de vie similaires, et que l'ensemble des pratiques funéraires semble partagé dans tous les groupes, l'analyse biochimique indique plutôt, sinon des modes de vie séparés, tout du moins des stratégies de subsistance diverses.

#### II.1.a. Variabilité globale des groupes

Le **groupe B** s'éloigne particulièrement du reste des humains, tous sites confondus. Excepté pour l'individu 99-456 qui s'en détache (pour être plus similaire aux autres groupes), les sujets de ce groupe présentent des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  relativement basses (sensiblement inférieures aux autres groupes) et des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  clairement inférieures et supérieures, respectivement, à l'ensemble des autres humains (les valeurs ne se recoupent pas ; Figure C10. 10a et b). Dans l'émail, le seul échantillon ayant fourni un résultat présente un Ba/Ca nettement inférieur aux autres groupes, indiquant un niveau trophique supérieur, contrairement à ce qui est représenté par le  $\delta^{15}\text{N}$  osseux (Figure C10. 10d). Si les personnes des différents groupes avaient accès aux mêmes ressources, ils n'en ont sans doute pas fait le même usage. La question de la **différence chronologique** se pose à nouveau (cf. II.3). L'absence de restes fauniques sur ce site et en particulier l'absence de référentiel direct rattachable à chaque groupe complique l'interprétation des résultats en termes de régimes alimentaires mais il est clair que le **groupe B se distingue nettement des autres** par la consommation de ses ressources. Si l'on considère ces groupes contemporains ou si l'on leur considère *a minima* un référentiel commun, les individus de

ce groupe (excepté 99-456) ont probablement consommé moins de protéines animales que l'ensemble des humains des autres groupes et des sites voisins (et par voie de fait plus de protéines végétales). La valeur de Ba/Ca dans l'émail de 99-240 suggère en revanche qu'avant ses 9 ans, cet individu avait vraisemblablement un niveau trophique supérieur à la moyenne locale.

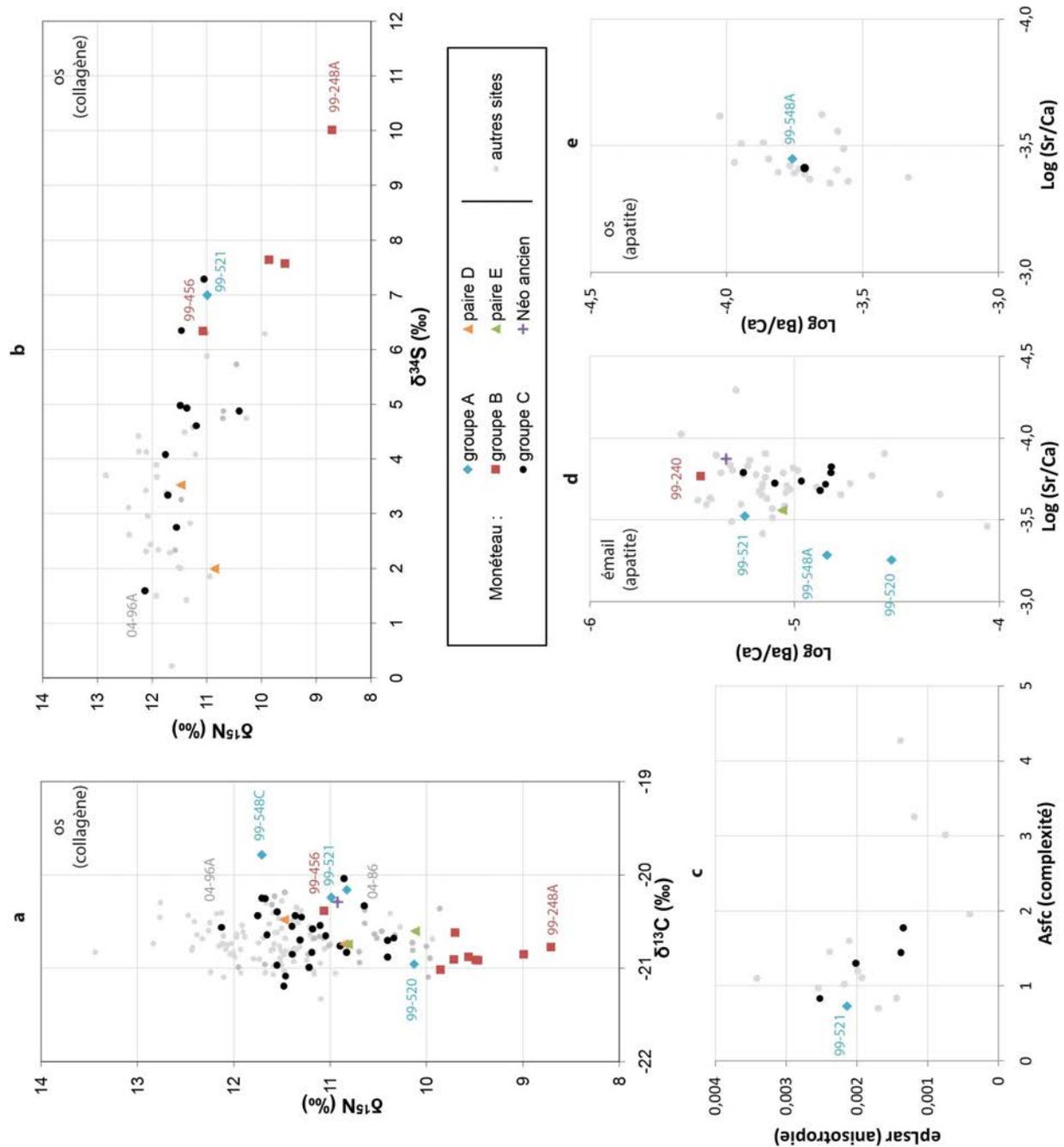


Figure C10.10 : Récapitulatif de la distribution des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  du collagène osseux global ; a et b), des valeurs d'anisotropie et de complexité texturale de la micro-usure dentaire (c) et des valeurs élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) dans l'émail dentaire (d) et dans l'os (e) des individus humains de Monéteau « Macherin », pour chaque groupe de sépultures, par rapport à l'ensemble du corpus analysé (en gris).

D'autre part, alors que les pratiques funéraires font de ce groupe un ensemble plus homogène que les autres, les valeurs isotopiques reflètent une certaine **hétérogénéité**. Cette variabilité semble principalement due à deux individus : l'homme 99-456 qui présente le plus haut  $\delta^{15}\text{N}$  et le plus bas  $\delta^{34}\text{S}$  ; l'adolescent 99-248A (10-12 ans) qui présente à l'inverse le plus faible  $\delta^{15}\text{N}$  et plus fort  $\delta^{34}\text{S}$ . Il est à noter que deux autres immatures faisant partie de ce groupe présentent des valeurs similaires aux autres adultes (99-248B et 99-360, de 6-8 et 10-14 ans respectivement). Comparativement au groupe C dont l'effectif est plus important, la variance du groupe B est supérieure pour  $\delta^{15}\text{N}$  (Var = 0,4 contre 0,2 pour le groupe C) et s'en rapproche pour  $\delta^{34}\text{S}$  (Var = 2,4 contre 2,8 pour le groupe C).

Le **groupe A** présente, lui, des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  intermédiaires entre les groupes C et B et des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  plutôt élevées par rapport à l'ensemble des humains de Monéteau (Figure C10. 10a et b). Le ratio Sr/Ca dans l'émail est également supérieur aux autres groupes (la différence est particulièrement notable pour les sujets 99-548A et 99-520 ; Figure C10. 10d). Les données sont toutefois peu nombreuses. En dépit du faible effectif, ce groupe semble très hétérogène pour l'ensemble des marqueurs ayant fourni plus d'une donnée ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  dans l'os ; Sr/Ca et Ba/Ca dans l'émail). Ce résultat s'accorde avec la diversité observée dans les pratiques funéraires et les datations.

Le **groupe C** est le plus **homogène** et le **plus proche de Gurgy « Les Noisats »** du point de vue des pratiques funéraires (très diversifiées) comme de la signature biochimique. Pour  $\delta^{15}\text{N}$ , il se détache statistiquement de l'ensemble des autres groupes de Monéteau, présentant des valeurs plus élevées (Figure C10. 10a). Il reste en moyenne toutefois légèrement inférieur à GLN, traduisant probablement des pratiques alimentaires comparables avec une spécificité locale (environnementale ?). Les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  sont particulièrement variables, comme à GLN (Figure C10. 10b). Le sujet 04-96A, un des trois enfants analysés dans ce groupe, présente les plus forte et plus faible valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ , se détachant du reste du groupe. La variabilité interne de ce groupe sera discutée plus en détail ci-après. Dans la dentine également, les deux sujets du groupe C échantillonnés montrent des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  inférieures à celles de GLN (le  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  sont similaires ; cf. Annexe A44).

Pour les paires D et E, les résultats disponibles sont hétérogènes. Les individus de la **paire D** présentent des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) dans la variabilité du groupe C. Ceux de la **paire E** sont aussi dans la variabilité du groupe C pour  $\delta^{13}\text{C}$  et présentent un faible  $\delta^{15}\text{N}$ , intermédiaire entre la moyenne du groupe C et du groupe B. Les valeurs du jeune homme 00-05 montrent un ratio Ba/Ca (dans l'émail) similaire au groupe C (Sr/Ca est sensiblement plus élevé). Les binômes de chaque paire ne présentent pas entre eux de valeurs particulièrement proches.

Enfin, le sujet de la sépulture du **Néolithique ancien** (99-374) se trouve dans la variabilité générale du Néolithique moyen pour l'ensemble des marqueurs mesurés ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  dans l'os, Sr/Ca et Ba/Ca dans l'émail). Ses valeurs dans l'os sont particulièrement proches des sujets 99-548A et 99-521 du groupe A ainsi que du sujet 99-456 du groupe B (et du sujet 04-86B du groupe C ; ce rapprochement

sera discuté plus loin), mais ne sachant pas si le référentiel faunique et végétal est le même que pour les sujets du Néolithique moyen (ni entre les groupes A et B), il est difficile de tirer des conclusions de ce résultat.

Concernant les **micro-usures dentaires**, les valeurs d'anisotropie et de complexité sont dans la variabilité micro-régionale ; la complexité étant toujours inférieure à 2 et particulièrement faible pour le sujet du groupe A.

### II.1.b. Variabilité intra-groupes selon le sexe et l'âge au décès

Bien que les effectifs soient déséquilibrés, des **différences sexuelles** sont visibles pour chaque groupe (rappelons que le recrutement de chaque groupe a concerné toutes les classes biologiques). Ces différences concernent essentiellement les rapports isotopiques du carbone et de l'azote dans l'os. Pour le groupe B, en dépit du faible effectif, les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  et de  $\delta^{34}\text{S}$  semblent globalement différenciées entre les sexes, mais ce résultat pourrait être dû au seul homme 99-456 (Figure C10. 11). Pour le groupe C, comme à GLN, les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  varient entre les sexes (cf. Figure C10. 13, p.548). En revanche, le  $\delta^{34}\text{S}$  n'apparaît pas différent, en moyenne. La même variation en C et N est observable dans le groupe A mais les effectifs sont insuffisants pour conclure.

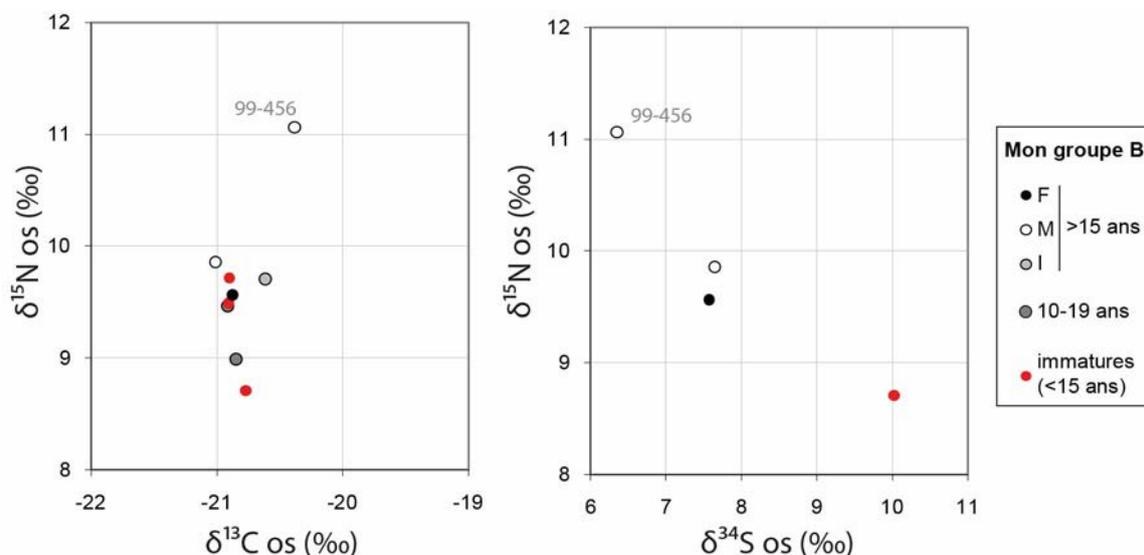


Figure C10. 11 : Distribution des valeurs isotopiques du carbone, de l'azote et du soufre du collagène osseux des individus du groupe B de Monéteau « Macherin » par classe biologique (sexe et âge au décès).

D'autre part, la comparaison des données isotopiques **avec l'âge** ne révèle pas de variation claire mais des tendances, souvent dues à un seul échantillon, et variables entre les groupes (Figure C10. 12). Dans les trois groupes, le  $\delta^{15}\text{N}$  le plus élevé ou le plus bas est délivré par un immature, de même que le  $\delta^{34}\text{S}$  pour les groupes B et C (pas de données pour le groupe A). Ce schéma rappelle celui rencontré à GLN où les immatures présentent souvent des valeurs extrêmes, peut-être en lien avec un signal d'allaitement encore visible pour les plus jeunes ou pour des raisons sociales ou physiologiques liées à leur âge (avant 15 ans, certains ont pu jouir d'un régime alimentaire différent, lié à leur statut social ou

pour répondre à des besoins physiologiques liés à leur croissance). Dans les groupes A et C, on observe une sensible diminution du  $\delta^{15}\text{N}$  os avec l'âge alors que celui-ci augmente dans le groupe B. D'autre part, le  $\delta^{34}\text{S}$  os augmente avec l'âge dans le groupe C et diminue dans le groupe B. Si ces observations soulignent à nouveau des différences entre les groupes, celles-ci ne sont généralement dues qu'à un seul échantillon et ne reflètent peut-être pas la généralité.

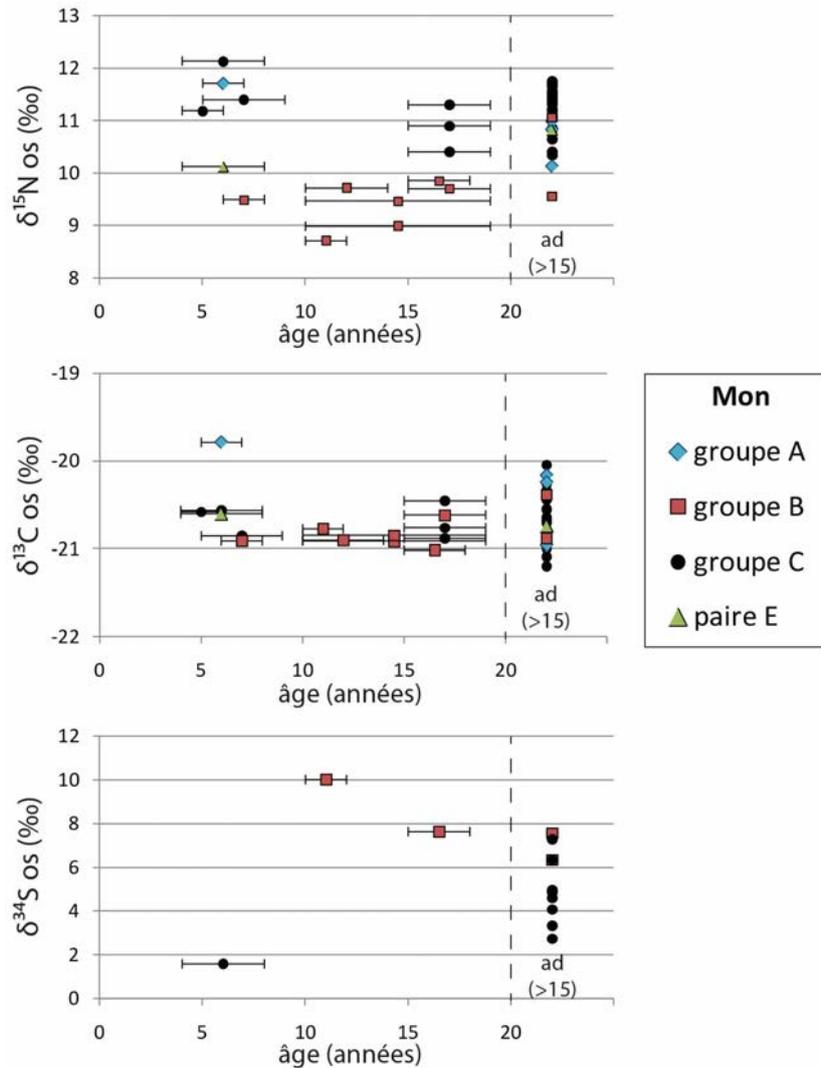


Figure C10.12 : Distribution des valeurs isotopiques du carbone, de l'azote et du soufre du collagène osseux des individus de Monéteau « Macherin » en fonction de l'âge au décès des immatures (moins de 15 ans) et des jeunes adultes (15-19 ans) comparativement aux adultes (plus de 15 ans).

À partir de 15 ans toutefois et avant 20 ans (jeunes adultes), aucune différence n'est relevée par rapport au reste du corpus adulte (>15, >20 et >30 ans), quelque soit le marqueur et le groupe. La variabilité isotopique en fonction de l'âge au décès des adultes est présentée en Annexe A50 et ne révèle aucune tendance particulière.

L'étude biologique dénote l'homogénéité des sujets entre les groupes (des VA partagées, une stature similaire et faiblement dimorphique, des atteintes squelettiques semblables) suggérant le partage d'un environnement commun et des conditions de vie similaires. En particulier, le faible dimorphisme

sexuel de la stature et des retards de croissance ont porté les auteurs à proposer des problèmes d'accès à une nourriture suffisante. Cela n'est pas visible ici par l'analyse de l'os mais la comparaison conjointe de la stature et des valeurs isotopiques à l'échelle régionale et sur un plus grand nombre d'échantillon pourrait peut-être alimenter cette question.

## II.2. À propos du sexe des sujets moins bien conservés

Pour plusieurs individus, l'état de conservation du squelette n'a pas permis de déterminer le sexe à plus de 95% de probabilité d'après les méthodes retenues dans ce travail (cf. Chap3.III.1.d) mais le sexe a été proposé sur la base de l'ensemble des critères observés (caractères morphologiques primaires et secondaires). Pour ces individus, marqués d'une \* dans la base de donnée (Annexe A7), nous avons voulu savoir si les valeurs isotopiques pouvaient influencer la corrélation observée avec le sexe. La Figure C10. 13 illustre la distribution des valeurs isotopiques du collagène osseux en fonction du sexe des sujets des groupes A et C pour lesquels des sujets marqués d'une \* ont été identifiés.

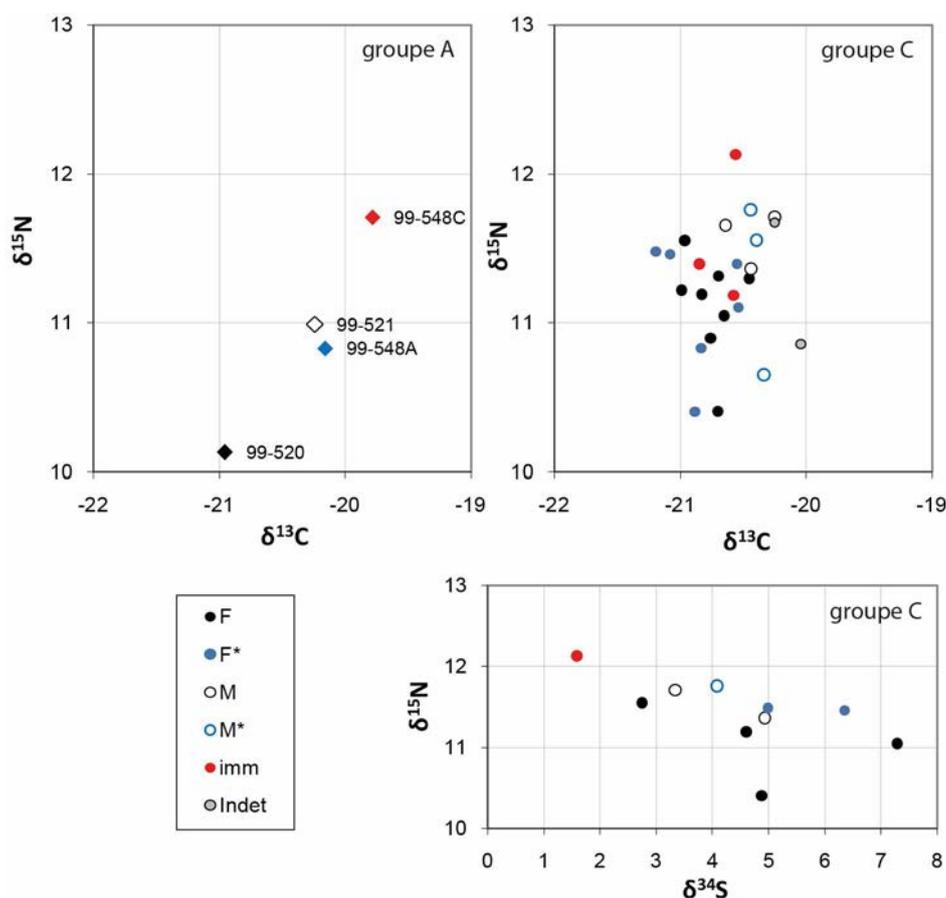


Figure C10. 13 : Distribution des valeurs isotopiques du carbone, de l'azote et du soufre du collagène osseux des individus de Monéteau (groupes A et C) en fonction du sexe. F, M et Indet : sexe féminin, masculin et indéterminé, respectivement, des sujets de plus de 15 ans ; imm : sujets immatures de moins de 15 ans ; \* sujets pour lesquels l'état de conservation du squelette n'a pas permis de déterminer le sexe à plus de 95% de probabilité.

Dans le **groupe A**, le sujet **99-548A** identifié comme une **femme probable** présente des valeurs isotopiques plus proches de l'homme 99-521 que de la femme 99-520. Néanmoins, le faible nombre

d'échantillons ne permet pas de tirer de conclusions sur la base de cette seule observation. Il est à noter toutefois que cet individu a été proposé comme étant « **fondateur·rice** » **du groupe A** en raison notamment de sa place centrale parmi le groupe de tombes, de sa structure à étage (sépulture triple dont 99-548A est le premier individu déposé) et de sa taille. Or, à Gurgy « Les Noisats », les récentes données génétiques indiquent que les fondateurs sont plutôt des hommes, dans un contexte d'organisation patrilocal et patrilinéaire (Rivollat *et al.* 2021a ; Rivollat *et al.* 2021b). Si l'on établit un parallèle entre ces deux sites, le sexe de l'individu 99-548A pose question. Par ailleurs, la datation plus ancienne de ce sujet par rapport à l'individu 99-548C déposé en dernier dans la même tombe est problématique (les dates ne se recoupent pas ; cf. Chap3.III.1.c). Une éventuelle consommation substantielle de poisson pourrait-elle avoir vieilli cette date ? Dans ce cas, le  $\delta^{15}\text{N}$  serait sans doute supérieur aux autres sujets datés de périodes plus récentes et, si l'on résonne par sexe, serait supérieur à celui des autres sujets du même sexe de ce groupe. C'est le cas ici, où le  $\delta^{15}\text{N}$  de 99-548A est supérieur à celui de la femme 99-520 datée d'une période plus récente. D'autre part, les valeurs isotopiques de 99-548A sont similaires à celles de l'homme 99-521 inhumé avec un hameçon et également daté d'une phase plus ancienne. Aucun autre indice ne suggère cependant que ces deux individus aient pu consommer plus de poisson que les autres (cf. II.3). La détermination génétique du sexe de ce sujet apporterait de précieuses informations quant à la construction sociale de ce groupe, si tant est que cette sépulture, qui occupe une place centrale, s'avère bien être celle des « fondateur·rice·s ».

Dans le **groupe C**, la détermination des sexes marqués d'une \* semble confirmer et renforcer la différence isotopique observée entre les sexes. Alors que l'inverse n'aurait pas été synonyme de mauvaise détermination, ce cas de figure semble **accroître la probabilité de la détermination des sexes**, excepté peut-être pour 04-86B qui présentent un  $\delta^{15}\text{N}$  plus proche de celui des femmes. Cependant, l'inhumation en coffre de cet individu pourrait aussi expliquer un  $\delta^{15}\text{N}$  atypique (cf. II.4).

### II.3. La question de la chronologie

Les différences relevées entre les groupes, pour tous les marqueurs, interrogent une nouvelle fois la chronologie et la contemporanéité ou non de ces groupes. La Figure C10. 14 présente pour chaque groupe la dispersion des valeurs isotopiques et élémentaires en fonction de la chronologie. Tous groupes confondus, les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  et de  $\delta^{34}\text{S}$  osseux sont **corrélées aux datations  $^{14}\text{C}$**  (coefficients de corrélation de Spearman de 0,6 et -0,6 respectivement,  $p < 0,05$ ). Néanmoins, ces corrélations semblent **dues essentiellement à la signature différente du groupe B**. Si l'on considère uniquement le groupe C qui présente la plus grande variabilité chronologique et le plus d'incertitudes, les corrélations ne sont plus significatives. Les sujets 04-86 et 04-212, qui proposent les plus faibles valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  et les dates les plus récentes, n'ont malheureusement pas fourni de données pour le soufre.

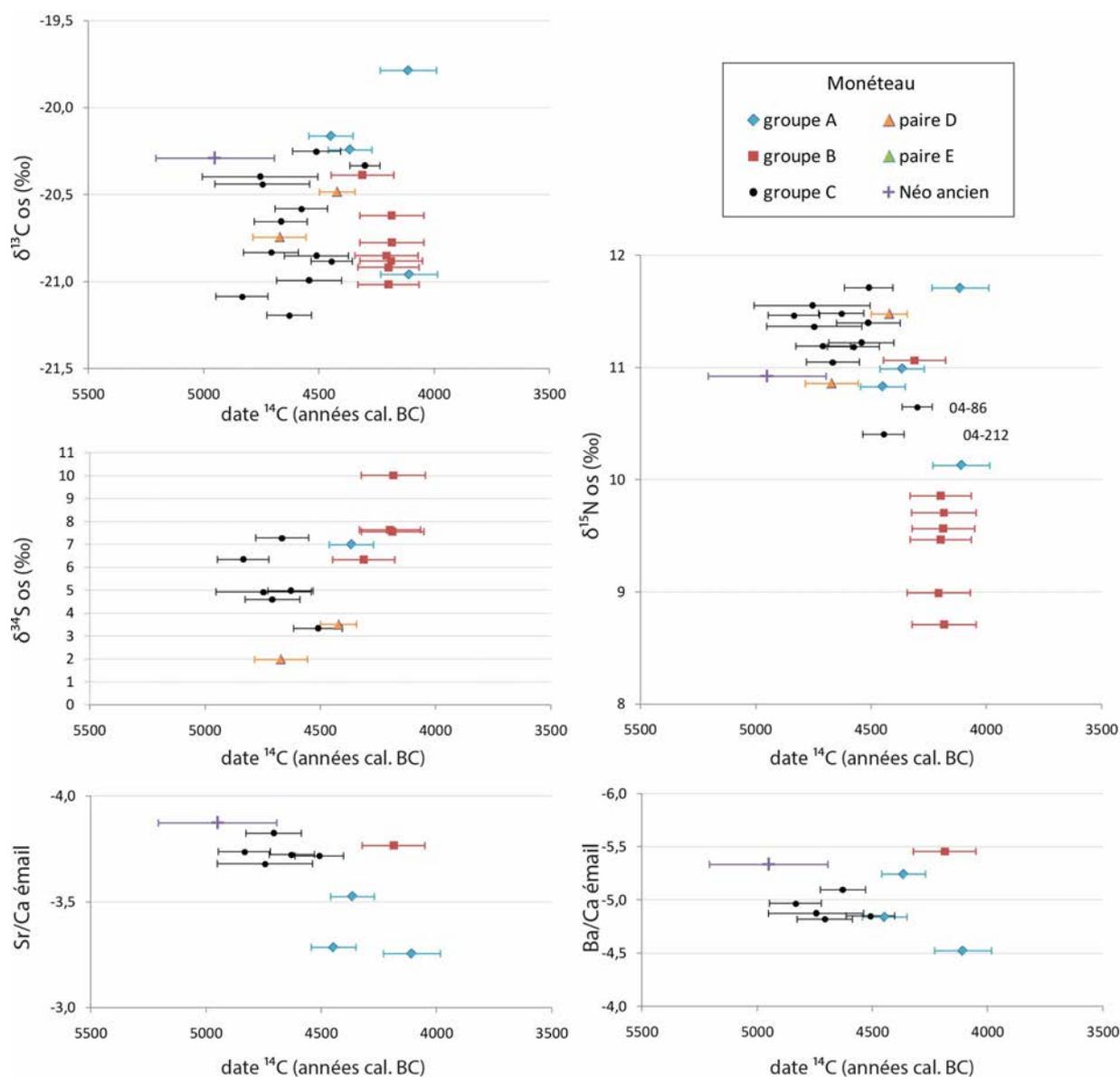


Figure C10. 14 : Répartition des valeurs isotopiques de l'os et des valeurs élémentaires de l'émail des humains de Monéteau « Macherin » par groupe en fonction de la datation.

Comme pour GLN, la consommation de **poisson ou autres ressources aquatiques** peut être proposée pour le groupe C de Monéteau (et éventuellement certains individus des autres groupes), qui pourrait expliquer le vieillissement de certaines dates (cf. Chap5.II). Dans ces deux ensembles, l'absence de corrélation interne entre  $\delta^{15}\text{N}$  et datations ne milite pas en faveur de cette hypothèse. Cependant, un faisceau de paramètre pourrait également conduire aux résultats observés. Des valeurs élevées de  $\delta^{15}\text{N}$  pourraient être dues, dans certains cas, à la consommation de poisson, alors que dans d'autres elles seraient le fait d'une plus grande consommation de porc ou d'un phénomène physiologique par exemple<sup>2</sup>. L'homogénéité des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  pour l'ensemble des sujets semble également en faveur

<sup>2</sup> Par exemple, les sujets 99-548C et 99-520 du groupe A présentent des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  très différentes qui pourraient illustrer une consommation différentielle de poisson mais partagent le même intervalle de datation. La différence en isotopes stables entre ces deux sujets relève probablement plutôt du fait d'un autre facteur métabolique ou alimentaire.

d'une alimentation principalement terrestre. L'analyse d'autres marqueurs ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ , Sr/Ca et Ba/Ca) ne permet pas de trancher ici, pour GLN comme pour Monéteau, mais n'exclue pas définitivement l'hypothèse d'une consommation de ressources aquatiques pour certains individus.

Nous l'avons énoncé à différentes reprises, d'autres analyses proposeraient des données plus pertinentes pour répondre à cette double question de la consommation aquatique et de la chronologie (mesures isotopiques directes sur du poisson local,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Met}}$ , datations de l'hydroxyproline).

#### II.4. Croisement des indicateurs biochimiques avec les paramètres funéraires

Dans l'ensemble, la **diversité des dispositifs funéraires** et la différence biochimique enregistrée **entre les groupes** (et entre les sexes) rend difficile le croisement de ces différents paramètres. En particulier pour le mobilier, aucune corrélation n'a été relevée par catégorie d'objet et les résultats, peu informatifs, ne seront pas présentés ici. Seuls les objets « remarquables » seront discutés. Pour la recherche de corrélation entre caractéristiques funéraires et marqueurs biochimiques au sein de chaque groupe et de chaque classe biologique, les effectifs sont insuffisants et ne consentent pas d'analyse statistique fiable. Nous avons néanmoins cherché à identifier d'éventuelles similitudes isotopiques et élémentaires entre individus partageant le même type de dispositif entre les groupes. Quelques uns des résultats sont présentés dans la Figure C10. 15.

##### II.4.a. Les coffres de Monéteau

Tout d'abord, aucune corrélation ne peut être strictement identifiée entre la présence d'un **coffre** et la signature biochimique, mais quelques tendances sont appréhendées. Dans le **groupe C**, le sujet **04-86B** (un homme probable, dans le seul coffre réellement certifié) présente un faible  $\delta^{15}\text{N}$  rappelant la signature des sujets du groupe B, presque exclusivement inhumés en coffre. Sa signature est d'ailleurs proche de celle des sujets en coffre 99-456 et 99-548A des groupes B et A. Cette proximité entre les trois groupes interroge. L'individu **04-212** (une femme probable avec un aménagement rigide pour le haut du corps) présente également un faible  $\delta^{15}\text{N}$  et un faible  $\delta^{13}\text{C}$  en comparaison des autres sujets (notamment des femmes) du groupe C, se rapprochant également du groupe B. Le coffre du sujet **04-99** est inséré dans une sépulture de type Balloy et doit probablement être considéré à part. Pour le dernier individu en coffre probable du groupe C considéré ici, **04-104** (une femme adulte), le faible  $\delta^{13}\text{C}$  est similaire à la moyenne du groupe B mais son  $\delta^{15}\text{N}$  en est nettement supérieur. D'autre part, l'individu de la **paire E (00-15)**, inséré dans un contenant mobile probable, présente la plus faible valeur de  $\delta^{15}\text{N}$  des deux sujets (proche du groupe B), mais c'est également un enfant (4-8 ans) qui pourrait présenter de ce fait une signature différente de l'adulte à côté duquel il est enterré. Globalement, il est difficile de conclure sur la base de tels arguments.

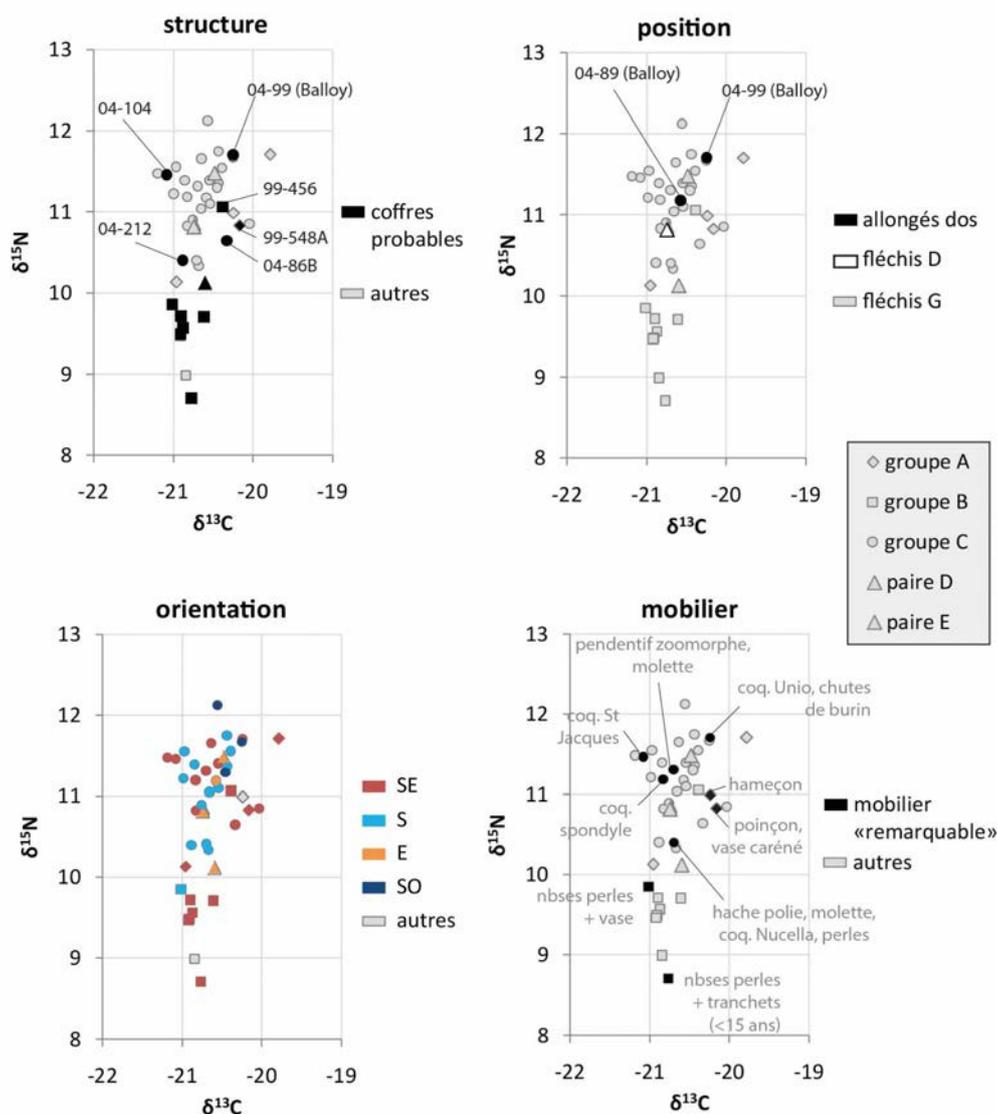


Figure C10. 15 : Répartition des valeurs isotopiques du carbone et de l'azote dans l'os des humains de Monéteau « Macherin », pour chaque groupe, en fonction de plusieurs paramètres funéraires comme le type de structure (et en particulier les probables coffres par rapport au reste des dispositifs, comptant peut-être d'autres coffres non identifiés), la position et l'orientation des défunts et le mobilier associé, à savoir ici le mobilier « remarquable » par sa composition (quantité d'objets, parure, outil spécifique) ou sa provenance (coquille marine, roche alpine). D : droite, G : gauche, SE : sud-est, S : sud, E : est, SO : sud-ouest, O : ouest.

Si l'on exclut les sujets 04-99 et 04-104 du groupe C (pour lesquels le coffre fait partie d'un dispositif Balloy ou n'est pas avéré, respectivement), on trouve d'une part l'ensemble 99-548A, 99-456 (qui présente un  $\delta^{15}\text{N}$  particulièrement élevé par rapport au reste du groupe B) et 04-86B, issu des trois groupes A, B et C et dont le coffre a clairement été identifié ; d'autre part on constate que toutes les autres valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  des sujets inhumés en coffre sont particulièrement basses, en incluant les valeurs de 04-212 et 00-15 dont le dispositif s'apparente plutôt à un contenant rigide mobile ou partiel. Il est à noter néanmoins que pour plusieurs sépultures, la présence d'un coffre ne peut être ni certifiée ni exclue. Ces résultats sont donc à considérer avec la plus grande réserve.

NB : Les trois sujets 548A, 456 et 86B partagent la même orientation (tête au sud-est), certes comme bien d'autres, dont la majorité des sujets des groupes A et B, mais la similitude est toutefois à relever.

#### II.4.b. Positions atypiques, sépultures de type Balloy

D'autre part, alors que la quasi-totalité des individus sont déposés en **position** fléchie sur leur côté gauche, les deux sujets allongés sur le dos dans des tombes de **type Balloy** ne diffèrent pas des autres par leur signature biochimique ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  osseux, Sr/Ca et Ba/Ca énamélaire). Ils n'ont pas davantage de similitude entre eux vis-à-vis du reste du groupe. Cependant, le sujet 04-89 est un enfant (4-6 ans) et son âge pourrait lui conférer un statut particulier vis-à-vis de 04-99 incluant un régime alimentaire distinct qui pourrait conduire à la différence de  $\delta^{15}\text{N}$  observée ici. Il n'est pas possible de conclure quant à cette comparaison.

Le jeune adulte 00-05 de la paire E (sujet masculin), fléchi sur son **côté droit**, n'apparaît pas non plus différent des autres individus du site par sa signature biochimique ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  osseux, Sr/Ca et Ba/Ca énamélaire).

#### II.4.c. Des orientations variables

Les **orientations**, variables au sein de chaque groupe et particulièrement du groupe C, ne sont **pas corrélées aux valeurs isotopiques ni élémentaires**. Une seule tendance peut être observée : les sujets inhumés la tête au sud-ouest (groupe C) présentent des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  relativement élevées par rapport à l'ensemble de la population de Monéteau. Rapportées au seul groupe C, ces valeurs ne sont pas significativement différentes du reste du groupe ( $p > 0,07$  d'après le test U de Mann-Whitney) ni particulièrement proches entre elles (elles concernent une jeune femme, un enfant de moins de 8 ans et un sujet mature de sexe indéterminé ; 04-95, 04-96 A et B respectivement).

#### II.4.d. Le mobilier « remarquable »

Enfin, l'observation de la distribution des valeurs isotopiques des sujets enterrés avec du **mobilier « remarquable »** ne montre aucune tendance spécifique.

Dans le **groupe A**, l'individu **99-548A**, probable femme fondatrice inhumée avec un **poinçon** en matière dure animale (MDA) et un **vase caréné**, présente des valeurs isotopiques qui ne s'éloignent pas de la variabilité globale (bien que plutôt en marge). Elle présente cependant un Sr/Ca élevé dans l'émail (similaire à l'autre femme 99-520 du groupe A) pouvant indiquer un régime différent des autres humains pendant l'enfance (et une origine exogène ?), mais les comparaisons s'arrêtent là. Dans le même groupe, l'homme **99-521** inhumé avec l'**hameçon** ne sort pas non plus de la variabilité globale, avec des valeurs isotopiques proches de 99-548A (pour  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) et également proche de 99-456 du groupe B (pour  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) entre autres. Le  $\delta^{34}\text{S}$  est relativement élevé (= 7 ‰) par rapport à l'ensemble des humains de la microrégion. Relativement aux deux autres sujets du groupe A,

il présente les plus faibles ratios Sr/Ca et Ba/Ca (plus haut niveau trophique ; cf. Annexe A46), mais se trouve néanmoins dans la variabilité de l'ensemble des humains de Monéteau. Si cet objet constitue un indicateur de pêche (bien qu'il ne semble pas avoir été utilisé et détiendrait peut-être une fonction symbolique uniquement), cet individu ne semble pas avoir consommé plus de poisson que les autres sujets d'après les données isotopiques et élémentaires. Un lien particulier avec la pratique de la pêche ne peut être avéré, ni exclu.

Dans le **groupe B**, les deux sujets enterrés avec un **grand nombre de perles** notamment sont un jeune homme (99-243) et un·e adolescent·e (99-248A) qui présentent des valeurs isotopiques (C, N, S) variables (aucune donnée élémentaire disponible).

Dans le **groupe C**, les individus inhumés avec des **coquilles venant de loin** (*Nucella lapillus*, St Jacques, spondyle), des **objets particulièrement travaillés** (pendentif zoomorphe ou hache polie) ou encore le sujet 04-99 de la sépulture de type Balloy ayant livré notamment des **chutes de burin** et une applique biforée sur une **moule d'eau douce** (*Unio*) révèlent des signatures isotopiques et élémentaires largement variables. Les femmes ensevelies avec les **molettes** n'ont pas plus de similitudes isotopiques entre elles qu'avec le reste du groupe (elles présentent toutes deux le même  $\delta^{13}\text{C}$  mais un  $\delta^{15}\text{N}$  différent de près d'1‰ ; aucune autre donnée disponible). Il s'agit de deux femmes de plus de 30 ans (04-113 et 04-217A), qui plus est toutes deux associées à un mobilier « remarquable » en plus de ces molettes à main : la hache polie et le pendentif en schiste zoomorphe respectivement. La signature de la femme **04-113** inhumée avec la **hache** (fait rare pour la période, ce type d'outil étant généralement plutôt un symbole masculin) présente notamment un  $\delta^{15}\text{N}$  particulièrement faible, similaire aux sujets indéterminé 04-101 et à la jeune femme en coffre 04-212.

### II.4.e. Comparaisons culturelles particulières

Si les comparaisons entre sites ont été abordées dans l'article Rey *et al.* 2019 (cf. Chap5.II), nous revenons ici sur deux sépultures en particulier, dont les dispositifs funéraires et/ou le mobilier rappellent les structures des sites voisins.

Tout d'abord, la sépulture à étage **99-548** trouve écho à **Bonnard**, avec la **sépulture 1**, également à étage, renfermant trois individus et dans laquelle des coffres ont été identifiées. Dans chacune d'elles, un vase à carène basse d'obédience chasséenne et de facture similaire a été retrouvé. Les deux individus de la sépulture de Bonnard analysés ont fourni des résultats quasiment identiques (de même qu'avec l'individu de l'autre sépulture du même site) de l'ordre de -20,7 et 10,2‰ pour  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  (Tableau C10. 2). Les résultats sont sensiblement plus élevés à Monéteau pour la femme 99-548A (l'enfant doit être considéré à part) avec un  $\delta^{13}\text{C}$  de -20,2‰ et un  $\delta^{15}\text{N}$  de 10,8‰. Ils restent tout de même assez proches au regard de la variabilité globale de tous les adultes de la microrégion. Il n'est pas incohérent de proposer pour les individus de ces deux sépultures des **pratiques communes**, non

seulement sur le plan culturel et funéraire comme le montrent les dispositifs sépulcraux, mais également sur le plan des **comportements de subsistance**.

Ensuite, les **sépultures de type Balloy 04-89 et 04-99** trouvent des comparaisons directes avec celles de Chichery « Sur les Pâturaux ». La comparaison de **l'homme 04-99** avec les **hommes de CHI-Pat** inhumés dans des sépultures de type Balloy (exit l'individu 1) est surprenante tant les valeurs biochimiques de l'un sont **similaires** à celles des deux autres pour tous les marqueurs mesurés ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  dans l'os mais aussi pour Sr/Ca et Ba/Ca dans l'émail ; Tableau C10. 2). La comparaison des enfants est moins évidente mais une différence d'âge pourrait induire des différences alimentaires ou physiologiques faisant varier la signature isotopique. Pour les adultes, si les deux individus de sexe indéterminé du groupe A de CHI-Pat étaient des hommes, la comparaison serait moins probante, tout du moins ne le serait-elle qu'avec les hommes du groupe B. Il est important de noter que ces analogies sont observables pour les hommes uniquement, les signatures des femmes étant différentes. Bien que les effectifs soient réduits et que le doute persiste pour les sujets indéterminés du groupe A de Chichery, la ressemblance entre les hommes en tombe Balloy de Monéteau et de Chichery est frappante, d'autant plus que les sites sont distants de plusieurs kilomètres l'un de l'autre, et suggère un environnement, des ressources et des pratiques partagées. L'analyse du strontium isotopique de l'émail dentaire de ces sujets pourrait apporter d'intéressantes informations quant à la mobilité de ces individus, si ce n'est avec l'extérieur, peut-être entre ces sites (pourvu qu'une différence de signature locale soit visible entre ces deux sites).

ID	groupe	datation cal BC	sexe	classe d'âge	$\delta^{13}\text{C}$ os	$\delta^{15}\text{N}$ os	$\delta^{34}\text{S}$ os	Sr/Ca os	Ba/Ca os	$\delta^{13}\text{C}$ dent.	$\delta^{15}\text{N}$ dent.	$\delta^{34}\text{S}$ dent.	Sr/Ca émail	Ba/Ca émail
Mon 99-548A	A	4545-4352	F*	>15	-20.2	10.8		-3.5	-3.8				-3.3	-4.8
Mon 99-548B	A		-	5-14										
Mon 99-548C	A	4236-3991	-	5-9	-19.8	11.7								
Bon Poirier 1	sépulture 1	4500-4000 ?	I	>20										
Bon Poirier 2	sépulture 1		I	>20	-20.6	10.3								
Bon Poirier 4	sépulture 1	4500-4000 ?	I	>20	-20.8	10.1								
Bon PFPM	sépulture 2	4344-4224	?	?	-20.7	10.1								
Bon PFPM i2	sépulture 2		?	>15									-3.7	-4.9
Mon 04-89	C	4690-4463	-	1-9	-20.6	11.2								
Mon 04-99	C	4615-4405	M	>30	-20.3	11.7	3.3						-3.7	-4.8
CHI-Pat 1	isolée	4335-4074	M	>30	-20.8	11.0	6.3	-3.4	-3.6				-3.4	-5.2
CHI-Pat 2	B	4546-4373	M	30-39	-20.2	11.5	3.3	-3.5	-3.6	-20.6	12.1	3.0	-3.7	-5.0
CHI-Pat 3	B		F	30-49	-20.7	11.1		-3.4	-3.3				-3.8	-5.3
CHI-Pat 4	B	5461-4686	F	>25	-20.8	10.7	4.7			-20.7	12.1	-1.4	-3.7	-5.0
CHI-Pat 6	B	4681-4450	M	30-39	-20.2	11.6	2.3							
CHI-Pat 7	A	4682-4459	I	15-19	-20.6	10.5	5.7						-3.9	-5.2
CHI-Pat 8	A		-	5-9	-20.7	10.5								
CHI-Pat 9	A	4703-4500	I	>20	-20.9	10.7	4.9						-4.3	-5.3

Tableau C10. 2 : Tableau de comparaison des sépultures de même typologie entre Monéteau et les sites voisins de Bonnard (en orange) et Chichery « Sur les Pâturaux » (en vert foncé pour les hommes, vert clair pour les immatures).

#### II.4.f. Conclusions

Finalement, les sujets identifiés comme présentant des caractéristiques funéraires sortant de « l'ordinaire » ne sont pas caractérisés ici par une signature biochimique spécifique, comme ce pouvait être le cas à Gurgy. Les sujets inhumés en coffre pouvaient partager un régime alimentaire commun mais ne se distinguent pas réellement du reste du groupe, sauf pour les sujets du groupe B que nous avons évoqué. Cela ne signifie pas nécessairement que ces personnes, inhumées dans des dispositifs atypiques ou avec un « riche » mobilier, ne se démarquaient pas du reste du groupe de leur vivant, mais un éventuel statut social spécifique n'est pas mis en avant à travers la présente analyse biochimique. Néanmoins, les effectifs déséquilibrés, souvent faibles, ainsi que la diversité des caractéristiques funéraires conjointement à la diversité isotopique entre les groupes (spatiaux, biologiques) rendent difficile une lecture d'ensemble. En revanche, un parallèle intéressant est observé entre les sépultures de même typologie de Monéteau et des sites voisins, soulignant une fois de plus les liens évoqués entre ces sites.

#### II.5. Répartition spatiale des valeurs isotopiques

##### II.5.a. Répartition spatiale des valeurs isotopiques entre les groupes

Afin d'établir et de discuter de possibles liens entre les individus des différents groupes, d'un point de vue isotopique et en fonction de la répartition spatiale, au regard des principales caractéristiques biologiques (âge au décès et sexe) et funéraires (taille et type de tombe, orientation), nous avons reporté les valeurs isotopiques sous la forme d'un dégradé de couleur sur le plan de répartition des sépultures (Figure C10. 16a à c). Tout d'abord, ces figures montrent bien les différences générales observées entre les groupes. Ensuite, elles mettent en valeur certains sujets atypiques et des rapprochements entre les groupes, ainsi que les similitudes et dissemblances au sein de chaque groupe. L'organisation interne du groupe C sera discutée plus en détail dans la section II.5.b.

Dans le **groupe A**, les individus **99-521 et 99-548A** partagent, nous l'avons vu, des valeurs isotopiques semblables ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ), indépendamment de leur sexe et de leur type de tombe (un homme en fosse couverte<sup>3</sup> et une femme en coffre, d'orientations distinctes), à la différence de la femme 99-520, inhumée plus à l'écart (non loin toutefois de l'homme 99-521 si l'on considère la répartition étalée de l'ensemble des sépultures de ce groupe). L'enfant 99-548C enterré dans la sépulture triple « à étage » présente des valeurs supérieures, en lien, sans doute, avec son âge.

Ensemble, les valeurs des sujets **99-521 et 99-548A** se rapprochent davantage de l'homme **99-456** du **groupe B**, également en **coffre** (pour  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  le cas échéant). Tous trois sont datés de phases plus anciennes au sein de leurs groupes respectifs, partageant approximativement la période entre 4450

---

<sup>3</sup> Si une couverture probable et un effet de paroi ont été identifiés pour la sépulture 99-521, la présence d'un coffre ne peut être ni avérée, ni exclue.

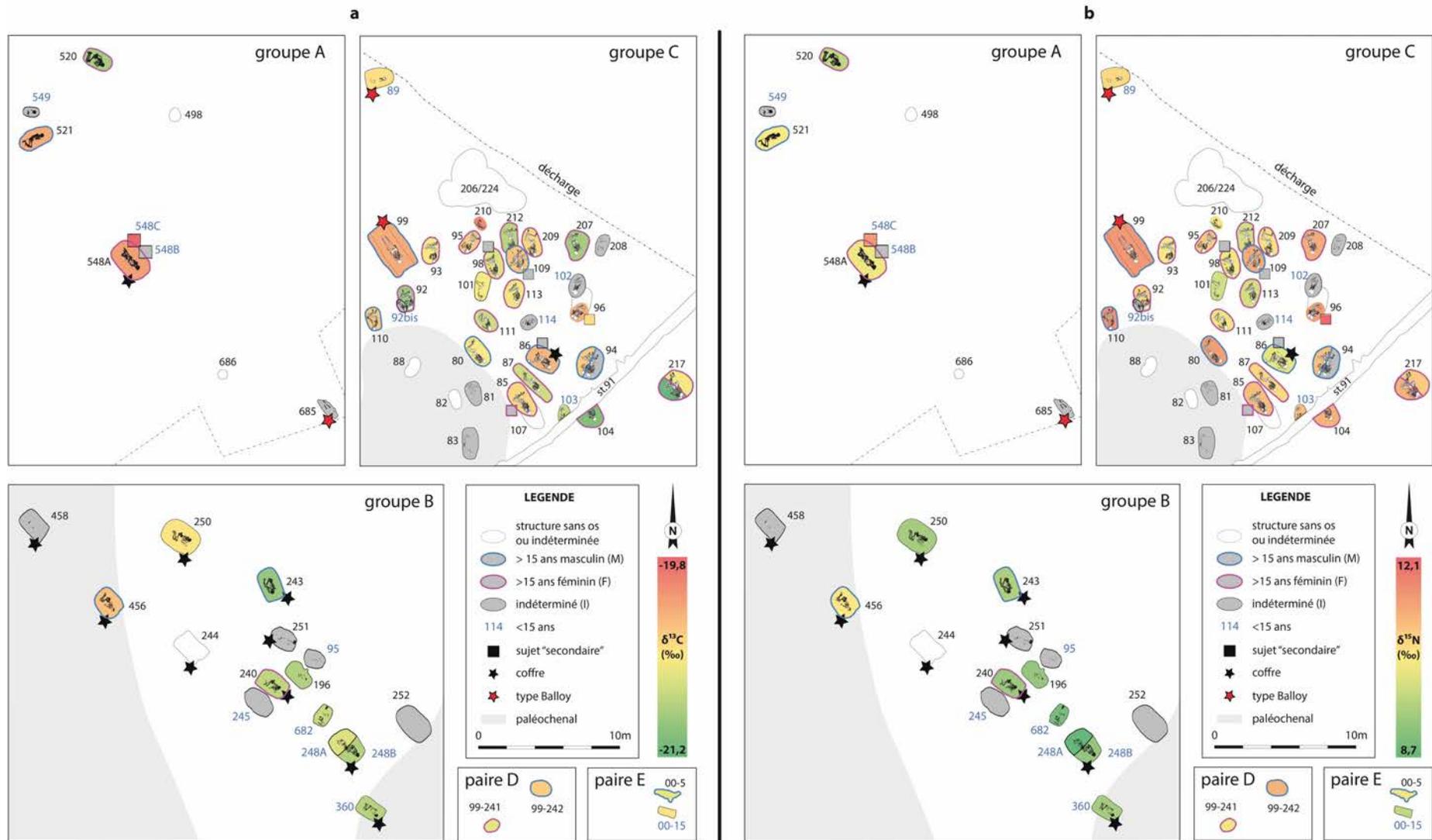
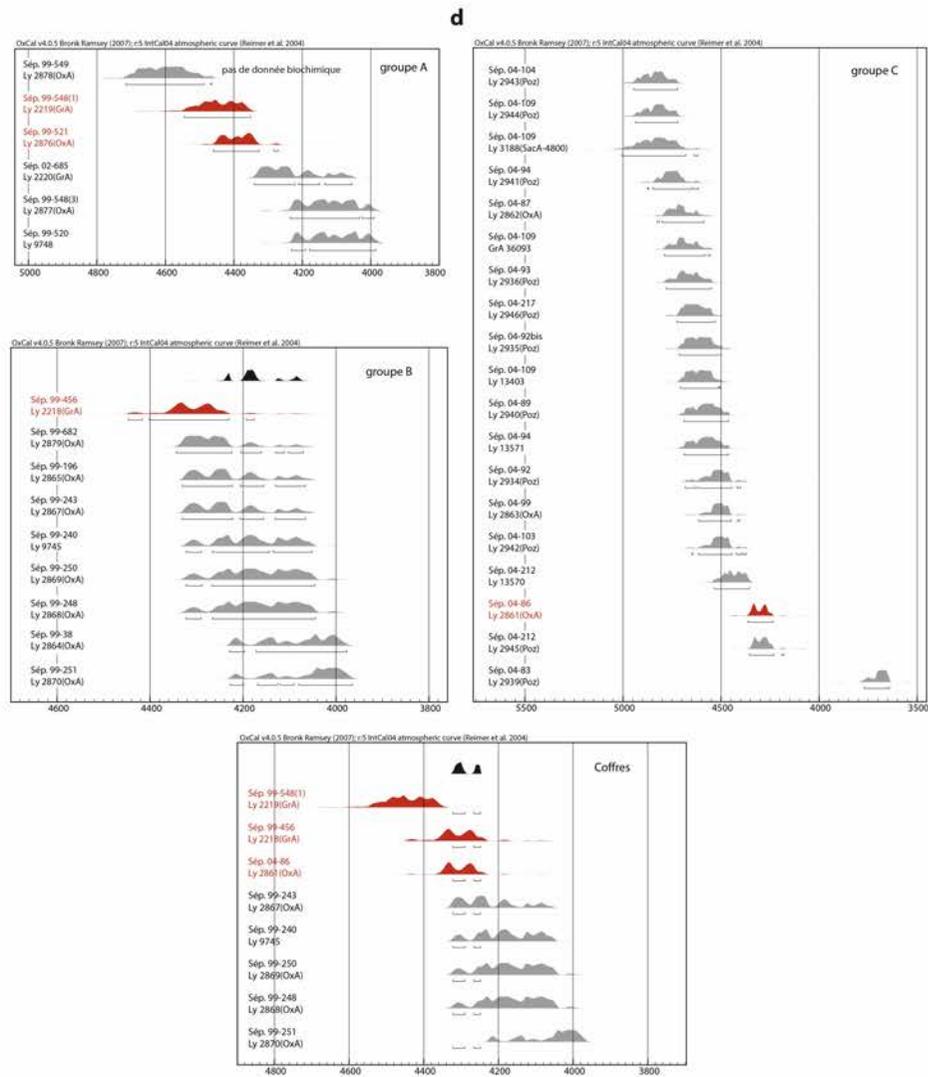
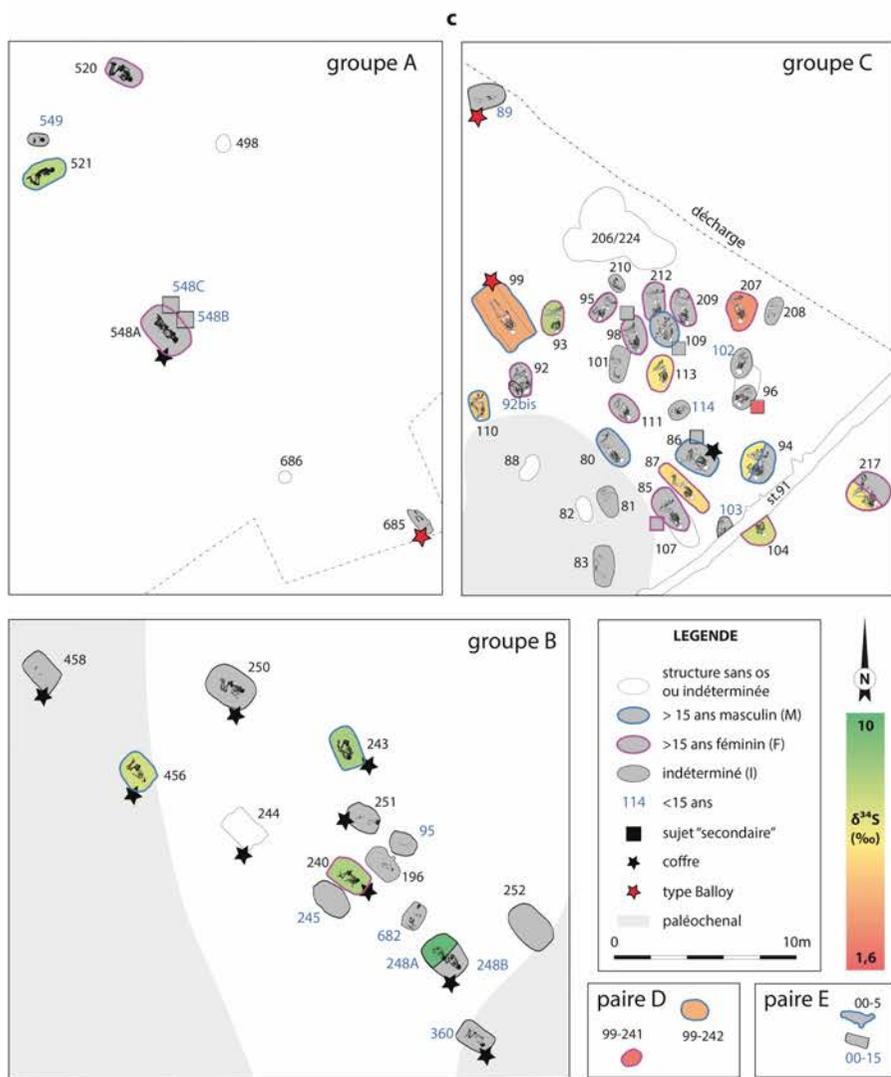


Figure C10.16 : Plan de répartition spatiale des sépultures de Monéteau « Macherin » en fonction des valeurs isotopiques du carbone (a), de l'azote (b) et du soufre (c) dans l'os et selon le groupe, l'âge, le sexe et le type de tombe des sujets. d) Histogrammes de calibration des dates indiquant (en rouge) les individus en coffre (sauf 99-521 ?) partageant des valeurs isotopiques proches (réalisé avec le logiciel libre Oxcal 4.0.5© Bronk Ramsey, 2007). Modifié d'après Augereau et Chambon, 2011.



(suite)

et 4350 cal BC (Figure C10. 16d). Ils présentent également des valeurs relativement similaires au sujet **04-86B** du **groupe C**, en coffre. Ce dernier est à l'inverse daté d'une période plus récente par rapport au reste du groupe C, recouvrant lui aussi la période de 4450 à 4350 cal BC. Sans porter de conclusions hâtives, ces observations pourraient refléter un environnement commun et des ressources partagées entre ces individus, ensuite inhumés dans des groupes distincts mais selon des pratiques funéraires semblables (coffres et orientations). Il est également intéressant de constater que les deux individus 99-548A et 04-86B sont enterrés avec un **vase à carène basse** (de typo-morphologie toutefois différente). Aucun dépôt funéraire n'a été retrouvé dans la sépulture 99-456 mais plusieurs coupes carénées ont été mises au jour dans d'autres tombes du groupe B, associées aux coffres. Les individus sus-discutés ne partagent pas d'autre caractéristique spécifique dans le mobilier.

Au sein du **groupe B**, nous avons vu que l'individu **99-456** se démarque du reste du groupe. Il est intéressant de constater qu'il ne se trouve pas dans une position centrale avec les autres sujets, mais plutôt à l'écart (Figure C10. 16). Le sujet de sexe indéterminé **99-250**, également à la marge du groupe B, présente un  $\delta^{13}\text{C}$  sensiblement différent du reste du groupe. Aucune autre spécificité n'est visible pour ce groupe, hormis pour l'adolescent **99-248A** (10-12 ans) déjà mentionné plus haut, qui présente une signature isotopique extrême (plus faible  $\delta^{15}\text{N}$  et plus fort  $\delta^{34}\text{S}$ ) mais ne se détache pas spatialement du reste du groupe. Pour les autres sujets, les valeurs isotopiques sont globalement similaires, de même que les pratiques funéraires.

Pour C, N et S, la **paire D** apparaît clairement dans la gamme de valeurs du groupe C. Si l'on prend en compte le sexe de ces sujets, la paire « homme 99-242 et femme 99-241 » semble similaire notamment au petit ensemble constitué de l'homme 109 et des femmes 98 et 209 dans le groupe C. Ces « groupes » ont-ils fonctionné ensemble ? Si la comparaison interroge, il n'est pas possible d'en tirer de conclusions.

Pour C et N, la **paire E** semble se rapprocher davantage des valeurs du groupe B, sans y trouver de comparaisons directes. Ces observations confirment ce qui a été énoncé précédemment (cf. Figure C10. 10, p.544) mais ne permettent pas d'établir plus de liens avec les autres groupes.

Une comparaison des plans de répartition des différents paramètres funéraires (cf. Augereau et Chambon 2011) avec les plans de répartition des valeurs isotopiques a été effectuée au cas par cas, ne révélant a priori pas de spécificité particulière en dehors de celles soulevées ci-avant.

### II.5.b. Caractérisation biologique et données biochimiques

En dépit de la mauvaise conservation des squelettes, l'observation de plusieurs **variations anatomiques non métriques (VA)** a permis d'établir certaines **liaisons entre individus**, au-delà des regroupements par âge ou par sexe (Augereau et Chambon 2011, p280-285). Toutes précautions gardées en termes d'interprétations, du fait du faible effectif et des incertitudes chronologiques d'une

part, ainsi que de la question du déterminisme des VA (génétique et/ou environnemental ?) d'autre part, les auteurs proposent de parler, plutôt que de liens de parentés stricts entre les sujets, de « quelques passerelles entre les groupes A, B, C et les paires isolées » qui relèveraient plutôt « d'éventuelles traces de contact ou de partage d'un environnement commun ». Ces liaisons méritent néanmoins d'être interrogées du point de vue biochimique.

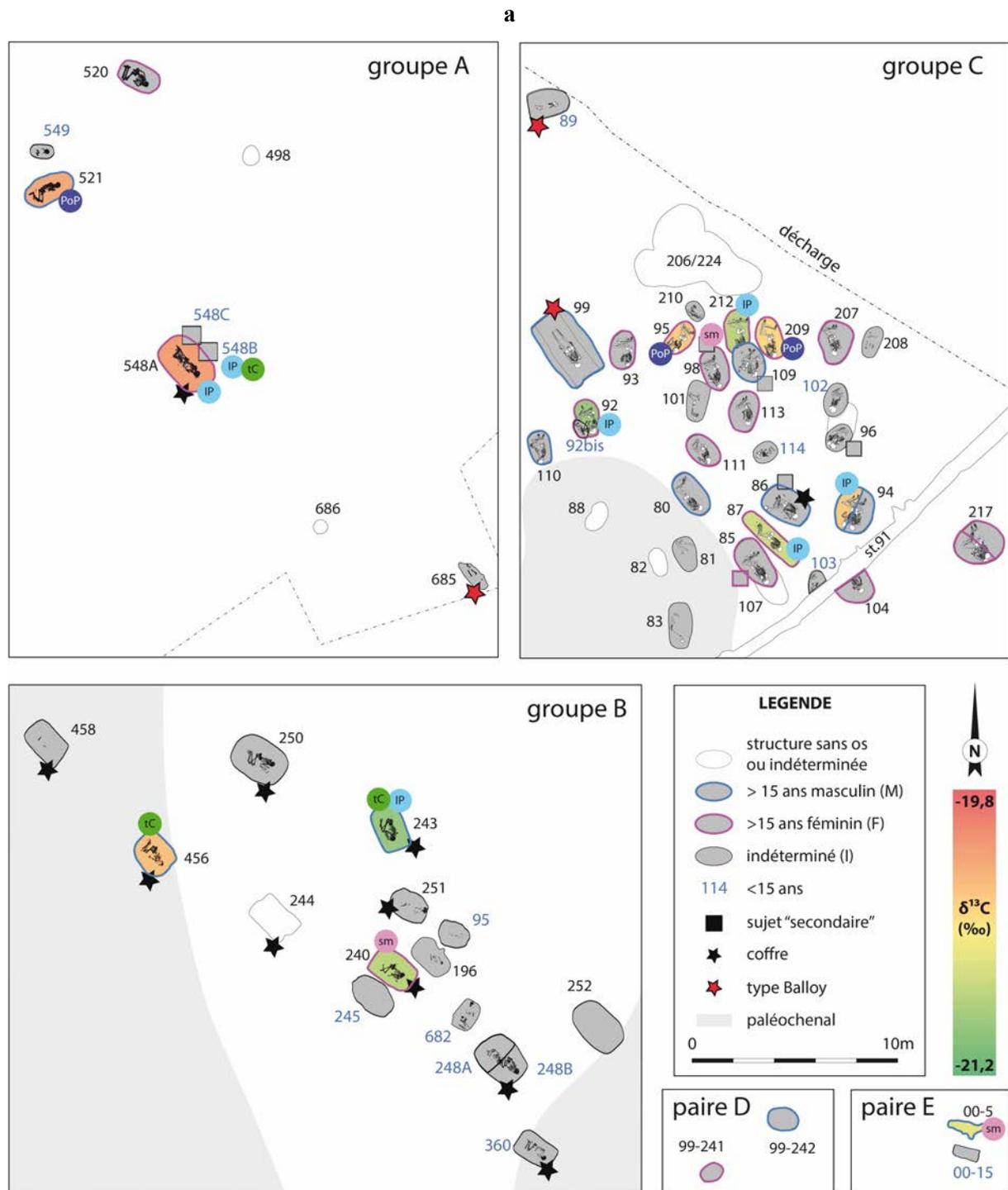
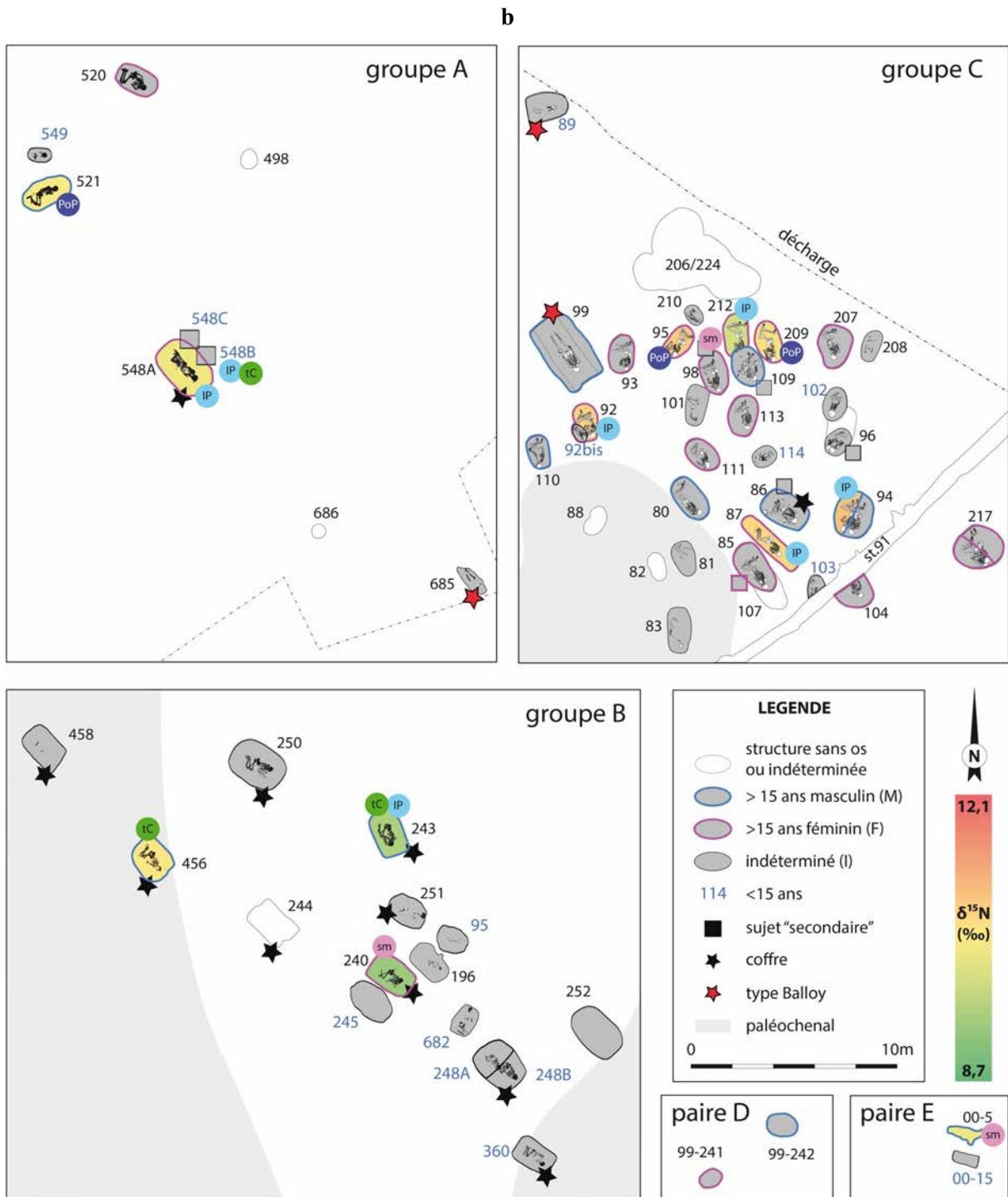


Figure C10. 17 : Plan de répartition spatial des sépultures de Monéteau « Macherin » en fonction des valeurs isotopiques du carbone (a), de l'azote (b) et des variations anatomiques, selon le groupe, l'âge, le sexe et le type de tombe des sujets. Pastilles bleu clair « IP » : incisives « en pelle », pastilles vertes « tC » : tubercule de Carabelli, pastilles roses « sm » : suture métopique, pastilles violettes « PoP » : perforations olécrâniennes et patellas *emarginata*.

Sur la base de la fréquence rare des VA partagées entre individus de groupes, d'âges et de sexes différents, quatre regroupements ou « sous-groupes biologiques » ont été proposés. Ils sont représentés par des pastilles colorées portant les codes des VA dans la Figure C10. 17 au regard des valeurs isotopiques du carbone et de l'azote du collagène osseux pour les sujets analysés (les résultats du  $\delta^{34}\text{S}$  osseux sont présentés en Annexe A51). Pour les autres marqueurs, les données ne sont pas suffisantes et ne sont pas discutées ici. Toutes les données disponibles sont reportées dans le Tableau C10. 3.



(suite)

- Dans le premier sous-groupe, les sujets 99-548A et B, 99-243, 04-85A, 04-87, 04-92A, 04-94B et 04-212 des groupes A, B et C portent des **incisives centrales supérieures « en pelle » (IP, pastilles bleu clair)** ; ils sont orientés avec une certaine variabilité du sud-est au sud. Ces individus ne partagent pas de valeurs isotopiques particulièrement similaires, sauf peut-être pour les trois individus du groupe C 04-87, 04-92 et 04-94B (deux femmes et un homme) ; ou entre 99-243 et 04-212 pour  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  (un homme et une femme des groupes B et C).

- Dans le deuxième sous-groupe, trois sujets des groupes A et B portent un **tubercule de Carabelli (tC, pastilles vertes)** : 99-548B, 99-243, 99-456. Ils sont orientés globalement dans la même direction sud-est/sud-sud-est. N'ayant pas de données pour le sujet 99-548B, les deux seuls individus comparables appartiennent au groupe B et présentent des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  différentes mais des valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  semblables. En revanche, on retrouve un lien intéressant entre la sépulture 99-548 du groupe A (bien qu'il ne concerne cette fois pas l'individu A mais le sujet immature inhumé juste au dessus) et le sujet 99-456 du groupe B, rappelant la comparaison discutée précédemment (cf. II.5.a). Inhumés dans la même tombe, il est possible que la femme et l'enfant 99-548 A et B soient apparentés (et qu'ils aient tous deux entretenus un lien avec 99-456 ?).

- Le troisième sous-groupe rassemble trois sujets présentant une **suture métopique (sm, pastilles roses)** : 99-240, 04-98A et 00-05 (groupes B, C et paire E ; orientés globalement entre l'est et le sud-sud-est). Aucune donnée n'est disponible pour 04-98A et les deux autres présentent des valeurs distinctes de  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{13}\text{C}$ .

- Dans le quatrième sous-groupe, trois sujets des groupes A et C partagent des **perforations olécrâniennes et des patellas *emerginata* (PoP, pastilles violettes)** : 99-521, 04-95 et 04-209 (tous trois sont orientés dans des directions diverses allant du NE au SO en passant par le SSE). Cette fois, les trois sujets présentent des **valeurs similaires** de  $\delta^{15}\text{N}$  (entre 11 et 11,3‰) et de  $\delta^{13}\text{C}$  (-20,2 à -20,5‰).

Si les rapprochements identifiés, sur la base de VA partagées et signatures isotopiques similaires, sont à interpréter avec prudence, ils offrent toutefois des comparaisons intéressantes à discuter. Bien entendu, des valeurs isotopiques similaires entre individus de groupes différents ne signifient pas nécessairement **des ressources partagées** mais **permettent seulement de l'envisager** et inversement, des valeurs isotopiques distinctes ne signifient pas nécessairement que les sujets n'entretenaient pas de lien de leur vivant, d'une quelconque nature. Le faible effectif des VA observées ne permet pas, ici, de discuter plus avant ces rapprochements, néanmoins il sera intéressant de croiser ces informations avec celles issues de l'étude des sites voisins. Des analyses génétiques retraçant les liens de parenté comme celles effectuées à GLN offrirait de précieux arguments pour aborder la question des relations entre les groupes et vérifier, ou non, les rapprochements proposés ici.

ID	groupe	VA	$\delta^{13}\text{C}$ os	$\delta^{15}\text{N}$ os	$\delta^{34}\text{S}$ os	Sr/Ca os	Ba/Ca os	$\delta^{13}\text{C}$ dentine	$\delta^{15}\text{N}$ dentine	$\delta^{34}\text{S}$ dentine	Sr/Ca émail	Ba/Ca émail
Mon 99-548A	A	IP	-20.2	10.8		-3.5	-3.8				-3.3	-4.8
Mon 04-87	C	IP	-20.8	11.2	4.6			-20.8	11.2		-3.8	-4.8
Mon 04-92	C	IP	-21.0	11.2								
Mon 04-94B	C	IP	-20.4	11.4	4.9						-3.7	-4.9
Mon 04-212	C	IP	-20.9	10.4								
Mon 99-548B	A	IP, tC										
Mon 99-243	B	IP, tC	-21.0	9.9	7.6							
Mon 99-456	B	tC	-20.4	11.1	6.3							
Mon 99-521	A	PoP	-20.2	11.0	7.0						-3.5	-5.2
Mon 04-95	C	PoP	-20.5	11.3								
Mon 04-209	C	PoP	-20.5	11.1								
Mon 99-240	B	sm	-20.9	9.6	7.6						-3.8	-5.5
Mon 00-05	E	sm	-20.7	10.8							-3.6	-5.1

Tableau C10. 3 : Résultats isotopiques et élémentaires des individus de Monéteau « Macherin » discutés dans le cadre de l'étude des regroupements sur la base des variations anatomiques (VA). IP : incisives « en pelle », tC : tubercule de Carabelli, PoP : perforations olécrâniennes et patellas *emerginata*, sm : suture métopique.

### II.5.c. Répartition des valeurs isotopiques dans le groupe C

Au sein du groupe C, des rapprochements par paires ont été proposés sur la base de la proximité spatiale et de la typologie funéraire. Examinons la variabilité isotopique de ces paires pour tenter d'identifier de possibles régimes alimentaires partagés.

La Figure C10. 18 montre que, pour **chaque paire** identifiée ayant fourni des résultats exploitables, les **signatures isotopiques ne sont pas spécialement proches**. Pour les paires regroupant des adulte(s) et immature (deux paires) ou des adultes de sexe opposé comme dans la plupart des cas (six paires), ces résultats ne sont sans doute pas surprenants, les hommes présentant dans ce groupe des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  presque toujours supérieures à celles des femmes. Néanmoins, **aucun schéma récurrent** n'est observé : la différence entre hommes et femmes (ou adultes et immatures) au sein d'une paire de sépulture est variable (Tableau C10. 4). Pour la paire réunissant deux femmes (04-209 et 212, en jaune sur la Figure C10. 18, en haut à droite), les valeurs ne sont pas particulièrement proches ( $\Delta^{15}\text{N} = 0,7\text{‰}$  notamment). Parmi ces rassemblements, deux paires présentent des valeurs isotopiques relativement similaires : l'homme 04-94B et les femmes de la sépulture 04-217 (bien que 04-217B présente un  $\delta^{13}\text{C}$  inférieur aux autres) ; l'homme 04-80 et la femme 04-85B (Tableau C10. 4).

NB : Comme nous l'avons vu pour GLN (et le verrons pour Bon), des similitudes peuvent ici être identifiées et refléter des proximités entre individus, en dépit de la variabilité intrinsèque du collagène et de l'incertitude analytique des données.

Monéteau "Macherin", groupe C

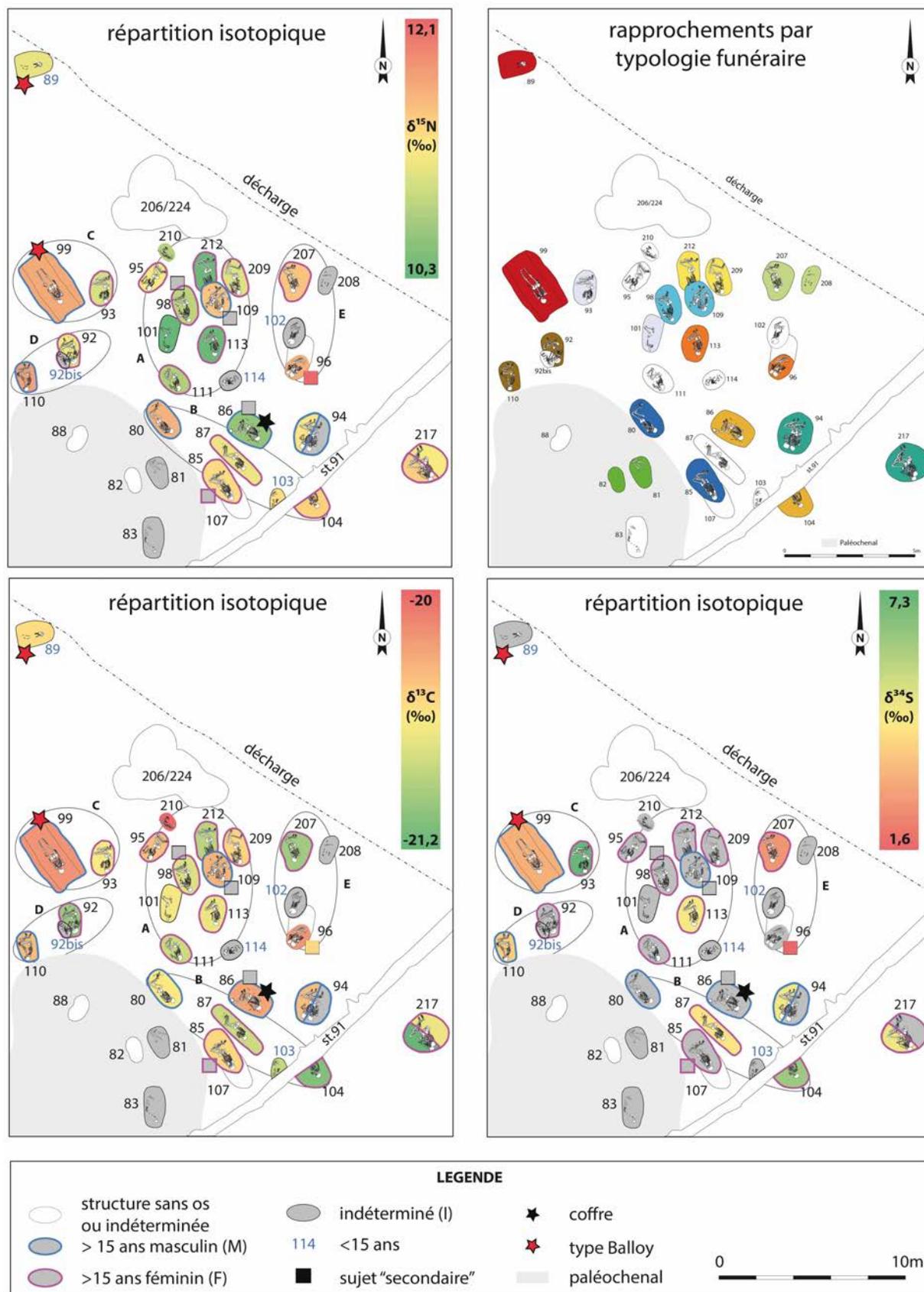


Figure C10. 18 : Plan de répartition spatiale des sépultures du groupe C de Monéteau « Macherin » en fonction des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  osseux) et des rapprochements par typologie funéraire.

Ainsi, les résultats isotopiques ne semblent pas étayer l'hypothèse de la répartition par paires de sépultures. En revanche, **un autre type de répartition** apparaît, pouvant regrouper plusieurs individus de sexe et âge distincts, rappelant celui mis en évidence à GLN. De tels regroupements sont proposés sur la Figure C10. 18 par les ellipses numérotées de A à E.

Un **premier regroupement (A)** pourrait fonctionner autour de la sépulture de l'homme 04-109, autour duquel sont inhumées plusieurs femmes (04-209, 04-212, 04-98, 04-111 et 04-113, peut-être 04-95 ?) et deux individus de sexe indéterminé (04-210 et 04-101) de  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  inférieur. Ces femmes présentent toutes des valeurs basses de  $\delta^{15}\text{N}$  (de 10,3 à 11,1‰,  $\Delta^{13}\text{C} = 0,3\%$  et  $\Delta^{15}\text{N} = 0,7\%$ ), de même que les sujets indéterminés (10,3 et 10,9‰).

Un **deuxième regroupement (B)** pourrait être constitué par l'homme 04-80 et les femmes 04-85, 04-87, 04-104 ainsi que l'immature 04-103. Femmes et enfant présentent des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  similaires et relativement élevées (de 11,2 à 11,5‰,  $\Delta^{15}\text{N} = 0,3\%$  et  $\Delta^{13}\text{C} = 0,5\%$ ) mais toujours inférieures à l'homme (11,7‰). Deux des femmes présentent des valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  similaires au regard de la variabilité globale (4,6 et 6,3‰).

Sur la base des proximités spatiales et des relations homme/femme, il est concevable de proposer les **regroupements C** (l'homme 04-99 et la femme 04-93) **et D** (l'homme 04-110 et la femme 04-92).

ID	sexe	classe d'âge	paire	$\delta^{13}\text{C}$ col os	$\delta^{15}\text{N}$ col os	$\delta^{34}\text{S}$ col os	$\Delta^{13}\text{C}$	$\Delta^{15}\text{N}$	$\Delta^{34}\text{S}$
Mon 04-89	-	1-9	rouge	-20.6	11.2				
Mon 04-99	M	>30	rouge	-20.3	11.7	3.3	0.3	0.5	NO
Mon 04-209	F*	>20	jaune	-20.5	11.1		0.3	0.7	NO
Mon 04-212	F*	15-19	jaune	-20.9	10.4				
Mon 04-98B	F	15-19	bleu ciel	-20.8	10.9		0.4	0.7	NO
Mon 04-109	M*	>20	bleu ciel	-20.4	11.6				
Mon 04-207	F	>30	vert clair	-21.0	11.6	2.7	NO	NO	NO
Mon 04-208	I	15-19	vert clair						
Mon 04-96A	-	1-9	orange foncé	-20.6	12.1	1.6			
Mon 04-96B	I	>30	orange foncé	-20.3	11.7		0.4	1.7	3.3
Mon 04-113	F	>30	orange foncé	-20.7	10.4	4.9			
Mon 04-94A	M	>30	turquoise						
Mon 04-94B	M	>30	turquoise	-20.4	11.4	4.9	0.8	0.2	0.0
Mon 04-217A	F	>30	turquoise	-20.7	11.3				
Mon 04-217B	F*	>30	turquoise	-21.2	11.5	5.0			
Mon 04-86B	M*	>30	jaune ocre	-20.3	10.6		0.8	0.8	NO
Mon 04-104	F*	>15	jaune ocre	-21.1	11.5	6.3			
Mon 04-80	M	>30	bleu nuit	-20.6	11.7				
Mon 04-85A	F	>30	bleu nuit				0.1	0.3	NO
Mon 04-85B	F*	>30	bleu nuit	-20.6	11.4				
Mon 04-81	I	>20	vert				NO	NO	NO
Mon 04-92	F	>30	marron	-21.0	11.2		0.6	0.5	NO
Mon 04-110	M*	>30	marron	-20.4	11.8	4.1			
Mon 04-93	F	>30	gris clair	-20.7	11.0	7.3	0.0	0.7	NO
Mon 04-101	?	indet	gris clair	-20.7	10.3				

Tableau C10. 4 : Tableau de comparaison des valeurs isotopiques de l'os par paires de sépultures proposées sur la base de la typologie funéraire, d'après Augereau et Chambon, 2011. NO = non observable.

Enfin, le **regroupement E** propose de considérer ensemble la femme 04-207 et les sujets de la sépulture 04-96 (un adulte de sexe indéterminé et un enfant) qui présentent des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  élevées (de 11,6 et 11,7‰ pour les adultes à 12,1‰ pour l'enfant). Le  $\delta^{13}\text{C}$  s'échelonne de -21 à -20,3‰ et le  $\delta^{34}\text{S}$  est plutôt homogène, de 1,6 et 2,7‰.

Ces regroupements ne constituent que des propositions et doivent être étayés par d'autres arguments.

## II.6. Synthèse et perspectives

### Matériel analysé :

✦ 53 humains

### Principaux résultats mis en évidence :

✦ Distinctions des signatures biochimiques entre les groupes pour tous les marqueurs : le groupe B se distingue particulièrement des autres (plus récent ?), le groupe C se rapproche du schéma rencontré à Gurgy « Les Noisats » (plus ancien ?)

✦ Signature isotopique de la sépulture du Néolithique ancien dans la variabilité du Néolithique moyen et particulièrement proche des sujets les plus anciens des groupes A et B (pour C et N) : 99-548A, 99-521, 99-456 (et de la plus récente du groupe C : 04-86B ?)

☞ La question de la chronologie est discutée par le prisme de la signature biochimique des défunts, des différences et des possibles rapprochements entre individus ayant pu partager des modes de subsistance communs.

✦ Distinctions isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  osseux) entre les sexes

✦ Des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  faibles pour les individus en coffre ?

✦ Pas de signatures spécifiques pour les individus en dispositif atypique (type de tombe, « riche » mobilier)

✦ Proximité biochimique entre certains individus des différents groupes, rappelant les liens évoqués entre les groupes par les pratiques funéraires et la biologie des défunts

✦ Identification de parallèles directs avec les sites voisins : dispositifs funéraires analogues, signatures biochimiques similaires (sépulture triple « à étage » du groupe A et de Bonnard ; sépultures de type Balloy du groupe C et de Chichery « Sur les Pâturaux »)

✦ Propositions de regroupements de plusieurs individus par petits ensembles dans le groupe C

☞ Les résultats mettent en exergue la complexité du site et la composante microrégionale, notamment le fonctionnement différentiel des groupes en termes de stratégies de subsistance mais également les relations entre ces groupes et avec l'extérieur. Ils permettent de proposer de nouvelles pistes de recherche.

### Perspectives :

✦ Signatures en Sr isotopique dans l'émail dentaire pour tracer la mobilité des humains

✦ Analyse isotopique de l'azote dans la méthionine pour évaluer la possible consommation de poisson et l'impact éventuel sur les datations

✦ Nouvelles datations sur l'hydroxyproline ?

✦ Croisement de ces résultats avec de futures analyses génétiques des liens de parenté pour comprendre la structuration interne du site et les éventuelles relations avec Gurgy « Les Noisats » et les sites voisins

### III. Chichery « Sur les Pâturaux » (CHI-Pat)

---

Le site de Chichery « Sur les Pâturaux », s'il contient assez peu d'individus, se prête toutefois plutôt bien à l'étude de son organisation interne. Répartis en deux groupes et une sépulture isolée, les individus ont fait l'objet d'une caractérisation bio-anthropologique détaillée révélant plusieurs aspects de leur identité sociale (Thomas 2011). Le croisement avec nos résultats biochimiques, indicateurs de l'alimentation et de la mobilité des sujets à différents moments de leur vie, a pour but de rechercher d'autres liens de nature sociale afin de mieux comprendre les relations entre ces individus et *in fine* de contribuer à compléter l'image que nous avons déjà de l'organisation sociale de ce groupe, qui plus est au regard de la variabilité microrégionale.

#### III.1. Retour en bref sur l'ensemble des résultats

##### III.1.a. Variabilité globale

La Figure C10. 19 synthétise les principaux résultats obtenus pour les humains de Chichery « Sur les Pâturaux ». Ces derniers présentent une signature biochimique dans la **variabilité micro-régionale** pour tous les marqueurs, avec des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  dans l'os) globalement intermédiaires entre GLN et Mon, voire plutôt similaires au groupe C de Mon. Dans l'ensemble, leur signature isotopique est plus proche de celle de la microrégion que de la variabilité des autres sites Cerny du Bassin parisien (qui expriment notamment des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  inférieures et des valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  supérieures à celles de l'Yonne ; cf. Chap5.III.2 ; Cheung *et al.* 2021). Parallèlement, les données de texture de leurs micro-usures dentaires indiquent également qu'ils se trouvent dans la variabilité de la microrégion et s'écartent de celle du Cerny du Bassin parisien (qui présentent une complexité et une anisotropie plus grandes et plus variées ; Figure C10. 19d ; cf. Chap9.I.5.d ; Syrikova *et al.* 2021).

Par ailleurs, les sujets inhumés à CHI-Pat présentent une certaine **hétérogénéité** de leur signature biochimique comparativement au faible effectif et à l'homogénéité des pratiques funéraires (pour  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  dans l'os,  $\delta^{34}\text{S}$  dans la dentine, Sr/Ca dans l'émail), de même qu'une diversité dans la texture des micro-usures dentaires relativement à la variabilité micro-régionale.

##### III.1.b. Variabilité intra-populationnelle

D'une façon générale, les **deux groupes** apparaissent **légèrement distincts** (pour N, S dans l'os et Sr/Ca dans l'émail ; Figure C10. 19a et c). En particulier, les deux hommes 2 et 6 du groupe B se démarquent en C, N et S dans l'os. Ainsi pour le **groupe B** (deux hommes et deux femmes analysés), les valeurs sont nettement **distinctes entre les sexes**, malgré le faible effectif, pour  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  dans l'os.

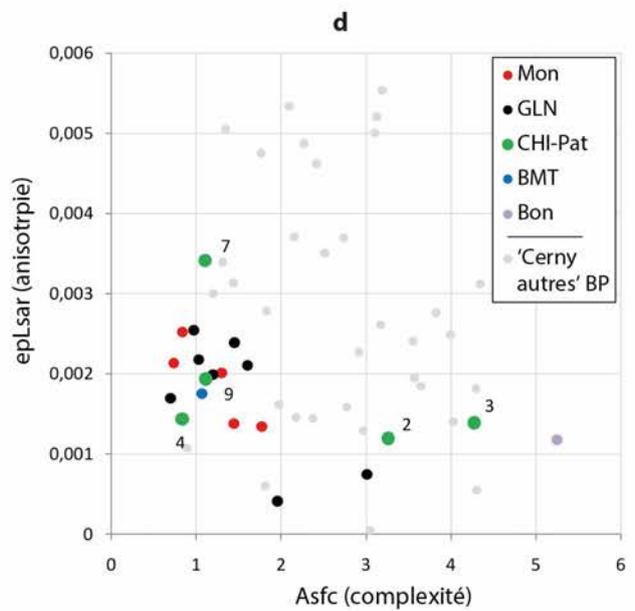
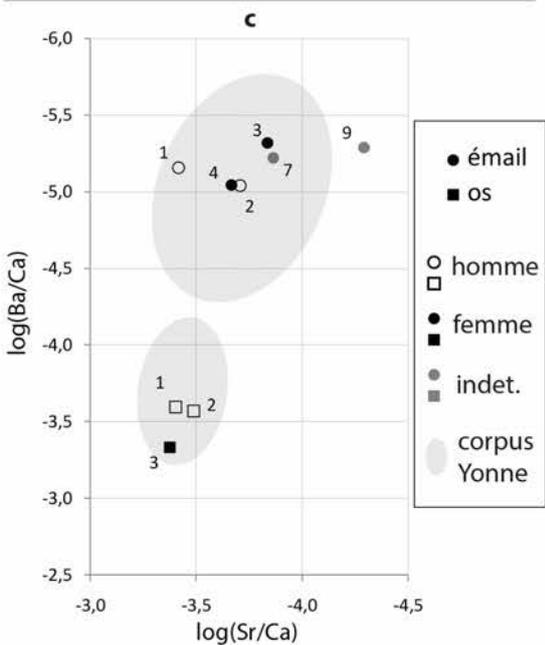
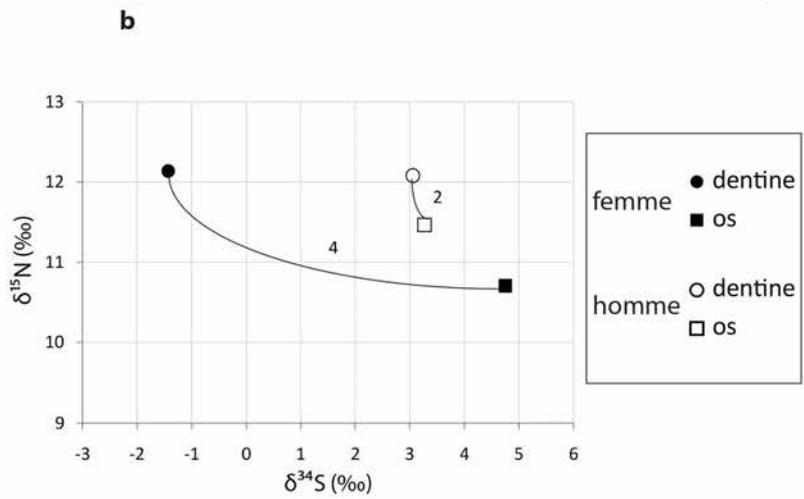
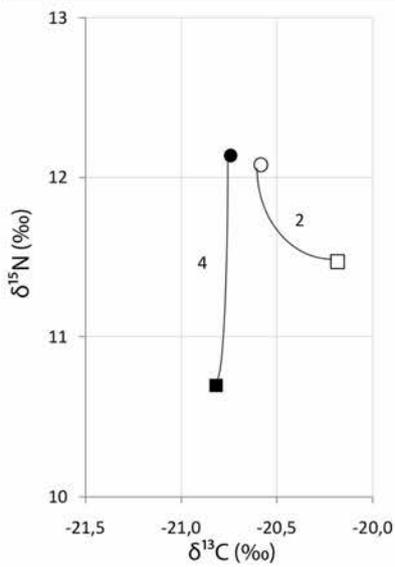
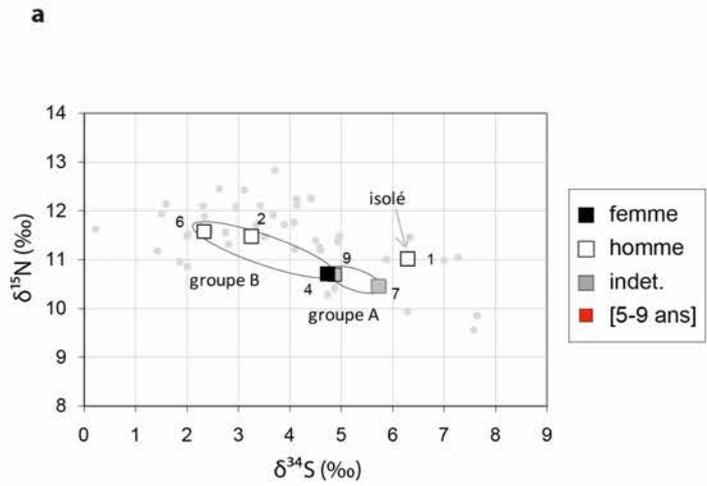
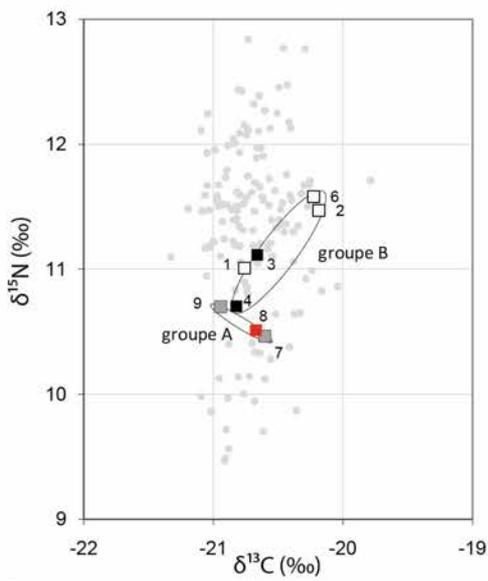


Figure C10. 19 (page précédente) : (a) Distribution des valeurs isotopiques du collagène osseux ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) des sujets de Chichery « Sur les Pâturaux ». (b) Distribution des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) du collagène dentinaire (ronds) au regard du collagène osseux (carrés) des sujets de Chichery « Sur les Pâturaux » indiquant la diminution du  $\delta^{15}\text{N}$  avec l'âge et la variation en  $\delta^{34}\text{S}$  entre l'enfance et l'âge adulte de l'individu féminin. (c) Distribution des valeurs élémentaires (Ba/Ca et Sr/Ca) dans l'apatite de l'émail (ronds) et de l'os (carré) des individus de Chichery « Sur les Pâturaux » au regard de la variabilité globale du corpus de l'Yonne représentée par les ellipses de confiance à 95% (grisées) pour l'émail et l'os respectivement. Les valeurs de l'émail et de l'os ne sont pas directement comparables et la différence n'est pas représentative des éventuelles modifications au cours de la vie. (d) Distribution des données d'anisotropie (epLsar) et de complexité (Asfc) des micro-usures dentaires des individus de Chi-Pat (en vert) relativement à la variabilité des autres sites de la microrégion et à la variabilité des autres sites Cerny du Bassin parisien (en gris, d'après les données de P. Syrikova 2020).

**L'enfant CHI-Pat 8** présente les plus faibles valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  de CHI-Pat avec le jeune adulte CHI-Pat 7 (15-19 ans) du même groupe, mais tous deux présentent des valeurs similaires également à l'autre individu, de plus de 20 ans, du **groupe A**.

Le **sujet isolé CHI-Pat 1** est dans la variabilité globale pour C et N dans l'os mais se démarque sensiblement en S dans l'os et Sr/Ca dans l'émail. Ses valeurs isotopiques dans l'os sont toutefois plus proches de celles des femmes que de celles des hommes (Figure C10. 19a). Pour tous les marqueurs, il semble se rapprocher des valeurs de l'homme 99-521 du groupe A de Monéteau et, pour C, N et S dans l'os, également de 99-456 du groupe B de Mon.

Pour les deux sujets analysés (un homme et une femme), les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  de la dentine sont supérieures à celles de l'os, comme à GLN, reflétant un signal différent entre l'enfance (approximativement entre 3 et 8 ans) et l'âge adulte (après 15 ans ; Figure C10. 19b). De plus, alors que les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  diffèrent dans l'os entre l'homme et la femme, leurs valeurs dans la dentine sont similaires, suggérant que la distinction sexuelle n'avait pas cours avant 9 ans. D'autre part, la valeur de  $\delta^{34}\text{S}$  de la dentine de la femme est largement inférieure à celle de l'os ( $\Delta^{34}\text{S} = 6,2\text{‰}$ ), indiquant un déplacement probable (origine exogène ?). À l'inverse, les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  de l'homme sont similaires entre l'os et la dentine ( $\Delta^{34}\text{S} = 0,2\text{‰}$ ). De nouvelles analyses du Sr isotopique permettront peut-être d'identifier des schémas de mobilité distincts entre les sexes.

NB : À partir de ces résultats, des associations par paires peuvent être proposées sur la base d'une plus grande similitude des données entre individus (la pertinence de ces proximités doit être corrélée à d'autres éléments archéologiques pour être confortée, puisque l'apparente proximité biochimique pourrait aussi relever d'un biais analytique ; ces suggestions ne sont proposées qu'à titre interrogatif). **Dans l'os**, au moins pour C et N mais également pour S lorsque les données sont disponibles, les sujets **1 et 3** (l'homme isolé et une femme), **2 et 6** (deux hommes), **4 et 9** (une femme et un adulte de sexe indéterminé) ainsi que les sujets **7 et 8** (un jeune adulte et un enfant) présentent des valeurs isotopiques similaires. **Dans la dentine** comme **dans l'émail** pour les données disponibles, ce sont cette fois les sujets **2 et 4** (un homme et une femme) et les sujets **3 et 7** (une femme et un jeune adulte de sexe indéterminé) qui présentent des proximités isotopiques et élémentaires. Dans l'émail, les sujets 1 et 9 se détachent du reste du groupe par un ratio Sr/Ca supérieur et inférieur aux autres individus, respectivement. Les données de **texture des micro-usures** dentaires indiquent un rapprochement entre

les sujets 4 et 9 à nouveau, et les sujets 2 et 3 (si tant est que l'on considère la valeur du sujet 3 non taphonomique ; cf. Chap9.I). Ces paires seront examinées en fonction de la répartition spatiale des sépultures et des variations anatomiques partagées.

### III.1.c. Indicateurs de stress

Des **hypoplasies de l'émail** relevées sur plusieurs dents de cette population ont révélé des épisodes de **stress entre 2,5 et 5 ans** notamment (Chambon *et al.* 2010). À titre expérimental et préliminaire, nous avons voulu savoir si d'éventuelles modifications dans les courbes de profils réalisées dans l'émail par ablation laser pouvaient correspondre à ce type de phénomène. Or, on observe un **pic dans le profil Sr/Ca** de CHI-Pat 4 par exemple (Figure C10. 20). Des hypoplasies ayant été identifiées sur les deuxièmes molaires de cet individu, il est possible que ce pic corresponde à une période de modification forte dans le mode d'alimentation de ce sujet, qui pourrait avoir causé un stress suffisant pour être marqué dans l'émail. Ce résultat offre d'intéressantes perspectives pour espérer comprendre le type de stress ayant pu advenir chez ces individus pendant leur enfance.

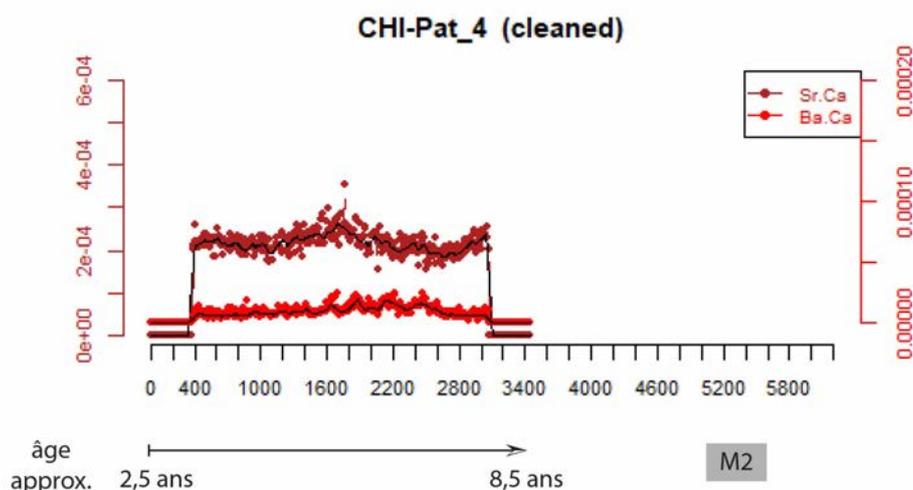


Figure C10. 20 : Courbe de variation des ratios Sr/Ca et Ba/Ca le long du profil d'ablation laser dans l'émail de la deuxième molaire supérieure gauche de l'individu CHI-Pat 4. Le pic de Sr/Ca pourrait correspondre à un épisode de stress identifié par une hypoplasie de l'émail dans le tiers moyen de la couronne observée sur plusieurs M2.

### III.2. Répartition spatiale des indicateurs biochimiques, biologiques et microscopiques

La Figure C10. 21 montre la répartition des valeurs isotopiques de C, N et S dans l'ensemble sépulcral en fonction des principales caractéristiques biologiques et funéraires des défunts.

En premier lieu, le dégradé de couleurs met en évidence les rapprochements isotopiques, pour les trois indicateurs, entre **les deux hommes 2 et 6 du groupe B**, inhumés à chaque extrémité de l'alignement, et entre la **femme 4** (groupe B) et **l'individu 9** de plus de 20 ans de sexe indéterminé (groupe A). Peut-on supposer que le sujet 9 soit une femme ? Ou que la femme 4 et le sujet 9 aient eu une relation particulière, un lien social, des pratiques communes ? Globalement, la femme 4 du groupe B entretient

plus de proximités isotopiques avec les individus 7, 8 et 9 du groupe A qu'avec les autres sujets de son groupe (cf. Figure C10. 19a, p.569).

Il est à noter que, dans le groupe B, la **femme 3** présente des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  **intermédiaires** entre la femme 4 et les deux hommes, au milieu desquels elle est inhumée.

Par ailleurs, les **deux jeunes 7 et 8** du groupe A, inhumés l'un à côté de l'autre, ont des valeurs isotopiques de C et N similaires (pas de S pour le 8).

Enfin, **l'individu 1 isolé** n'entretient pas de similitudes (pour l'ensemble des marqueurs) avec un sujet en particulier.

Parmi une sélection de **VA rares et partagées** à CHI-Pat (cf. Chap3.IV.1.e), plusieurs liens de parenté sont proposés (Figure C10. 21). Les deux femmes partagent une canine inférieure incluse. La femme 3 partage avec le sujet 9 un tubercule marginal zygomatique. L'homme 2 partage avec l'autre homme un torus maxillaire et avec le jeune adulte 7 une extension de l'émail inter-radiculaire. L'enfant 8 partage des caractères avec l'homme 6 (un sillon coronaradiculaire) et avec le jeune adulte 7 (une suture incisive). Le sujet 1 ne partage aucun de ces caractères avec les autres.

Ainsi, il semble que les deux hommes 2 et 6 soient apparentés avec le jeune 7 et l'enfant 8 d'une part, et que les deux femmes 3 et 4 seraient apparentées avec le sujet 9 d'autre part. On constate que, si des similitudes isotopiques sont enregistrées au sein de ces deux ensembles, il existe également d'importantes différences, qui ne semblent pas dues uniquement à l'appartenance à un groupe ou au sexe des sujets : dans le premier ensemble, les deux hommes (2 et 6) du groupe B partagent des valeurs isotopiques similaires et les deux jeunes (7 et 8) du groupe A partagent également des valeurs isotopiques similaires mais les deux hommes et les deux jeunes entre eux (2-6 vs 7-8) présentent des valeurs très distinctes ; dans le deuxième ensemble en revanche, les sujets 4 et 9 appartenant aux différents groupes A et B présentent des valeurs isotopiques similaires alors que les deux femmes (4 et 3) appartenant au même groupe présentent des valeurs isotopiques plus éloignées.

NB : On note que les VA retenues pour la recherche de liens de parenté ne sont pas les mêmes que pour Monéteau : à CHI-Pat, ne sont pas enregistrées de patella *emarginata*, de perforation olécranienne ni d'incisive en pelle mais sont enregistrés 3 tubercules de Carabelli (sur les 3 immatures 3, 7 et 10, aucune adulte) et 2 sutures métopiques (sujets 3 et 7).

Plus généralement, si certains individus qui **partagent des VA** partagent également des **valeurs isotopiques similaires** (les deux hommes de la paire 2 et 6 et les deux jeunes de la paire 7 et 8 par exemple), d'autres présentent des **valeurs isotopiques distinctes** (le jeune adulte 7 et l'homme 2 par exemple). En outre, les individus qui partagent des valeurs isotopiques similaires peuvent être inhumés indifféremment dans des sépultures côte à côte (7 et 8) ou bien dans des sépultures plus éloignées (2 et 6 ou encore 4 et 9).

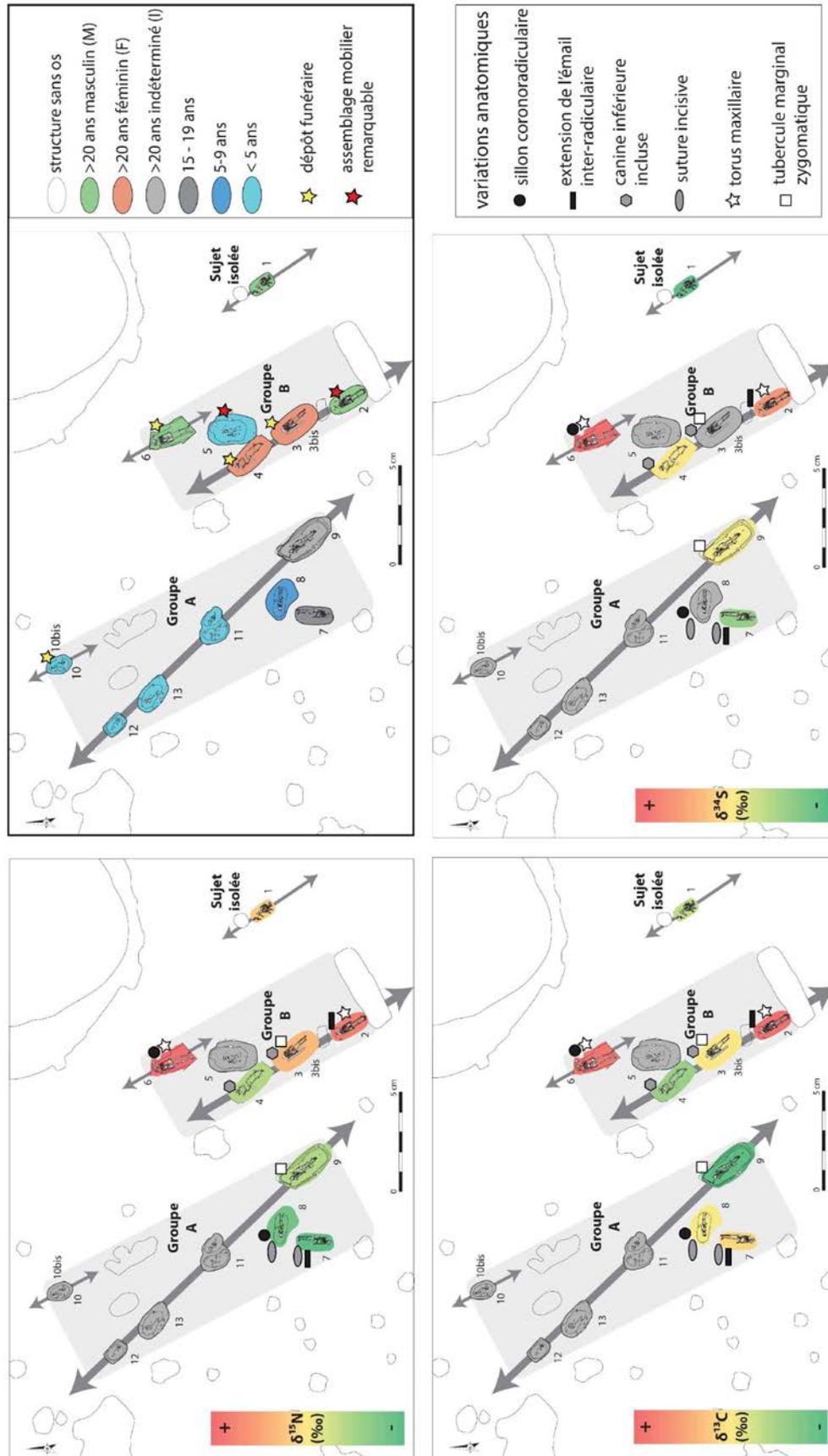


Figure C10. 21 : Plan de répartition des sépultures de Chichery « Sur les Pâtreaux » en fonction de la signature isotopique ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) du collagène osseux et des principales caractéristiques biologiques (âge-au-décès, sexe, variations anatomiques rares et partagées entre quelques individus) et funéraires (dépôt mobilier).

Par ailleurs, les individus qui présentent des **valeurs similaires dans les dents** (dentine ou émail : 2 et 4 ou encore 3 et 7 ; cf. Figure C10. 19b, p.569) ne sont pas inhumés dans des tombes adjacentes et ne partagent pas non plus de VA. Cela n'indique pas nécessairement qu'ils n'avaient pas de lien de parenté mais suggère qu'ils partageaient des pratiques alimentaires communes avant 9 ans. Si une origine exogène a été proposée pour la femme 4 sur la base du ratio isotopique  $\delta^{34}\text{S}$  de son collagène dentinaire, elle présente des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca similaires aux autres sujets et notamment à l'homme 2. Ce résultat pourrait indiquer un régime alimentaire semblable quelque soit le lieu de vie de ces individus. En revanche, le sujet 9 présente un Sr/Ca en dehors de la variabilité globale (plus faible) pouvant refléter la consommation de ressources différentes pour cet individu avant 9 ans. La question de la mobilité pourra être abordée par de nouvelles analyses du Sr isotopiques (à venir).

De plus, au niveau de la texture de surface de leurs **micro-usures dentaires**, **la femme 3 et l'homme 2**, enterrés dans des fosses adjacentes, ont une complexité similaire (Asfc) et différente des autres sujets de Chichery ; leur anisotropie est également proche, se distinguant principalement de l'individu 7 (cf. Figure C10. 19d, p.569). **La femme 4 et le sujet 9** ont une complexité et une anisotropie semblables, les rapprochant à nouveau. Pour la femme 3 et l'homme 2, d'une part, et la femme 4 et le sujet 9, d'autre part, on peut suggérer que leurs derniers repas aient été composés des mêmes types de ressources. Le sujet 7, par ailleurs, présente une anisotropie légèrement supérieure à tous les autres mais une complexité semblable à 4 et 9. Il présente également un  $\delta^{34}\text{S}$  osseux supérieur aux autres.

Pour conclure, la complexité de ces résultats, de concert avec le faible effectif, rend délicate l'interprétation globale et permet difficilement de proposer une clé de lecture unique. Le partage alimentaire ne se faisait sans doute pas uniquement en fonction du sexe mais aussi en fonction des relations familiales et probablement du rang social. Pour certains individus, la position dans la société permettait sans doute d'accéder à une inhumation dans un groupe plutôt que dans l'autre quelles qu'aient été les conditions de vie et notamment de subsistance. Les femmes du groupe B pouvaient avoir une signature (et une alimentation) proche des sujets du groupe A, mais ont eu tout de même accès à une inhumation dans le groupe B (vraisemblablement plus élitiste, comme le suggèrent les dépôts de mobilier). La disparité isotopique entre les hommes et les femmes du groupe B révèle néanmoins que des différences sociales existaient entre les sexes, adossées à un accès aux ressources distinct ou plutôt à des pratiques alimentaires différenciées compte tenu de la (somme toute) faible différenciation. Ces observations/considérations montrent bien l'intérêt de croiser l'ensemble des informations disponibles, issues de disciplines variées et complémentaires. Appliquées à un plus grand nombre de sujets comme à Gurgy « Les Noisats » voire sur tous les sujets de la microrégion, ils permettront assurément d'obtenir de nouvelles clés interprétatives.

### III.3. Synthèse et perspectives

#### **Matériel analysé :**

- ✦ 8 humains

#### **Principaux résultats mis en évidence :**

- ✦ Signature biochimique et texture des micro-usures dentaires dans la variabilité de la microrégion ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  proches notamment du groupe C de Monéteau), s'écartant de la variabilité Cerny du reste du Bassin parisien.

- ☞ Composante locale majoritaire du point de vue des pratiques alimentaires

- ✦ Groupe sensiblement hétérogène par sa signature biochimique (et la texture de ses micro-usures dentaires) vs homogène par ses pratiques funéraires (excepté sujet 1) relativement à la variabilité locale.

- ✦ Différences sexuelles dans l'os ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) mais pas dans la dentine, sauf pour  $\delta^{34}\text{S}$

- ☞ Statut social « genré » à l'âge adulte mais pas avant 8-9 ans. Mobilité probable de la femme.

- ✦ Différences biochimiques entre les groupes et avec le sujet 1 isolé

- ✦ Identification de similitudes biochimiques en lien ou non avec les proximités biologiques (VA) et spatiales, partage de caractères entre les groupes A et B

- ☞ Structuration sociale dans la mort peut-être différente des modalités de subsistance. Les femmes du groupe B semblent avoir partagé les conditions de vie et de subsistances des sujets du groupe A mais ont eu accès à une inhumation « distinguée » dans le groupe B, vraisemblablement plus « élitiste ».

#### **Perspectives :**

- ✦ Étude intégrative des indicateurs biochimiques en fonction de la caractérisation anthropologique en comparaison avec les autres sites de la microrégion et des sites Cerny du Bassin parisien

- ✦ Nouvelles analyses du Sr isotopique pour identifier des schémas de mobilité distincts entre les sexes notamment, peut-être en lien avec les VA (origine exogène des sujets 3, 4 et 9 ?)

- ✦ Identification d'épisodes de stress dans les courbes de ratios élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) en association avec les hypoplasies de l'émail

**IV. Beaumont « Le Crot aux Moines » (BMT)**

---

**IV.1. Article 6 (participation à la monographie)**

*Les analyses isotopiques.*

Léonie Rey

Dans : Garmond et Sidéra (à paraître). *Les enceintes chasséennes du “Crot aux Moines” à Beaumont (Yonne)*

## 4.7 Les analyses isotopiques (L. Rey)

### 4.7.1 Introduction

Depuis une vingtaine d'années, les études isotopiques se multiplient en France et en Europe pour reconstituer le régime alimentaire des populations du passé. Le Néolithique, période de transition majeure des modes de vie et de l'alimentation, n'a pas échappé à cet engouement et de nombreux sites ont déjà fait l'objet d'analyses des isotopes stables du carbone et de l'azote du collagène osseux. Dans le Bassin parisien et plus spécifiquement dans la vallée de l'Yonne, un travail de thèse en cours porte sur l'analyse isotopique des restes humains et animaux de plusieurs sites du V<sup>e</sup> millénaire, dont l'enceinte de Beaumont fait partie. Les autres sites constituent des ensembles à vocation funéraire (de deux individus à de grandes nécropoles ; CHAMBON *et alii*, 2013) attribués à différentes cultures et pourront être comparés à l'étude des sujets de Beaumont. Le caractère singulier des dépôts humains rencontré à Beaumont interroge la place de ces derniers dans le contexte local. Pourquoi des restes humains ont-ils été mis à l'écart des autres sépultures contemporaines ? L'alimentation pouvant refléter le statut social ou la condition humaine dans une population, son étude pourrait mettre en évidence une position particulière des sujets retrouvés à Beaumont. Par ailleurs, le découpage du site en plusieurs secteurs et la pluralité des campagnes de fouille réalisées posent autant de questions sur l'homogénéité archéologique des restes découverts.

L'analyse isotopique du collagène osseux permet de reconstituer l'alimentation des populations à l'échelle individuelle, en combinaison avec l'étude des restes culinaires (ex. archéobotanique, archéozoologie, résidus lipidiques piégés dans les poteries) et de l'état sanitaire squelettique et dentaire (ex. marqueurs de stress, carences, caries). Les éléments constitutifs du squelette (carbone, azote, soufre...) proviennent en partie de l'alimentation et les ressources alimentaires ont des ratios isotopiques<sup>4</sup> qui leur sont propres (céréales, légumineuses, viandes, poissons). Ainsi, la composition biochimique du squelette dépend de l'environnement et des aliments consommés du vivant de l'individu. Lorsque celui-ci meurt, les ratios des isotopes stables demeurent inchangés (contrairement aux isotopes radioactifs) et le restent jusqu'à nos jours si les conditions environnementales permettent la bonne conservation du squelette. La mesure des ratios isotopiques dans les tissus humains permet de ce fait, en comparaison à celle de la faune locale et contemporaine (qui a donc été potentiellement consommée), de replacer les humains dans la chaîne alimentaire locale. La comparaison des individus entre eux permet, elle, de détecter les éventuelles différences de régimes alimentaires, potentiellement liées au statut de l'individu, à son rang ou sa fonction dans la société ou encore à des choix culturels

---

<sup>4</sup> Les isotopes sont les différentes formes d'un même élément chimique. Par exemple le carbone a trois isotopes : <sup>12</sup>C, <sup>13</sup>C et <sup>14</sup>C. Les deux premiers sont stables et le dernier est radioactif. Ils ont un nombre de neutrons différents et donc des masses et des propriétés différentes, ce qui implique qu'ils réagissent différemment lors des réactions chimiques : c'est le fractionnement isotopique. Les ratios isotopiques correspondent au rapport entre deux isotopes (l'isotope lourd sur l'isotope léger relativement à un standard international) qui est mesuré et varie en fonction des organismes. Par exemple pour le carbone, on note :  $\delta^{13}\text{C} (\%) = [(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \text{ échantillon} - \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \text{ standard}) / \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \text{ standard}] \times 1000$  (AMBROSE, 1993).

ou personnels. L'étude du collagène, qui est une protéine, renseigne principalement sur la part protéique de l'alimentation. Par ailleurs, l'os se renouvelle tout au long de la vie d'un individu et la signature isotopique de l'alimentation qu'il enregistre se renouvelle avec lui. Ainsi, la composition isotopique des os reflète la moyenne de l'alimentation globale d'un individu au cours des dernières années de sa vie (LIBBY *et alii*, 1964) et la durée de l'enregistrement dépend du taux de renouvellement osseux, variable avec l'âge, la condition physique et le type d'os considéré (VALENTIN, 2003).

Dans le but d'évaluer les stratégies de subsistance des humains retrouvés à Beaumont et de les replacer dans le spectre alimentaire régional de cette période, des analyses isotopiques du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) et de l'azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ) ont été réalisées sur le collagène osseux de 13 échantillons humains et de 38 animaux. L'objectif était de répondre aux questions suivantes : le contexte particulier des dépôts humains de Beaumont est-il reflété par l'alimentation à travers les analyses isotopiques ? Existe-t-il une différence avec les sujets inhumés dans des sépultures isolées ou en nécropole ? Y a-t-il un lien entre l'alimentation et la fonction du site ? Les éventuelles différences isotopiques mises en évidence entre les secteurs sont-elles liées à des fonctions particulières ? Peuvent-elles permettre d'individualiser des nouveaux sujets et ainsi d'augmenter le NMI ? Dans un deuxième temps et pour répondre à des questions plus générales à l'échelle de la région, la mesure des isotopes du soufre ( $\delta^{34}\text{S}$ ) a été réalisée sur 13 échantillons animaux. Les os humains de Beaumont n'ont pas encore fait l'objet d'analyses du soufre.

#### 4.7.2 Sélection des échantillons et analyses

Pour répondre à ces questions, les échantillons humains (notés de H1 à H13) ont été sélectionnés en collaboration avec Jean-Gabriel Pariat, qui a mené l'étude anthropologique des ossements, de manière à représenter un maximum de sujets ou d'ensembles osseux pouvant appartenir à des individus différents (fig. 156). Les sujets 1, 2, 3, 4 et 7 identifiés précédemment ont été sélectionnés (échantillons H1, H3, H10, H11 et H13 ; les sujets 5 et 6 ayant été perdus). Les échantillons H2, H4 et H5 représentés par un fémur, un tibia et une vertèbre ayant été retrouvés dans la même zone du fossé B (carrés N10, N11 et P11) ont été sélectionnés pour tenter de savoir si on pouvait les différencier de sujets déjà identifiés, sur la base des résultats isotopiques. Les échantillons H6 à H9 et H12 ont, eux, été sélectionnés parce qu'ils proviennent de secteurs différents des autres. Le but est de savoir s'il existe des variations isotopiques entre les secteurs et éventuellement, ici encore, d'individualiser de nouveaux sujets sur la base des résultats isotopiques.

Les restes animaux ont été sélectionnés de manière à n'échantillonner que des individus bien différenciés par espèce et par secteur, c'est-à-dire de sorte à n'échantillonner qu'une seule fois le même individu (en supposant qu'un même individu ne puisse être retrouvé dans deux secteurs séparés). Pour ce faire, un NMI a été déterminé sur la base de l'espèce, du secteur, de l'âge et du

code labo	ID	secteur	espèce	sujet (tabl. 19)	AGE	datation (cal BC)	ID datation (tabl. 18)	os	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	rendement d'extraction (mg/g)	%C	%N	%S	C/N	C/S	N/S
H1	P11.9.357	secteur B - fosse B	humain	sujet 3	9-10 ans			fémur G	-21.1	10.0		32.5	41.7	14.5		3.3		
H2	N11.299	secteur B - fosse B	humain		adulte			fémur D	-20.7	11.1		34.4	41.1	14.7		3.3		
H3	P11.6.355	secteur B - fosse B	humain	sujet 4	adulte jeune	4460-4338	éch 1	fémur G				32.0	43.6	13.5		3.8		
H4	N10.9.298	secteur B - fosse B	humain		adulte ?			tibia D	-20.4	10.6		15.4	39.1	14.2		3.2		
H5	P11.10.357	secteur B - fosse B	humain		adulte			VT	-21.0	11.7		48.2	42.0	14.6		3.3		
H6	C1.5.CXXIX	secteur B - fosse A	humain		adulte ?			côte D	-20.7	10.8		26.3	39.6	14.1		3.3		
H7	F4.8.CIX	secteur B	humain		ado			côte D				42.4	53.2	11.2		5.5		
H8		couche 5 Ederlé	humain		adulte	4503-4351	éch 2	BCF	-21.0	12.0		35.4	40.0	14.6		3.2		
H9		secteur A - Toussac	humain					côte	-20.3	11.6		73.9	41.2	14.8		3.2		
H10		secteur A - foyer 2	humain	sujet 7		4346-4177	éch 3	BCF	-20.7	11.2		15.2	37.1	12.9		3.3		
H11		secteur A - s13 78 A II	humain	sujet 1	adulte	4682-4457	éch 5	côte	-20.6	10.5		26.3	36.1	13.1		3.2		
H12		?	humain		adulte			humérus D	-20.8	10.0		23.0	41.1	14.8		3.2		
H13		?	humain	sujet 2	adulte	4521-4356	éch 7	MT4 G	-20.5	10.6		26.1	31.4	11.5		3.2		
F1	I4.2.CCXXX	secteur B - fosse B	suidé					humérus G	-20.0	8.3		29.5	37.0	13.3		3.2		
F2	C3.4.IX	secteur B - fosse A	boviné					talus G	-22.2	6.7	-4.2	66.0	40.6	14.6	0.2	3.2	651.0	201.2
F3	B3.4.XV	secteur B - fosse A	suidé		adulte	0		humérus G	-19.6	8.2	10.2	25.7	40.3	14.3	0.2	3.3	589.0	179.5
F4	H6.2.CCXIX	secteur B - fosse B	suidé		tout jeune			humérus D	-20.0	8.8		32.0	40.4	14.0		3.4		
F5	I7.4.CCXXXIII	secteur B - fosse B	suidé					humérus D	-20.5	11.0	-10.0	32.7	41.6	15.0	0.2	3.2	619.8	191.2
F6	C2.21	secteur B - fosse A	capriné		< 50-55 mois			tibia D	-22.0	7.2	-4.5	35.5	38.4	13.9	0.1	3.2	713.9	221.7
F7	M8.298	secteur B - fosse B	suidé		adulte			humérus G	-20.0	9.0		19.8	41.2	14.7		3.3		
F8	C6.4.XXXVIII	secteur B - fosse A	boviné					talus D	-21.1	5.8		24.5	33.0	11.5		3.3		
F9	F4.30.XL	secteur B - fosse B	boviné					talus G	-22.0	5.9		41.0	41.7	15.1		3.2		
F10	A2.5	secteur B - fosse A	capriné		adulte			ulna G	-22.3	6.0		39.5	40.0	14.5		3.2		
F11	G4.4.XXXIV	secteur B - fosse B	cervidé					talus G	-22.6	4.8	10.4	45.1	38.9	14.1	0.2	3.2	645.3	200.8
F12	F4.4.CLV	secteur B - fosse B	boviné					talus D	-20.7	5.6	4.1	46.6	40.9	14.8	0.2	3.2	627.0	194.9
F13	M5.CCLXXXVII	secteur B - fosse B	suidé					humérus G	-20.8	7.3	11.1	30.1	39.6	14.4	0.2	3.2	535.0	166.2
F14	D4.9.X2	secteur B - fosse A	cervidé					talus D	-21.4	5.3		14.2	34.5	12.5		3.2		
F15	G6.2.CLXXXIII	secteur B - fosse B	capriné		adulte			ulna G	-21.7	6.4		29.2	38.5	13.6		3.3		
F16	F4.2.LXXXV	secteur B - fosse B	capriné					crâne	-22.3	5.0	1.1	42.1	42.1	15.2	0.2	3.2	642.5	199.0
F17	M10.1.CLIX	couche IV	boviné					MTC G	-22.4	6.4		17.5	38.8	13.9		3.2		
F18		couche IV	capriné		adulte jeune			mandibule I	-21.8	5.5		29.1	34.5	12.0		3.3		
F19	O9.4.373	couche IV	capriné		12-40 mois			humérus G	-21.3	6.4		50.0	42.0	15.2		3.2		
F20	DNW	couche IV	suidé					tibia G	-21.0	7.3		69.3	42.4	15.4		3.2		

Fig. 156 : Synthèse des données archéologiques, biologiques, isotopiques et élémentaires (C, N, S) des échantillons humains et animaux de Beaumont. Dans le cas de H11 et H13, les échantillons analysés n'ont pas été datés directement mais les datations ont porté sur un os du même ensemble anatomique.

code labo	ID	secteur	espèce	sujet (tabl. 19)	AGE	datation (cal BC)	ID datation (tabl. 18)	os	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	rendement d'extraction (mg/g)	%C	%N	%S	C/N	C/S	N/S
F21		couche 5 Ederlé	boviné		< 24-30 mois			MTT D	-23.0	5.5		60.6	42.2	15.3		3.2		
F22		couche 5 Ederlé	boviné		adulte			MTT G	-22.7	5.3		25.2	40.4	14.5		3.2		
F23		couche 5 Ederlé	boviné		adulte			MTT D	-23.7	4.5		18.2	38.1	13.6		3.3		
F24		couche 5 Ederlé	boviné					mandibule I	-21.9	7.1	0.5	57.5	41.6	15.0	0.2	3.2	649.1	200.7
F25		couche 5 Ederlé	cervidé					radius D	-21.6	6.5		15.0	39.1	14.0		3.2		
F26		couche 5 Ederlé	capriné		adulte			mandibule	-21.4	5.6		30.5	39.0	14.1		3.2		
F27		couche 5 Ederlé	capriné		jeune adulte			mandibule	-22.1	5.9	6.0	68.3	42.4	15.1	0.2	3.2	665.2	203.8
F29		couche 5 Ederlé	suidé		adulte			MTT III G	-20.5	8.6	9.4	32.8	41.4	14.8	0.2	3.2	614.6	188.5
F30		couche 5 Ederlé	suidé		adulte			humérus D	-20.9	8.0		77.9	43.1	15.3		3.3		
F31		habitat circulaire	boviné		adulte			talus	-22.3	6.4		39.2	40.4	14.5		3.2		
F32		habitat circulaire	capriné		<1 an			mandibule	-21.9	6.0		39.6	38.4	14.0		3.2		
F33		habitat circulaire	suidé		jeune adulte			radius	-19.7	5.3	15.1	36.2	41.4	14.9	0.2	3.2	609.1	187.7
F34		habitat circulaire	suidé					tibia	-19.4	6.5	12.4	25.3	40.2	14.5	0.2	3.2	540.9	166.7
F38	C3.22.XVI	secteur B - fosse A	boviné		< 1an non sevré			mandibule				8.5						
F41	E3.3.XLVIII	secteur B - fosse A	suidé		adulte			maxillaire D	-21.7	8.1		59.6	43.3	15.3		3.3		
F42	A'02.1.CXXXVII	secteur B - fosse A	suidé		adulte			mandibule C	-21.4	8.7		17.5	41.3	14.5		3.3		
F44	B3.7.XX	secteur B - fosse A	suidé		juvénile			maxillaire D	-20.6	6.9		36.3	41.2	14.5		3.3		
F46		couche 5 Ederlé	capriné					?	-22.2	6.2		32.2	39.4	13.7		3.3		

(suite)

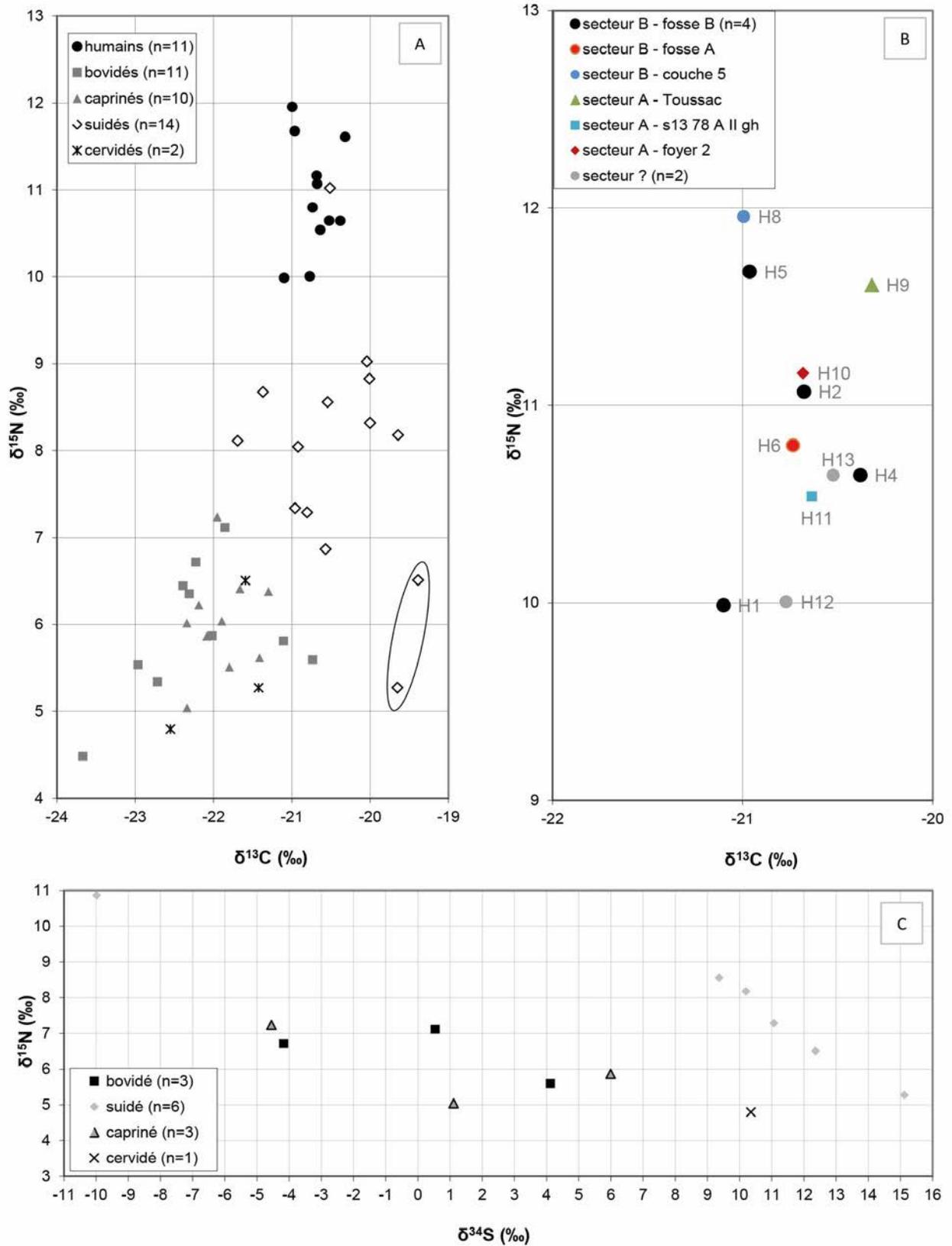
format, sur la base du travail de Ludivine Paleau (ce volume) et avec l'aide de Jean-Baptiste Mallye (UMR 5199-PACEA) et Pierre Magniez (UMR 7269-LAMPEA) pour la détermination des restes non marqués. Ainsi, les analyses ont porté sur 9 suidés, 5 bovidés, 4 caprinés et 2 cerfs dans les fosses du secteur B ; 1 suidé, 1 bovidé et 2 caprinés dans la couche IV ; 2 suidés, 1 bovidé et 1 capriné dans l'habitat circulaire ; et 2 suidés, 4 bovidés, 3 caprinés et 1 cerf dans la couche 5 prospectée par Ederlé.

Le collagène a été extrait selon la méthode Longin (LONGIN, 1971) réadaptée par Bocherens (BOCHERENS, 1992) au laboratoire LAMPEA - UMR 7269. Les teneurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ) et élémentaires (%C, %N, %S) ont été mesurées simultanément avec un spectromètre de masse isotopique couplé à un analyseur élémentaire Europa Scientific EA-IRMS par le laboratoire IsoAnalytical (UK) et le département d'archéologie de l'Université de Cap Town (Afrique du Sud). La précision analytique est inférieure à 0,1 ‰ pour  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  et inférieure à 0,2 ‰ pour  $\delta^{34}\text{S}$ . Pour contrôler la qualité du collagène extrait, les critères internationaux ont été utilisés : rendement d'extraction  $> 10\text{mg.g}^{-1}$ , %C  $> 30$ , %N  $> 11$ , rapport C/N entre 2.9 et 3.6 (DENIRO, 1985 ; AMBROSE, 1990), %S entre 0.15 et 0.35, rapport C/S =  $600 \pm 300$  et rapport N/S =  $200 \pm 100$  (NEHLICH, RICHARDS, 2009). Considérant les faibles effectifs par catégorie, aucune analyse statistique n'a été réalisée.

### 4.7.3. Résultats et discussion

Sur l'ensemble des analyses, seulement deux échantillons humains (H3 et H7) et un échantillon animal (F38) ne respectent pas les critères de conservation du collagène et ont été exclus de l'étude (fig. 156). Tous les autres possèdent un collagène bien conservé qui présente les teneurs isotopiques enregistrées du vivant des individus et reflètent bien leur alimentation. Pour  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ , trois pools de valeurs se distinguent (fig. 157) : les humains ont des valeurs moyennes de  $-20,7 \pm 0,3$  ‰ pour  $\delta^{13}\text{C}$  et  $10,9 \pm 0,7$  ‰ pour  $\delta^{15}\text{N}$  ; les suidés ont un  $\delta^{13}\text{C}$  moyen de  $-20,4 \pm 0,7$  ‰ et un  $\delta^{15}\text{N}$  moyen de  $8 \pm 1,3$  ‰ ; les herbivores (bovidés, caprinés et cervidés) ont un  $\delta^{13}\text{C}$  moyen de  $-22 \pm 0,6$  ‰ et un  $\delta^{15}\text{N}$  moyen de  $5,9 \pm 0,7$  ‰. Ces valeurs rentrent dans la variabilité connue dans la région ( $\delta^{13}\text{C} \approx -20,7$  ‰ et  $\delta^{15}\text{N} \approx 11,3$  ‰ pour les humains,  $\delta^{13}\text{C} \approx -20,2$  ‰ et  $\delta^{15}\text{N} \approx -8$  ‰ pour les cochons, et  $\delta^{13}\text{C} \approx -22$  ‰ et  $\delta^{15}\text{N} \approx 6,3$  ‰ pour les herbivores, d'après les données de 7 sites de la vallée de l'Yonne ; REY *et al.*, 2016). Pour le  $\delta^{34}\text{S}$ , les herbivores et les suidés présentent également des valeurs distinctes. Le  $\delta^{34}\text{S}$  moyen des herbivores est de  $0,5 \pm 4,3$  ‰ alors que le  $\delta^{34}\text{S}$  moyen des suidés est de  $8 \pm 9,1$  ‰.

La comparaison des valeurs isotopiques entre les secteurs du site, pour chaque espèce a mis en évidence une seule distinction : les suidés provenant de l'habitat circulaire présentent des valeurs différentes des suidés des autres secteurs (fig. 157). Ces cochons ont pu être parqués dans un environnement différent (plus ouvert, au regard des valeurs en carbone moins négatives ?) ou avoir été nourris autrement (plus de légumineuses, au regard des valeurs en azote plus basses ?). Aucun échantillon humain n'ayant été découvert dans cette zone, il n'est pas possible de savoir si cette gestion



**Fig. 157 : Dispersion des valeurs isotopiques (A) de la totalité des échantillons humains et animaux de Beaumont ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ), (B) des humains seulement ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) et (C) des animaux seulement ( $\delta^{34}\text{S}$ ). Le cercle (A et C) montre la distinction des suidés provenant de l'habitat circulaire par rapport aux autres secteurs.**

porcine spécifique était accompagnée d'une différence de régime alimentaire chez les humains. Aucune autre différence n'a été relevée entre les secteurs, ni pour les animaux, ni pour les humains (considérant le faible effectif de ces derniers par zone). Si les différents secteurs avaient des fonctions particulières et s'organisaient séparément, ces différences ne sont pas révélées à travers l'alimentation des humains ou la gestion du cheptel, hormis peut-être pour l'habitat circulaire. Tout au moins, les résultats isotopiques ne témoignent pas de régimes alimentaires différents entre les secteurs du site. Par conséquent, les résultats seront par la suite traités tous secteurs confondus.

Pour les humains, les résultats sont globalement homogènes. La dispersion totale est de 2 ‰ pour l'azote et 0,8 ‰ pour le carbone. Ce résultat indique une alimentation similaire pour tous les échantillons humains analysés. Quelques variations peuvent toutefois être discutées. Les échantillons H5 et H8 présentent les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  les plus élevées et un  $\delta^{13}\text{C}$  similaire. L'ensemble anatomique duquel fait partie l'échantillon H5, issu de la fosse B (secteur B) pourrait appartenir au même individu, adulte, que l'ensemble anatomique duquel fait partie l'échantillon H8, issu de la couche 5 prospectée par R. Ederlé et correspondant peut-être au fond de la fosse A (même secteur). La proximité des résultats isotopiques n'exclut toutefois absolument pas la possibilité que ces deux ossements appartiennent à des sujets distincts. L'échantillon H1, correspondant au fémur d'enfant retrouvé dans la fosse B, présente les valeurs les plus basses en carbone et en azote. Son alimentation a pu être légèrement différente de celle des adultes (moins riche en protéines animales par exemple). L'échantillon H12 (localisation inconnue) montre des valeurs similaires à ce dernier (H1) mais correspond, lui, à un humérus adulte et ne peut donc pas appartenir au même sujet. Son alimentation devait être similaire à celle de l'enfant. D'un point de vue social, aucune conclusion ne peut être tirée de ce seul constat. L'échantillon H9 du lieu-dit Toussac présente des valeurs (C et N) relativement distinctes du pool restant des échantillons H2, H4, H6, H10, H11 et H13. Il pourrait provenir d'un nouvel individu, mais la différence isotopique par rapport aux autres échantillons reste faible et peut résulter de la variabilité individuelle. En effet, il est possible que les valeurs isotopiques varient légèrement entre deux analyses du même individu (parfois jusqu'à 1‰ pour l'azote et presque autant pour le carbone). Ces variations sont inhérentes à la conservation du collagène (la composition en acides aminés peut varier selon les parties échantillonnées ; ZAZZO, 2014) et à son taux de remodelage (VALENTIN, 2003). Enfin, le pool d'échantillons précédemment cité (H2, H4, H6, H10, H11 et H13) constitue un ensemble très homogène et ne consent aucune distinction individuelle sur la base des valeurs isotopiques.

D'après les données archéozoologiques, l'alimentation carnée des humains semble majoritairement tournée vers le bœuf, puis vers le porc. Les caprinés et les espèces sauvages (cerf et sanglier) sont moins consommés. Ces dernières ont dû revêtir plutôt un rôle symbolique et, parfois, entrer dans l'alimentation en complément des autres ressources issues de l'élevage. Le poisson a pu également être consommé de manière occasionnelle, comme en témoignent les quelques restes trouvés sur le site

et la proximité du cours d'eau. La comparaison isotopique des humains avec les animaux montre que si la consommation de bœuf a été majoritaire, d'autres ressources enrichies en azote lourd ont dû entrer dans la composition des repas de manière significative. En effet, la différence entre les humains et les bovidés ( $\Delta^{15}\text{N} = 5 \text{ ‰}$  et  $\Delta^{13}\text{C} = 1,5 \text{ ‰}$ ) est supérieure à celle attendue entre deux niveaux trophiques (en théorie 4 ‰ et 0,5 ‰ en moyenne pour l'azote et le carbone ; BOCHERENS, DRUCKER, 2003). Le porc présente des valeurs en azote et en carbone plus élevées que le bœuf, et la différence avec les humains est de 2,9 ‰ et -0,3 ‰ pour l'azote et le carbone respectivement. Les cochons domestiques ont donc pu constituer une part importante du régime des humains. Par ailleurs, les jeunes bêtes tuées dans le cadre d'une exploitation laitière (pour le bœuf) ou simplement pour la recherche de viande tendre (bœuf et porc) peuvent présenter des valeurs isotopiques en azote plus élevées que les adultes, du fait du signal de l'allaitement enregistré dans les tissus (BALASSE *et alii*, 1997)<sup>5</sup>. La consommation substantielle de jeunes animaux à peine sevrés pourrait expliquer de fortes valeurs en azote chez les humains.

Une autre ressource enrichie en azote lourd, et donc présentant des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  plus élevées que les animaux domestiques, est le poisson. Les chaînes alimentaires aquatiques étant plus longues, le poisson occupe généralement une position trophique plus élevée que les animaux terrestres. Aucun reste de poisson n'a pu être échantillonné sur le site, ni localement, pour étayer cette hypothèse, mais sa consommation reste une possibilité. D'autres vestiges de poisson ont été mis au jour dans le nord de la France au Néolithique (CLAVEL, ARBOGAST, 2007) et la pêche est attestée dans la région depuis le Mésolithique (DRUCKER *et alii*, 2016). Ainsi, et considérant la part végétale *a priori* insécable du régime alimentaire des humains au Néolithique, ces derniers ont dû consommer soit une très grande quantité de protéines de porc en plus du bœuf (y compris de jeunes animaux), probablement dans une plus grande mesure que ce qu'indiquent les résultats de l'archéozoologie, soit une quantité non négligeable de poisson en complément du bœuf, majoritaire, puis du porc. Les résultats isotopiques sont en accord avec la part secondaire des caprinés et des cervidés dans le régime alimentaire.

À Beaumont, le dépôt des restes humains parmi les autres vestiges dans les fossés d'enceinte interroge sur la place de ces individus dans la société. Pourquoi n'ont-ils pas de sépulture ? Pourquoi ont-ils été mis à l'écart des nécropoles contemporaines voisines ? La comparaison des résultats de cette étude avec plusieurs sites voisins et contemporains montre un régime alimentaire similaire quel que soit le contexte d'inhumation ou de dépôt, la culture ou la fonction du site (REY *et alii*, 2016). L'ensemble des valeurs isotopiques des humains de la vallée de l'Yonne est homogène et révèle une alimentation plutôt riche en protéines animales, principalement basée sur l'élevage du bœuf et du porc, avec un

<sup>5</sup> Le lait et la viande étant constitués de protéines animales de même niveau trophique, la différence est invisible par les mesures isotopiques. De plus, un petit qui consomme le lait de sa mère peut occuper le même niveau qu'un consommateur de viande du même animal, c'est-à-dire un niveau trophique supérieur à celui de sa mère. Dans cette étude, le tout jeune suidé F4 présente des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  parmi les plus élevées du groupe, témoignant certainement d'un allaitement récent.

complément possible issu des ressources de la pêche. Le site de Gurgy « les Noisats » présente des valeurs isotopiques encore plus élevées pour l'azote, témoignant d'une exploitation peut-être plus orientée vers la viande de porc ou le poisson, ou encore relevant d'une gestion d'élevage légèrement différente de celle de Beaumont. En effet, les cochons des deux sites présentent des valeurs isotopiques distinctes en carbone et en soufre, pouvant caractériser un affouragement spécifique ou un environnement différent pour l'élevage porcin (les cochons de Gurgy ont un  $\delta^{13}\text{C}$  moyen de  $-19,7 \pm 0,7 \text{ ‰}$  et un  $\delta^{34}\text{S}$  moyen de  $4,3 \pm 1 \text{ ‰}$ ). Les autres animaux, sauvages et domestiques, ont des valeurs isotopiques (CNS) similaires. Ainsi, l'unique différence révélée par l'analyse isotopique entre le site de Beaumont et les sites voisins concerne l'alimentation ou la gestion des suidés. Si les restes humains découverts à Beaumont ont appartenu à des sujets ayant une position sociale particulière par rapport aux individus inhumés dans les sites voisins, cette différence n'est pas visible dans l'alimentation, ou en tout cas elle n'est pas reflétée par les ratios isotopiques mesurés dans leur squelette.

### **Bibliographie**

- AMBROSE S.H. (1990) – Preparation and characterization of bone and tooth collagen for isotopic analysis, *Journal of Archaeological Science*, 17, 4, p. 431-451.
- AMBROSE S.H. (1993) – Isotopic analysis of paleodiets: methodological and interpretive considerations, in M. Standford dir., *Investigations of ancient human tissue*, Langhorne, Éd. Gordon and Breach Science Publishers, p. 59-130.
- BALASSE M., BOCHERENS H., TRESSET A., MARIOTTI A., VIGNE J.-D. (1997) – Émergence de la production laitière au Néolithique ? Contribution de l'analyse isotopique d'ossements de bovins archéologiques, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Séries 2, Sciences de la terre et des planètes*, 325, 12, p. 1005-1010.
- BOCHERENS H. (1992) – *Biogéochimie isotopique ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) et paléontologie des vertébrés : application à l'étude des réseaux trophiques révolus et des paléoenvironnements*, Thèse de Doctorat, Université Paris VI, Paris, 317 p.
- BOCHERENS H., DRUCKER D. (2003) – Trophic level isotopic enrichment of carbon and nitrogen in bone collagen: case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems, *International Journal of Osteoarchaeology*, 13, p. 46-53.
- CHAMBON P., ROTTIER S., AUGEREAU A., BONNARDIN S., MEUNIER K., PARIAT J.-G. (2013) – Evolution, coexistence et confrontation de pratiques funéraires entre 4700 et 4000 av. J.-C. sur un microterritoire dans la vallée de l'Yonne, in J. Jaubert, N. Fourment et P. Depaepe dir., *Transitions, ruptures et continuité en Préhistoire, XXVIIe Congrès Préhistorique de France, Bordeaux - Les Eyzies 2010*, Paris, Éd. Société Préhistorique Française, p. 213-228.
- CLAVEL B., ARBOGAST R.-M. (2007) – Fish exploitation from early neolithic sites in northern France : The first data, in C. Dobiat et K. Leidorf dir., *The role of fish in ancient time. 13th Meeting of the International Council of the ICAZ Fish Remains Working Group*, Éd. Internationale Archäologie, p. 85-91.
- DENIRO M.J. (1985) – Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction, *Nature*, 317, p. 806-809.
- DRUCKER D.G., VALENTIN F., THEVENET C., MORDANT D., COTTIAUX R., DELSATE D., VAN NEER W. (2016) – Aquatic resources in human diet in the Late Mesolithic in Northern France and Luxembourg: insights from carbon, nitrogen and sulphur isotope ratios, *Archaeological and Anthropological Sciences*, p. 1-18.

- LIBBY W.F., BERGER R., MEAD J.F., ALEXANDER G.V., ROSS J.F. (1964) – Replacement rates for human tissue from atmospheric radiocarbon, *Science*, 146, 3648, p. 1170-1172.
- LONGIN R. (1971) – New method of collagen extraction for radiocarbon dating, *Nature*, 230, p. 241-242.
- NEHLICH O., RICHARDS M. (2009) – Establishing collagen quality criteria for sulphur isotope analysis of archaeological bone collagen, *Archaeological and Anthropological Sciences*, 1, 1, p. 59-75.
- REY L., TACAÏL T., LE LUYER M., SALAZAR-GARCÍA D.C., BALTER V., ROTTIER S., GOUDE G. 2016. *8th World Archaeological Congress* (Kyoto (Japan), 28 aug-2 sep 2016).
- VALENTIN J. (2003) – Bone remodelling, in J. Valentin dir., *Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. Ann. ICRP 32(3-4), Publication 89*, Pergamon, 3-4, Éd. Pergamon, p. 185-188.
- ZAZZO A. (2014) – Bone and enamel carbonate diagenesis: A radiocarbon prospective, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 416, p. 168-178.

### IV.2. Retour en bref sur les autres résultats

Si les valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca dans l'os sont douteuses et probablement altérées par la **diagénèse**, les valeurs dans l'**émail** montrent une nette **distinction** entre les **herbivores, les cochons et l'humain** H15 suivant le même schéma qu'à GLN (Figure C10. 22a). L'humain H14 présente des valeurs intermédiaires entre celles des cochons et des herbivores pouvant refléter un régime végétarien ou un signal d'allaitement éventuel (cf. Chap8.II.6.d ; la dent n'a pas pu être déterminée avec certitude comme étant une deuxième molaire et pourrait être, de façon moins probable, une première molaire). La courbe du profil obtenue par ablation laser est relativement plate pour H15 alors que celle du sujet H14 varie amplement (Figure C10. 22b), ce qui pourrait témoigner d'une alimentation (et d'une mobilité ?) variable au cours du temps, entre 2,5 et 8,5 ans (ou d'une période de sevrage par « à coups » s'il s'agit d'une M1 ?). Ces deux individus appartiennent aux secteurs A (H15) et B (H14). Le profil élémentaire atypique de H14 interpelle : cet individu vient-il d'un lieu extérieur à la microrégion ? A-t-il eu des pratiques alimentaires différentes avant ses 9 ans ? A-t-il été plus mobile que les autres sujets ? De nouvelles analyses de Sr isotopiques pourraient probablement répondre à ces questions.

La mesure de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  sur deux échantillons animaux (un capriné et un cervidé) a permis de replacer ceux-là dans la variabilité régionale et de confirmer le **niveau trophique de ces herbivores** (TP = 2).

L'analyse des **micro-usures dentaires** du sujet H14 indique des valeurs **similaires à la moyenne** des humains de la microrégion.

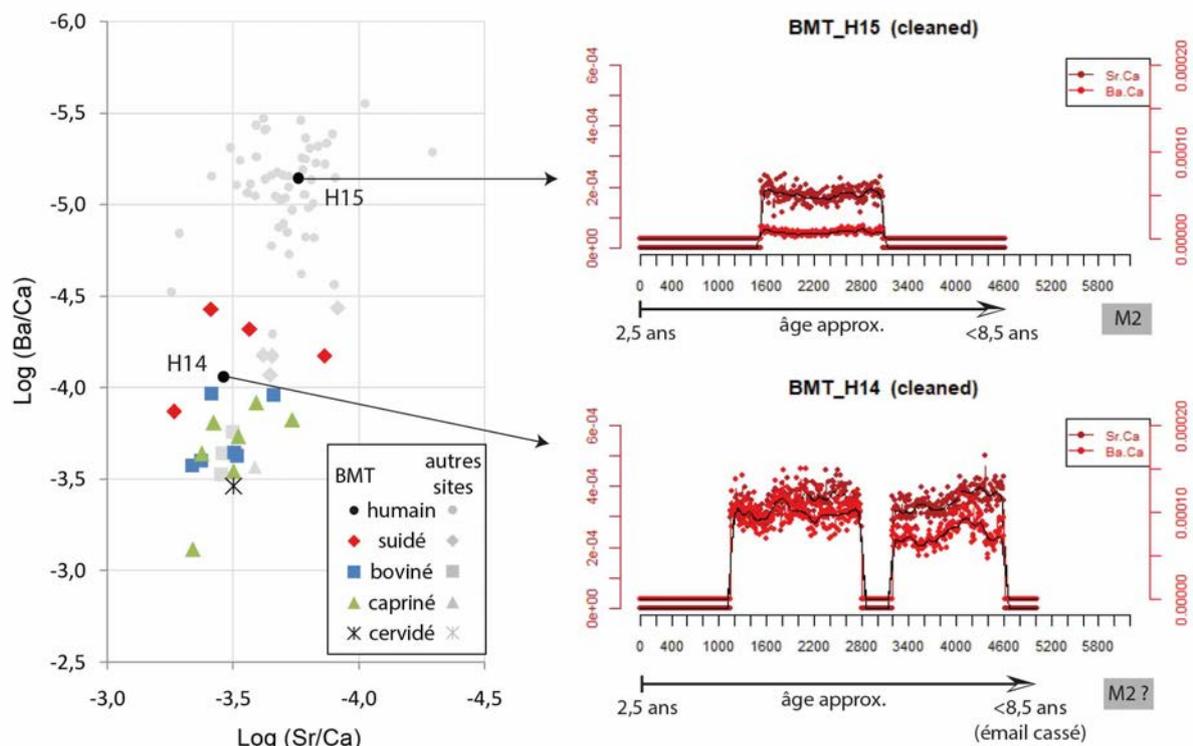


Figure C10. 22 : (a) Distribution des valeurs moyennes de Sr/Ca et Ba/Ca de l'émail dentaire des différentes espèces de Beaumont « Le Crot aux Moines » au regard de la variabilité des autres sites de la microrégion (en gris) et (b) courbes de variations des ratios Sr/Ca et Ba/Ca dans les profils de l'émail des humains.

### IV.3. Synthèse et perspectives

#### **Matériel analysé :**

- ✦ 15 humains et 46 animaux

#### **Principaux résultats mis en évidence :**

- ✦ Signature biochimique des différentes espèces dans la variabilité des autres sites, même schéma interspécifique que celui de GLN (entre bovidés / suidés / humains)
- ✦ Signature biochimique des cochons différente de GLN, pour  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  notamment
- ☞ Alimentation des humains riche en protéines animales (viande de bœuf puis porc + produits laitiers éventuels), gestion des cochons différente de celle de GLN
- ☞ Consommation de poisson/ressources aquatiques probablement pas substantielle mais ne peut être exclure en raison des difficultés méthodologiques rencontrées
- ✦ Signature isotopique des humains dans la variabilité de la microrégion pour  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ , similaire au groupe C de Monéteau et à CHI-Pat
- ✦ Pas de différence significative entre les secteurs
- ☞ Régimes alimentaires similaires entre les humains retrouvés épars dans les fossés d'enceinte de BMT et les humains inhumés dans les sépultures des nécropoles voisines.
- ✦ Sujet H15 (secteur A) dans la variabilité locale pour Sr/Ca et Ba/Ca dans l'émail (M2), courbe stable au cours du temps (entre 3 et 8 ans) ; sujet H14 (secteur B) de niveau trophique inférieur (Sr/Ca et Ba/Ca supérieurs) dans l'émail (M2 ?), courbe variable avant 9 ans (végétarien, modifications alimentaires/mobilité ?)

#### **Perspectives :**

- ✦ Analyses de poisson retrouvé parmi les dépôts
- ✦ Analyses de Sr isotopique pour identifier une origine différente des sujets des fossés d'enceintes relativement aux contextes sépulcraux

**V. Bonnard « Le Poirier » (Bon)**

---

**V.1. Article 7 (participation à la monographie)**

*Etude isotopique des restes humains de Bonnard « Le Poirier » : variabilité « populationnelle », individuelle et comparaisons régionales.*

Léonie Rey

Dans : **Chambon *et al.* (en préparation-a). *Les sépultures du Néolithique moyen de Bonnard "Le Poirier" (Yonne) : une révision des données***

## Etude isotopique des restes humains de Bonnard « Le Poirier » : variabilité « populationnelle », individuelle et comparaisons régionales

Léonie Rey

### Introduction

L'analyse des isotopes stables du carbone (C) et de l'azote (N) dans le collagène osseux se fait en routine depuis une vingtaine d'années dans les échantillons archéologiques pour reconstituer les régimes alimentaires des populations du passé (e.g. Bocherens et Mariotti, 2002 ; Lee-Thorp, 2008). Au-delà de l'étude des stratégies de subsistance que l'approche isotopique vient compléter par rapport à d'autres disciplines (archéozoologie, carpologie, étude des résidus piégés dans la céramique ou des outils de mouture, etc.), c'est l'analyse individuelle qui offre un avantage précieux permettant de comparer les sujets ou les groupes entre eux. Le croisement des résultats isotopiques avec les données bioarchéologiques (âge, sexe, type de tombe, etc.) et chrono-culturelles permet d'identifier des différences alimentaires en lien avec le statut social des individus ou l'identité socio-culturelle d'un groupe humain (e.g. Le Huray et Schutkowski, 2005 ; Waterman, Tykot et Silva, 2016 ; Fernández-Crespo et Schulting, 2017).

### Le principe de l'enregistrement isotopique

À la base de la chaîne alimentaire, les végétaux enregistrent des valeurs isotopiques<sup>6</sup> qui dépendent de leur espèce et de leur environnement, par le CO<sub>2</sub> atmosphérique pour le carbone et par les nitrates du sol ou le N<sub>2</sub> atmosphérique pour l'azote (Bocherens, 1999). Lors de la consommation des végétaux par les herbivores, puis par les carnivores et ainsi de suite, ces valeurs se répercutent le long de la chaîne alimentaire dans les tissus des consommateurs, avec un enrichissement en isotope lourd entre chaque maillon de la chaîne (ou niveau trophique). Cet enrichissement est spécifique à chaque élément. Le rapport isotopique mesuré dans les tissus des consommateurs correspond au rapport de l'isotope lourd sur l'isotope léger (<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C et <sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N) et se note δ<sup>13</sup>C et δ<sup>15</sup>N (en ‰). L'enrichissement en isotope lourd (dû à un fractionnement isotopique au cours des réactions chimiques) induit une augmentation de ces ratios, de 0 à 2‰ pour le δ<sup>13</sup>C et de 3 à 5‰ pour le δ<sup>15</sup>N (on considère généralement 1‰ et 4‰ en moyenne, respectivement) entre chaque maillon de la chaîne (Bocherens et Drucker, 2003). En mesurant ces ratios dans les restes humains (et notamment dans le collagène osseux) et en les comparant à ceux mesurés dans la faune locale et contemporaine, il est possible de replacer les individus au sein de leur chaîne alimentaire.

<sup>6</sup> Les isotopes sont les différentes formes d'un élément chimique. Par exemple, le carbone a 3 isotopes : <sup>12</sup>C, <sup>13</sup>C, <sup>14</sup>C. Si le dernier est radioactif (sa dégradation dans le temps permet de dater les spécimens archéologiques), les autres sont stables et restent inchangés au cours du temps. La composition isotopique d'un reste archéologique reflète celle enregistré par l'organisme de son vivant (si les conditions de conservation le permettent).

Le collagène, protéine majoritaire du corps et du squelette en particulier, est composé principalement de carbone, d'azote, d'oxygène et d'hydrogène (également de soufre dans une moindre mesure). Ces éléments y sont apportés essentiellement par les protéines de l'alimentation. Le dosage isotopique du collagène reflète donc la part protéique de l'alimentation. De plus, les os se renouvellent en permanence pour répondre aux contraintes biomécaniques, à une vitesse variable selon l'âge, l'activité physique et l'état de santé, et ils enregistrent de ce fait le signal isotopique moyen des dernières années de la vie des individus (de quelques années pour les plus jeunes à une vingtaine d'année pour les adultes ; Valentin, 2002).

### Contexte et problématique d'étude

L'analyse isotopique des restes humains de Bonnard se place dans un cadre d'étude plus large portant sur sept sites Néolithiques de ce micro-territoire de la vallée de l'Yonne, entre le Serein et la Baulche (Rey *et al.*, 2019). Le but est de comparer les sites entre eux par rapport à la faune locale (les analyses portant sur les humains et les animaux) pour identifier d'éventuelles différences entre les sites en lien avec leur fonction, leur période d'occupation, leur attribution culturelle ou autre, et d'inférer sur des questions plus générales de gestion du territoire et de relation entre les sites. Dans ce contexte, l'analyse isotopique de Bonnard sera donc considérée au regard de la diversité observée sur le micro-territoire, en comparaison avec les résultats obtenus dans les sites voisins. L'analyse s'effectue à deux échelles : celle de l'ensemble des individus de Bonnard par rapport à la faune locale et aux humains des autres sites et celle de la variabilité individuelle intra-site.

### **Matériel analysé et procédé analytique**

À Bonnard, 4 sujets humains ont été analysés : les individus 1, 2 et 4 de la sépulture 1 (le squelette de l'individu 3 n'ayant pas été retrouvé) et un des deux individus de la sépulture 2 de la « petite fosse près de la maison » (Tableau 1). Afin d'homogénéiser le signal, les prélèvements ont été effectués sur les diaphyses fémorales, sauf pour l'individu 4 pour lequel il restait un fragment de tibia des analyses de  $^{14}\text{C}$  précédemment réalisées.

Le collagène a été extrait au laboratoire LAMPEA - UMR 7269 d'après la méthode Longin (1971) réadaptée par Bocherens (1992). Les teneurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) et élémentaires (%C, %N) ont été mesurées au département d'archéologie de l'Université de Cap Town (Afrique du Sud) avec un spectromètre de masse isotopique couplé à un analyseur élémentaire Europa Scientific EA-IRMS. La précision analytique est inférieure à 0,1 %.

La faune servant de référentiel local provient des sites voisins de Gurgy « les Noisats » et « Le Nouzeau » et de Beaumont « Le Crot aux Moines » (Rey *et al.*, 2019).

code ISO	sépulture	individu	sexe	âge	classe d'âge	os	résultat	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	rendement collagène (%)	C (%)	N (%)	C/N
Bon_Poirier_1	sep 1	1	indet	adulte	>20	fémur G	mauvais	-25.7	10.7	5.5	62.5	8.8	8.2
Bon_Poirier_2	sep 1	2	indet	adulte	>20	fémur G	bon	-20.6	10.3	4.3	42.0	15.1	3.2
Bon_Poirier_4	sep 1	4	indet	adulte	>20	tibia (reste analyse $^{14}\text{C}$ )	bon	-20.8	10.1	2.4	38.0	13.6	3.3
Bon_PFPM	sep 2 "petite fosse près de la maison"	indet	indet	adulte ?		fémur G	bon	-20.7	10.1	3.1	40.6	14.5	3.2

**Tableau 1 : Données bioarchéologiques et résultats des analyses isotopiques et élémentaires du collagène osseux des sujets humains. Les cellules grisées correspondent aux valeurs non acceptables pour un collagène bien conservé (N<11% et C/N en dehors de la gamme 2,9-3,6).**

## Résultats et discussion

Tous les résultats sont présentés dans le tableau 1. Sur les quatre échantillons analysés, celui de l'individu 1 ne répond pas aux critères de contrôle de la bonne conservation du collagène et sera donc exclu de l'interprétation des résultats. En effet, pour être considéré comme étant bien conservé (non dégradé et non contaminé), le collagène doit avoir un rendement d'extraction supérieur à 1%, une teneur élémentaire en C supérieure à 30%, une teneur en azote supérieure à 11% et un rapport C/N compris entre 2,9 et 3,6 (DeNiro, 1985 ; Ambrose, 1990). Les 3 autres échantillons présentent des valeurs dans les gammes acceptables et sont retenus pour l'interprétation. Les résultats sont représentés sur la figure 1 par rapport à la faune locale et aux humains des sites voisins.

Globalement, les 3 individus présentent des valeurs isotopiques très similaires, avec un  $\delta^{13}\text{C}$  moyen de  $-20,7 \pm 0.1\text{‰}$  et un  $\delta^{15}\text{N}$  moyen de  $10,2 \pm 0.1\text{‰}$ . Ces valeurs se trouvent dans la gamme de variation basse de l'ensemble des sites et indiquent, en comparaison de la faune locale, une alimentation théorique basée **majoritairement sur les protéines d'herbivores domestiques** : bovins et ovicaprins, viande ou produits laitiers. En effet, ce type d'analyse ne permet pas de différencier ces deux ressources, étant de même niveau trophique, et la consommation de lait est attestée au Néolithique moyen dans la région (Balasse *et al.*, 2000). Ces résultats soutiennent les **données archéozoologiques** indiquant la place majoritaire de l'élevage du bœuf (Hachem, Bedault et Leduc, 2016). D'autre part, les produits de la **chasse** n'ont probablement pas fait partie de l'alimentation de ces humains de façon significative. Les résultats isotopiques corroborent les données archéozoologiques stipulant que la chasse détenait alors plutôt un rôle symbolique (Tresset, 1993 ; Sidéra, 2003). Par ailleurs, bien que la part des **plantes** – plus pauvres en protéines que la viande – soit souvent masquée par une alimentation riche en protéines animales, la consommation de ressources végétales a dû jouer un rôle non négligeable dans l'alimentation de ces premiers agriculteurs, comme en témoigne le mobilier retrouvé dans des sites voisins (Hamon, 2003 ; Hamon, Emery-Barbier et Messenger, 2011 ; Hamon *et al.*, 2019) et les études carpologiques (Martin *et al.*, 2016).

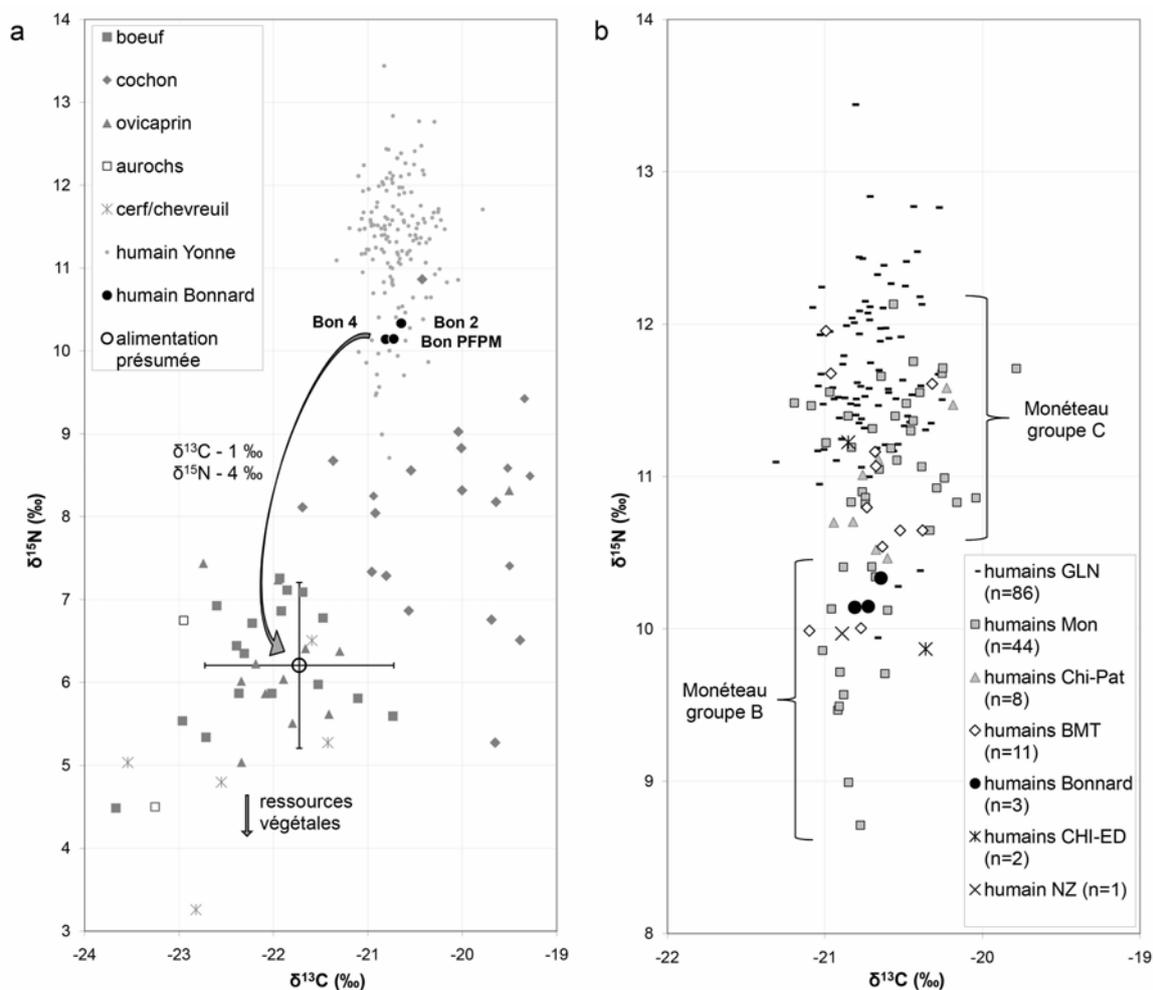


Figure 1 : (a) Distribution des valeurs isotopiques des humains de Bonnard par rapports à la variabilité locale des humains et des animaux (données issues de Rey et al. 2019) ; (b) Variabilité isotopique des humains entre les différents sites considérés dans cette étude. GLN = Gurgy "Les Noisats", Mon = Monéteau "Macherin", Chi-Pat = Chichery "Sur les Patureaux", BMT = Beaumont "Le Crôt aux Moines", CHI-ED = "Chichery "l'Étang David", NZ = Gurgy "Le Nouzeau" (Rey et al. 2019).

En complément, ces individus ont pu consommer du **porc**, comme cela a été proposé pour les autres sites. La consommation du porc est attestée au Néolithique moyen dans la région (Hachem, Bedault et Leduc, 2016) et, si les valeurs du porc sont supérieures à celles des herbivores, pour C et N, elles pourraient « compenser » la consommation de plantes ayant des valeurs inférieures, pour C et N également. Enfin, la possible consommation de **ressources d'eau douce** (poisson, mollusques, etc.) a également été proposée pour l'ensemble de ces humains, en supplément des ressources terrestres. La pêche occasionnelle est attestée au Néolithique dans le Bassin parisien (Clavel et Arbogast, 2007 ; Clavel, 2009). Le poisson présenterait théoriquement des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  supérieures à celles de la faune terrestre et pourrait venir en complément des ressources végétales et animales citées ci-avant, mais en l'absence de données isotopiques sur des restes aquatiques locaux, leur consommation ne peut être démontrée, encore moins leur part relative dans l'alimentation, bien qu'elle soit probablement négligeable à Bonnard.

La proportion relative de ces différentes ressources est difficile à mesurer précisément dans le cas présent, mais l'ensemble des humains de ces sites a certainement consommé des ressources similaires, produites localement. En témoignent la grande homogénéité des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  et la tendance relativement continue des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$ , variant de 8,7 à 13,4‰ pour l'ensemble du corpus considéré. Cela indique que les différences entre les humains relèvent plutôt d'un facteur de variation des valeurs isotopiques de l'azote que de la consommation différentielle de ressources dont les  $\delta^{13}\text{C}$  sont distincts (herbivores vs porc par exemple). De ce fait, les sujets de plus faible  $\delta^{15}\text{N}$ , comme à Bonnard, ont probablement consommé soit moins de protéines animales, soit des protéines végétales dont le  $\delta^{15}\text{N}$  est inférieur. Par exemple, ils ont pu consommer plus de légumineuses, présentant généralement un  $\delta^{15}\text{N}$  inférieur à celui des céréales (Virginia et Delwiche, 1982), ou des céréales moins fertilisées que dans les sites où le  $\delta^{15}\text{N}$  est plus élevé, car la fertilisation (l'apport de fumier animal) augmente les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  (Fraser *et al.*, 2011 ; Kanstrup *et al.*, 2012 ; Bogaard *et al.*, 2013).

#### Comparaisons chrono-culturelles

La distribution isotopique des différents sites est donnée dans la figure 1b. L'ensemble des humains présentant des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  homogènes, c'est la distribution des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  qui sera discutée ici. Il n'existe pas à proprement parler de groupes clairement distincts des autres : les gammes de valeurs des différents sites se recoupent. Toutefois, on observe des tendances, avec des valeurs plus élevées à Gurgy « Les Noisats » et Monéteau « Macherin », groupe C, que les caractéristiques archéologiques et chronoculturelles rapprochent (de grands ensembles funéraires ayant une composante culturelle locale rappelant différentes sphères culturelles alentour et datés approximativement de la même période ; Rey *et al.*, 2019 ; Augereau et Chambon, 2011 ; Rottier *et al.*, 2005 ; Rottier, 2007). D'autre part, les valeurs de Bonnard, plus basses, se rapprochent de celles des sites de Gurgy « Le Nouzeau », plus ancien et attribué au Cerny (Meunier, 2007), et à celles du groupe B de Monéteau, dont la composante chasséenne a été mise en évidence dans les pratiques funéraires et dont les datations radiocarbone recoupent celles de Bonnard (Augereau et Chambon, 2011). Un parallèle est donc à faire entre ces deux ensembles funéraires sur le plan isotopique, donc alimentaire, et culturel. Par ailleurs, le site chasséen de Beaumont « Le Crot aux Moines », qui contient des restes humains épars dans les fossés d'enceinte et qui est daté de la même période (Chambon *et al.*, 2013), bien que sensiblement antérieur, présentent des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  qui recoupent celles de Bonnard. En effet, les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  des inhumés de Bonnard se trouvent dans la variabilité basse de celles de Beaumont, indiquant une alimentation globalement basée sur les mêmes ressources. Il en est de même pour les valeurs de Chichery « L'Étang David » (datation contemporaines à légèrement antérieures à celles de Bonnard et composante culturelle autochtone ; *ibid.*) dont le  $\delta^{15}\text{N}$  moyen est similaire à celui de Bonnard.

Toutefois, les deux valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  de ce site (L'Étang David) diffèrent de plus d'1‰, alors que celles de Bonnard sont fortement similaires ( $\Delta^{15}\text{N} \approx 0,1\%$ ). Cette observation ne portant que sur très peu d'individus, elle ne peut être généralisée, mais la **très grande homogénéité** des valeurs de Bonnard, au regard de la variabilité générale et en comparaison à la variabilité rencontrée dans les autres sites, reflète probablement des comportements alimentaires très proches entre les 3 sujets. La proximité spatiale des individus 2 et 4 n'est pas à démontrer, compte tenu de leur place dans la même sépulture, et ce résultat renforce l'hypothèse d'un lien social fort. En outre, la proximité des valeurs isotopiques de l'individu PFFM avec ceux de la sépulture 1 suggère également un lien fort avec des pratiques alimentaires probablement partagées. Des rapprochements isotopiques ont également été mis en évidence dans le site de Gurgy « Les Noisats » entre des individus inhumés dans des tombes voisines, pouvant traduire la présence de noyaux « familiaux » (Rey *et al.*, 2019).

### Conclusion

En conclusion, les résultats isotopiques de Bonnard s'inscrivent parfaitement dans la variabilité locale des autres sites, avec des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  légèrement plus basses que la moyenne. Ces données indiquent une alimentation riche en protéines animales (bovins/ovicaprins majoritairement et porc) et de légères différences entre les sites possiblement dues à des gestions agricoles spécifiques (plus ou moins de céréales vs légumineuses consommées et cultures plus ou moins fertilisées ?). Une plus grande proximité isotopique est observée avec le site chasséen de Beaumont et le groupe B de Monéteau ayant également une composante chasséenne, mais aussi avec le site de Chichery « L'Étang David » et le site Cerny plus ancien de Gurgy « Le Nouzeau ».

### Remerciements

Cette étude a été financée par l'ANR dans le cadre du Projet DHP (S. Rottier, Univ. Bordeaux, Lascarbx [ANR-10-LABX-52], 2012–2014), par l'Institut Danone France/Fondation pour la Recherche Médicale 2015 dans le cadre du projet « Women and diet at the beginning of farming, 5th – 3rd millennium BC, France: a bio-anthropological approach » (Dir. G. Goude 2016-2017; <http://institutdanone.org/nos-prix/femmes-alimentation-les-premieres-societes-agropastorales-ve-iiiie-millennaires-av-j-c-france-approche-bio-anthropologique/>) et par le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (bourse doctorale).

## Bibliographie

- AMBROSE S.H. (1990) – Preparation and characterization of bone and tooth collagen for isotopic analysis, *Journal of Archaeological Science*, 17, 4, p. 431-451.
- AUGEREAU A., CHAMBON P. (2011) – *Les occupations néolithiques de Macherin à Monéteau (Yonne)*, Paris, Éd. Société Préhistorique Française, 422 p.
- BALASSE M., TRESSET A., BOCHERENS H., MARIOTTI A., VIGNE J.-D. (2000) – Un abattage "post-lactation" sur des bovins domestiques néolithiques. Etude isotopique des restes osseux du site de Bercy (Paris, France), *Anthropozoologica*, 31, 31, p. 39-48.
- BOCHERENS H. (1992) – *Biogéochimie isotopique ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) et paléontologie des vertébrés : application à l'étude des réseaux trophiques révolus et des paléoenvironnements*, PhD Thesis, Université Paris VI, Paris, 317 p.
- BOCHERENS H. (1999) – Isotopes stables et reconstitution du régime alimentaire des hominidés fossiles: une revue, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 11, 3-4, p. 261-287.
- BOCHERENS H., DRUCKER D. (2003) – Trophic level isotopic enrichment of carbon and nitrogen in bone collagen: case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems, *International Journal of Osteoarchaeology*, 13, p. 46-53.
- BOCHERENS H., MARIOTTI A. (2002) – Paléoenvironnements et paléoalimentation : biogéochimie isotopique des vertébrés, in J.L. Miskowsky dir., *Géologie de la Préhistoire, méthodes, techniques, applications*, Paris, Éd. Géopré - Presses Universitaires de Perpignan, p. 1323-1344.
- BOGAARD A., FRASER R., HEATON T.H.E., WALLACE M., VAIGLOVA P., CHARLES M., JONES G., EVERSLED R.P., STYRING A.K., ANDERSEN N.H., ARBOGAST R.-M., BARTOSIEWICZ L., GARDEISEN A., KANSTRUP M., MAIER U., MARINOVA E., NINOV L., SCHÄFER M., STEPHAN E. (2013) – Crop manuring and intensive land management by Europe's first farmers, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110, 31, p. 12589-12594.
- CHAMBON P., ROTTIER S., AUGEREAU A., BONNARDIN S., MEUNIER K., PARIAT J.-G. (2013) – Evolution, coexistence et confrontation de pratiques funéraires entre 4700 et 4000 av. J.-C. sur un microterritoire dans la vallée de l'Yonne, in J. Jaubert, N. Fourment et P. Depaepe dir., *Transitions, ruptures et continuité en Préhistoire, XXVIIe Congrès Préhistorique de France, Bordeaux - Les Eyzies 2010*, Paris, Éd. Société Préhistorique Française, p. 213-228.
- CLAVEL B. (2009) – Site de pêche néolithique au bord de l'Aisne, *Archéopages*, 26, p. 22-23.

CLAVEL B., ARBOGAST R.-M. (2007) – Fish exploitation from early neolithic sites in northern France : The first data, in C. Dobiat et K. Leidorf dir., *The role of fish in ancient time. 13th Meeting of the International Council of the ICAZ Fish Remains Working Group*, Éd. Internationale Archäologie, p. 85-91.

DENIRO M.J. (1985) – Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction, *Nature*, 317, p. 806-809.

FERNÁNDEZ-CRESPO T., SCHULTING R.J. (2017) – Living different lives: Early social differentiation identified through linking mortuary and isotopic variability in Late Neolithic/ Early Chalcolithic north-central Spain, *PLoS ONE*, 12, 9, p. e0177881.

FRASER R.A., BOGAARD A., HEATON T.H.E., CHARLES M., JONES G., CHRISTENSEN B.T., HALSTEAD P., MERBACH I., POULTON P.R., SPARKES D., STYRING A.K. (2011) – Manuring and stable nitrogen isotope ratios in cereals and pulses: towards a new archaeobotanical approach to the inference of land use and dietary practices, *Journal of Archaeological Science*, 38, p. 2790-2804.

HACHEM L., BEDAULT L., LEDUC C. (2016) – L'élevage et la chasse au Chasséen septentrional : renouvellement des connaissances d'après l'étude des enceintes de Villers-Carbonnel (Somme) et de Passel (Oise), in T. Perrin, P. Chambon, J.F. Gibaja et G. Goude dir., *Le Chasséen, des Chasséens : retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortailod, Lagozza*, Toulouse, Éd. Archives d'Écologie Préhistorique, p. 241-258.

HAMON C. (2003) – De l'utilisation des outils de mouture, broyage et polissage au Néolithique en Bassin parisien : apports de la tracéologie, *Bulletin de la Société préhistorique française*, 100, 1, p. 101-116.

HAMON C., EMERY-BARBIER A., MESSEGER E. (2011) – Quelle fonction pour les meules du Néolithique ancien de la moitié Nord de la France ? Apports et limites de l'analyse phytolithique, *Revue archéologique de Picardie*, p. 515-521.

HAMON C., SALAVERT A., DIETSCH-SELLAMI M.-F., MONCHABLON C. (2019) – Cultiver et consommer les plantes au Néolithique entre Seine et Meuse : technologie des meules et analyses carpologiques, in C. Montoya, J.-P. Fagnart et J.-L. Lochet dir., *Préhistoire de l'Europe du Nord-Ouest : mobilité, climats et identités culturelles. Actes du XXVIIIe Congrès préhistorique de France Amiens 30 mai-4 juin 2016*. Paris, Éd. Société Préhistorique française.

KANSTRUP M., THOMSEN I.K., MIKKELSEN P.H., CHRISTENSEN B.T. (2012) – Impact of charring on cereal grain characteristics : linking prehistoric manuring practice to  $\delta^{15}\text{N}$  signatures in archaeobotanical material, *Journal of Archaeological Science*, 39, 7, p. 2533-2540.

LE HURAY J.D., SCHUTKOWSKI H. (2005) – Diet and social status during the La Tène period in Bohemia: Carbon and nitrogen stable isotope analysis of bone collagen from Kutná Hora-Karlov and Radovesice, *Journal of Anthropological Archaeology*, 24, 2, p. 135-147.

LEE-THORP J.A. (2008) – On isotopes and old bones, *Archaeometry*, 50, 6, p. 925-950.

LONGIN R. (1971) – New method of collagen extraction for radiocarbon dating, *Nature*, 230, p. 241-242.

MARTIN L., BOUBY L., MARINVAL P., DIETSCH-SELLAMI M.-F., ROUSSELET O., CABANIS M., DURAND F., FIGUEIRAL I. (2016) – L'exploitation des ressources végétales durant le Chasséen: un bilan des données carpologiques en France entre 4400 et 3500 avant notre ère, in T. Perrin, P. Chambon, J.F. Gibaja et G. Goude dir., *Le Chasséen, des Chasséens... Retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortaillod, Lagozza*, Toulouse, Éd. Archives d'Ecologie Préhistorique, p. 259-272.

MEUNIER K. (2007) – *Gurgy "Le Nouzeau" (89 - Bourgogne)*, INRAP, Rapport Final d'Opération, inédit, 189 p.

REY L., SALAZAR-GARCÍA D.C., CHAMBON P.H., SANTOS F., ROTTIER S., GOUDE G. (2019) – A multi-isotope analysis of Neolithic human groups in the Yonne valley, Northern France: insights into dietary patterns and social structure, *Archaeological and Anthropological Sciences*, 11, 10, p. 5591–5616.

ROTTIER S. (2007) – L'architecture funéraire des sépultures du Néolithique moyen des Noisats à Gurgy (Yonne, France), in P. Moinat et P. Chambon dir., *Les cistes de Chamblandes et la place des coffres dans les pratiques funéraires du Néolithique moyen occidental*, Actes du colloque de Lausanne (12-13 mai 2006), Éd. Cahiers d'archéologie romande (110) et Société préhistorique française (Mémoire 43), p. 99-107.

ROTTIER S., MORDANT C., CHAMBON P., THEVENET C. (2005) – Découverte de plus d'une centaine de sépultures du Néolithique moyen à Gurgy, les Noisats (Yonne), *Bulletin de la Société préhistorique de France*, 102, 3, p. 641-645.

SIDÉRA I. (2003) – De l'usage des produits de la chasse pour différencier des hommes. Fonctions votive et sociale de la chasse au Néolithique ancien et moyen du Bassin parisien, in P. Chambon et J. Leclerc dir., *Les pratiques funéraires néolithiques avant 3500 av. J.-C. en France et dans les régions limitrophes, Table ronde de Saint-Germain-en-Laye (15-17 juin 2001)*, Paris, Éd. Société préhistorique française, p. 91-98.

TRESSET A. (1993) – Le rôle de la chasse dans la néolithisation de l'Europe tempérée : l'exemple de la vallée de la "Petite Seine", in F. Audouin-Rouzeau et J. Desse dir., *Exploitation des animaux*

*sauvages à travers le temps : Actes des XIIIe Rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, IVe colloque international de L'Homme et l'animal*, Juan-les-Pins, Éd. APDCA, p. 247-259.

VALENTIN J. (2002) – Bone remodelling, in J. Valentin dir., *Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values.*, Ann. ICRP, 3-4, Éd. Pergamon, p. 185-188.

VIRGINIA R., DELWICHE C.C. (1982) – Natural <sup>15</sup>N abundance of presumed N<sub>2</sub>-fixing and non-N<sub>2</sub>-fixing plants from selected ecosystems, *Oecologia*, 54, 3, p. 317-325.

WATERMAN A.J., TYKOT R.H., SILVA A.M. (2016) – Stable Isotope Analysis of Diet-based Social Differentiation at Late Prehistoric Collective Burials in South-Western Portugal, *Archaeometry*, 58, 1, p. 131-151.

## V.2. Synthèse et perspectives

### **Matériel analysé :**

- ✦ 5 humains (3 bons résultats sur os, 1 bon résultat sur dent)

### **Principaux résultats mis en évidences :**

- ✦ Signature isotopique ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  osseux) et élémentaire (Sr/Ca et Ba/Ca émail) dans la variabilité de la microrégion ; valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  plutôt basses
- ✦ Très grande homogénéité des valeurs des trois sujets
- ☞ Alimentation identique pour les trois sujets, apparemment moins carnée qu'à GLN et que le groupe C de Mon ; rapprochements avec la sépulture à étage de Mon (99-548, groupe A)
- ✦ Valeurs de texture des micro-usures dentaires sortant de la variabilité (complexité > 5) : taphonomie ?

### **Perspectives :**

- ✦ Analyses du Sr isotopique et comparaison avec la sépulture à étage de Mon (99-548)

**VI. Chichery « L'Étang David » (CHI-ED)**

---

**VI.1. Article 8 (participation à la monographie)**

*L'analyse isotopique des sujets P4 et P5.*

Léonie Rey

Dans : **Chambon *et al.* (en préparation-b).** *La nécropole de Chichery "L'Étang David" : une révision*

**L'analyse isotopique des sujets P4 et P5**

Léonie REY

L'analyse isotopique des restes osseux archéologiques permet de reconstruire les comportements de subsistance des humains, à l'échelle populationnelle et individuelle. En effet, le squelette enregistre la signature biochimique de son alimentation. Les sources alimentaires (viande, végétaux, poisson) ont des ratios isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) distincts qui se transmettent le long de la chaîne alimentaire et sont enregistrés dans les tissus des consommateurs, avec une augmentation entre chaque niveau trophique (entre proie et prédateur). De ce fait, il est possible de replacer chaque individu dans sa chaîne alimentaire (Ambrose, 1993 ; Bocherens et Mariotti, 2002). Un certain nombre de facteurs environnementaux et climatiques pouvant modifier les valeurs isotopiques, il est nécessaire de comparer ses valeurs avec celles de la faune locale et contemporaine, dans la mesure du possible. C'est la différence entre les valeurs des consommateurs et des ressources potentielles qui permet de déterminer la part consommée relative de ces différentes ressources.

La mesure des ratios isotopiques dans le collagène osseux, qui est une protéine, permet de reconstituer essentiellement la part protéique de l'alimentation. De plus, comme l'os est un tissu dynamique en perpétuel remaniement, il enregistre la signature moyenne des aliments consommés pendant les dernières années de la vie de l'individu. Le taux de remodelage osseux varie avec l'âge, l'activité physique, l'état de santé ou encore la partie du squelette considérée (Valentin, 2002), et la durée du signal enregistré varie avec lui (Balasse, Bocherens et Mariotti, 1999). Ainsi, les os des enfants en pleine croissance enregistrent un signal moyenné sur quelques années seulement, alors que ceux des adultes reflètent le signal moyen enregistré pendant une vingtaine d'année.

La comparaison des valeurs isotopiques des humains entre eux, au regard de la gamme de variation du référentiel local, permet d'observer la variabilité alimentaire au sein d'un groupe et entre des groupes, et de mettre en évidence des différences alimentaires qui, si elles sont corrélées à des paramètres biologiques (âge, sexe, état de santé), chrono-culturels et/ou archéologiques (type de tombe, mobilier associé, etc.) peuvent refléter des statuts sociaux particuliers. C'est dans ce but qu'ont été réalisées les analyses isotopiques des sujets de l'Étang David, afin de les comparer aux analyses menées dans les sites Néolithiques voisins de la vallée de l'Yonne (Rey *et al.*, 2019) et de tenter de mieux comprendre les relations existant entre ces sites, de nature et de fonctions variées et pouvant être attribués à différentes cultures. Ces analyses permettront de compléter l'image apportée par les différentes disciplines concernant la gestion économique et sociale du territoire. Cette étude s'inscrit dans un travail de recherche plus large incluant l'analyse biogéochimique multi-proxies des sites de ce micro-territoire (Rey, inédit), sites faisant en outre l'objet du PCR (Chambon *et al.*, 2013).

Échantillonnage et processus analytique

À l'Étang David, la grande majorité des squelettes n'ayant pas été retrouvés à la suite de fouilles anciennes, les analyses ont porté sur seulement 2 sujets des sépultures P4 et P5. La sépulture P6 contenant 2 enfants de moins de 5 ans, ils n'ont pas été échantillonnés pour éviter le signal possible de l'allaitement qui peut modifier les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  (Fogel, Tuross et Owsley, 1989 ; Herrscher, Goude et Metz, 2017). Il en est de même pour l'individu P7b, dont l'âge avait été estimé comme pouvant être inférieur à 3 ans, avant ré-estimation (désormais entre 5 et 9 ans). Pour l'individu P4 (enfant de 8,5 à 13,5 ans), le prélèvement a été effectué sur un fragment de diaphyse fémorale. L'individu P5 (9,5 – 18 ans ?) n'avait pas de squelette infra-crânien et c'est un fragment de maxillaire qui a été prélevé. Aucun reste animal n'ayant été retrouvé sur le site, les données utilisées pour le référentiel faunique local proviennent des sites voisins de Beaumont « Le Crot aux Moines » et de Gurgy « les Noisats » et « Le Nouzeau » (Rey *et al.*, 2019).

L'extraction du collagène a été réalisée au laboratoire LAMPEA - UMR 7269 selon la méthode Longin (1971) réadaptée par Bocherens (1992). La mesure des concentrations isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) et élémentaires (%C, %N) a été effectuée avec un spectromètre de masse isotopique couplé à un analyseur élémentaire Europa Scientific EA-IRMS au département d'archéologie de l'Université de Cap Town (Afrique du Sud). Les données ont été calibrées sur des standards internationaux et la précision analytique est inférieure à 0,1 ‰ (voir Rey *et al.*, 2019 pour plus de détails).

Résultats, croisement des données et interprétations

Avant tout, les critères de conservation du collagène communément admis (rendement d'extraction >1%, C>30%, N>11% et C/N entre 2,9 et 3,6 ; DeNiro, 1985 ; Ambrose, 1990) ont permis de contrôler que les résultats des deux échantillons reflètent bien les valeurs enregistrées in vivo. Les résultats sont donnés dans le tableau et les valeurs isotopiques sont représentées sur la figure par rapport à l'ensemble des données disponibles dans la région (Rey *et al.*, 2019). Les valeurs des sujets P4 et P5 sont dans la variabilité générale des humains de la vallée de l'Yonne, bien que le sujet P4 présente des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  relativement basses. En effet, les valeurs des deux sujets sont assez distinctes. Cette variabilité entre les deux individus (SD  $\delta^{13}\text{C}$  = 0,4‰ et SD  $\delta^{15}\text{N}$  = 0,9‰) est particulièrement importante au regard de la variabilité des autres sites comprenant un bien plus grand nombre d'individus (SD max  $\delta^{13}\text{C}$  = 0,3‰ et SD max  $\delta^{15}\text{N}$  = 0,8‰). Cela indique probablement des différences de comportement alimentaire.

code ISO	sépulture	datation $^{14}\text{C}$ cal BC	sexe	âge	os	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	rendement collagène	C (%)	N (%)	C/N
CHI-ED_4	P4	4681-4456	indet	8,5-13,5	fémur G	-20.4	9.9	3.1	39.9	14.4	3.2
CHI-ED_5	P5		indet	9,5-18 ?	maxillaire	-20.9	11.2	3.3	40.4	14.5	3.2

**Tableau : Données isotopiques et élémentaires des deux individus analysés**

Ces différences pourraient être liées à l'âge. La mandibule se renouvelle plus vite que l'os compact du fémur, et si l'individu P5 (+ de 9,5 ans) est plus âgé que l'individu P4 (- de 13,5 ans), la mandibule de P5 a pu enregistrer le signal de l'alimentation d'une période plus tardive que le fémur de P4 qui se renouvelle plus lentement. Des différences liées à l'âge ont été mises en évidence, notamment à Gurgy « Les Noisats » (Rey *et al.*, 2019 ; Rey *et al.*, inédit). Toutefois, le lien entre les processus physiologiques relatifs à la croissance squelettique et les rapports isotopiques sont mal connus, et ces différences peuvent exprimer aussi bien des besoins nutritionnels particuliers relatifs à la croissance que des choix socioculturels. Des analyses menées dans la dentine des sujets de Gurgy (reflétant le signal de l'alimentation enregistré pendant l'enfance) semblent indiquer des modifications alimentaires entre différentes classes d'âge. Des changements de statut social avec l'âge ont également été proposés d'après l'étude des pratiques funéraires, avec des transitions autour de 8-9 ans et de 14-15 ans (Le Roy, Rottier et Tillier, 2018). Néanmoins, la précision de l'estimation de l'âge de nos deux sujets P4 et P5 (de même que l'effectif minime) ne permet pas de conclure quant à ces possibilités.

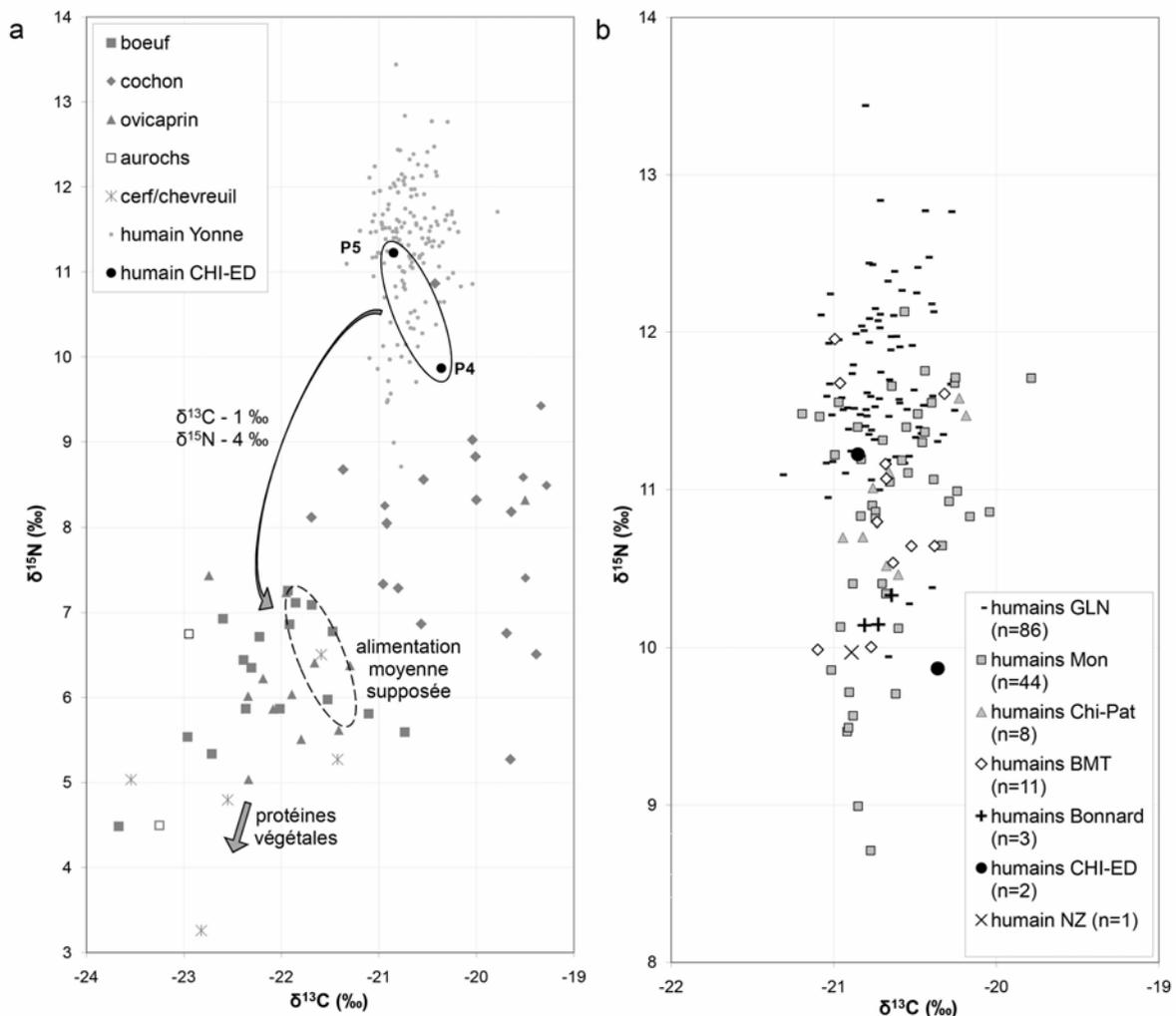


Figure : a. Représentation des valeurs isotopiques des humains de l'Étang David par rapports à la variabilité locale des humains et des animaux de la vallée de l'Yonne (données issues de Rey et al, 2019) ; b. Variabilité isotopique des humains entre les différents sites considérés dans cette étude. GLN = Gurgy "Les Noisats", Mon = Monéteau "Macherin", Chi-Pat = Chichery "Sur les Patureaux", BMT = Beaumont "Le Crot aux Moines", CHI-ED = "Chichery "l'Étang David", NZ = Gurgy "Le Nouzeau" (Rey et al, 2019).

Quoi qu'il en soit, les ratios isotopiques des deux individus se trouvant dans la variabilité globale de l'ensemble des humains de la région, les mêmes propositions peuvent être apportées quant à leur régime alimentaire (voir Rey *et al.*, 2019). La relative homogénéité des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  et de  $\delta^{15}\text{N}$  des humains des différents sites indique que tous ont du consommer le même type de ressources provenant de l'environnement local. La part des protéines animales serait majoritaire, issue principalement de viande (et/ou produits laitiers) de bovins et caprinés domestiques ainsi que de viande de porc, voire de ressources d'eau douce occasionnellement. Le graphique a montre la gamme de valeurs moyenne théorique de l'alimentation protéique supposée des individus de l'Étang David, d'après la différence moyenne admise entre le collagène du consommateur et les protéines de son alimentation pour  $\delta^{13}\text{C}$  (de 0 à 2‰) et pour  $\delta^{15}\text{N}$  (de 3 à 5‰ ; Bocherens et Drucker, 2003). En complément de ces ressources carnées, les plantes (céréales principalement, mais aussi légumineuses et plantes sauvages) ont dû faire partie de l'alimentation de ces humains de façon non négligeable. Leur proportion relative dans l'alimentation est ici difficile à mesurer du fait de leur plus faible concentration en protéines que la viande. Toutefois, les plantes présentent des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  inférieures à celles des herbivores, et leur consommation peut être masquée par la consommation de viande, et en particulier de cochon, dont les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  sont supérieures (fig. a).

Pour finir, la comparaison des valeurs isotopiques de l'Étang David avec les autres sites (fig. b) montre de légères variations en  $\delta^{15}\text{N}$  (alors que les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  sont très homogènes) témoignant probablement soit d'une plus grande proportion de protéines animales que de protéines végétales pour les sujets de plus fort  $\delta^{15}\text{N}$  (mais sans distinction en  $\delta^{13}\text{C}$ ), soit d'une différence de gestion agricole ou de préparations culinaires plutôt que d'un approvisionnement en ressources différent. En effet, la fertilisation des sols pour la culture des céréales peut augmenter les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  (e.g. Bogaard *et al.*, 2007) et l'effet des préparations culinaires (fermentation, cuisson) peut également modifier sensiblement les rapports isotopiques (Royer *et al.*, 2017). La comparaison en particulier avec le site de Gurgy « Les Noisats » qui, datant de la même période, n'est pas attribué à une culture en particulier mais reflète plutôt une composante culturelle locale similaire à l'Étang David, révèle une légère différence de moyennes de  $\delta^{15}\text{N}$  (supérieures à Gurgy) pouvant refléter ce type de particularité. Une plus grande part de poisson dans l'alimentation des humains présentant les valeurs les plus élevées en  $\delta^{15}\text{N}$  a aussi été proposée, mais en l'absence d'analyse sur des restes de poissons locaux, il est impossible de conclure.

### Remerciements

Cette étude a été financée par l'ANR dans le cadre du Projet DHP (S. Rottier, Univ. Bordeaux, Lascarb [ANR-10-LABX-52], 2012–2014), par l'Institut Danone France/Fondation pour la Recherche Médicale 2015 dans le cadre du projet « Women and diet at the beginning of farming, 5th – 3rd millennium BC, France: a bio-anthropological approach » (Dir. G. Goude 2016-2017;

<http://institutdanone.org/nos-prix/femmes-alimentation-les-premieres-societes-agropastorales-ve-iiiie-millenaires-av-j-c-france-approche-bio-anthropologique/>) et par le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (bourse doctorale).

## Bibliographie

AMBROSE S.H. (1993) – Isotopic analysis of paleodiets: methodological and interpretive considerations, in M. Standford dir., *Investigations of ancient human tissue*, Langhorne, Éd. Gordon and Breach Science Publishers, p. 59-130.

BALASSE M., BOCHERENS H., MARIOTTI A. (1999) – Intra-bone variability of collagen and apatite isotopic composition used as evidence of a change of diet, *Journal of Archaeological Science*, 26, 6, p. 593-598.

BOCHERENS H. (1992) – *Biogéochimie isotopique ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) et paléontologie des vertébrés : application à l'étude des réseaux trophiques révolus et des paléoenvironnements*, PhD Thesis, Université Paris VI, Paris, 317 p.

BOCHERENS H., DRUCKER D. (2003) – Trophic level isotopic enrichment of carbon and nitrogen in bone collagen: case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems, *International Journal of Osteoarchaeology*, 13, p. 46-53.

BOCHERENS H., MARIOTTI A. (2002) – Paléoenvironnements et paléosalimentation : biogéochimie isotopique des vertébrés, in J.L. Miskowsky dir., *Géologie de la Préhistoire, méthodes, techniques, applications*, Paris, Éd. GéoPré - Presses Universitaires de Perpignan, p. 1323-1344.

BOGAARD A., HEATON T.H.E., POULTON P., MERBACH I. (2007) – The impact of manuring on nitrogen isotope ratios in cereals : archaeological implications for reconstruction of diet and crop management practices, *Journal of Archaeological Science*, 34, 3, p. 335-343.

CHAMBON P., ROTTIER S., AUGEREAU A., BONNARDIN S., MEUNIER K., PARIAT J.-G. (2013) – Evolution, coexistence et confrontation de pratiques funéraires entre 4700 et 4000 av. J.-C. sur un microterritoire dans la vallée de l'Yonne, in J. Jaubert, N. Fourment et P. Depaepe dir., *Transitions, ruptures et continuité en Préhistoire, XXVIIe Congrès Préhistorique de France, Bordeaux - Les Eyzies 2010*, Paris, Éd. Société Préhistorique Française, p. 213-228.

FOGEL M.L., TUROSS N., OWSLEY D. (1989) – Nitrogen isotope tracers of human lactation in modern and archaeological populations, *Annual Report of Geophysical Laboratory Carnegie Institution of Washington*, p. 111-117.

HERRSCHER E., GOUDE G., METZ L. (2017) – Longitudinal study of stable isotope compositions of maternal milk and implications for the palaeo-diet of infants, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 29, 3, p. 131-139.

LE ROY M., ROTTIER S., TILLIER A.-M. (2018) – Who was a ‘Child’ During the Neolithic in France?, *Childhood in the Past*, 11, 2, p. 69-84.

LONGIN R. (1971) – New method of collagen extraction for radiocarbon dating, *Nature*, 230, p. 241-242.

REY L. (inédit) – *Comportements alimentaires et mobilité au Néolithique : apports de l'analyse biogéochimique multi-proxy à la compréhension des sociétés du Ve millénaire av. J.-C. dans une microrégion, la vallée de l'Yonne (Bassin parisien, France)*, PhD thesis, Université de Bordeaux.

REY L., ROTTIER S., SANTOS F., GOUDE G. (inédit) – Sex and age-related social organization in the Neolithic: a promising survey.

REY L., SALAZAR-GARCÍA D.C., CHAMBON P.H., SANTOS F., ROTTIER S., GOUDE G. (2019) – A multi-isotope analysis of Neolithic human groups in the Yonne valley, Northern France: insights into dietary patterns and social structure, *Archaeological and Anthropological Sciences*, 11, 10, p. 5591–5616.

ROYER A., DAUX V., FOUREL F., LÉCUYER C. (2017) – Carbon, nitrogen and oxygen isotope fractionation during food cooking: Implications for the interpretation of the fossil human record, *American Journal of Physical Anthropology*, 163, 4, p. 759-771.

VALENTIN J. (2002) – Bone remodelling, in J. Valentin dir., *Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values.*, Ann. ICRP, 3-4, Éd. Pergamon, p. 185-188.

## VI.2. Synthèse et perspectives

### **Matériel analysé :**

✦ 2 humains

### **Principaux résultats mis en évidence :**

✦ Signature isotopique ( $\delta^{13}\text{N}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  osseux) et élémentaire (Sr/Ca et Ba/Ca émail) dans la variabilité de la microrégion (moyenne basse de  $\delta^{15}\text{N}$ )

✦ Différence de  $\delta^{15}\text{N}$  entre les deux sujets (plus faible pour l'adolescent CHI-ED 4 de 8-14 ans)

☞ Alimentation globalement similaire aux autres sites mais différente entre les deux sujets (peut-être lié à l'âge)

## VII. Gurgy « Le Nouzeau » (NZ)

---

### VII.1. Retour en bref sur les résultats

Au Nouzeau, l'analyse de **5 animaux** a permis d'observer des **différences interspécifiques** globalement du même ordre que celles observées à GLN et BMT (Figure C10. 23). Les espèces sauvages présentent les plus faibles  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ , un  $\delta^{34}\text{S}$  élevé et un faible niveau trophique sur la base de Sr/Ca et Ba/Ca dans l'os si l'on considère les données de BMT diagénétiques (cf. Chap8.II.5.a). Le bovin est dans la variabilité générale (pour  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) ; le cochon F9 présente un  $\delta^{15}\text{N}$  inférieur à la moyenne et le cochon F7 un niveau trophique plutôt élevé (Sr/Ca et Ba/Ca émail) ; le capriné un  $\delta^{15}\text{N}$  supérieur et un  $\delta^{13}\text{C}$  inférieur à la moyenne. En dépit de la légère variation par rapport aux autres données de la microrégion, le faible effectif enjoint à considérer un type d'économie agricole globalement basé sur le même schéma que pour GLN et BMT.

Seul l'**humain H239** a fourni un résultat isotopique exploitable et présente un  $\delta^{15}\text{N}$  particulièrement faible, similaire aux sujets de Bonnard (Chasséen), aux sujets H1 et H12 de BMT (Chasséen) mais inférieur à la moyenne de BMT et inférieur aux individus Cerny de CHI-Pat. Ce sujet présente également un très faible niveau trophique dans l'enfance, à partir des données Sr/Ca et Ba/Ca de l'émail, sortant de la variabilité générale des humains (Figure C10. 23c). La courbe de valeurs de Ba/Ca de son profil diminue au cours du temps (entre 2,5 et 8,5 ans approximativement), de façon intermittente (Figure C10. 24). L'aspect sinusoïdal de cette courbe témoigne probablement de modifications alimentaires arythmiques et la diminution du Ba/Ca, notamment au début du profil, peut correspondre à une (ou des) période(s) de sevrage. À l'inverse, le ratio Sr/Ca reste globalement stable, suggérant peut-être une faible mobilité.

Le **sujet H238** révèle un niveau trophique (Sr/Ca et Ba/Ca émail) supérieur à H239 entre 2,5 et 8,5 ans, proche de la moyenne des humains de l'ensemble du corpus (Figure C10. 23c). La courbe de variation de son profil est plus stable, bien qu'elle révèle quelques pics ponctuels de Ba/Ca (peu avant 7 ans notamment) et quelques variations du Sr/Ca. Il serait intéressant de comparer ces courbes avec celles de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  pour identifier une éventuelle mobilité. Les pics de Ba/Ca seraient-ils le signal d'une consommation inhabituelle d'autres ressources pendant un temps très court ? Ce pic est-il lié à une période de stress ou à un épisode physiologique particulier ? S'agit-il d'une inclusion diagénétique non repérée par le croisement des marqueurs (le ratio U/Ca augmente légèrement juste après ce pic de Ba/Ca) ? L'étude d'autres ratios élémentaires mesurés conjointement pourrait peut-être apporter des éléments complémentaires.

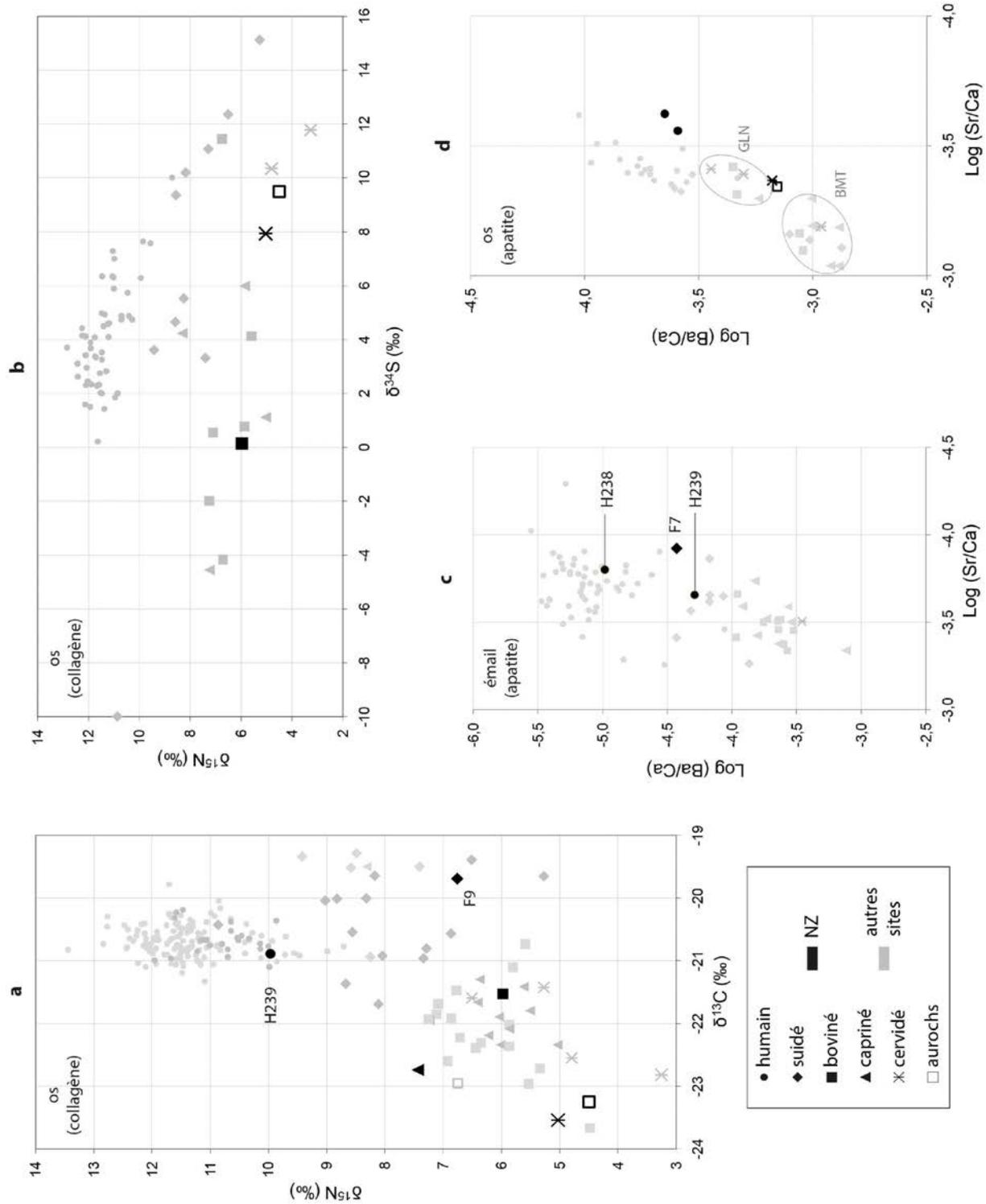


Figure C10. 23 : Récapitulatif de la distribution des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  du collagène osseux global ; a et b) et des valeurs élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) dans l'émail dentaire (d) et dans l'os (e) des échantillons humains et animaux de Gurgy « Le Nouzeau » par rapport à l'ensemble du corpus analysé (en gris).

Dans l'os, les ratios élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) des deux individus sont similaires, avec un Sr/Ca relativement faible par rapport à l'ensemble des humains. Cela semble indiquer l'apport d'autres ressources (provenant d'un environnement particulier ?) pour ces deux individus, si ce n'est de la diagenèse.

Ces hommes, inhumés côte à côte dans des dispositifs quasiment identiques, rappelons-le, ne semblent pas avoir eu la même histoire de vie avant 9 ans, tout du moins du point de vue alimentaire.

D'autre part, la **mauvaise qualité du collagène** révélée par nos analyses dénonce effectivement la **fiabilité des datations** déjà remise en question, en particulier pour H238 qui présentait les dates les plus anciennes et les plus problématiques.

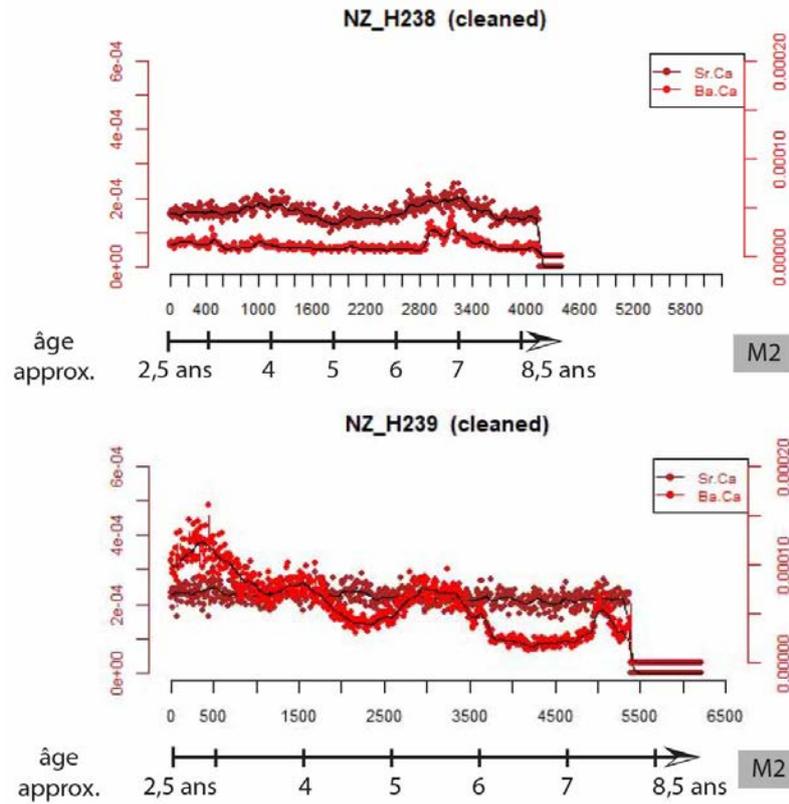


Figure C10. 24 : Courbe de variation des ratios Sr/Ca et Ba/Ca dans les profils d'ablation laser de l'émail de la deuxième molaire (M2) des humains de Gurgy « Le Nouzeau » en fonction de l'âge.

## VII.2. Synthèse et perspectives

### **Matériel analysé :**

- ✦ 2 humains et 7 animaux

### **Principaux résultats mis en évidence :**

- ✦ Signature biochimique des animaux et des humains globalement dans la variabilité locale
- ✦ Bas niveau trophique du sujet H239, avant 9 ans (Ba/Ca émail) et à l'âge adulte ( $\delta^{15}\text{N}$  os)
- ☞ Pas de similitude particulière avec l'autre site Cerny CHI-Pat, plus de proximité avec Bonnard et deux individus de BMT (Chasséen, contexte d'enceinte)
- ✦ Valeurs moyennes et courbes de variations de Sr/Ca et Ba/Ca dans l'émail différentes entre H238 et H239
- ☞ Une histoire de vie différente dans l'enfance pour les deux sujets mais similaire à l'âge adulte ?
- ✦ Mauvaise qualité du collagène osseux
- ☞ Confirmation que les datations sont peu fiables et doivent être rejetées (surtout la plus ancienne)

### **Perspectives :**

- ✦ Nouvelles analyses du Sr isotopiques pour évaluer les schémas de mobilité des humains
- ✦ Analyses biochimiques des restes humains épars dans le fossé d'enceinte pour comparaison avec les deux inhumations et avec les restes humains épars de BMT
- ✦ Datations de l'hydroxyproline pour évaluer l'ancienneté du Cerny dans la microrégion, dater le lien entre Cerny et Chasséen

## Chapitre 11. Synthèse générale et perspectives

Avant de conclure, nous proposons ici une synthèse à partir de l'observation conjointe de l'ensemble des résultats obtenus sur les humains et les animaux des sept sites de la portion de la vallée de l'Yonne considérée dans ce travail sur la période globalement comprise entre 4800 et 4000 cal BC. Celle-ci reprend les trois axes de notre recherche : l'alimentation, la différenciation sociale à travers l'alimentation, l'apport méthodologique et les limites des outils utilisés.

Tous les résultats sont rassemblés dans un tableau récapitulatif, pour chaque individu, en Annexe A34.

### I. L'alimentation générale des humains et la gestion des ressources

---

La Figure C11. 1 présente un extrait condensé des principaux résultats obtenus dans ce travail permettant de discuter des modes de subsistance des humains de la microrégion. En supplément des valeurs directement mesurées sur la faune domestique et sauvage retrouvée sur les sites concernés, des estimations des valeurs de plantes et de poisson sont proposées à titre de comparaison (cf. encadré).

L'ensemble des marqueurs indique une alimentation **riche en protéines animales**, en comparaison de ce qui est connu dans les régions voisines, en particulier par rapport au sud de la France, mais également par rapport à d'autres sites du centre et du nord de la France et de l'Allemagne. Les récentes données C, N et S disponibles pour le Cerny dans le Bassin parisien sont similaires aux résultats de la microrégion, bien que le niveau trophique des humains soit sensiblement inférieur à celui de la microrégion et que les valeurs de S soient homogènes entre toutes les espèces (reflétant un milieu plus homogène en dépit de la plus large aire de répartition des sites).

Globalement, les résultats sont en accord avec les données de l'archéozoologie indiquant une **consommation majoritaire de produits bovins** (viande et/ou produits laitiers), **puis de porc**. La part des caprinés, source minoritaire selon les données archéozoologiques régionales, ne peut être discernée de celle du bœuf ici puisque ces espèces présentent des valeurs similaires pour l'ensemble des marqueurs.

Ces deux principales ressources (bœuf et porc) présentent des valeurs distinctes pour l'ensemble des marqueurs, suggérant une **gestion différente du cheptel** avec une possible **occupation de milieux séparés** : les cochons pouvant être gardés proches des habitations et les bovins amenés à pâturer plus à l'écart, dans des milieux peut-être plus fermés (intermédiaires entre celui des animaux sauvages et

celui des cochons). Un **affouragement différent** peut être proposé avec un apport possible (peut-être saisonnier) en espèces arborées (Thiébaud 2005) voire en légumineuses pour les herbivores (la culture des légumineuses ne semblait pas intensive mais les herbivores pouvaient consommer une plus grande proportion de légumineuses sauvages, e.g. trèfle, luzerne) ou avec des plantes fertilisées pour les cochons. Néanmoins les éléments traces (Sr/Ca et Ba/Ca) semblent témoigner d'une différence de niveau trophique, suggérant un régime plus omnivore pour les cochons, bien que cela ne soit pas mis en évidence par l'unique résultat de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ .

Les **animaux chassés** ne semblent pas avoir été consommés de façon substantielle et, s'ils ont constitué un apport alimentaire en complément des ressources agropastorales, leurs prises semblent plutôt liées à un acte symbolique qu'à une recherche nécessaire de nourriture.

La question de la pêche et de la **consommation de poisson** est soulevée par plusieurs résultats ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ,  $\delta^{34}\text{S}_{\text{bulk}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ ) mais ne peut être approfondie ici en l'absence d'analyses directes de restes ichtyologiques locaux (les analyses atteignent leurs limites méthodologiques). Toutefois, la combinaison des marqueurs suggère que, s'il est possible que les ressources aquatiques aient fourni un supplément alimentaire aux ressources terrestres, elles ne semblent pas avoir constitué une part importante de l'alimentation des humains et apparaissent plutôt négligeables au regard des produits de l'élevage et de l'agriculture. Cela souligne vraisemblablement une nouvelle fois la dichotomie existante entre les sphères domestique et sauvage.

La **part des plantes** est difficile à mettre en évidence, particulièrement dans ce contexte où elle est masquée par une alimentation apparemment très carnée. Néanmoins les ressources végétales (céréales, légumineuses et plantes sauvages) ont dû faire partie de l'alimentation de façon non négligeable. Leur consommation semble mieux représentée par l'analyse des éléments traces Sr/Ca et Ba/Ca.

En effet, si la **variabilité des humains** apparaît faible relativement à la variabilité de la faune domestique pour les rapports isotopiques C, N et S du collagène, indiquant une source de protéines majoritairement issue de ressources homogènes entre les individus, elle semble plus élevée pour les éléments traces Sr/Ca et Ba/Ca de l'apatite, qui pourraient refléter de façon plus importante la part des plantes, moins riches en protéines et plus riches en Ca. La différence de niveau trophique entre les humains reflétant la dichotomie entre produits animaux et végétaux est également soulignée par les résultats  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  (et dans une moindre mesure par  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ). Il est particulièrement intéressant de noter la grande homogénéité des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  et le fait que la variabilité en C, N, S<sub>bulk</sub> et  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  des humains ne suive pas la tendance observée entre herbivores et porcs : il existe pour ces derniers une corrélation entre  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{13}\text{C}$ , entre  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  et entre  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  et  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  alors que les valeurs des humains ne révèlent aucune corrélation entre  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  et montrent une corrélation inverse entre  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  et entre  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  et  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  (Figure C11. 1). Cela suggère que ces ressources (bovines et porcines) aient été consommées globalement dans les mêmes proportions pour tous les humains et que

la variabilité entre ces derniers résiderait plutôt dans la différence de proportion en produits animaux/végétaux (voire en produits aquatiques).

Enfin, l'analyse complémentaire des **textures des micro-usures dentaires** apporte une clé de lecture supplémentaire à la reconstitution de l'alimentation et indique ici que les aliments consommés devaient être essentiellement mous, peu abrasifs et peu coriaces. Le type d'usures observées (faiblement complexes et faiblement anisotropes) n'avait encore jamais été rencontré au Néolithique (pas même dans les populations Cerny voisines du Bassin parisien) et suggère que les denrées aient pu être consommées très transformées. Certaines préparations culinaires ayant pu engendrer ce type de micro-usures (bouillies, fermentations, séchage) ont pu avoir un impact, bien que certainement très modéré, sur la composition isotopique des humains. Quoi qu'il en soit, ces résultats apportent une information additionnelle sur la façon de se nourrir de ces groupes, qui semble de surcroît tout à fait homogène pour l'ensemble des sujets de la microrégion analysés (à l'inverse des individus Cerny du reste du Bassin parisien qui présentent des textures de micro-usures très variables).

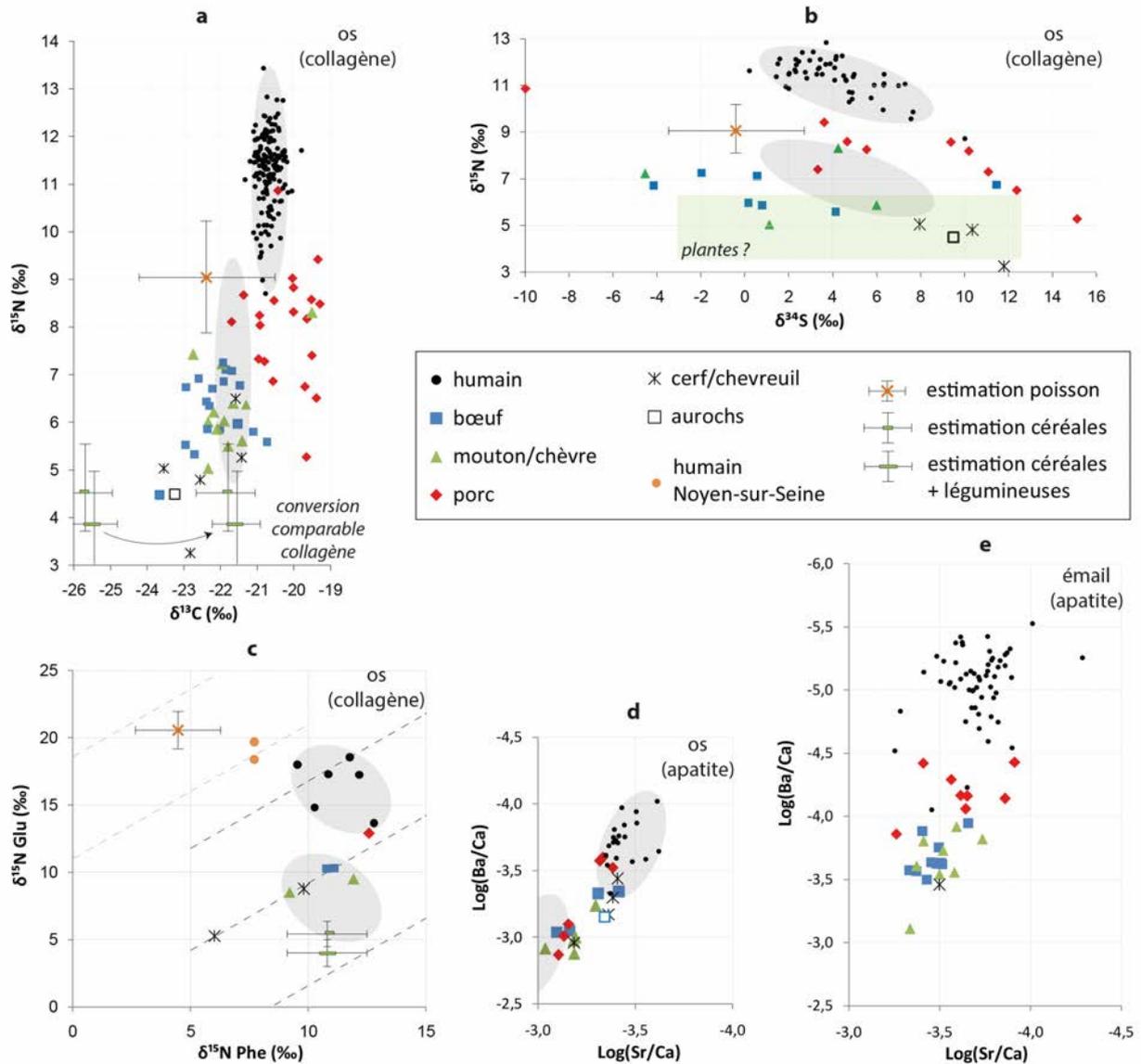


Figure C11. 1 : Synthèse sélective des principaux résultats permettant d'aborder la question de l'alimentation des humains de l'ensemble du corpus : graphiques de dispersion des valeurs isotopiques de  $\delta^{13}\text{C}$  vs  $\delta^{15}\text{N}$  (a) et  $\delta^{34}\text{S}$  vs  $\delta^{15}\text{N}$  (b) du collagène osseux global, de  $\delta^{15}\text{N}$  des acides aminés Glu et Phe du collagène osseux (c) et des ratios élémentaires Sr/Ca et Ba/Ca de l'os (d) et de l'émail dentaire (e) des humains et de la faune associée de tous les sites étudiés dans ce travail. Les estimations des valeurs de plantes et de poisson proposées sont réalisées à partir des données de la littérature (cf. encadré). Les valeurs des humains du site mésolithique de Noyen-sur-Seine (Seine-et-Marne) ayant consommé du poisson sont indiqués à titre comparatif (c ; Naito *et al.* 2013a). Les ellipses grises représentent la dispersion des valeurs des humains et la dispersion théorique relative de leur alimentation moyenne, un niveau trophique en-dessous. Cette information n'est pas disponible pour les éléments traces dans l'émail (e) puisque l'OR n'est pas connu (cf. Chap2.VI.1). Les résultats présentés ici (e) montrent néanmoins l'écart enregistré entre les différentes ressources de niveau trophique croissant des herbivores aux humains en passant par le porc, de niveau intermédiaire.

### Proposition de révision pour l'estimations de valeurs de plantes et de poisson

Les valeurs estimées de plantes et de poisson sont représentées sur la Figure C11. 1. Bien que le référentiel végétal et aquatique utilisé dans ce travail ait déjà été défini dans la section Chap3.IX.1 et dans l'article Rey *et al.* en révision (cf. Chap7.I et Annexe B4, Appendix A), nous en présentons ici un résumé et une **légère adaptation**.

#### ✦ Pour le carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) et l'azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ; Figure C11. 1a) :

 Les **valeurs de plantes** de quatre sites néolithiques allemands sont utilisées (source 1). À ces valeurs est appliquée ici une **correction** de -1‰ en  $\delta^{13}\text{C}$  et -0,7 ‰ en  $\delta^{15}\text{N}$  calculée à partir de la comparaison des herbivores domestiques néolithiques d'Allemagne (source 2) et de l'Yonne (source 3) afin de mieux correspondre à la variabilité régionale. Une **correction supplémentaire** de +4‰ en  $\delta^{13}\text{C}$  est indiquée sur le graphique pour rendre les valeurs comparables avec les données du collagène (cette correction correspond à la différence moyenne mesurée entre l'organisme entier et le collagène ; cf. Chap2.IV.2.b).

 Les **données de poisson** proviennent de différents sites néolithiques et antérieurs européens (source 4). Aucune correction régionale n'est appliquée en raison de l'aspect singulier des systèmes aquatiques et la grande variabilité possible doit être prise en compte.

#### ✦ Pour le soufre ( $\delta^{34}\text{S}$ ; Figure C11. 1b) :

 Les **valeurs de plantes** sont ici calquées sur les valeurs de la faune herbivore domestique et sauvage locale (source 3) afin d'envisager toute la variabilité possible (cf. Chap3.IX.1).

 Les **valeurs de poisson** proviennent de sites belges mésolithiques et paléolithiques (source 5).

#### ✦ Pour l'azote des acides aminés spécifiques ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ ; Figure C11. 1c) :

 Les **valeurs de plantes** sont estimées à partir des recommandations de Styring *et al.* 2015 :

-  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}} = \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}} \text{ plantes Vaihingen (source 1) } + \Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu} - \text{bulk}} \text{ plantes modernes (- 0,5 ‰)}$

-  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}} = \delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}} \text{ herbivores domestiques français (source 6) - TEF (+ 0,4 ‰)}$  (cf. Chap7.I).

 Les **valeurs de poisson** proviennent du site épipaléolithique de Pont d'Ambon (Dordogne ; Naito *et al.* 2013 ; cf. Annexe B4, Table A4).

#### ✦ Pour les éléments traces (Sr/Ca et Ba/Ca ; Figure C11. 1d et e) : aucune estimation n'est disponible.

↓

Source 1 : valeurs de plantes ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) des sites néolithiques allemands de Vaihingen, Hornstaad Hörnle, Sipplingen et Viesenhäuser Hof (Styring *et al.* 2017 ; cf. Annexe B4, Table A5-6)

Source 2 : valeurs d'herbivores domestiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) des sites néolithiques allemands de Derenburg, Halberstadt, Karsdorf, Herxheim, Trebur, Nieder-Mörlen (Dürrwächter *et al.* 2006 ; Nehlich *et al.* 2009 ; Oelze *et al.* 2011 ; cf. Annexe B2 : Online Resource 8)

Source 3 : valeurs d'herbivores domestiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ) des sites de Gurgy « Les Noisats » et « Le Nouzeau », Beaumont « Le Crot aux Moines » (Rey *et al.* 2019 ; cf. Chap5.II)

Source 4 : valeurs de poissons européens ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  ; Bösl *et al.* 2006 ; Drucker et Bocherens 2004 ; Drucker *et al.* 2018 ; Dürrwächter *et al.* 2006 ; Meadows *et al.* 2018 ; cf. Annexe B4, Table A4)

Source 5 : valeurs de poissons de Belgique ( $\delta^{34}\text{S}$  ; Drucker *et al.* 2016 ; cf. Annexe B4, Table A4)

Source 6 : valeurs d'herbivores ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$ ) des sites néolithiques français de Gurgy « Les Noisats », Beaumont « Le Crot aux Moines », Le Vigneau et Pontcharaud (Rey *et al.* en révision)

### II. Variabilité micro-régionale, identité(s) et spécificités locales

---

Au regard de l'importante diversité culturelle et structurelle mise au jour entre les sites et au sein de certains sites, on observe globalement une grande homogénéité dans les compositions biochimiques (de même que pour les micro-usures dentaires).

En premier lieu, si les résultats peuvent varier sensiblement entre les sites, ils ne révèlent **pas de distinction** en fonction du **type de site** (enceinte vs nécropole ou plus petit ensemble funéraire) ni en fonction de la **culture** attribuée à ces derniers. On ne note pas de rapprochement spécifique entre Beaumont « Le Crot aux Moines » (BMT), Monéteau « Macherin » (Mon) et Bonnard « Le Poirier » (Bon) – attribués au Chasséen – ou entre Chichery « Sur les Pâturaux » (CHI-Pat) et Gurgy « Le Nouzeau » (NZ) – attribués au Cerny –, ni entre Gurgy « Les Noisats » (GLN) et Chichery « L'Étang David » (CHI-ED) – de composante locale. En particulier, les résultats des restes épars de BMT sont dans la variabilité globale des autres humains, inhumés en contexte funéraire. Les individus ont donc reçu des traitements différents dans la mort mais ont certainement eu une alimentation similaire.

En outre, une sensible variation peut être observée avec la **chronologie**, mais semble principalement due au groupe B de Monéteau. L'ensemble des résultats biochimiques est représenté en fonction des datations associées en Annexe A52. Toutefois, les problèmes de datation rencontrés dans la microrégion rendent l'analyse diachronique de ces données délicate.

Le type de **dispositif funéraire** et le **mobilier** ne sont globalement pas corrélés aux résultats biochimiques, comme ce peut être le cas ailleurs dans le Sud de la France par exemple (e.g. Le Bras-Goude *et al.* 2012). On n'observe notamment pas de composition isotopique ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ) ou élémentaire (Sr/Ca, Ba/Ca) propre à un type de tombe qui se retrouverait entre les sites : les coffres de Mon, GLN ou Bon ne présentent pas plus de similitudes entre eux qu'avec les autres types funéraires par exemple.

En revanche, une certaine **structuration** est visible dans **l'espace funéraire**, notamment dans les grandes nécropoles de GLN et Mon. On observe des ratios isotopiques similaires entre individus regroupés dans des tombes proches, reflétant sans doute des pratiques alimentaires partagées au sein de noyaux « familiaux ». Les sépultures à alcôves rassemblées au sud-ouest de GLN présentent des valeurs isotopiques globalement semblables. Les différents secteurs de Monéteau reflètent une disparité à travers les données biochimiques. D'ailleurs, une analogie est proposée entre le groupe C de Monéteau et la nécropole de GLN. Il en est de même pour la faune de BMT qui marque une gestion différente selon les secteurs, en particulier pour le porc (e.g. les valeurs de C,N,S des cochons de l'habitat circulaire diffèrent ostensiblement de celles des autres secteurs, suggérant une fonction particulière de cette structure circulaire : aire artisanale, cérémonielle ?).

D'autre part, **les cochons de GLN et ceux de BMT** présentent une composition biochimique clairement distincte, notamment en C et S, indiquant une gestion ou un environnement différents de ces animaux entre les sites, bien que la composition des humains entre eux soit similaire et reflète une alimentation globalement basée sur le même ensemble de ressources (dont le porc fait partie, bien que son impact, non majoritaire, doive être lissé par un signal moyenné entre les différentes ressources).

Dans l'ensemble, les stratégies de subsistance semblent être **organisées sur le territoire** de façon homogène, autour des mêmes ressources, gérées localement. L'alimentation pouvait varier sensiblement entre les sites, peut-être avec la chronologie, selon les influences culturelles ou en fonction de la disponibilité des ressources, de l'environnement proche ou du climat. Il n'est pas impossible que les groupes aient bougé, évolué, se soient croisés, et aient enterré leurs morts dans différents espaces selon les modalités en cours qui pouvaient changer rapidement au contact des autres groupes culturels et des populations voisines. D'après les données biochimiques, l'organisation semble plutôt horizontale pour les individus retrouvés dans ces sites. Elle n'exclut pas que quelques individus (par exemple « chefs de famille » ou d'autre statut/rôle distinctif ?) aient pu occuper une place particulière et jouir d'un accès privilégié (ou au contraire limité ?) à certaines denrées comme le montrent les valeurs isotopiques et élémentaires de plusieurs sujets isolés (e.g. GLN 221B, GLN 284, Mon 04-99, Mon 99-456, Mon 99-520), mais aucun sujet ou catégorie d'individus ne se détache réellement du reste du groupe. D'autre part, aucune différence significative n'a été enregistrée lors des comparaisons avec les nécropoles monumentales Cerny, suggérant que la hiérarchisation apparente observée dans les pratiques funéraires ne soit pas visible à travers l'alimentation ou qu'elle concerne d'autres aspects de l'alimentation – invisibles par l'approche biochimique – ou d'autres rangs de la société, dont les restes n'ont pas été retrouvés, qui auraient pu jouir d'un autre traitement funéraire.

Cependant, des **disparités** sont visibles **entre les sexes et en fonction de l'âge**, essentiellement à GLN et Mon. Si ces résultats ne peuvent être extrapolés à l'ensemble des sites, ils sont probablement au moins pour ces grands ensembles le reflet d'une **organisation interne spécifique** de ces populations, avec une probable évolution du statut social au cours de la vie. Les valeurs isotopiques dans l'os sont sensiblement mais significativement différentes pour les hommes et les femmes alors que le signal (isotopique et élémentaire) enregistré dans la couronne des deuxièmes molaires minéralisées pendant l'enfance (avant 9 ans) est homogène entre les sexes. Les tests préliminaires d'analyse séquentielle de la dentine (couronne et racine) semblent révéler des périodes de transitions alimentaires et/ou de mobilité vers 8-9 ans et vers 14-15 ans, rejoignant l'hypothèse d'un changement de statut social autour de ces âges-là avancée par l'étude des pratiques funéraires (Le Roy *et al.* 2018). Le passage social de l'enfance à l'adolescence (autour de 8-9 ans) puis à l'âge adulte (autour de 14-15 ans) pourrait ainsi s'accompagner de modifications alimentaires ou de mobilité (cf. Chap6.I ; Rey *et al.* 2021, Fig. 6).

En revanche, les résultats dans l'os des sujets morts avant 15 ans, voire avant 9 ans, révèlent des disparités déjà visibles en fonction du sexe, mises en évidence uniquement grâce à la récente détermination du sexe par la génétique. Ce résultat contraste avec le précédent et soulève la question d'une **différence de traitement** (lié au statut ?) entre les **enfants morts jeunes** (dont l'os est analysé) et **ceux ayant survécu** (dont la dentine est analysée). La question d'une différence tissu-dépendante (cf. Beaumont *et al.* 2018), par exemple liée aux modalités d'enregistrement du signal entre les os et les dents, est également évoquée. Cela pourrait refléter une différence d'activités (perceptible dans l'os uniquement, dès le plus jeune âge) plutôt que de réelles divergences alimentaires. Cette dernière hypothèse ne semble toutefois pas étayée par les résultats de l'analyse isotopique séquentielle dans la dentine qui, bien que devant être confirmés sur un plus grand nombre d'échantillons, montrent clairement des modifications en fonction de l'âge avant 15 ans.

Quoi qu'il en soit, à partir de 14-15 ans au moins (peut-être même dès 8-9 ans), la **différence isotopique constatée entre les sexes** reflète de légères mais significatives distinctions dans les pratiques, peut-être liée à la séparation des tâches. Déjà mise en évidence par d'autres paramètres archéologiques (mobilier, marqueurs osseux d'activité), la différenciation sexuelle est ici révélée de façon exceptionnelle à travers l'analyse isotopique, pour la première fois en contexte néolithique français. En outre, une plus large variation du S dans la dentine des femmes suggère une mobilité différentielle entre les sexes avec la présence de **femmes exogènes**. Si les résultats du Sr isotopique s'avèrent difficiles à interpréter ici (cf. *infra*), les très récents développements techniques ont permis d'obtenir de bons résultats qui, adossés à l'analyse génomique retraçant les liens de parenté et la structure familiale, viennent confirmer cette hypothèse (Rivollat *et al.* 2021a ; Rivollat *et al.* 2021b ; en préparation).

Il est à noter que la **différence entre les sexes** n'implique pas les mêmes indicateurs que la **différence entre les sites**. La première faisant intervenir  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ , l'autre faisant intervenir  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  (voire Ba/Ca si l'impact de la diagenèse est exclu dans l'os), mais non  $\delta^{13}\text{C}$ . Ainsi, les différences alimentaires entre les sexes ou entre les sites ne touchent pas les mêmes aspects, sans qu'il soit possible d'en discerner nettement les variables. Par exemple, si des différences micro-environnementales et/ou de niveau trophique (proportion relative de produits animaux vs végétaux) pourraient être envisagées entre les sites (la variabilité concerne à la fois l'apport en protéines et l'alimentation totale), des différences de mobilité pourraient être proposées entre les sexes. Par ailleurs, l'absence de différence significative des textures de micro-usures dentaires entre les sexes comme entre les sites indique que l'ensemble des individus a certainement consommé des aliments préparés de façon similaire (à la différence des sujets Cerny du reste du Bassin parisien pour lesquels des différences entre les sexes ont été mesurées, contrairement aux résultats isotopiques).

### III. Synthèse méthodologique sur l'apport et les limites des différents marqueurs et de leur utilisation combinée

---

À ce jour, cette étude constitue, pour tout le Néolithique européen, le **plus gros corpus** (180 humains et 74 animaux) ayant fait l'objet d'autant d'analyses variées et novatrices, conjuguant différents marqueurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) et élémentaires (Sr,Ba/Ca, Mg/Ca, U,Mn/Ca) dans différents tissus (collagène osseux et dentinaire, apatite de l'émail dentaire) à différentes échelles (« *bulk collagen* », acides aminés, multi-échantillonnage séquentiel de la dentine, ablation laser dans l'émail). L'apport d'analyses complémentaires telles que celle des textures de micro-usures dentaires vient compléter l'image obtenue par l'approche biogéochimique. La **combinaison de tous ces marqueurs** avait pour but de mieux caractériser les comportements alimentaires des humains, non seulement à des fins de **reconstitutions des régimes** alimentaires *per se*, ce qui constitue un challenge méthodologique dans le cas de régimes complexes comme ceux des humains où toutes les sources ne sont pas connues et encore moins mesurées pour servir de référentiel aux données des humains (cf. encadré), mais aussi et surtout pour **comparer les individus entre eux** et à **différents moments de vie** afin d'accéder à un niveau plus fin d'analyses : celui du lien entre l'alimentation et la structuration sociale d'un territoire ou d'un groupe.

En premier lieu, la **combinaison des isotopes de C, N et S**, dans l'os, d'abord, de presque tous les individus du corpus, offre un riche recueil de **comparaison** (inédit pour un tel effectif sur un micro-territoire) s'inscrivant dans le paysage isotopique néolithique ouest-européen. Les conclusions quant aux stratégies de subsistance et à la variabilité interindividuelle sont discutées au regard de ce qui est connu ailleurs en contexte similaire. L'adjonction des **analyses dans la dentine**, sur un plus petit nombre d'échantillons, et notamment ceux de l'analyse séquentielle réalisés à titre exploratoire, offre d'intéressants résultats sur l'évolution des statuts au cours de la vie et les structures sociales. L'étude devra être poursuivie sur un plus grand nombre d'échantillons pour confirmer et/ou affiner ces observations (cf. IV). D'autre part, alors que les résultats dans la couronne dentinaire ne révèlent aucune distinction par sexe, l'analyse séquentielle sur toute la hauteur de la dent semble mettre en évidence une variabilité avec l'âge pouvant être liée au sexe des enfants, soulignant l'importance de dépasser l'analyse globale (*bulk*) pour atteindre des variations plus subtiles par le micro-échantillonnage. En addition de ces marqueurs ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  osseux et dentaires) aujourd'hui utilisés en routine, d'autres analyses plus innovantes ont donc été conduites afin de préciser et compléter, voire rediscuter, les schémas ainsi obtenus.

#### **Reconstituer l'alimentation, un challenge méthodologique**

Avant même de discuter de la variabilité intra- et inter-populationnelle, rappelons comment la **reconstitution des régimes alimentaires** par l'analyse biogéochimique constitue un **challenge méthodologique**.

De nombreux facteurs physiologiques et environnementaux influencent la composition biochimique des tissus et les principes métaboliques en jeu ne sont pas connus précisément. En outre, la méconnaissance de l'ensemble des sources alimentaires fragilise la reconstitution des régimes alimentaires. Les valeurs à la base de la chaîne alimentaire doivent être estimées au plus proche, nécessitant une identification des différentes sources potentielles par diverses analyses, ce qui est souvent difficile en contexte archéologique. Dans le cas de régimes mixtes et complexes tels que le sont généralement ceux des humains, une multitude de combinaisons pourrait aboutir à une même composition biochimique. Chaque méthode comprend des biais analytiques que seule la conjugaison des différentes approches permet de pallier. La multiplication des marqueurs, des disciplines et des matériaux d'étude offre généralement le meilleur moyen d'éviter les écueils interprétatifs et les conclusions trop simplistes.

Dès les premiers résultats isotopiques (C, N et S osseux) de notre étude, le niveau trophique particulièrement élevé des humains mis en évidence dans la microrégion nous a enjoint à envisager **différentes hypothèses quant au régime alimentaire**, parmi lesquelles celle de la consommation du poisson, interrogeant la place de la pêche (ou le régime particulièrement carné) dans ces sociétés d'agropasteurs qui semblent essentiellement tournée vers une économie de production terrestre. D'intérêt corollaire, la part des ressources végétales, inversement masquées par une alimentation riche en protéines animales de haut niveau trophique, est également questionnée. Finalement, c'est la proportion relative de ces différentes ressources (produits d'élevage et de l'agriculture, ressources végétales et animales cueillies, chassées et pêchées) dans l'alimentation qui est recherchée afin d'en comparer les modalités de subsistance avec les cultures et groupes humains avoisinants, dans l'espace ou dans le temps. Si nombre de ressources ne peuvent être estimées (e.g. œufs, insectes, plantes sauvages), l'analyse biochimique vise à approcher au mieux les proportions relatives des principales catégories alimentaires ciblées, dans une optique comparative.

Pour tenter de répondre à ces questions et de mieux percevoir le cadre alimentaire des humains dans son ensemble, nous avons procédé à **l'analyse isotopique de l'azote dans les acides aminés** du collagène ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$ ). Cette méthode a pour but de mieux définir le niveau trophique des humains et notamment d'identifier la possible consommation de ressources aquatiques, théoriquement même en l'absence de référentiel local. Les résultats indiquent un niveau trophique terrestre très élevé des humains dont l'alimentation serait basée majoritairement (presque exclusivement pour la plupart des sujets) sur les produits de l'élevage (Figure C11. 1). Cependant, plusieurs interrogations restent

ouvertes, ne permettant pas tout à fait de conclure et nous projetant aux limites de la méthode. Les résultats soulignent notamment l'importance du référentiel local dans le cas de régimes mixtes. La position intermédiaire (régime omnivore) du cochon, ou au contraire son possible régime herbivore non soupçonné par les premiers résultats isotopiques, demandent à être vérifiés, de même que les valeurs des poissons locaux, ce qui permettrait d'affiner encore l'interprétation et de répondre aux nouvelles questions soulevées (cf. Chap7). Ces données offrent néanmoins des arguments supplémentaires permettant de construire une image plus complète et montrent une nouvelle fois l'intérêt de conjuguer plusieurs approches.

**L'analyse des éléments traces** a ensuite été envisagée pour tâcher de préciser la caractérisation des pratiques alimentaires de ces groupes humains. En parallèle, l'analyse du Sr isotopique devait apporter des éléments pour évaluer la mobilité des individus, questionnée notamment par les données archéologiques renvoyant à différentes cultures et échanges sur de longues distances et par les premiers résultats des isotopes du soufre. **L'ablation laser** s'est très vite imposée pour tenter de répondre à une double problématique : reconstituer l'alimentation et la mobilité et tracer les modifications au cours de la vie, dans une démarche expérimentale. Car la méthode permet non seulement de mesurer quasi simultanément et de façon concomitante dans les mêmes tissus les concentrations en éléments traces et les rapports isotopiques du Sr, mais également et surtout d'obtenir, par prélèvement d'une infime quantité de matière à une échelle très fine dans les tissus, une quantité exceptionnelle d'acquisitions permettant notamment de suivre un signal biochimique ciblé, enregistré de façon incrémentielle dans les stries de croissance de l'émail dentaire.

Il s'agit d'une **analyse pionnière jamais effectuée à cette échelle**, ni même à plus petite échelle sur des échantillons néolithiques. Notre travail a permis d'établir un protocole semi-automatisé de traitement des données dont les récents développements offrent aujourd'hui la possibilité d'obtenir de manière considérablement plus rapide des résultats « propres » directement interprétables. Des connaissances en programmation sont requises pour gérer plusieurs millions de données (BigData) qui peuvent ensuite être réduites à des moyennes et variances individuelles exploitables à l'instar des autres marqueurs ou utilisées en intégralité dans le cadre d'analyses statistiques larges.

L'ablation laser n'autorisant *a priori* pas de prétraitement visant à éliminer les contaminations *post-mortem*, un **traitement post-hoc de la diagénèse** a été mis en place à partir de l'analyse conjointe de différents éléments traces, biogéniques d'une part (Sr/Ca et Ba/Ca) et diagénétiques d'autre part (U/Ca et Mn/Ca), et majeurs (Mg/Ca). Ce protocole permet d'identifier et d'éliminer *a posteriori* les zones diagénétiques dans les profils d'émail dentaire. En revanche, le **tissu osseux** s'avère **inadapté à l'ablation laser**. Plus sensible aux altérations *post-mortem* et plus diffusif que l'émail, l'os a fourni des résultats visiblement perturbés par un **signal diagénétique** en dépit des traitements post-hoc effectués. D'éventuels prétraitements adaptés à la méthode sont à investiguer, mais à ce jour l'ablation

laser ne peut être conduite telle quelle sur l'os sans évaluation préalable de la diagénèse par des méthodes additionnelles (e.g. spectroscopie Raman, diffraction rayons X).

Dans l'émail, les **données  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$**  ne peuvent pas être exploitées en l'état en raison de la mauvaise conservation des tissus adossée à un signal trop faible (mesurable par le  $^{88}\text{Sr}$ ) ne permettant pas de surpasser les interférences poly-atomiques à la masse 87 ( $^{40}\text{Ca}$ - $^{31}\text{P}$ - $^{16}\text{O}$ ). Néanmoins, de nouvelles mesures réalisées avec des instruments dernière génération plus performants (analyses en cours) permettent d'ores et déjà d'obtenir des résultats de meilleure qualité qui apportent de nouveaux éléments pour répondre aux questions de mobilité.

En ce qui concerne **les éléments traces** (Sr/Ca et Ba/Ca), les résultats obtenus dans l'émail dentaire ne peuvent servir à reconstituer directement les régimes alimentaires car, contrairement à l'os, la différence théorique entre l'alimentation et l'émail du consommateur (OR) est variable et mal connue. Néanmoins, les ordres de grandeurs observés permettent de discuter les tendances, et la comparaison de ces données avec celles des isotopes stables offre de nouveaux arguments pour discuter notamment de la gestion du cheptel domestique et de la variabilité des humains. Nos données viennent donc enrichir les connaissances disponibles à ce sujet. En outre, l'ablation laser a rendu possible la mesure simultanée de nombreux autres éléments traces qui n'ont pas été exploités dans le cadre de ce travail et seront traités ultérieurement. Enfin, si le travail engagé sur les variations intra-profil n'a été qu'amorcé ici, nous disposons d'une quantité exceptionnelle de données et de profils propres dont l'étude approfondie offre de belles perspectives.

### IV. Perspectives

---

Les nouvelles questions soulevées à l'issue de ce travail nous invitent à proposer une série d'analyses ultérieures qui permettraient d'aller plus loin, dont certaines sont déjà en cours. Celles-ci sont présentées ci-après sans ordre de priorité et peuvent être conduites indépendamment les unes des autres.

En ce qui concerne la **reconstitution des régimes alimentaires** :

✦ L'analyse directe de **restes végétaux et ichtyologiques** retrouvés dans la microrégion (carporestes de pois à Gurgy « Les Plantes-du-Mont » et restes de poissons à Beaumont « Le Crot aux Moines », particulièrement) ou dans des sites non loin en contexte néolithique permettraient de préciser les référentiels.

✦ De nouvelles analyses isotopiques de **l'azote dans les acides aminés Glu et Phe** à partir d'échantillons supplémentaires de **cochons** de notre corpus permettraient de vérifier le niveau trophique de ces animaux et de mieux définir la position des humains en conséquence.

✦ D'autre part, l'étude de nouveaux marqueurs récemment développés pourrait affiner le tableau des ressources consommées par les humains de façon non négligeable, permettant d'identifier la consommation de poisson ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{Met}}$ ), de produits laitiers ( $\delta^{44}\text{Ca}$ ), ou éventuellement de préciser la part des plantes et ainsi le degré de carnivorie ( $\delta^{26}\text{Mg}$  ou  $\delta^{66}\text{Zn}$ ) entre autres (e.g. Ishikawa *et al.* 2018 ; Jaouen et Pons 2017 ; Martin *et al.* 2017 ; Tacail *et al.* 2021).

✦ En parallèle, l'apport **d'autres disciplines** offrirait des opportunités de mieux caractériser la diversité des ressources consommées par ces groupes humains : l'analyse des **résidus piégés dans les poteries** retrouvées dans les différents sites de la microrégion ou encore l'**analyse du tartre** dentaire (projet en cours).

Pour ce qui est de la **variabilité individuelle** plus spécifiquement :

✦ Les indicateurs biogéochimiques devront être croisés avec les **marqueurs bio-anthropologiques** (VA, pathologies, marqueurs de stress, état sanitaire bucco-dentaire) à l'échelle de tout le micro-territoire afin de mieux caractériser l'identité biologiques des défunts et le lien avec l'alimentation. Ce travail nécessite un enregistrement des données homogène entre les sites et une analyse comparative précise adossée à un protocole statistique bien défini.

✦ Il serait intéressant d'échantillonner et analyser les **restes humains épars du site de Gurgy « Le Nouzeau »** pour les comparer aux sépultures attenantes à l'enceinte du même site ainsi qu'aux restes de Beaumont, également en contexte détritique.

✦ Le changement de statut social avec l'âge doit être vérifié par **micro-échantillonnage dentaire** sur un plus grand nombre d'échantillons de différents sites de notre corpus (projet en cours).

✦ Enfin, de nouvelles analyses du **Sr isotopique** permettront de discuter de la mobilité des individus (projet en cours).

Par ailleurs, l'**analyse par ablation laser** ayant fourni une quantité exceptionnelle de données, de nombreux éléments déjà mesurés restent à étudier. De plus, la mise en place d'un diagnostic fiable de la diagenèse dans l'os et/ou la possibilité d'un prétraitement compatible avec l'ablation laser doivent être testées. Enfin, la **caractérisation statistique** de la variabilité des profils permettrait d'identifier de façon semi-automatisée les modifications biogéniques intra-individuelles et d'en discuter les récurrences ou la diversité.

## Conclusion

L'analyse combinée de nombreux proxies, différents et complémentaires, sur un nombre très important d'échantillons (plus de 250 individus) provenant d'un contexte ciblé et bien défini a permis de répondre à la triple problématique posée dans ce travail et de soulever de nouvelles questions. Les données obtenues ont été comparées avec ce qui est connu en contexte similaire, discutées au regard des informations archéologiques disponibles dans la région et plus largement en Europe et, bien sûr, confrontées entre elles dans un jeu de miroir entre les différents marqueurs. Nous avons ainsi pu proposer des clés interprétatives essentielles, via une démarche en « synergie », pour contribuer à reconstituer les stratégies alimentaires des premiers agropasteurs, ainsi qu'à identifier des distinctions relatives aux questions d'organisation sociale et de structuration des groupes humains. Notre étude a également une portée méthodologique puisqu'elle met en regard différentes approches afin d'évaluer les apports combinés et les limites respectives dans un contexte précis et développe notamment un nouveau protocole d'utilisation de données acquises par ablation laser. Par le biais des avancées récentes de la recherche sur le plan technique et méthodologique, de nombreuses questions archéo-anthropologiques sont ainsi abordées et discutées, offrant un important corpus de comparaison dans le paysage chronoculturel du Néolithique français et limitrophe ainsi qu'à plus vaste échelle dans le contexte disciplinaire de la biogéochimie appliquée à l'archéologie.

Quoi qu'il en soit l'interprétation de ces résultats doit se faire sans jamais perdre de vue la problématique principale et la substance du sujet de recherche qu'est l'humain, la variabilité biologique et la part symbolique de ses choix. Au delà des aspects pratiques, les dimensions immatérielle et spirituelles ont sans doute porté nombre de décisions, d'évolutions. Les nombreux exemples ethnologiques nous présentent la grande diversité toute en nuances et en subtilités des pratiques socioculturelles au sens large. Si nous tentons de reconstituer les modes de vie et les gestes du passé, c'est avant tout pour comprendre d'où nous venons et quel(s) moteur(s) guide(nt) l'humain dans ses choix pour le futur. N'oublions pas que les interprétations scientifiques se font sans cesse à travers le prisme de notre culture et de nos connaissances. Un grand nombre de paramètres nous sont inconnus et le resteront à jamais, c'est aussi ce qui fait la fascination des mystères du passé. Mais pour tenter d'en percevoir les contours et de mieux comprendre qui nous sommes, chaque indice compte.



## Bibliographie

- ABBO, S., SARANGA, Y., PELEG, Z., KEREM, Z., LEV-YADUN, S. & GOPHER, A. 2009. Reconsidering domestication of legumes versus cereals in the ancient near east. *Q Rev Biol* 84(1):29-50.
- ÅBERG, G., FOSSE, G. & STRAY, H. 1998. Man, nutrition and mobility: A comparison of teeth and bone from the Medieval era and the present from Pb and Sr isotopes. *Science of The Total Environment* 224(1):109-119.
- ADAMS, D.M., RALSTON, C.E., SUSSMAN, R.A., HEIM, K. & BETHARD, J.D. 2019. Impact of population-specific dental development on age estimation using dental atlases. *American Journal of Physical Anthropology* 168(1):190-199.
- AGUILERA, M., ZECH-MATTERNE, V., LEPETZ, S. & BALASSE, M. 2018. Crop Fertility Conditions in North-Eastern Gaul During the La Tène and Roman Periods: A Combined Stable Isotope Analysis of Archaeobotanical and Archaeozoological Remains. *Environmental Archaeology* 23(4):323-337.
- ALAGICH, R., GARDEISEN, A., ALONSO, N., ROVIRA, N. & BOGAARD, A. 2018. Using stable isotopes and functional weed ecology to explore social differences in early urban contexts: The case of Lattara in mediterranean France. *Journal of Archaeological Science* 93:135-149.
- ALI, M.A.M., EL TINAY, A.H. & ABDALLA, A.H. 2003. Effect of fermentation on the in vitro protein digestibility of pearl millet. *Food Chemistry* 80(1):51-54.
- ALLARD, P., AUGEREAU, A., BEUGNIER, V., BOSTYN, F., CASPAR, J.-P., GILIGNY, F., HAMARD, D., MARTIAL, E. & PHILIBERT, S. 2004. Fonction des outillages lithiques dans le Bassin parisien au néolithique. *XXVe Congrès Préhistorique de France, Nanterre : France (2000)*
- ALLARD, P., DUBOULOZ, J. & HACHEM, L. 1997. Premiers éléments sur cinq tombes rubanées à Berry-au-Bac (Aisne-France): principaux apports à l'étude du rituel funéraire danubien occidental. *Le Néolithique danubien et ses marges entre Rhin et Seine*:31-43.
- ALLEN, M.R. & BURR, D.B. 2014. Chapter 4 - Bone Modeling and Remodeling. In: BURR, D.B. & ALLEN, M.R., editors. *Basic and Applied Bone Biology*. San Diego: Academic Press. p 75-90.
- ALLEN, P.J., HOBBS, J.A., CECH JR., J.J., VAN EENENNAAM, J.P. & DOROSHOV, S.I. 2009. Using Trace Elements in Pectoral Fin Rays to Assess Life History Movements in Sturgeon: Estimating Age at Initial Seawater Entry in Klamath River Green Sturgeon. *Transactions of the American Fisheries Society* 138(2):240-250.
- ALQAHTANI, S.J., HECTOR, M.P. & LIVERSIDGE, H.M. 2010. Brief communication: The London atlas of human tooth development and eruption. *American Journal of Physical Anthropology* 142(3):481-490.
- ALT, K.W., TEJEDOR RODRÍGUEZ, C., NICKLISCH, N., ROTH, D., SZÉCSÉNYI NAGY, A., KNIPPER, C., LINDAUER, S., HELD, P., DE LAGRÁN, Í.G.M., SCHULZ, G., SCHUERCH, T., THIERINGER, F., BRANTNER, P., BRANDT, G., ISRAEL, N. *et al.* . 2020. A massacre of early Neolithic farmers in the high Pyrenees at Els Trocs, Spain. *Scientific Reports* 10(1):2131.
- ALT, K.W., ZESCH, S., GARRIDO-PENA, R., KNIPPER, C., SZÉCSÉNYI-NAGY, A., ROTH, C., TEJEDOR-RODRÍGUEZ, C., HELD, P., GARCÍA-MARTÍNEZ-DE-LAGRÁN, Í., NAVITAINUCK, D., ARCUSA MAGALLÓN, H. & ROJO-GUERRA, M.A. 2016. A Community in Life and Death: The Late Neolithic Megalithic Tomb at Alto de Reinoso (Burgos, Spain). *PLoS ONE* 11(1):e0146176.
- ALVES, E.Q., MACARIO, K., ASCOUGH, P. & BRONK RAMSEY, C. 2018. The Worldwide Marine Radiocarbon Reservoir Effect: Definitions, Mechanisms, and Prospects. *Reviews of Geophysics* 56(1):278-305.
- AMBROSE, S.H. 1990. Preparation and characterization of bone and tooth collagen for isotopic analysis. *Journal of Archaeological Science* 17(4):431-451.
- AMBROSE, S.H. 1991. Effects of diet, climate and physiology on nitrogen isotope abundances in terrestrial foodwebs. *Journal of Archaeological Science* 18(3):293-317.
- AMBROSE, S.H. 1993. Isotopic analysis of paleodiets: methodological and interpretive considerations. In: STANDFORD, M., editor. *Investigations of ancient human tissue*. Langhorne: Gordon and Breach Science Publishers. p 59-130.

- AMBROSE, S.H. 2002. Controlled diet and climate experiments on nitrogen isotope ratios of rats. In: AMBROSE, S.H. & KATZENBERG, M.A., editors. *Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers. p 243-259.
- AMBROSE, S.H., BUIKSTRA, J. & KRUEGER, H.W. 2003. Status and gender differences in diet at Mound 72, Cahokia, revealed by isotopic analysis of bone. *Journal of Anthropological Archaeology* 22(3):217-226.
- AMBROSE, S.H., BUTLER, B.M., HANSON, D.B., HUNTER-ANDERSON, R.L. & KRUEGER, H.W. 1997. Stable isotopic analysis of human diet in the Marianas Archipelago, Western Pacific. *American Journal of Physical Anthropology* 104(3):343-361.
- AMBROSE, S.H. & KRIGBAWM, J. 2003. Bone chemistry and bioarchaeology. *Journal of Anthropological Archaeology* 22:191-199.
- AMBROSE, S.H. & NORR, L. 1993. Experimental evidence for the relationship of the carbon isotope ratios of whole diet and dietary protein to those of bone collagen and carbonate. In: LAMBERT, J.B. & GRUPE, G., editors. *Prehistoric human bone Archaeology at the molecular level*. Berlin: Springer-Verlag. p 1-37.
- AMMERMAN, A.J. & CAVALLI-SFORZA, L.L. 1971. Measuring the Rate of Spread of Early Farming in Europe. *Man* 6(4):674-688.
- AMMERMAN, A.J. & CAVALLI-SFORZA, L.L. 1979. 12 - The Wave of Advance Model for the Spread of Agriculture in Europe. In: RENFREW, C. & COOKE, K.L., editors. *Transformations : Mathematical Approaches to Culture Change*: Academic Press. p 275-293.
- AN, J., LEEUWENBURGH, S., WOLKE, J. & JANSEN, J. 2016. 4 - Mineralization processes in hard tissue: Bone. In: APARICIO, C. & GINEBRA, M.-P., editors. *Biomineralization and Biomaterials*. Boston: Woodhead Publishing. p 129-146.
- ANSES. 2020. Table de composition nutritionnelle des aliments Ciqual. In: AGENCE NATIONALE DE SECURITE SANITAIRE DE L'ALIMENTATION, D.L.E.E.D.T., editor.
- ANTOLÍN, F. & JACOMET, S. 2015. Wild fruit use among early farmers in the Neolithic (5400–2300 cal bc) in the north-east of the Iberian Peninsula: an intensive practice? *Veget Hist Archaeobot* 24(1):19-33.
- ARBOGAST, R.-M. 1991. Premiers élevages néolithiques du Nord-est de la France. *Anthropozoologica*(14-15):49-53.
- ARBOGAST, R.-M. 2013. Food offerings in graves from the Danubian Neolithic (5500–4900 B.C.) in the upper Rhine valley. *Anthropozoologica* 48(2):255-261, 257.
- ARBOGAST, R.-M., BALASSE, M., OLLIVIER, M., TRESSET, A., CUCCHI, T., BRÉHARD, S., BLAISE, E. & BEDAULT, L. 2018. Des animaux et des hommes au Néolithique. In: DOMINIQUE, G. & JEAN, G., editors. *La Protohistoire de la France*. Paris: Hermann. p 153-169.
- ARBOGAST, R.-M. & JEUNESSE, C. 2013. Early Neolithic pastoral traditions and cultural groups in northern France. In: SUE COLLEDGE, J.C., KEITH DOBNEY, KATIE MANNING, STEPHEN SHENNAN, editor. *The Origins and Spread of Domestic Animals in Southwest Asia and Europe*. Left Coast Press ed: Institute of Archaeology, University College London. p 271-282.
- ARD, V. & WELLER, O. 2012. Les vases de «type Champ-Durand» : témoins d'une exploitation du sel au Néolithique récent dans le Marais poitevin. *L'enceinte néolithique de Champ-Durand à Nieul-sur-l'Autise (Vendée), Chauvigny, APC (Mémoire; XLIV)*:319-343.
- ARGANT, J. 2014. La copropalynologie: coprolithes et paléoenvironnement. *Bulletin du Musée d'Anthropologie préhistorique de Monaco* 54:39-44.
- ARGANT, J. & ARGANT, A. 1996. La Bourgogne entre les bassins rhénan, rhodanien et parisien : apport de la palynologie. In: DUHAMEL, P., editor. *La Bourgogne entre les bassins rhénan, rhodanien et parisien : carrefour ou frontière ?* Dijon: ARTEHIS Éditions. p 79-83.
- ARNESON, L.S. & MACAVOY, S.E. 2005. Carbon, nitrogen, and sulfur diet-tissue discrimination in mouse tissues. *Canadian Journal of Zoology* 83(7):989-995.
- ARNOLD, B. 1998. Les pirogues néolithiques de Paris-Bercy. Traces de travail et techniques de façonnage. *Archaeonautica* 14:73-78.
- ARORA, M., HARE, D., AUSTIN, C., SMITH, D.R. & DOBLE, P. 2011. Spatial distribution of manganese in enamel and coronal dentine of human primary teeth. *Science of The Total Environment* 409(7):1315-1319.

- ARUNA, T.E., AWORH, O.C., RAJI, A.O. & OLAGUNJU, A.I. 2017. Protein enrichment of yam peels by fermentation with *Saccharomyces cerevisiae* (BY4743). *Annals of Agricultural Sciences* 62(1):33-37.
- ASCOUGH, P., COOK, G. & DUGMORE, A. 2005. Methodological approaches to determining the marine radiocarbon reservoir effect. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 29(4):532-547.
- ASH, A., FRANCKEN, M., PAP, I., TVRDÝ, Z., WAHL, J. & PINHASI, R. 2016. Regional differences in health, diet and weaning patterns amongst the first Neolithic farmers of central Europe. *Scientific Reports* 6:29458-29458.
- AUGEREAU, A. 2004. *L'industrie du silex du Ve au IVe millénaire dans le sud-est du Bassin parisien : Rubané, Villeneuve-Saint-Germain, Cerny et groupe de Noyen*. Paris: Éditions de la Maison des sciences de l'homme. 220 p.
- AUGEREAU, A. 2010. Grandes enceintes et rites funéraires au Néolithique moyen. In: DEMOULE, J.-P., editor. *La révolution néolithique dans le monde*. Paris: CNRS Éditions. p 399-410.
- AUGEREAU, A. 2019. Change and continuity: Gender and flint knapping activities during the Neolithic in the Paris basin. In: KOCH, J.K. & KIRLEIS, W., editors. *Gender transformations in prehistoric and archaic societies*. Leiden: Sidestone Press. p 435-458.
- AUGEREAU, A. 2021a. *Femmes néolithiques. Le genre dans les premières sociétés agricoles*: CNRS Éditions. 304 p.
- AUGEREAU, A. 2021b. Funerary Practices as a Testimony of Ideology in Western Linearbandkeramik Culture. *Open Archaeology* 7:953-971.
- AUGEREAU, A. inédit. L'industrie lithique de Gurgy "Les Noisats" (Yonne). Campagnes 2004-2006. In: ROTTIER, S., editor. *Rapport d'opération archéologique programmée (2007)*. Dijon: SRA Bourgogne.
- AUGEREAU, A. & CHAMBON, P. 2011. *Les occupations néolithiques de Macherin à Monéteau (Yonne)*. Paris: Société Préhistorique Française. 422 p.
- AUGEREAU, A., CHAMBON, P., GARMOND, N., MEUNIER, K. & BEECHING, A. 2016. Le Chasséen dans l'Yonne est-il aussi ancien qu'à Chassey ? In: PERRIN, T., CHAMBON, P., GIBAJA, J.F. & GOUDE, G., editors. *Le Chasséen, des Chasséens... Retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortaillod, Lagozza Actes du colloque international tenu à Paris (France) du 18 au 20 novembre 2014*. Toulouse: Archives d'Ecologie Préhistorique. p 471-490.
- AUGEREAU, A., CHAMBON, P. & SIDERA, I. 2003. Nature et statut des mobiliers funéraires de la nécropole chasséenne de Monéteau (Yonne). In: CHAMBON, P. & LECLERC, J., editors. *Les pratiques funéraires néolithiques avant 3500 av J-C en France et dans les régions limitrophes Table Ronde SPF*. Table Ronde de Saint-Germain-en-Laye (15-17 juin 2001): Société préhistorique française (Mémoire 33). p 131-145.
- AURENCHÉ, O. & KOZŁOWSKI, S.K. 2015. *La naissance du Néolithique au Proche-Orient*: CNRS Éditions. 416 p.
- AUSTIN, C., SMITH, T.M., BRADMAN, A., HINDE, K., JOANNES-BOYAU, R., BISHOP, D., HARE, D.J., DOBLE, P., ESKENAZI, B. & ARORA, M. 2013. Barium distributions in teeth reveal early-life dietary transitions in primates. *Nature* 498(7453):216-219.
- AUXIETTE, G. & HACHEM, L. 2007. Une histoire des bovines durant les cinq millénaires précédant notre ère: l'exemple de la vallée de l'Aisne et de la Vesle (France). *Ethnozootechnie* 79:127-135.
- BAILON, S. 2005. Chapitre IX. Les amphibiens du néolithique moyen du Camp de Chassey : un nouvel exemple de la consommation de grenouilles dans le Néolithique français. In: THEVENOT, J.-P., editor. *Le camp de Chassey (Chassey-le-Camp, Saône-et-Loire) : Les niveaux néolithiques du rempart de « la Redoute »*. Dijon: ARTEHIS Éditions. p 423-428.
- BAKELS, C. 1997. Le blé dans la culture de Cerny. In: CONSTANTIN, C., MORDANT, D. & SIMONIN, D., editors. *La culture de Cerny Nouvelle économie, nouvelle société au Néolithique Actes du Colloque International de Nemours, 1994*: Mémoires du Musée de Préhistoire d'Ile-de-France. p 315-317.

- BAKELS, C. 2008. L'agriculture rubanée/post-rubanée, continuité ou discontinuité. *Fin des traditions danubiennes dans le Néolithique du Bassin parisien et de la Belgique (5100–4700 av JC) Autour des recherches de Claude Constantin*:191-196.
- BAKER, O., COQUEUGNIOT, H., DUTOUR, O., CHAMEL, B., COQUEUGNIOT, É., STORDEUR, D., LE MORT, F., KHAWAM, R., PERRIN, P., PALFI, G. & GOURICHON, L. 2017. Prehistory of human tuberculosis: Earliest evidence from the onset of animal husbandry in the Near East. *Paléorient* 43(2):35-51.
- BALASSE, M. 1999. *De l'exploitation du lait au Néolithique moyen en Europe tempérée : examen des modalités de sevrage des bovins, par l'analyse isotopique des ossements archéologiques* [PhD Thesis]. Grenoble: Université Paris VI. 244 p.
- BALASSE, M. 2003a. Keeping the young alive to stimulate milk production? Differences between cattle and small stock. *Anthropozoologica* 37:3-10.
- BALASSE, M. 2003b. Potential biases in sampling design and interpretation of intra-tooth isotope analysis. *International Journal of Osteoarchaeology* 13(1-2):3-10.
- BALASSE, M. & AMBROSE, S.H. 2005. Distinguishing sheep and goats using dental morphology and stable carbon isotopes in C4 grassland environments. *Journal of Archaeological Science* 32(5):691-702.
- BALASSE, M., BOCHERENS, H. & MARIOTTI, A. 1999. Intra-bone variability of collagen and apatite isotopic composition used as evidence of a change of diet. *Journal of Archaeological Science* 26(6):593-598.
- BALASSE, M., BOCHERENS, H., MARIOTTI, A. & AMBROSE, S.H. 2001. Detection of dietary changes by intra-tooth carbon and nitrogen isotopic analysis: an experimental study of dentine collagen of cattle (*Bos taurus*). *Journal of Archaeological Science* 28:235-245.
- BALASSE, M., BOCHERENS, H., TRESSET, A., MARIOTTI, A. & VIGNE, J.-D. 1997. Émergence de la production laitière au Néolithique ? Contribution de l'analyse isotopique d'ossements de bovins archéologiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Séries 2, Sciences de la terre et des planètes* 325(12):1005-1010.
- BALASSE, M., BOURY, L., UGHETTO-MONFRIN, J. & TRESSET, A. 2012. Stable isotope insights ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ) into cattle and sheep husbandry at Bercy (Paris, France, 4th millennium BC): birth seasonality and winter leaf foddering. *Environmental Archaeology* 17(1):29-44.
- BALASSE, M., GILLIS, R., ŽIVALJEVIĆ, I., BERTHON, R., KOVAČIKOVÁ, L., FIORILLO, D., ARBOGAST, R.-M., BALASESCU, A., BRÉHARD, S., NYERGES, É., DIMITRIJEVIĆ, V., BÁNFFY, E., DOMBOROCZKI, L., MARCINIÁK, A., OROSS, K. *et al.* . 2021. Seasonal calving in European Prehistoric cattle and its impacts on milk availability and cheese-making. *Scientific Reports* 11:8185.
- BALASSE, M., MAINLAND, I. & RICHARDS, M.P. 2009. Stable isotope evidence for seasonal consumption of marine seaweed by modern and archaeological sheep in the Orkney archipelago (Scotland). *Environmental Archaeology* 14(1):1-14.
- BALASSE, M. & TRESSET, A. 2002. Early weaning of neolithic domestic cattle (Bercy, France) revealed by intra-tooth variation in nitrogen isotope ratios. *Journal of Archaeological Science* 29:853-859.
- BALASSE, M., TRESSET, A., BĂLĂȘESCU, A., BLAISE, E., TORNERO, C., GANDOIS, H., FIORILLO, D., NYERGES, É.Á., FRÉMONDEAU, D., BANFFY, E. & IVANOVA, M. 2017. Animal Board Invited Review: Sheep birth distribution in past herds: a review for prehistoric Europe (6th to 3rd millennia BC). *animal* 11(12):2229-2236.
- BALASSE, M., TRESSET, A., BOCHERENS, H., MARIOTTI, A. & VIGNE, J.-D. 2000. Un abattage "post-lactation" sur des bovins domestiques néolithiques. Etude isotopique des restes osseux du site de Bercy (Paris, France). *Anthropozoologica* 31(31):39-48.
- BALTER, V. 2001. *Les rapports Sr/Ca et Ba/Ca dans les phosphates biogéniques : Applications palé-écologiques et paléo-anthropologiques* [PhD Thesis]: Université Bordeaux 1. 154 p.
- BALTER, V. 2004. Allometric constraints on Sr/Ca and Ba/Ca partitioning in terrestrial mammalian trophic chains. *Oecologia* 139(1):83.
- BALTER, V. 2015. Géochimie de la diagenèse. In: BALASSE, M., BRUGAL, J.-P., DAUPHIN, Y., GEIGL, E.-M., OBERLIN, C. & REICHE, I., editors. *Messages d'os : Archéométrie du squelette animal et humain*. Paris: Éditions des Archives Contemporaines. p 163-175.

- BALTER, V., BOCHERENS, H., PERSON, A., LABOURDETTE, N., RENARD, M. & VANDERMEERSCH, B. 2002a. Ecological and physiological variability of Sr/Ca and Ba/Ca in mammals of West European mid-Würmian food webs. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 186(1–2):127-143.
- BALTER, V., BRAGA, J., TELOUK, P. & THACKERAY, J.F. 2012. Evidence for dietary change but not landscape use in South African early hominins. *Nature* 489(7417):558-560.
- BALTER, V. & LÉCUYER, C. 2010. Determination of Sr and Ba partition coefficients between apatite from fish (*Sparus aurata*) and seawater: The influence of temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74(12):3449-3458.
- BALTER, V., PERSON, A., LABOURDETTE, N., DRUCKER, D., RENARD, M. & VANDERMEERSCH, B. 2001. Les Néandertaliens étaient-ils essentiellement carnivores ? Résultats préliminaires sur les teneurs en Sr et en Ba de la paléobiocène mammalienne de Saint-Césaire. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 332(1):59-65.
- BALTER, V., SALIÈGE, J.F., BOCHERENS, H. & PERSON, A. 2002b. Evidence of physico-chemical and isotopic modifications in archaeological bones during controlled acid etching. *Archaeometry* 44(3):329-336.
- BALTER, V. & SIMON, L. 2006. Diet and behavior of the Saint-Césaire Neanderthal inferred from biogeochemical data inversion. *Journal of Human Evolution* 51(4):329-338.
- BALTER, V., SIMON, L., FOUILLET, H. & LÉCUYER, C. 2006. Box-modeling of  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  in mammals. *Oecologia* 147(2):212-222.
- BARNES, C. & JENNINGS, S. 2007. Effect of temperature, ration, body size and age on sulphur isotope fractionation in fish. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 21(8):1461-1467.
- BARONE, R. 1976. *Anatomie comparée des mammifères domestiques*. Paris: Vigot Freres.
- BEAUDOIN, G., TAYLOR, B.E., RUMBLE, D. & THIEMENS, M. 1994. Variations in the sulfur isotope composition of troilite from the Cañon Diablo iron meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58(19):4253-4255.
- BEAUMONT, J., ATKINS, E.-C., BUCKBERRY, J., HAYDOCK, H., HORNE, P., HOWCROFT, R., MACKENZIE, K. & MONTGOMERY, J. 2018. Comparing apples and oranges: Why infant bone collagen may not reflect dietary intake in the same way as dentine collagen. *American Journal of Physical Anthropology* 167(3):524-540.
- BEAUMONT, J., GLEDHILL, A.R., LEE-THORP, J.A. & MONTGOMERY, J. 2013a. Childhood diet: a closer examination of the evidence from dental tissues using stable isotope analysis of incremental human dentine. *Archaeometry* 55:277-295.
- BEAUMONT, J., GLEDHILL, A.R., LEE-THORP, J.A. & MONTGOMERY, J. 2013b. Protocol for sectioning human dentine: expanded from Methods 1 and 2. Written as a response to questions arising from: Beaumont J, Gledhill A, Lee-Thorp J and Montgomery JA (2013) Childhood diet: a closer examination of the evidence from dental tissues using stable isotope analysis of incremental human dentine. *Archaeometry*. 55(2): 277-295.
- BEAUMONT, J. & MONTGOMERY, J. 2015. Oral histories: a simple method of assigning chronological age to isotopic values from human dentine collagen. *Annals of Human Biology* 42(4):407-414.
- BEDAULT, L. 2009. First reflections on the exploitation of animals in Villeneuve-Saint-Germain society at the end of the early Neolithic in the Paris Basin (France) In: HOFMANN, D. & BICKLE, P., editors. *Creating communities: New advances in central European Neolithic research*. Oxford: Oxbow Books. p 111-131.
- BEDAULT, L. 2012. *L'exploitation des ressources animales dans la société du Néolithique ancien du Villeneuve-Saint-Germain en Bassin parisien : synthèse des données archéozoologiques* [PhD Thesis]: Université de Paris 1 – Panthéon-Sorbonne.
- BEDAULT, L. & HACHEM, L. 2008. Recherches sur les sociétés du Néolithique danubien à partir du Bassin parisien : approche structurelle des données archéozoologiques. In: BURNEZ-LANOTTE, L., ILETT, M. & ALLARD, P., editors. *Fin des traditions danubiennes dans le Néolithique du Bassin parisien et de la Belgique (5100-4700 BC) – Autour des recherches de Claude Constantin*: Société Préhistorique Française. p 222-243.
- BEECHING, A. 2003. Mobilité et société néolithiques dans les Alpes occidentales et la France méridionale. *Preistoria alpina* 39:175-187.

- BEECHING, A. & SENEPART, I. 2009. *De la maison au village. L'habitat néolithique dans le Sud de la France et le Nord-Ouest méditerranéen ACTES DE LA TABLE RONDE des 23 et 24 mai 2003 Marseille/Musée d'Histoire de la Ville de Marseille (Séance de la SPF): Société Préhistorique Française.*
- BENTLEY, R.A. 2006. Strontium isotopes from the earth to the archeological skeleton : a review. *Journal of Archaeological Method and Theory* 13(3):135-187.
- BENTLEY, R.A. 2013. Mobility and the diversity of Early Neolithic lives: Isotopic evidence from skeletons. *Journal of Anthropological Archaeology* 32(3):303-312.
- BENTLEY, R.A., BICKLE, P., FIBIGER, L., NOWELL, G.M., DALE, C.W., HEDGES, R.E.M., HAMILTON, J., WAHL, J., FRANCKEN, M., GRUPE, G., LENNEIS, E., TESCHLER-NICOLA, M., ARBOGAST, R.-M., HOFMANN, D. & WHITTLE, A. 2012. Community differentiation and kinship among Europe's first farmers. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(24):9326-9330.
- BENTLEY, R.A. & KNIPPER, C. 2005. Transhumance at the early Neolithic settlement at Vaihingen (Germany). *Antiquity* 76.
- BENTLEY, R.A., KRAUSE, R., PRICE, T.D. & KAUFMANN, B. 2003. Human mobility at the Early Neolithic settlement of Vaihingen, Germany: evidence from strontium isotope analysis. *Archaeometry* 45(3):471-486.
- BENTLEY, R.A., PIETRUSEWSKY, M., DOUGLAS, M. & ATKINSON, T. 2005. Matrilocality during prehistoric transition to agriculture in Thailand? *Antiquity* 79(306):865-881.
- BENTLEY, R.A., PRICE, T.D., LÜNING, J., GRONENBORN, D., WAHL, J. & FULLAGAR, P.D. 2002. Prehistoric migration in Europe: strontium isotope analysis of early neolithic skeletons. *Current Anthropology* 43(5):799-804.
- BENTLEY, R.A., PRICE, T.D. & STEPHAN, E. 2004. Determining the 'local'  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  range for archaeological skeletons: a case study from Neolithic Europe. *Journal of Archaeological Science* 31:365-375.
- BERGSTRÖM, A., FRANTZ, L., SCHMIDT, R., ERSMARK, E., LEBRASSEUR, O., GIRDLAND-FLINK, L., LIN, A.T., STORÅ, J., SJÖGREN, K.-G., ANTHONY, D., ANTIPINA, E., AMIRI, S., BAR-OZ, G., BAZALIISKII, V.I., BULATOVIĆ, J. *et al.* . 2020. Origins and genetic legacy of prehistoric dogs. *Science* 370(6516):557-564.
- BERNARD, V., PETREQUIN, P., WELLER, O., BAILLY, G., BOURQUIN-MIGNOT, C. & RICHARD, H. 2008. Captages en bois à la fin du Néolithique: les Fontaines Salées de Saint-Père-sous-Vézelay (Yonne, France). Presses Universitaires de Franche-Comté.
- BEYNEIX, A. 2001. Aux origines de la guerre : actes de violence et massacres dans le néolithique européen. *Revue des Études Anciennes*:329-342.
- BEYNEIX, A. 2007. Les comportements funéraires au Néolithique en France méridionale : une vue d'ensemble. *L'anthropologie* 111:68-78.
- BEYNEIX, A. 2016. Les manifestations de prestige au Néolithique. *Les Nouvelles de l'archéologie*(142):63.
- BICKLE, P. 2013. Of Time and the House: the Early Neolithic Communities of the Paris Basin and Their Domestic Architecture. In: HOFMANN, D. & SMYTH, J., editors. *Tracking the Neolithic House in Europe: Sedentism, Architecture and Practice*. New York, NY: Springer New York. p 151-181.
- BICKLE, P. 2016. Capturing diversity in Neolithic diets. In: AMKREUTZ, L., HAACK, F., HOFMANN, D. & VAN WIJK, I., editors. *Something Out of the Ordinary? Interpreting Diversity in the Early Neolithic Linearbandkeramik and Beyond*: Cambridge Scholars Publishing. p 89.
- BICKLE, P. 2018. Stable isotopes and dynamic diets: The Mesolithic-Neolithic dietary transition in terrestrial central Europe. *Journal of Archaeological Science: Reports* 22:444-451.
- BICKLE, P. 2019. Thinking Gender Differently: New Approaches to Identity Difference in the Central European Neolithic. *Cambridge Archaeological Journal* 30:1-18.
- BICKLE, P., CHAN, B., CZERNIAK, L., PYZEL, J. & TSORAKI, C. 2016. At Home in the Neolithic: Understanding Diversity in Neolithic Houses and Households. *Open Archaeology* 2:410-416.
- BICKLE, P. & FIBIGER, L. 2014. Ageing, Childhood and Social Identity in the Early Neolithic of Central Europe. *European Journal of Archaeology* 17:208-228.
- BICKLE, P. & WHITTLE, A. 2013. *The first farmers of central Europe: diversity in LBK lifeways*. Oxford: Oxbow Books.

- BINDER, D., LEPERE, C. & MAGGI, R. 2008. Épipaléolithique et Néolithique dans l'arc liguro-provençal: bilan et perspectives de recherche. *Bulletin du Musée d'Anthropologie Préhistorique de Monaco, Supplément* 1:49-62.
- BINDER, D. & MAGGI, R. 2001. Le Néolithique ancien de l'arc liguro-provençal. *Bulletin de la Société préhistorique française* 98(3):411-422.
- BINDER, D., PERLES, C., INIZAN, M.-L. & LECHEVALLIER, M. 1990. Stratégies de gestion des outillages lithiques au Néolithique. *Paléo, Revue d'Archéologie Préhistorique* 2:257-283.
- BIRKNER, R. 1980. *L'image radiologique typique de squelette: aspect normal et variantes chez l'adulte et l'enfant; pour médecins, étudiants et manipulateurs*. Paris: Maloine. 564 p.
- BISHOP, K.G., GARVIE-LOK, S., HAAGSMA, M., MACKINNON, M. & KARAPANOU, S. 2020. Mobile animal management in the Mediterranean: Investigating Hellenistic (323-31 BCE) husbandry practices in Thessaly, Greece using  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , and  $87\text{Sr}/86\text{Sr}$  recorded from sheep and goat tooth enamel. *Journal of Archaeological Science: Reports* 31:102331.
- BLANKE, C.M., CHIKARAISHI, Y., TAKIZAWA, Y., STEFFAN, S.A., DHARAMPAL, P.S. & VANDER ZANDEN, M.J. 2017. Comparing compound-specific and bulk stable nitrogen isotope trophic discrimination factors across multiple freshwater fish species and diets. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 74(8):1291-1297.
- BLAU, N., VAN SPRONSEN, F.J. & LEVY, H.L. 2010. Phenylketonuria. *Lancet* 376(9750):1417-1427.
- BOCHERENS, H. 1992. *Biogéochimie isotopique ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) et paléontologie des vertébrés : application à l'étude des réseaux trophiques révolus et des paléoenvironnements* [PhD Thesis]. Paris: Université Paris VI. 317 p.
- BOCHERENS, H. 1999. Isotopes stables et reconstitution du régime alimentaire des hominidés fossiles: une revue. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 11(3-4):261-287.
- BOCHERENS, H., BILLIOU, D. & TRESSET, A. 2005. Approche biogéochimique ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) de l'exploitation de l'environnement par les humains. In: GILIGNY, F., editor. *Louviers "La Vilette" (Eure) : un site néolithique moyen en zone humide*. Rennes: Presses Universitaires de Rennes. p 265-269.
- BOCHERENS, H. & DRUCKER, D. 2003. Trophic level isotopic enrichment of carbon and nitrogen in bone collagen: case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems. *International Journal of Osteoarchaeology* 13:46-53.
- BOCHERENS, H., DRUCKER, D.G. & TAUBALD, H. 2011. Preservation of bone collagen sulphur isotopic compositions in an early Holocene river-bank archaeological site. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 310(1-2):32-38.
- BOCHERENS, H. & MARIOTTI, A. 2002. Paléoenvironnements et paléoalimentation : biogéochimie isotopique des vertébrés. In: MISKOWSKY, J.L., editor. *Géologie de la Préhistoire, méthodes, techniques, applications*. Paris: Géopré - Presses Universitaires de Perpignan. p 1323-1344.
- BOCHERENS, H., POLET, C. & TOUSSAINT, M. 2007. Palaeodiet of Mesolithic and Neolithic populations of Meuse Basin (Belgium): evidence from stable isotopes. *Journal of Archaeological Science* 34(1):10-27.
- BOCQUENTIN, F. 2013. Après la mort, avant l'oubli. *Les nouvelles de l'archéologie* 132:54-59.
- BOCQUENTIN, F., CHAMBON, P., LE GOFF, I., LECLERC, J., PARIAT, J.G., PEREIRA, G., THEVENET, C. & VALENTIN, F. 2010. De la récurrence à la norme: interpréter les pratiques funéraires en préhistoire. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 22(3):157-171.
- BOCQUENTIN, F., SELLIER, P. & MURAIL, P. 2005. Abrasion dentaire et travail spécialisé dans la population natoufienne de Mallaha (Israël). *Comptes Rendus PLEVOL* 4(4):351-357.
- BOCQUET-APPEL, J.-P. 2006. La transition démographique néolithique. In: GUILAINE, J., editor. *Populations néolithiques et environnement Séminaire du Collège de France*. Paris: Errance. p 11-20.
- BOCQUET-APPEL, J.-P. 2011. The Agricultural Demographic Transition During and After the Agriculture Inventions. *Current Anthropology* 52(S4):S497-S510.
- BOCQUET-APPEL, J.-P. & DUBOULOZ, J. 2003. Traces paléanthropologiques et archéologiques d'une transition démographique néolithique en Europe. *Bulletin de la Société préhistorique française* 100(4):699-714.
- BOCQUET, A. & NOËL, M. 1985. The Neolithic or Wood Age. *Endeavour* 9(1):34-41.

- BOËS, E., JEUNESSE, C., ARBOGAST, R.-M., LEFRANC, P., MAUVILLY, M., SCHNEIKERT, F. & SIDERA, I. 2007. Vendenheim Le haut du Coteau (Bas-Rhin) : remarques sur l'organisation interne d'une nécropole du Néolithique ancien danubien. In: BESSE, M., editor. *Sociétés néolithiques Des faits archéologiques aux fonctionnements socio-économiques*. Actes du 27<sup>e</sup> colloque interrégional sur le Néolithique (Neuchâtel, 1-2 octobre 2005), Lausanne: Cahiers d'archéologie romande, 108. p 279-283.
- BOGAARD, A., ARBOGAST, R.-M., EBERSBACH, R., FRASER, R.A., KNIPPER, C., KRAHN, C., SCHÄFER, M., STYRING, A. & KRAUSE, R. 2017. The Bandkeramik settlement of Vaihingen an der Enz, Kreis Ludwigsburg (Baden-Württemberg): an integrated perspective on land use, economy and diet. *Germania: Anzeiger der Römisch-Germanischen Kommission des Deutschen Archäologischen Instituts* 94.
- BOGAARD, A., FRASER, R., HEATON, T.H.E., WALLACE, M., VAIGLOVA, P., CHARLES, M., JONES, G., EVERSHED, R.P., STYRING, A.K., ANDERSEN, N.H., ARBOGAST, R.-M., BARTOSIEWICZ, L., GARDEISEN, A., KANSTRUP, M., MAIER, U. *et al.* . 2013. Crop manuring and intensive land management by Europe's first farmers. *P Natl Acad Sci USA* 110(31):12589-12594.
- BOGAARD, A., HEATON, T.H.E., POULTON, P. & MERBACH, I. 2007. The impact of manuring on nitrogen isotope ratios in cereals : archaeological implications for reconstruction of diet and crop management practices. *Journal of Archaeological Science* 34(3):335-343.
- BOGAARD, A., KRAUSE, R. & STRIEN, H.-C. 2011. Towards a social geography of cultivation and plant use in an early farming community: Vaihingen an der Enz, south-west Germany. *Antiquity* 85(328):395-416.
- BOL, R., OSTLE, N.J. & PETZKE, K.J. 2002. Compound specific plant amino acid  $\delta^{15}\text{N}$  values differ with functional plant strategies in temperate grassland. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165(6):661-667.
- BON, C. & MARSOLIER-KERGOAT, M.-C. 2021. Vous avez dit paléogénomique ? *Revue d'ethnoécologie* 19
- BONNABEL, L., PARESIS, C. & THOMASHAUSEN, L. 2003. Un groupe de tombes en contexte d'habitat Néolithique rubané à Ecriennes (Marne): Approche des gestes funéraires. In: CHAMBON, P. & LELERC, J., editors. *Pratiques funéraires du Néolithique ancien et moyen(en France et dans les régions limitrophes, entre 5000 et 3500 environ av J-C)*. Musée des Antiquités Nationales, Saint-Germain-en-Laye. 15, 16 et 17 juin 2001.: Société préhistorique française. p 13.
- BONNARDIN, S. 2009. *La parure funéraire des premières sociétés agro-pastorales des Bassins parisien et rhénan : Rubané, Hinkesltein et Villeneuve-Saint-Germain.*: Société préhistorique française. 322 p.
- BONNARDIN, S. inédit. La parure de Gurgy "Les Noisats" (Yonne). Approche technologique, typologique et fonctionnelle (campagnes 2006 et 2007). In: ROTTIER, S., editor. *Rapport d'opération archéologique programmée (2007)*. Dijon: SRA Bourgogne.
- BONNEMERE, P. & LEMONNIER, P. 2007. *Les tambours de l'oubli. La vie ordinaire et cérémonielle d'un peuple forestier de Papouasie / Drumming to forget : ordinary life and ceremonies among a Papua New Guinea Group of forest-dwellers, Papeete*. Paris: Au vent des îles - Musée du Quai Branly. 213 p.
- BONSALL, C., COOK, G.T., PICKARD, C., MCSWEENEY, K. & BARTOSIEWICZ, L. 2009. Dietary trends at the Mesolithic–Neolithic transition in North-west Europe. In: CROMBÉ, P., VAN STRYDONCK, M., SERGANT, J., BOUDIN, M. & BATS, M., editors. *Chronology and Evolution within the Mesolithic of North-West Europe*. Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing. p 539-562.
- BONSALL, C., LENNON, R., MCSWEENEY, K., STEWART, C., HARKNESS, D., BORONEAN, V., BARTOSIEWICZ, L., PAYTON, R. & CHAPMAN, J. 1997. Mesolithic and Early Neolithic in the Iron Gates: A Palaeodietary Perspective. *Journal of European Archaeology* 5(1):50-92.
- BORGES, G. inédit. *Optimisation du protocole d'extraction du collagène de poisson archéologique et analyse isotopique par GC-IRMS* [mémoire de Master 2]: Université P. et M. Curie – Centro Federal de Educação tecnologica de Minas Gerais. 95 p.
- BORIĆ, D. & PRICE, T.D. 2013. Strontium isotopes document greater human mobility at the start of the Balkan Neolithic. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110(9):3298-3303.

- BOSCH, J. & FAURA, J.M. 2003. Pratiques funéraires néolithiques dans la région des Bouches de l'Ebre. *Mémoires de la Société préhistorique française* 33:153-158.
- BÖSL, C., GRUPE, G. & PETERS, J. 2006. A Late Neolithic vertebrate food web based on stable isotope analyses. *International Journal of Osteoarchaeology* 16(4):296-315.
- BOSTYN, F., HACHEM, L., JOSEPH, F., HAMON, C. & MAIGROT, Y. 2016. L'apport du site d'habitat de Conty "ZAC Dunant" (Somme) à la connaissance de la culture de Cerny. *Bulletin de la Société préhistorique française* 113(2):291-332.
- BOSTYN, F., ILETT, M. & MEUNIER, K. 2018. Tendances évolutives de l'organisation des habitats au Néolithique ancien (Rubané/B-VSG) dans le bassin de la Seine. In: LEMERCIER, O., SENEPART, I., BESSE, M. & MORDANT, C., editors. *Habitations et habitat du Néolithique à l'âge du Bronze en France et ses marges Actes des IIe rencontres Nord-Sud de Préhistoire récente, Dijon, 19-21 novembre 2015*. Toulouse: Archives d'Ecologie Préhistorique. p 27-40.
- BOSTYN, F. & JOSEPH, F. 2007. Un niveau d'occupation Cerny à Longueil-Sainte-Marie « Le Barrage » (Oise). *Camps, enceintes et structures d'habitat néolithique en France septentrionale, Actes du 24e colloque interrégional sur le néolithique, Orléans 1999*. Tours Fédération pour l'édition de la Revue archéologique du Centre de la France, Supplément à la Revue archéologique du centre de la France. p 115-130.
- BOSTYN, F. & LANCHON, Y. 1992. Jablines le Haut Château (Seine et Marne). Une minière de silex au Néolithique. *Documents d'archéologie française*(35).
- BOUBY, L. 2000. Restituer les pratiques agraires par la carpologie archéologique. *Études rurales* 153-154:177-194.
- BOUBY, L., DIETSCH-SELLAMI, M.-F., MARTIN, L., MARINVAL, P. & WIETHOLD, J. 2018. Ressources végétales et économie de subsistance au Néolithique en France (6000-2000 av. J.-C.). In: JEAN-GUILAINE, D.G., editor. *La Protohistoire de la France*: Hermann. p 141-152.
- BOUBY, L., DURAND, F., ROUSSELET, O. & MANEN, C. 2019. Early farming economy in Mediterranean France: fruit and seed remains from the Early to Late Neolithic levels of the site of Taï (ca 5300–3500 cal bc). *Veget Hist Archaeobot* 28(1):17-34.
- BOUBY, L., MARINVAL, P., DURAND, F., FIGUEIRAL, I., BRIOIS, F., MARTZLUFF, M., THOMAS, P., NICOLAS, V., VAQUER, J., GUILAINE, J. & MANEN, C. 2020. Early Neolithic (ca. 5850-4500 cal BC) agricultural diffusion in the Western Mediterranean: An update of archaeobotanical data in SW France. *PLoS ONE* 15:e0230731.
- BOUDADI-MALIGNE, M., MALLYE, J.-B., FERRIÉ, J.-G., COSTAMAGNO, S., BARSHAY-SZMIDT, C., DEGUILLOUX, M.-F., PÉMONGE, M.-H. & BARBAZA, M. 2020. The earliest double dog deposit in the Palaeolithic record: The case of the Azilian level of Grotte-abri du Moulin (Troubat, France). *International Journal of Osteoarchaeology* 30(3):382-394.
- BOULESTIN, B., DUDAY, H. & SEMELIER, P. 1996. Les modifications artificielles sur l'os humain : une approche fondamentale du traitement des cadavres. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 8(3-4):261-273.
- BOULLIER, L. inédit. *Les sujets immatures de la nécropole de Gurgy, « Les Noisats » (Yonne)* [Mémoire de Master]: Université Bordeaux 1. 70 p.
- BOWES, R.E. & THORP, J.H. 2015. Consequences of employing amino acid vs. bulk-tissue, stable isotope analysis: a laboratory trophic position experiment. *Ecosphere* 6(1):art14.
- BOX, G.E.P. 1979. Robustness in the Strategy of Scientific Model Building. In: LAUNER, R.L. & WILKINSON, G.N., editors. *Robustness in Statistics*: Academic Press. p 201-236.
- BREART, B. 1984. Le site néolithique du " Champ de bataille" à l'Etoile (Somme): Une enceinte à fossé interrompu. *Revue archéologique de Picardie* 1(1):293-310.
- BREHARD, S. 2011. Le complexe chasséen vu par l'archéozoologie: révision de la dichotomie Nord-Sud et confirmation de la partition fonctionnelle au sein des sites méridionaux. *Bulletin de la Société préhistorique française* 108(1):73-92.
- BREHARD, S., BEDAULT, L., TRESSET, A. & VIGNE, J.-D. 2014. Contribution de l'archéozoologie à la connaissance du Chasséen : état des lieux 25 ans après le colloque de Nemours. *Le Chasséen, des Chasséens : retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortaillod, Lagozza Colloque international tenu à Paris (France) du 18 au 20 novembre 2014*

- BRÉHARD, S., BEECHING, A. & VIGNE, J.-D. 2010. Shepherds, cowherds and site function on middle Neolithic sites of the Rhône valley: An archaeozoological approach to the organization of territories and societies. *Journal of Anthropological Archaeology* 29(2):179-188.
- BRICKLEY, M. & IVES, R. 2008. *The Bioarchaeology of Metabolic Bone Disease*.
- BROOKS, J.R., BUCHMANN, N., PHILLIPS, S., EHLERINGER, B., EVANS, R.D., LOTT, M., MARTINELLI, L.A., POCKMAN, W.T., SANDQUIST, D., SPARKS, J.P., SPERRY, L., WILLIAMS, D. & EHLERINGER, J.R. 2002. Heavy and Light Beer: A Carbon Isotope Approach To Detect C4 Carbon in Beers of Different Origins, Styles, and Prices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50(22):6413-6418.
- BROTHWELL, D. 1965. *Digging Up Bones*. London: British Museum (Natural History). 194 p.
- BROWN, W., CHRISTOFFERSON, P., MASSLER, M. & WEISS, M. 1960. Postnatal tooth development in cattle. *American journal of veterinary research* 21:7-34.
- BRUZEK, J. 2002. A method for visual determination of sex using the human hip bone. *American Journal of Physical Anthropology* 117(2):157-168.
- BRŮŽEK, J., SANTOS, F., DUTAILLY, B., MURAIL, P. & CUNHA, E. 2017. Validation and reliability of the sex estimation of the human os coxae using freely available DSP2 software for bioarchaeology and forensic anthropology. *American Journal of Physical Anthropology* 164(2):440-449.
- BRUZEK, J., SCHMITT, A. & MURAIL, P. 2005. Identification biologique individuelle en paléanthropologie. Détermination du sexe et estimation de l'âge au décès à partir du squelette. *Origine et évolution humaine Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, Paris*:217-246.
- BUCKLEY, M., FRASER, S., HERMAN, J., MELTON, N.D., MULVILLE, J. & PÁLSDÓTTIR, A.H. 2014. Species identification of archaeological marine mammals using collagen fingerprinting. *Journal of Archaeological Science* 41(0):631-641.
- BUCKLEY, M., WHITCHER KANSA, S., HOWARD, S., CAMPBELL, S., THOMAS-OATES, J. & COLLINS, M. 2010. Distinguishing between archaeological sheep and goat bones using a single collagen peptide. *Journal of Archaeological Science* 37(1):13-20.
- BUDD, C., POTEKHINA, I. & LILLIE, M. 2020. Continuation of fishing subsistence in the Ukrainian Neolithic: diet isotope studies at Yasinovatka, Dnieper Rapids. *Archaeol Anthropol Sci* 12(2):64.
- BUDD, P., MILLARD, A., CHENERY, C., LUCY, S. & ROBERTS, C. 2004. Investigating population movement by stable isotope analysis: a report from Britain. *Antiquity* 78(299):127-141.
- BUDD, P., MONTGOMERY, J., BARREIRO, B. & THOMAS, R.G. 2000. Differential diagenesis of strontium in archaeological human dental tissues. *Applied Geochemistry* 15(5):687-694.
- BURGER, J., KIRCHNER, M., BRAMANTI, B., HAAK, W. & THOMAS, M.G. 2007. Absence of the lactase-persistence-associated allele in early Neolithic Europeans. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(10):3736-3741.
- BURGER, J., LINK, V., BLÖCHER, J., SCHULZ, A., SELL, C., POCHON, Z., DIEKMANN, Y., ŽEGARAC, A., HOFMANOVÁ, Z., WINKELBACH, L., REYNA-BLANCO, C.S., BIEKER, V., ORSCHIEDT, J., BRINKER, U., SCHEU, A. *et al.* . 2020. Low Prevalence of Lactase Persistence in Bronze Age Europe Indicates Ongoing Strong Selection over the Last 3,000 Years. *Current Biology* 30(21):4307-4315.e4313.
- BURTON, J. & PRICE, T. 1991. Paleodietary applications of barium values in bone. *Proceedings of the 27th International Symposium on Archaeometry, Heidelberg*
- BURTON, J.H. & PRICE, T.D. 1990. The ratio of barium to strontium as a paleodietary indicator of consumption of marine resources. *Journal of Archaeological Science* 17(5):547-557.
- BURTON, J.H. & PRICE, T.D. 2002. The Use and Abuse of Trace Elements for Paleodietary Research. In: AMBROSE, S.H. & KATZENBERG, M.A., editors. *Biogeochemical Approaches to Paleodietary Analysis*. Boston, MA: Springer US. p 159-171.
- BURTON, J.H., PRICE, T.D. & MIDDLETON, W.D. 1999. Correlation of Bone Ba/Ca and Sr/Ca due to Biological Purification of Calcium. *Journal of Archaeological Science* 26(6):609-616.
- BURTON, J.H. & WRIGHT, L.E. 1995. Nonlinearity in the relationship between bone Sr/Ca and diet: Paleodietary implications. *American Journal of Physical Anthropology* 96(3):273-282.

- CALANDRA, I. & MERCERON, G. 2016. Dental microwear texture analysis in mammalian ecology. *Mammal Review* 46(3):215-228.
- CAMPBELL, N.A. 1995. *Biologie*. Bruxelles: De Boeck. 1190 p.
- CAPO, R.C., STEWART, B.W. & CHADWICK, O.A. 1998. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods. *Geoderma* 82(1):197-225.
- CASANOVA, E., ARBOGAST, R.-M., DENAIRE, A., JEUNESSE, C., LEFRANC, P. & EVERSLED, R.P. 2020. Spatial and temporal disparities in human subsistence in the Neolithic Rhineland gateway. *Journal of Archaeological Science* 122:105215.
- CASANOVA, E.J., KNOWLES, T.D., BAYLISS, A., ROFFET-SALQUE, M., HEYD, V.M., PYZEL, J., CLABE, E., DOMBORÓCZKI, L., ILETT, M. & LEFRANC, P. 2021. Dating the emergence of dairying by the first farmers of Central Europe using  $^{14}\text{C}$  analysis of fatty acids preserved in pottery vessels. *P Natl Acad Sci USA*.
- CASEY, M.M. & POST, D.M. 2011. The problem of isotopic baseline: Reconstructing the diet and trophic position of fossil animals. *Earth-Science Reviews* 106(1–2):131-148.
- CASSEN, S., CHAIGNEAU, C., GRIMAUD, V., LESCOP, L., PÉTREQUIN, P., RODRÍGUEZ-RELLÁN, C. & VOUREH, M. 2019. Measuring distance in the monumentalities of the Neolithic in Western France. In: JOHANNES, M., MARTIN, H. & MARIA, W., editors. *Megaliths – Societies – Landscapes Early Monumentality and Social Differentiation in Neolithic Europe Volume 2 Proceedings of the international conference "Megaliths – Societies – Landscapes Early Monumentality and Social Differentiation in Neolithic Europe" (16th–20th June 2015) in Kiel*. Bonn: Verlag Dr. Rudolf Habelt GmbH. p 565-582.
- CASSIDY, L., Ó MAOLDÚIN, R., KADOR, T., LYNCH, A., JONES, C., WOODMAN, P., MURPHY, E., RAMSEY, G., DOWD, M., NOONAN, A., CAMPBELL, C., JONES, E., MATTIANGELI, V. & BRADLEY, D. 2020. A dynastic elite in monumental Neolithic society. *Nature* 582:384-388.
- CAUT, S., ANGULO, E. & COURCHAMP, F. 2009. Variation in discrimination factors ( $\Delta^{15}\text{N}$  and  $\Delta^{13}\text{C}$ ): the effect of diet isotopic values and applications for diet reconstruction. *Journal of Applied Ecology* 46(2):443-453.
- CAUVIN, J. 2010. *Naissance des divinités, naissance de l'agriculture : La Révolution des symboles au Néolithique*. Paris: CNRS éditions.
- CERVEL, M. inédit. *La nécropole Néolithique de Gurgy, « Les Noisats » (Yonne). Une première approche archéologique de la population adulte du site*. [Mémoire de Master]: Université Bordeaux 1. 75 p.
- CHAMBON, P. 2006. Des morts aux vivants. Population et société au Néolithique. In: GUILAINE, J., editor. *Populations néolithiques et environnement Séminaire du Collège de France*. Paris: Errance. p 23-40.
- CHAMBON, P. 2007. Des Chamblandes au centre de la France ? In: MOINAT, P. & CHAMBON, P., editors. *Les cistes de Chamblandes et la place des coffres dans les pratiques funéraires du Néolithique moyen occidental*. Actes du colloque de Lausanne (12-13 mai 2006): Cahiers d'archéologie romande (110) et Société préhistorique française (Mémoire 43). p 75-89.
- CHAMBON, P. 2016. Les coffres et la question d'un système funéraire chasséen. *Le Chasséen, des Chasséens : retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortailod, Lagozza Conference Proceedings, Paris, 18-20 novembre 2014*. Toulouse: Archives d'Ecologie Préhistorique. p 355-366.
- CHAMBON, P. & AUGEREAU, A. 2009. Le mobilier en contexte funéraire chasséen dans le Bassin parisien. In: COLLECTIF, editor. *De Méditerranée Et d'Ailleurs Mélanges Offerts à Jean Guilaine*. Toulouse: Archives d'Ecologie Préhistorique. p 853.
- CHAMBON, P., AUGEREAU, A., BONNARDIN, S., CONVERTINI, F., KOWALYK-MAHR, C., MEUNIER, K., SIDERA, I. & AVEC LA COLLABORATION DE MOLEZ, D. en préparation-a. Les sépultures du Néolithique moyen de Bonnard "Le Poirier" (Yonne) : une révision des données.
- CHAMBON, P., AUGEREAU, A., BONNARDIN, S., DELOR, J.-P., GIBAJA BAO, J.F., LEMERCIER, O., MEUNIER, K., MOREAU, C., PARIAT, J.-G., PRESTREAU, M., ROTTIER, S. & SIDERA, I. 2009a. Evolution, coexistence et confrontation de pratiques funéraires entre 4500 et 4000 av. J.-C. sur un micro-territoire : la vallée de l'Yonne, entre le Serein et le Baulche. - Rapport de Projet collectif de Recherche. Dijon: Service Régional de l'Archéologie. p 146 p.

- CHAMBON, P., BEDAULT, L., BONNARDIN, S., BOSTYN, F., CAYOL, N., CONVERTINI, F., HACHEM, L., HAMON, C., MAIGROT, Y., MEUNIER, K., OBERLIN, C. & THOMAS, A. 2018. La nécropole du Néolithique moyen. In: BOSTYN, F., LANCHON, Y. & CHAMBON, P., editors. *Habitat du Néolithique ancien et nécropoles du Néolithique moyen I et II à Vignely « la Porte aux Bergers »*, Seine-et-Marne. Paris: Société préhistorique française. p 203-400.
- CHAMBON, P., DELOR, J.-P., AUGEREAU, A., BONNARDIN, S., KOWALYK-MAHR, C. & AVEC LA COLLABORATION DE VACHARD, D. en préparation-b. La nécropole de Chichery "L'Etang David" : une révision.
- CHAMBON, P., DELOR, J.-P., AUGEREAU, A., GIBAJA BAO, J.F., MEUNIER, K., THOMAS, A., MURAIL, P. & MOLEZ, D. 2010. La nécropole du Néolithique moyen de Sur les Pâturaux à Chichery (Yonne). *Gallia Préhistoire* 52:117-192.
- CHAMBON, P. & LECLERC, J. 2007. Les tombes multiples dans le Néolithique français : aléa statistique ou pratique institutionnalisée ? *Bulletin de la Société préhistorique française* 104(2):289-306.
- CHAMBON, P., MORDANT, D. & PARIAT, J.-G. 2009b. Sépultures du Néolithique moyen en Bassin parisien : le cas des architectures sépulcrales. In: LE BRUN-RICALENS, F., VALOTTEAU, F. & HAUZEUR, A., editors. *Relations interrégionales au Néolithique entre Bassin parisien et Bassin rhénan, Actes du 26 colloque interrégional sur le Néolithique, Luxembourg, 8 et 9 novembre 2003*: Archaeologia Mosellana. p 445-467.
- CHAMBON, P. & PETILLON, J.-M. 2009. Des chasseurs Cerny ? *Bulletin de la Société préhistorique française* 106(4):761-783.
- CHAMBON, P., ROTTIER, S., AUGEREAU, A., BONNARDIN, S., MEUNIER, K. & PARIAT, J.-G. 2013. Evolution, coexistence et confrontation de pratiques funéraires entre 4700 et 4000 av. J.-C. sur un microterritoire dans la vallée de l'Yonne. In: JAUBERT, J., FOURMENT, N. & DEPAEPE, P., editors. *Transitions, ruptures et continuité en Préhistoire, XXVIIe Congrès Préhistorique de France, Bordeaux - Les Eyzies 2010*. Paris: Société Préhistorique Française. p 213-228.
- CHAMBON, P. & THOMAS, A. 2010. The first monumental cemeteries of western Europe: the „Passy type “necropolis in the Paris basin around 4500 BC. *Journal of Neolithic Archaeology*.
- CHAMEL, B. 2014. *Bioanthropologie et pratiques funéraires des populations néolithiques du Proche-Orient: l'impact de la Néolithisation (Étude de sept sites syriens-9820-6000 cal. BC)* [PhD Thesis]: Université Lumière Lyon 2.
- CHANCEREL, A. 2020. Le phénomène pressignien. La diffusion des poignards et autres silex taillés du Grand-Pressigny en Europe occidentale au Néolithique. *Revue archéologique de l'Ouest*(36):243-246.
- CHARDIGNY, J.-M. 2017. Les protéines végétales pour l'alimentation humaine. *Agronomie environnement et sociétés* 7(1):27-32.
- CHEUNG, C., HERRSCHER, E., ANDRE, G., BEDAULT, L., HACHEM, L., BINOIS-ROMAN, A., SIMONIN, D. & THOMAS, A. 2021. The grandeur of death – Monuments, societies, and diets in middle Neolithic Paris Basin. *Journal of Anthropological Archaeology* 63:101332.
- CHEUNG, C., HERRSCHER, E. & THOMAS, A. 2020. Monumental cemeteries of the Paris Basin Region - stable isotope evidence (C, N, and S) for early social stratification in Middle Neolithic France. *1845e Journées de la Société d'Anthropologie de Paris, 29-31 Janvier 2020*, 32.
- CHIARADIA, M., GALLAY, A. & TODT, W. 2003. Different contamination styles of prehistoric human teeth at a Swiss necropolis (Sion, Valais) inferred from lead and strontium isotopes. *Applied Geochemistry* 18(3):353-370.
- CHIKARAISHI, Y., KASHIYAMA, Y., OGAWA, N.O., KITAZATO, H. & OHKOUCHI, N. 2007. Metabolic control of nitrogen isotope composition of amino acids in macroalgae and gastropods implications for aquatic food web studies. *Marine ecology progress series* 342:85-90.
- CHIKARAISHI, Y., OGAWA, N.O., DOI, H. & OHKOUCHI, N. 2011. <sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N ratios of amino acids as a tool for studying terrestrial food webs: a case study of terrestrial insects (bees, wasps, and hornets). *Ecological research* 26(4):835-844.
- CHIKARAISHI, Y., OGAWA, N.O., KASHIYAMA, Y., TAKANO, Y., SUGA, H., TOMITANI, A., MIYASHITA, H., KITAZATO, H. & OHKOUCHI, N. 2009. Determination of aquatic food-web structure based on compound-specific nitrogen isotopic composition of amino acids. *Limnology and Oceanography: Methods* 7(11):740-750.

- CHIKARAISHI, Y., OGAWA, N.O. & OHKOUCHI, N. 2010a. Further evaluation of the trophic level estimation based on nitrogen isotopic composition of amino acids. *Earth, life, and isotopes*:37-51.
- CHIKARAISHI, Y., STEFFAN, S.A., OGAWA, N.O., ISHIKAWA, N.F., SASAKI, Y., TSUCHIYA, M. & OHKOUCHI, N. 2014. High-resolution food webs based on nitrogen isotopic composition of amino acids. *Ecology and Evolution* 4(12):2423-2449.
- CHIKARAISHI, Y., STEFFAN, S.A., TAKANO, Y. & OHKOUCHI, N. 2015. Diet quality influences isotopic discrimination among amino acids in an aquatic vertebrate. *Ecology and Evolution* 5(10):2048-2059.
- CHIKARAISHI, Y., TAKANO, Y., OGAWA, N. & OHKOUCHI, N. 2010b. Instrumental optimization for compound-specific nitrogen isotope analysis of amino acids by gas chromatography/combustion/isotope ratio mass spectrometry. *Earth, life, and isotopes*:367-386.
- CHISHOLM, B.S., NELSON, D.E. & SCHWARCZ, H.P. 1982. Stable-carbon isotope ratios as a measure of marine versus terrestrial protein in ancient diets. *Science* 216(4550):1131-1132.
- CINTAS-PEÑA, M. & GARCÍA SANJUÁN, L. 2019. Gender Inequalities in Neolithic Iberia: A Multi-Proxy Approach. *European Journal of Archaeology* 22(4):499-522.
- CLASTRES, P. 1966. L'arc et le panier. *L'Homme Revue française d'anthropologie* 6(2):13-31.
- CLAVEL, B. 2009. Site de pêche néolithique au bord de l'Aisne. *Archéopages* 26:22-23.
- CLAVEL, B. 2017. Un poisson peut en cacher un autre. *Les Nouvelles de l'archéologie* 148.
- CLAVEL, B. & ARBOGAST, R.-M. 2007. Fish exploitation from early neolithic sites in northern France : The first data. In: DOBIAT, C. & LEIDORF, K., editors. *The role of fish in ancient time 13th Meeting of the International Council of the ICAZ Fish Remains Working Group: Internationale Archäologie*. p 85-91.
- CLAVEL, B. & DREANO, Y. 2009. La pêche sur le littoral atlantique au Néolithique et à l'âge du Bronze. *Archéopages* 26:16-21.
- CLEMENTZ, M.T., FOX-DOBBS, K., WHEATLEY, P.V., KOCH, P.L. & DOAK, D.F. 2009. Revisiting old bones: coupled carbon isotope analysis of bioapatite and collagen as an ecological and palaeoecological tool. *Geological Journal* 44(5):605-620.
- COLLINS, M.J., NIELSEN-MARSH, C.M., HILLER, J., SMITH, C.I., ROBERTS, J.P., PRIGODICH, R.V., WESS, T.J., CSAPÒ, J., MILLARD, A.R. & TURNER-WALKER, G. 2002. The survival of organic matter in bone: a review. *Archaeometry* 44(3):383-394.
- COMAR, C.L., RUSSELL, R.S. & WASSERMAN, R.H. 1957. Strontium-Calcium Movement from Soil to Man. *Science* 126(3272):485-492.
- CONSTANTIN, C. 2013. Précisions sur l'étape finale du Rubané récent du Bassin parisien et la formation du groupe de Villeneuve Saint-Germain. *Bulletin de la Société préhistorique française*:473-494.
- CONSTANTIN, C. & ILETT, M. 1997. Une étape finale dans le Rubané récent du Bassin parisien. *Le Néolithique danubien et ses marges entre Rhin et Seine*:281-300.
- CONSTANTIN, C., MORDANT, D. & SIMONIN, D. 1997. *La culture de Cerny. Nouvelle économie, nouvelle société au Néolithique. Actes du Colloque International de Nemours, 1994.* Nemours : A.P.R.A.I.F.: Mémoires du Musée de Préhistoire d'Ile-de-France. 740 p.
- COOK, G.T., BONSALE, C., HEDGES, R.E.M., MCSWEENEY, K., BORONEAN, V. & PETTITT, P.B. 2001. A freshwater diet-derived <sup>14</sup>C reservoir effect at the stone age sites in the Iron Gates Gorge. *Radiocarbon* 43:453-460.
- COPELAND, S.R., SPONHEIMER, M., DE RUITER, D.J., LEE-THORP, J.A., CODRON, D., LE ROUX, P.J., GRIMES, V. & RICHARDS, M.P. 2011. Strontium isotope evidence for landscape use by early hominins. *Nature* 474(7349):76-78.
- COPELAND, S.R., SPONHEIMER, M., LE ROUX, P.J., GRIMES, V., LEE-THORP, J.A., DE RUITER, D.J. & RICHARDS, M.P. 2008. Strontium isotope ratios (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr) of tooth enamel: a comparison of solution and laser ablation multicollector inductively coupled plasma mass spectrometry methods. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 22(20):3187-3194.
- COPELAND, S.R., SPONHEIMER, M., LEE-THORP, J.A., LE ROUX, P.J., DE RUITER, D.J. & RICHARDS, M.P. 2010. Strontium isotope ratios in fossil teeth from South Africa: assessing laser ablation MC-ICP-MS analysis and the extent of diagenesis. *Journal of Archaeological Science* 37(7):1437-1446.

- COUPLAN, F. 2009. *Le régal végétal: plantes sauvages comestibles*. Paris: Sang De La Terre.
- COUPLAN, F. 2020. *Ce que les plantes ont à nous dire: Les Liens Qui Libèrent*. 352 p.
- COURTIN, J. & BINDER, D. 1994. Un point sur la circulation de l'obsidienne dans le domaine provençal. *Gallia préhistoire* 36:310-322.
- COUTELAS, A., HAUZEUR, A., COURBOIN-GRESILLAUD, E., TERROM, J. & WITH THE COLLABORATION OF CHESNAUX L, C.E., CHRZAVZEZ J, FERNANDES P, GOMEZ DE SOTO J, GOUDE G, LOUYOT D, MENS E, ROUX L, RUE M, VARENNES G. 2015. Pussigny (37), « Le Vigneau 2 ». Nécropoles néolithique et protohistoriques. Rapport final d'opération. Orléans: SRA Centre. 1113 p.
- CRAIG, O., FORSTER, M., ANDERSEN, S.H., KOCH, E., CROMBÉ, P., MILNER, N.J., STERN, B., BAILEY, G.N. & HERON, C.P. 2007. Molecular and isotopic demonstration of the processing of aquatic products in northern european prehistoric pottery. *Archaeometry* 49(1):135-152.
- CRAIG, O.E. 2021. Prehistoric Fermentation, Delayed-Return Economies, and the Adoption of Pottery Technology. *Current Anthropology* 62(S24):S233-S241.
- CRAIG, O.E., BIAZZO, M., COLONESE, A.C., DI GIUSEPPE, Z., MARTINEZ-LABARGA, C., LO VETRO, D., LELLI, R., MARTINI, F. & RICKARDS, O. 2010. Stable isotope analysis of Late Upper Palaeolithic human and faunal remains from Grotta del Romito (Cosenza), Italy. *Journal of Archaeological Science* 37(10):2504-2512.
- CRAIG, O.E., BONDIOLI, L., FATTORE, L., HIGHAM, T. & HEDGES, R. 2013. Evaluating marine diets through radiocarbon dating and stable isotope analysis of victims of the AD79 eruption of vesuvius. *American Journal of Physical Anthropology* 152(3):345-352.
- CRAIG, O.E., CHAPMAN, J., HERON, C., WILLIS, L.H., BARTOSIEWICZ, L., TAYLOR, G., WHITTLE, A. & COLLINS, M. 2005. Did the first farmers of central and eastern Europe produce dairy foods? *Antiquity* 79(306):882-894.
- CRAIG, O.E., ROSS, R., ANDERSEN, S.H., MILNER, N. & BAILEY, G.N. 2006. Focus: sulphur isotope variation in archaeological marine fauna from northern Europe. *Journal of Archaeological Science* 33(11):1642-1646.
- CRAMP, L., ETHIER, J., UREM-KOTSOU, D., BONSALE, C., BORIC, D., BORONEANT, A., EVERSLED, R., PERIC, S., ROFFET-SALQUE, M., WHELTON, H. & IVANOVA, M. 2018. Regional diversity in subsistence among early farmers in Southeast Europe revealed by archaeological organic residues. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*.
- CRISTIANI, E., RADINI, A., BORIC, D., ROBSON, H.K., CARICOLA, I., CARRA, M., MUTRI, G., OXILIA, G., ZUPANCICH, A., ŠLAUS, M. & VUJEVIĆ, D. 2018. Dental calculus and isotopes provide direct evidence of fish and plant consumption in Mesolithic Mediterranean. *Scientific Reports* 8(1):8147.
- CRUBEZY, É. & SELIER, P. 1990. Caractères discrets et «recrutement» des ensembles sépulcraux. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 2(3):171-177.
- CRUELLES, W., CASTELLS, J. & MOLIST, M. 2003. Sépultures de type monumental en Catalogne centrale au Ve millénaire (av. J.-C.): La nécropole de Tavertet (Barcelone). In: CHAMBON, P. & LECLERC, J., editors. Chambon P, and Lelerc J, editors Pratiques funéraires du Néolithique ancien et moyen(en France et dans les régions limitrophes, entre 5000 et 3500 environ av J-C) Musée des Antiquités Nationales, Saint-Germain-en-Laye. 15, 16 et 17 juin 2001.: Société préhistorique française. p 27.
- CUBAS, M., LUCQUIN, A., ROBSON, H.K., COLONESE, A.C., ARIAS, P., AUBRY, B., BILLARD, C., JAN, D., DINIZ, M., FERNANDES, R., FABREGAS VALCARCE, R., GERMAIN-VALLEE, C., JUHEL, L., DE LOMBERA-HERMIDA, A., MARCIGNY, C. *et al.* . 2020. Latitudinal gradient in dairy production with the introduction of farming in Atlantic Europe. *Nature Communications* 11(1):2036.
- CURTO, A., MAHONEY, P., MAURER, A.-F., BARROCAS-DIAS, C., FERNANDES, T. & FAHY, G.E. 2019. Diet and disease in Tomar, Portugal: Comparing stable carbon and nitrogen isotope ratios between skeletons with and without signs of infectious disease. *Journal of Archaeological Science* 105:59-69.
- CZERMAK, A., FERNÁNDEZ-CRESPO, T., DITCHFIELD, P.W. & LEE-THORP, J.A. 2020. A guide for an anatomically sensitive dentine microsampling and age-alignment approach for human teeth isotopic sequences. *American Journal of Physical Anthropology* n/a(n/a):e24126.

- D'ORTENZIO, L., BRICKLEY, M., SCHWARCZ, H. & PROWSE, T. 2015. You are not what you eat during physiological stress: Isotopic evaluation of human hair. *American Journal of Physical Anthropology* 157(3):374-388.
- DAGOBERT, C., PETIT, C. & DUHAMEL, P. 2006. Approche géoarchéologique sur la nécropole monumentale d'Escolives-Sainte-Camille (Yonne) : un site en bordure d'un chenal de l'Yonne à l'époque néolithique. In: DUHAMEL, P., editor. *Impacts interculturels au Néolithique moyen Du terroir au territoire : sociétés et espace*. Actes du 25<sup>e</sup> colloque interrégional sur le Néolithique, Dijon (20-21 octobre 2001): Revue archéologique de l'Est, 25<sup>e</sup> supplément. p 167-183.
- DAUPHIN, Y. 2015. La fossilisation des tissus dentaires et osseux : structure, composition, implications. *Les nouvelles de l'archéologie* 138:5-10.
- DAUPHIN, Y. & WILLIAMS, C.T. 2004. Diagenetic trends of dental tissues. *Comptes Rendus PALEVOL* 3(6):583-590.
- DAVIS, M. & PINEDA-MUNOZ, S. 2016. The temporal scale of diet and dietary proxies. *Ecology and Evolution* 6(6):1883-1897.
- DAWSON, T.E., MAMBELLI, S., PLAMBOECK, A.H., TEMPLER, P.H. & TU, K.P. 2002. Stable isotopes in plant ecology. *Annual review of ecology and systematics* 33(1):507-559.
- DE BECDELIEVRE, C., JOVANOVIĆ, J., HOFMANOVÁ, Z., GOUDE, G. & STEFANOVIĆ, S. 2020. Direct insight into dietary adaptations and the individual experience of Neolithisation: comparing subsistence, provenance and ancestry of Early Neolithic humans from the Danube Gorges c. 6200–5500 cal BC. In: GRON, K.J., SØRENSEN, L. & ROWLEY-CONWY, P., editors. *Farmers at the Frontier: A Pan European Perspective on Neolithisation*. Oxford & Philadelphia: Oxbow. p 45-75.
- DE LUCA, A., BOISSEAU, N., TEA, I., LOUVET, I., ROBINS, R.J., FORHAN, A., CHARLES, M.-A. & HANKARD, R. 2012.  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  in hair from newborn infants and their mothers: a cohort study. *Pediatric Research* 71(5):598-604.
- DE LUCA, A., HANKARD, R., FRASQUET-DARRIEUX, M., ROBINS, R. & TEA, I. 2019. Mesure de l'abondance isotopique naturelle en  $^{15}\text{N}$  dans le cheveu du nouveau-né allaité exclusivement. p 69-75.
- DE SAINT POL, T. 2017. Les évolutions de l'alimentation et de sa sociologie au regard des inégalités sociales. *L'Année sociologique* 67(1):11-22.
- DEAN, M.C. 2006. Tooth microstructure tracks the pace of human life-history evolution. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 273(1603):2799-2808.
- DEAN, M.C. 2007. Growing up slowly 160,000 years ago. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(15):6093-6094.
- DEAN, M.C. & COLE, T.J. 2013. Human life history evolution explains dissociation between the timing of tooth eruption and peak rates of root growth. *PLoS ONE* 8(1):14.
- DEAN, M.C. & SCANDRETT, A.E. 1995. Rates of dentine mineralization in permanent human teeth. *International Journal of Osteoarchaeology* 5(4):349-358.
- DEBONO SPITERI, C., GILLIS, R.E., ROFFET-SALQUE, M., CASTELLS NAVARRO, L., GUILAINE, J., MANEN, C., MUNTONI, I.M., SAÑA SEGUI, M., UREM-KOTSOU, D., WHELTON, H.L., CRAIG, O.E., VIGNE, J.-D. & EVERSHERD, R.P. 2016. Regional asynchronicity in dairy production and processing in early farming communities of the northern Mediterranean. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113(48):13594-13599.
- DEBUT, A. & MASSET, C. 1991. Restes humains épars en milieu chasséen septentrional. Recherches en cours. In: BEECHING, A., BINDER, D., BLANCHET, J.C., CONSTANTIN, C., DUBOULOZ, J., MARTINEZ, R., MORDANT, D., THEVENOT, J.P. & VAQUER, J., editors. *Identité du Chasséen Actes du colloque international de Nemours 1989*. Nemours: Mémoires du Musée de préhistoire d'Ile-de-France. p 409-412.
- DEFORREST, D.K., BRIX, K.V. & ADAMS, W.J. 2007. Assessing metal bioaccumulation in aquatic environments: The inverse relationship between bioaccumulation factors, trophic transfer factors and exposure concentration. *Aquatic Toxicology* 84(2):236-246.
- DEINES, P. 1980. The isotopic composition of reduced organic carbon. Chapter 9. In: FRITZ, P. & FONTES, J.C., editors. *The Terrestrial Environment, A*. Amsterdam: Elsevier. p 329-406.

- DELHON, C. 2001. L'analyse phytolithique : un nouvel outil pour l'étude des paléoenvironnements. *ArchéoSciences, revue d'Archéométrie*:53-63.
- DELHON, C. & MAZUY, A. 2014. Analyse phytolithique d'un coprolithe du néolithique moyen. Rapport triennal fouille programmée de la Grande Rivoire. UCA CNRS.
- DELOR, J.-P. 1999. Le Néolithique de la vallée de l'Yonne (France) à travers la prospection aérienne. Actes du colloque international d'archéologie aérienne Amiens, 15 - 18 octobre 1992. Hommage à Roger Agache pour 35 ans de prospections aériennes dans le Nord de la France. *Revue archéologique de Picardie* Numéro spécial 17:409-415.
- DEMIRJIAN, A., GOLDSTEIN, H. & TANNER, J.M. 1973. A new system of dental age assessment. *Human Biology*:211-227.
- DEMOULE, J.-P. 2007. *La révolution néolithique en France: Découverte*. 180 p.
- DENAIRE, A. 2011. Chronologie absolue de la séquence Hinkelstein-Grossgartach-Roessen-Bischheim dans le sud de la plaine du Rhin supérieur et le nord de la Franche-Comté à la lumière des dernières données. In: DENAIRE, A., JEUNESSE, C. & LEFRANC, P., editors. *Nécropole et enceintes danubiennes du Ve millénaire dans le Nord-Est de la France et le Sud-Ouest de l'Allemagne*. Strasbourg: Université de Strasbourg. p 9-30.
- DENAIRE, A. & BOËS, E. 2009. Rosheim Rosenmeer : une vaste nécropole du Néolithique moyen. *10 000 ans d'histoire ! Dix ans de fouilles archéologiques en Alsace*: Editions des Musées de la ville de Strasbourg. p 23-24.
- DENAIRE, A. & LEFRANC, P. 2014. Les pratiques funéraires de la culture de Roessen et des groupes épiroesséniens dans le sud de la plaine du Rhin supérieur (4750–4000 av. J.-C.). *Données récentes sur les pratiques funéraires néolithiques de la Plaine du Rhin supérieur*:75-126.
- DENIRO, M.J. 1985. Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction. *Nature* 317:806-809.
- DENIRO, M.J. 1987. Stable isotopy and archaeology. *American Scientist* 75(2):182-191.
- DENIRO, M.J. & EPSTEIN, S. 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42(5):495-506.
- DENIRO, M.J. & EPSTEIN, S. 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 45(3):341-351.
- DENIRO, M.J. & SCHOENINGER, M.J. 1983. Stable carbon and nitrogen isotope ratios of bone collagen: variations within individuals, between sexes, and within populations raised on monotonous diets. *Journal of Archaeological Science* 10(3):199-203.
- DENIRO, M.J., SCHOENINGER, M.J. & HASTORF, C.A. 1985. Effect of heating on the stable carbon and nitrogen isotope ratios of bone collagen. *Journal of Archaeological Science* 12(1):1-7.
- DESSE-BERSET, N. 2005. Chapitre VIII. Les poissons des niveaux néolithiques de la Redoute au Camp de Chassey : les niveaux néolithiques du rempart de «la Redoute». In: THEVENOT, J.-P., editor. *Le camp de Chassey (Chassey-le-Camp, Saône-et-Loire)*. Dijon: ARTEHIS Edition. p 417-421.
- DEVIESE, T., ABRAMS, G., HAJDINJAK, M., PIRSON, S., DE GROOTE, I., DI MODICA, K., TOUSSAINT, M., FISCHER, V., COMESKEY, D., SPINDLER, L., MEYER, M., SEMAL, P. & HIGHAM, T. 2021. Reevaluating the timing of Neanderthal disappearance in Northwest Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118:e2022466118.
- DEVIESE, T., COMESKEY, D., MCCULLAGH, J., BRONK RAMSEY, C. & HIGHAM, T. 2018. New protocol for compound-specific radiocarbon analysis of archaeological bones. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 32(5):373-379.
- DEVIÈSE, T., RIBECHINI, E., QUERCI, D. & HIGHAM, T. 2019. Assessing the efficiency of supercritical fluid extraction for the decontamination of archaeological bones prior to radiocarbon dating. *The Analyst*.
- DÍAZ-ZORITA BONILLA, M., DRUCKER, D.G., RICHARDIN, P., SILVA-PINTO, V., SEPÚLVEDA, M. & BOCHERENS, H. 2016. Marine food consumption in coastal northern Chilean (Atacama Desert) populations during the Formative Period: Implications of isotopic evidence (C, N, S) for the Neolithic process in south central Andes. *Journal of Archaeological Science: Reports* 6:768-776.

- DIETSCH-SELLAMI, M.-F. 2002. Etude carpologique des occupations néolithiques et protohistoriques. In: BOSTYN, F., editor. *Néolithique et protohistoire du site des Antes à Rungis, Val de Marne: Arpea 94-Artcom*. p 32-41.
- DIETSCH-SELLAMI, M. 2007. L'utilisation des plantes sauvages au Néolithique dans le nord-ouest de la France: témoignages carpologiques. In: BESSE, M., editor. *Sociétés néolithiques, des faits archéologiques aux fonctionnements socio-économiques, Actes du 27e colloque interrégional sur le Néolithique, Neuchâtel*. Lausanne: CAR. p 127-136.
- DOERING, B. 2019. Effects of fermentation on the carbon and nitrogen isotopes of Chinook salmon. *Journal of Archaeological Science: Reports* 23:626-633.
- DOLPHIN, A.E., GOODMAN, A.H. & AMARASIRIWARDENA, D.D. 2005. Variation in elemental intensities among teeth and between pre- and postnatal regions of enamel. *American Journal of Physical Anthropology* 128(4):878-888.
- DRIEU, L., LUCQUIN, A., CASSARD, L., SORIN, S., CRAIG, O.E., BINDER, D. & REGERT, M. 2021. A Neolithic without dairy? Chemical evidence from the content of ceramics from the Pendimoun rock-shelter (Castellar, France, 5750–5150 BCE). *Journal of Archaeological Science: Reports* 35:102682.
- DRUCKER, D. 2001. *Validation méthodologique de l'analyse isotopique d'ossements fossiles et apports aux reconstitutions paléoécologiques du paléolithique supérieur du sud-ouest de la France* [Thèse de Doctorat]: Université Pierre et Marie Curie, Paris. 245 p.
- DRUCKER, D. & BOCHERENS, H. 2004. Carbon and nitrogen stable isotopes as tracers of change in diet breadth during Middle and Upper Palaeolithic in Europe. *International Journal of Osteoarchaeology* 14(3-4):162-177.
- DRUCKER, D.G., BOCHERENS, H. & BILLIOU, D. 2003. Evidence for shifting environmental conditions in Southwestern France from 33 000 to 15 000 years ago derived from carbon-13 and nitrogen-15 natural abundances in collagen of large herbivores. *Earth and Planetary Science Letters* 216(1-2):163-173.
- DRUCKER, D.G., NAITO, Y.I. & JERARDINO, A. 2016. Aquatic resource exploitation by prehistoric humans. *Journal of Archaeological Science: Reports* 6:621-622.
- DRUCKER, D.G., VALENTIN, F., THEVENET, C., MORDANT, D., COTTIAUX, R., DELSATE, D. & VAN NEER, W. 2018. Aquatic resources in human diet in the Late Mesolithic in Northern France and Luxembourg: insights from carbon, nitrogen and sulphur isotope ratios. *Archaeol Anthropol Sci* 10:351-368.
- DUBOULOZ, J. 2003. Datation absolue du premier Néolithique du Bassin parisien : complément et relecture des données RRBP et VSG. *Bulletin de la Société préhistorique française* 100(4):671-689.
- DUBOULOZ, J. & LANCHON, Y. 1997. Cerny et Rössen en Bassin parisien: une approche par la céramique. In: CONSTANTIN, C., MORDANT, D. & SIMONIN, D., editors. *La culture de Cerny Nouvelle économie, nouvelle société au Néolithique Actes du Colloque International de Nemours 9, 10, 11 mai 1994: Mémoires du Musée de préhistoire d'Ile-de-France*. p 239-265.
- DUBOULOZ, J., PRESTREAU, M. & MORDANT, D. 1991. Les enceintes "néolithiques" du Bassin parisien : Variabilité structurelle, chronologique et culturelle. Place dans l'évolution socio-économique du Néolithique régional. Modèles interprétatifs préliminaires. In: BEECHING, A., BINDER, D., BLANCHET, J.C., CONSTANTIN, C., DUBOULOZ, J., MARTINEZ, R., MORDANT, D., THEVENOT, J.-P. & VAQUER, J., editors. *Identité du Chasséen Actes du Colloque International de Nemours, 17-19 mai 1989*. Nemours: Association pour la promotion de la recherche archéologique en Ile-de-France. p 211–229.
- DUDD, S.N. & EVERSHEED, R.P. 1998. Direct Demonstration of Milk as an Element of Archaeological Economies. *Science* 282(5393):1478-1481.
- DUDLEY, N. & ALEXANDER, S. 2017. Agriculture and biodiversity: a review. *Biodiversity* 18(2-3):45-49.
- DUFOUR, E., BOCHERENS, H. & MARIOTTI, A. 1999. Palaeodietary implications of isotopic variability in eurasian lacustrine fish. *Journal of Archaeological Science* 26(6):617-627.
- DUHAMEL, P. 1996. *La Bourgogne entre les bassins rhénan, rhodanien et parisien : carrefour ou frontière ?* Dijon: ARTEHIS Éditions.

- DUHAMEL, P. 2004. La nécropole monumentale d'Escolives-Sainte-Camille" La Pièce de l'Étang"(Yonne). Premiers résultats (fouilles 1997-1999). *Journée d'information du 20 novembre 2004*
- DUHAMEL, P., LEMERCIER, O., MEUNIER, K., PILLOT, L., PRESTREAU, M., AUGEREAU, A., JOUFFROY, I., MARTINEAU, R., MORDANT, D., MOREAU, C., PILCH, N., ROTTIER, S. & THOMAS, J. 2015. Le Néolithique du bassin versant Seine-Yonne. In: MARTINEAU, R., PAUTRAT, Y. & LEMERCIER, O., editors. *La Préhistoire en Bourgogne: état des connaissances et bilan 1994-2005*. Dijon: Revue Archéologique de l'Est. p 163-191.
- DUHAMEL, P. & MIDGLEY, M. 2001. Espaces, monumentalisme et pratiques funéraires des sociétés néolithiques en voie de hiérarchisation - Les nécropoles monumentales Cerny du bassin Seine-Yonne. In: BARAY, L., editor. *Archéologie des pratiques funéraires Approches critiques*. Glux-en-Glenne (Nièvre), France: Bibracte. p 211-248.
- DUHAMEL, P. & MORDANT, D. 1997. Les nécropoles monumentales Cerny du bassin Seine-Yonne. *Mémoires du Musée de préhistoire d'Ile-de-France*(6):481-488.
- DUHAMEL, P. & PRESTREAU, M. 1997. Emergence, développement et contacts de la société Cerny en bassin d'Yonne : Point des connaissances et voies de recherche. In: CONSTANTIN, C., MORDANT, D. & SIMONIN, D., editors. *La culture de Cerny Nouvelle économie, nouvelle société au Néolithique*. Actes du Colloque International de Nemours: Mémoires du Musée de Préhistoire d'Ile-de-France n°6. p 111-134.
- DUNN, P.J.H., HAI, L., MALINOVSKY, D. & GOENAGA-INFANTE, H. 2015. Simple spreadsheet templates for the determination of the measurement uncertainty of stable isotope ratio delta values. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 29(22):2184-2186.
- DÜRRWÄCHTER, C., CRAIG, O.E., COLLINS, M.J., BURGER, J. & ALT, K.W. 2006. Beyond the grave: variability in Neolithic diets in Southern Germany? *Journal of Archaeological Science* 33(1):39-48.
- EASTOE, J.E. 1955. The amino acid composition of mammalian collagen and gelatin. *Biochem J* 61(4):589-600.
- ECCLES, J.S. 1999. The Development of Children Ages 6 to 14. *The Future of Children* 9(2):30-44.
- EDWARDS, C.J., BOLLONGINO, R., SCHEU, A., CHAMBERLAIN, A., TRESSET, A., VIGNE, J.D., BAIRD, J.F., LARSON, G., HO, S.Y., HEUPINK, T.H., SHAPIRO, B., FREEMAN, A.R., THOMAS, M.G., ARBOGAST, R.M., ARNDT, B. *et al.* . 2007. Mitochondrial DNA analysis shows a Near Eastern Neolithic origin for domestic cattle and no indication of domestication of European aurochs. *Proc Biol Sci* 274(1616):1377-1385.
- EL ZAATARI, S. & HUBLIN, J.J. 2014. Diet of upper paleolithic modern humans: evidence from microwear texture analysis. *Am J Phys Anthropol* 153(4):570-581.
- ELIAS, R.W., HIRAO, Y. & PATTERSON, C.C. 1982. The circumvention of the natural biopurification of calcium along nutrient pathways by atmospheric inputs of industrial lead. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 46(12):2561-2580.
- ELLIOTT, J.C., WILSON, R. & DOWKER, S.E.P. 2002. Apatite structures. *Adv X-Ray Anal* 45:172-181.
- ELLIOTT, T.A. & GRIME, G.W. 1993. Examining the diagenetic alteration of human bone material from a range of archaeological burial sites using nuclear microscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 77(1):537-547.
- ENSOR, B.E. 2021. *The not very patrilocal European Neolithic: strontium, aDNA, and archaeological kinship analyses*: Archaeopress Publishing Ltd.
- ERICSON, J.E. 1985. Strontium isotope characterization in the study of prehistoric human ecology. *Journal of Human Evolution* 14(5):503-514.
- ETHIER, J., BÁNFFY, E., VUKOVIĆ, J., LESHTAKOV, K., BACVAROV, K., ROFFET-SALQUE, M., EVERSLED, R.P. & IVANOVA, M. 2017. Earliest expansion of animal husbandry beyond the Mediterranean zone in the sixth millennium BC. *Scientific Reports* 7(1):7146.
- EVANS, J.A., MONTGOMERY, J., WILDMAN, G. & BOULTON, N. 2010. Spatial variations in biosphere <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr in Britain. *Journal of the Geological Society* 167(1):1-4.
- EVERSLED, R.P., PAYNE, S., SHERRATT, A.G., COPLEY, M.S., COOLIDGE, J., UREM-KOTSU, D., KOTSAKIS, K., OZDOGAN, M., OZDOGAN, A.E., NIEUWENHUYSE, O., AKKERMANS, P.M.M.G., BAILEY, D., ANDEESCU, R.-R., CAMPBELL, S., FARID, S. *et al.* . 2008. Earliest date

- for milk use in the Near East and southeastern Europe linked to cattle herding. *Nature* 455(7212):528-531.
- EZZO, J.A., LARSEN, C.S. & BURTON, J.H. 1995. Elemental signatures of human diets from the Georgia Bight. *American Journal of Physical Anthropology* 98(4):471-481.
- FABIG, A. & HERRMANN, B. 2002. Trace elements in buried human bones: intra-population variability of Sr/Ca and Ba/Ca ratios – diet or diagenesis? *Naturwissenschaften* 89(3):115-119.
- FAHY, G.E., DETER, C., PITFIELD, R., MISZKIEWICZ, J.J. & MAHONEY, P. 2017. Bone deep: Variation in stable isotope ratios and histomorphometric measurements of bone remodelling within adult humans. *Journal of Archaeological Science* 87:10-16.
- FARQUHAR, G.D., EHLERINGER, J.R. & HUBICK, K.T. 1989. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 40:503-537.
- FAYE, B. 2008. *Bergers du monde*: Quae. 240 p.
- FEREMBACH, D., SCHWIDETZKY, I. & STLOUKAL, M. 1979. Recommandations pour déterminer l'âge et le sexe sur le squelette. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 6(1):7-45.
- FERNANDES, R., GROOTES, P., NADEAU, M.-J. & NEHLICH, O. 2015. Quantitative diet reconstruction of a Neolithic population using a Bayesian mixing model (FRUITS): The case study of Ostorf (Germany). *American Journal of Physical Anthropology* 158:325-340.
- FERNANDES, R., MEADOWS, J., DREVES, A., NADEAU, M.-J. & GROOTES, P. 2014. A preliminary study on the influence of cooking on the C and N isotopic composition of multiple organic fractions of fish (mackerel and haddock). *Journal of Archaeological Science* 50:153-159.
- FERNANDES, R., NADEAU, M.-J. & GROOTES, P.M. 2012. Macronutrient-based model for dietary carbon routing in bone collagen and bioapatite. *Archaeol Anthropol Sci* 4(4):291-301.
- FERRIO, J.P., ARAUS, J.L., BUXÓ, R., VOLTAS, J. & BORT, J. 2005. Water management practices and climate in ancient agriculture: inferences from the stable isotope composition of archaeobotanical remains. *Veget Hist Archaeobot* 14(4):510-517.
- FIORENZA, L., BENAZZI, S. & KULLMER, O. 2011. Para-masticatory wear facets and their functional significance in hunter-gatherer maxillary molars. *Journal of Archaeological Science* 38(9):2182-2189.
- FISCHER, A., OLSEN, J., RICHARDS, M.P., HEINEMEIER, J., SVEINBJÖRNSDÓTTIR, A.E. & BENNIKE, P. 2007. Coast-inland mobility and diet in the Danish Mesolithic and Neolithic: evidence from stable isotope values of humans and dogs. *Journal of Archaeological Science* 34:2125-2150.
- FIZET, M. 1992. *Biogéochimie isotopique du  $\delta^{13}C$  et  $\delta^{15}N$  du collagène des vertèbres : contribution à l'étude d'un paléoécosystème anthropique du Pléistocène Supérieur (Marillac, Charente)* [Thèse de Doctorat]. Paris: Université Pierre et Marie Curie. 136 p.
- FIZET, M., MARIOTTI, A., BOCHERENS, H., LANGE-BADRE, B., VANDERMEERSCH, B., BOREL, J.P. & BELLON, G. 1995. Effect of diet, physiology and climate on carbon and nitrogen stable isotopes of collagen in a late pleistocene anthropic palaeoecosystem: Marillac, Charente, France. *Journal of Archaeological Science* 22(1):67-79.
- FLOHR, P., JENKINS, E., WILLIAMS, H.R.S., JAMJOUR, K., NUIMAT, S. & MÜLDNER, G. 2019. What can crop stable isotopes ever do for us? An experimental perspective on using cereal carbon stable isotope values for reconstructing water availability in semi-arid and arid environments. *Veget Hist Archaeobot* 28(5):497-512.
- FOFANA, I., DOUDJO, S., YEO, M. & KOFFI, E. 2017. Influence De La Fermentation Sur Les Caractéristiques Physicochimiques Et Sensorielles De La Farine Composite A Base De Banane Plantain Et D'amande De Cajou. *European Scientific Journal* 13.
- FOGEL, M.L., TUROSS, N. & OWSLEY, D. 1989. Nitrogen isotope tracers of human lactation in modern and archaeological populations. *Annual Report of Geophysical Laboratory Carnegie Institution of Washington*:111-117.
- FONTANALS-COLL, M., EULÀLIA SUBIRÀ, M., DÍAZ-ZORITA BONILLA, M. & GIBAJA, J.F. 2017. First insight into the Neolithic subsistence economy in the north-east Iberian Peninsula: paleodietary reconstruction through stable isotopes. *American Journal of Physical Anthropology* 162(1):36-50.

- FONTUGNE, M., HATTÉ, C., VALLADAS, H., TISNÉRAT-LABORDE, N., ZAZZO, A., OBERLIN, C., DELQUE-KOLIC, E., MOREAU, C. & BERTHIER, B. 2014. De l'utilisation des isotopes stables du carbone dans la datation par la méthode du radiocarbone. *L'anthropologie* 118(2):194-200.
- FONTUGNE, M., SADOUNI, N., SALIOT, A., SICLET, F. & BOULOUBASSI, I. 2002. La distribution des activités en  $^{14}\text{C}$  des eaux, du bouchon vaseux et des sédiments dans l'estuaire de la Loire. *Radioprotection-Colloques* 37:1-8.
- FRANCE, R.L. 1994. Nitrogen isotopic composition of marine and freshwater invertebrates. *Marine ecology progress series* 115:205-207.
- FRANCEY, R.J., ALLISON, C.E., ETHERIDGE, D.M., TRUDINGER, C.M., ENTING, I.G., LEUENBERGER, M., LANGENFELDS, R.L., MICHEL, E. & STEELE, L.P. 1999. A 1000-year high precision record of  $\delta^{13}\text{C}$  in atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 51(2):170-193.
- FRASER, R.A., BOGAARD, A., HEATON, T.H.E., CHARLES, M., JONES, G., CHRISTENSEN, B.T., HALSTEAD, P., MERBACH, I., POULTON, P.R., SPARKES, D. & STYRING, A.K. 2011. Manuring and stable nitrogen isotope ratios in cereals and pulses: towards a new archaeobotanical approach to the inference of land use and dietary practices. *Journal of Archaeological Science* 38:2790-2804.
- FRATZL, P. 2008. Collagen: Structure and Mechanics, an Introduction. In: FRATZL, P., editor. *Collagen: Structure and Mechanics*. Boston, MA: Springer US. p 1-13.
- FREI, K.M. & PRICE, T.D. 2012. Strontium isotopes and human mobility in prehistoric Denmark. *Archaeol Anthropol Sci* 4(2):103-114.
- FROEHLE, A.W., KELLNER, C.M. & SCHOENINGER, M.J. 2010. FOCUS: effect of diet and protein source on carbon stable isotope ratios in collagen: follow up to Warinner and Tuross (2009). *Journal of Archaeological Science* 37(10):2662-2670.
- FULLER, B.T., FULLER, J.L., SAGE, N.E., HARRIS, D.A., O'CONNELL, T.C. & HEDGES, R.E.M. 2004. Nitrogen balance and  $\delta^{15}\text{N}$  : why you're not what you eat during pregnancy. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 18:2889-2896.
- FULLER, B.T., FULLER, J.L., SAGE, N.E., HARRIS, D.A., O'CONNELL, T.C. & HEDGES, R.E.M. 2005. Nitrogen balance and  $\delta^{15}\text{N}$ : why you're not what you eat during nutritional stress. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 19:2497-2506.
- FULLER, B.T., RICHARDS, M.P. & MAYS, S. 2003. Stable carbon and nitrogen isotope variations in tooth dentine serial sections from Wharram Percy. *Journal of archaeological science* 30(12):1673-1684.
- FULLER, D.Q. & GONZALEZ CARRETERO, L. 2018. The archaeology of Neolithic cooking traditions: archaeobotanical approaches to baking, boiling and fermenting. *Archaeology International* 21(1):109-121.
- FULLER, D.Q., WILLCOX, G. & ALLABY, R.G. 2012. Early agricultural pathways: moving outside the 'core area' hypothesis in Southwest Asia. *J Exp Bot* 63(2):617-633.
- GAEBLER, O.H., VITTI, T.G. & VUKMIROVICH, R. 1966. Isotope effects in metabolism of  $^{14}\text{N}$  and  $^{15}\text{N}$  from unlabeled dietary proteins. *Canadian Journal of Biochemistry* 44(9):1249-1257.
- GALLAY, A. 1995. A propos de travaux récents sur la Néolithisation de l'Europe de l'ouest. *Chronologies néolithiques: de 6000 à 2000 avant notre ère dans le Bassin rhodanien*:17-25.
- GALLAY, A. 2007. Cistes de type Chamblandes : 15 ans de recherches, quels progrès ? In: MOINAT, P. & CHAMBON, P., editors. *Les cistes de Chamblandes et la place des coffres dans les pratiques funéraires du Néolithique moyen occidental Actes du colloque de Lausanne: Cahiers d'archéologie romande* (110) et Société préhistorique française (Mémoire 43). p 337-348.
- GALLAY, A. 2016. Quelques réflexions sur le concept de culture. In: PERRIN, T., CHAMBON, P., GIBAJA, J.F. & GOUDE, G., editors. *Le Chasséen, des Chasséens : retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortailod, Lagozza*. Toulouse: Archives d'Écologie Préhistorique. p 11-23.
- GALLAY, A. & NICOD, P.-Y. 2000. Le Néolithique dans les Alpes occidentales. In: BÖTSCH, G., editor. *Évolutions biologiques et culturelles en milieu alpin Actes de l'université d'été 1999*. Aix-Marseille: Centre régional de documentation pédagogique. p 17-38.
- GANDELIN, M. 2011. *Les enceintes chasséennes de Villeneuve-Tolosane et Cugnaux dans leur contexte du Néolithique moyen européen*: Archives d'Écologie Préhistoriques.

- GANDELIN, M. & VAQUER, J. 2008. Présentation des sites chasséens de Villeneuve-Tolosane et de Cugnaux (Haute-Garonne) et localisation des faits funéraires. In: JEAN, V., MURIEL, G., MAXIME, R. & YARAMILA, T., editors. *Défunts néolithiques en Toulousain*. Toulouse: Archives d'Ecologie Préhistorique. p 34-44.
- GANNES, L.Z., DEL RIO, C.M.N. & KOCH, P. 1998. Natural Abundance Variations in Stable Isotopes and their Potential Uses in Animal Physiological Ecology. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* 119(3):725-737.
- GARMOND, N. & SIDÉRA, I. à paraître. *Les enceintes chasséennes du "Crot aux Moines" à Beaumont (Yonne)*: éditions de la MSH Mondes
- GAROT, E., COUTURE-VESCHAMBRE, C., MANTON, D., RODRIGUEZ, V., LEFRAIS, Y. & ROUAS, P. 2017. Diagnostic guide enabling distinction between taphonomic stains and enamel hypomineralisation in an archaeological context. *Archives of Oral Biology* 74:28-36.
- GASSIN, B., BICHO, N., BOUBY, L., BUXÓ, R., CARVALHO, A., CLEMENTE, C., MARINVAL, P., PHILIBERT, S., GIBAJA, J., GONZALEZ-URQUIJO, J., IBÁÑEZ, J. & LINTON, J. 2008. Variabilité des techniques de récolte et traitement des céréales dans l'occident méditerranéen au Néolithique ancien et moyen : facteurs environnementaux, économiques et sociaux.
- GAUDICHON, C. 2019. Les critères de qualité des protéines ont-ils évolué ? *Médecine des Maladies Métaboliques* 13(3):235-239.
- GAVERIAUX, F., BOUBY, L., MARINVAL, P., FIGUEIRAL, I., BINDER, D., FOUERE, P., GERNIGON, K., LEA, V., HASLER, A., VIGNAUD, A. & GOUDE, G. sous presse. L'alimentation des premières sociétés agropastorales du Sud de la France : premières données isotopiques sur des graines et fruits carbonisés néolithiques et essais de modélisation. *Compte Rendu Palévol*.
- GEDDES, D., CARRERE, I. & ALZIEU, J.-P. 1987. Découpe des bovins au Néolithique moyen à Villeneuve-Tolosane. *Anthropozoologica*(1):97-106.
- GERLING, C., DOPPLER, T., HEYD, V., KNIPPER, C., KUHN, T., LEHMANN, M.F., PIKE, A.W. & SCHIBLER, J. 2017. High-resolution isotopic evidence of specialised cattle herding in the European Neolithic. *PLoS ONE* 12(7):e0180164.
- GERLING, C. & FRANCKEN, M. 2007. Das linearbandkeramische Gräberfeld von Schwetzingen. *Archäologische Informationen* 30(1):43-50.
- GHEQUIERE, E. & HACHEM, L. 2018. Place et rôle de l'animal dans les pratiques funéraires au Cerny : l'exemple de la nécropole néolithique de Fleury-sur-Orne (Calvados). p 299-328.
- GHEQUIERE, E., MARCIGNY, C., AUBRY, B., CLEMENT-SAULEAU, S., DIETSCH-SELLAMI, M.-F., DELOZE, V., HAMON, G., QUERRE, G. & RENAULT, V. 2003. L'habitat néolithique moyen I de Vivoin "le Parc" (Sarthe). *Bulletin de la Société préhistorique française* 100:533-573.
- GIBAJA, J.F., TORCHY, L. & GASSIN, B. 2014. L'utilisation de l'outillage lithique taillé destiné à l'acquisition et à la transformation des aliments au Néolithique moyen en Méditerranée nord-occidentale. Le Chasséen, des Chasséens... Retour sur une culture nationale et ses parallèles : Sepulcres de fossa, Cortailod, Lagozza. Paris, France.
- GILBERT, C., SEALY, J. & SILLEN, A. 1994. An Investigation of Barium, Calcium and Strontium as Palaeodietary Indicators in the Southwestern Cape, South Africa. *Journal of Archaeological Science* 21(2):173-184.
- GILIGNY, F., BOSTYN, F. & MAUX, N. 2012. Production et importation de haches polies dans le Bassin parisien : typologie, chronologie et influences. p 1136-1167.
- GILLIS, R.E., KOVACIKOVA, L., BREHARD, S., GUTHMANN, E., VOSTROVSKA, I., NOHALOVA, H., ARBOGAST, R.M., DOMBOROCZKI, L., PECHTL, J., ANDERS, A., MARCINIAK, A., TRESSET, A. & VIGNE, J.D. 2017. The evolution of dual meat and milk cattle husbandry in Linearbandkeramik societies. *Proc Biol Sci* 284(1860).
- GOSSELIN, R. & SAMZUN, A. 2005-2008. Un dépôt associé à une sépulture de la fin du Néolithique ancien à Buthiers-Boulancourt (Seine-et-Marne, France) : approche tracéologique et technofonctionnelle du mobilier lithique. In: BAILLY, M. & PLISSON, H., editors. *La valeur fonctionnelle des objets sépulcraux : actes de la table ronde d'Aix-en-Provence, 25-27 octobre 2006*. Aix-en-Provence: Editions APPAM. p 91-104.
- GOUDE, G. 2007. *Étude des modes de subsistance de populations néolithiques (VI<sup>e</sup>-IV<sup>e</sup> millénaires av. J.-C.) dans le nord-ouest de la Méditerranée. Approche par l'utilisation des isotopes stables ( $\delta^{13}C$  et  $\delta^{15}N$ ) du collagène* [PhD Thesis]: Université Bordeaux 1. 416 p.

- GOUDE, G. 2008. Les sites de Najac (Siran, Hérault), de Gazel (Sallèles-Gabardès, Aude) et Champ du Poste (Carcassonne, Aude). Etude des régimes alimentaires à partir des isotopes stables (C et N) du collagène osseux. *Rapport d'activité IR du CNRS*:43.
- GOUDE, G. 2014. Etude isotopique des restes humains du site de Mont d'Hubert (Escalles) : ressources alimentaires et exploitation de l'environnement. In: PRAUD, I. & PANLOUPS, E., editors. *Rapport de fouille préventive Escalles, Mont d'Hubert : une enceinte du Néolithique Moyen II, des fosses du Néolithique Moyen I et du Bronze final sur le littoral de la mer du Nord : INRAP*. p 332-336.
- GOUDE, G., ANDRE, G., BALTER, V., BINDER, D., BOUBY, L., DEGUILLOUX, M.-F., COURTIN, J., COUTELAS, A., FIGUERAL, I., GAVERIAUX, F., GERNIGON, K., GOURICHON, L., HASLER, A., LAMBERT, A., LE BAILLY, M. *et al.* . 2018. Présentation du projet IDF/FRM : Femmes et alimentation dans les premières sociétés agropastorales (Ve - IIIe millénaires av. J.-C., France) : une approche bio-anthropologique. Premiers résultats. Séminaire de l'UMR 7055 PréTech. Nanterre, France.
- GOUDE, G., BALASESCU, A., REVEILLAS, H., THOMAS, Y. & LEFRANC, P. 2014. Diet variability and stable isotope analyses: looking for variables within the Late Neolithic and Iron Age human groups from Gougenheim site and surrounding areas (Alsace, France). *International Journal of Osteoarchaeology* 25:988–996.
- GOUDE, G., CASTORINA, F., HERRSCHER, E., CABUT, S. & TAFURI, M.A. 2012. First Strontium Isotope Evidence of Mobility in the Neolithic of Southern France. *European Journal of Archaeology* 15(3):421-439.
- GOUDE, G., DORI, I., SPARACELLO, V.S., STARNINI, E. & VARALLI, A. 2020a. Multi-proxy stable isotope analyses of dentine microsections reveal diachronic changes in life history adaptations, mobility, and tuberculosis-induced wasting in prehistoric Liguria (Finale Ligure, Italy, northwestern Mediterranean). *International Journal of Paleopathology*.
- GOUDE, G. & FONTUGNE, M. 2016. Carbon and nitrogen isotopic variability in bone collagen during the Neolithic period: Influence of environmental factors and diet. *Journal of Archaeological Science* 70:117-131.
- GOUDE, G. & HERRSCHER, E. 2018. Étude isotopique des restes osseux du Champ du Poste : discussion sur l'alimentation humaine au Néolithique moyen. In Convertini F. et Georjon C. (Dir.) *Le Champ du Poste (Carcassonne, Aude). Une succession d'occupations du début du Néolithique moyen à l'âge du Bronze ancien*. Archives d'Ecologie Préhistoriques / INRAP, Toulouse, p. 327-334. *Le Champ du Poste (Carcassonne, Aude) Une succession d'occupations du début du Néolithique moyen à l'âge du Bronze ancien*.
- GOUDE, G., REY, L., TOULEMONDE, F., CERVEL, M. & ROTTIER, S. 2015. Etude paléalimentaire et isotopique des groupes humains de l'âge du Bronze : nouvelles perspectives sur le site de Barbuise et La Saulsotte (XIVe-XIIe s. av. J.-C., Aube, France). Recherches sur l'Age du Bronze : nouvelles approches et perspectives Actes de la Journée d'étude de l'APRAB, 28 février 2014 Bulletin de l'Association pour la Promotion des Recherches sur l'Age du Bronze. p 166-167.
- GOUDE, G., RIVOLLAT, M., SCHMITT, A., SALAZAR-GARCIA, D., VILLOTTE, S., LAMBERT, A., SANZ, A., BRIGE, P., PEMONGE, M.-H., HAAK, W. & DEGUILLOUX, M.-F. 2021. Identifying biological and behavioural diversity among European Neolithic farmers. *9th International Symposium on Biomolecular Archaeology (1er-4 juin, Toulouse, France) Poster presentation*
- GOUDE, G., SALAZAR-GARCÍA, D.C., POWER, R.C., RIVOLLAT, M., GOURICHON, L., DEGUILLOUX, M.-F., PEMONGE, M.-H., BOUBY, L. & BINDER, D. 2020b. New insights on Neolithic food and mobility patterns in Mediterranean coastal populations. *American Journal of Physical Anthropology* 173:218-235.
- GOUDE, G., SALAZAR-GARCÍA, D.C., POWER, R.C., TERROM, J., RIVOLLAT, M., DEGUILLOUX, M.-F., PEMONGE, M.-H., LE BAILLY, M., ANDRE, G., COUTELAS, A. & HAUZEUR, A. 2019. A Multidisciplinary Approach to Neolithic Life Reconstruction. *Journal of Archaeological Method and Theory* 26:537–560.
- GOUDE, G., SCHMITT, A., HERRSCHER, E., LOISON, G., CABUT, S. & ANDRE, G. 2013. Pratiques alimentaires au Néolithique moyen : nouvelles données sur le site de Pontcharaud 2 (Puy-de-Dôme, Auvergne, France). *Bulletin de la Société préhistorique française* 110(2):299-317.

- GRAEFE, J., HAMON, C., LIDSTRÖM-HOLMBERG, C., TSORAKI, C. & WATTS, S. 2009. Subsistence, social and ritual practices: quern deposits in the Neolithic societies of Europe. In: BONNARDIN, S., HAMON, C., LAUWERS, M. & QUILLIEC, B., editors. *Du matériel au spirituel Réalités archéologiques et historiques des « dépôts » de la Préhistoire à nos jours XXIXe rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes*. Antibes: APDCA. p 87-96.
- GRAVEN, H., FISCHER, M.L., LUEKER, T., JEONG, S., GUILDERTON, T.P., KEELING, R.F., BAMBHA, R., BROPHY, K., CALLAHAN, W., CUI, X., FRANKENBERG, C., GURNEY, K.R., LAFRANCHI, B.W., LEHMAN, S., MICHELSEN, H.A. *et al.* . 2019. CMS: Atmospheric CO<sub>2</sub> and C Isotopes, Fossil Fuel Contributions, California, 2014-2015. ORNL Distributed Active Archive Center.
- GRÖCKE, D.R., TREASURE, E.R., LESTER, J.J., GRON, K.J. & CHURCH, M.J. 2021. Effects of marine biofertilisation on Celtic bean carbon, nitrogen and sulphur isotopes: Implications for reconstructing past diet and farming practices. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 35(5):e8985.
- GRON, K.J., GRÖCKE, D.R., LARSSON, M., SØRENSEN, L., LARSSON, L., ROWLEY-CONWY, P. & CHURCH, M.J. 2017. Nitrogen isotope evidence for manuring of early Neolithic Funnel Beaker Culture cereals from Stensborg, Sweden. *Journal of Archaeological Science: Reports* 14:575-579.
- GRUPE, G., BALZER, A. & TURBAN-JUST, S. 2002. Modeling Protein Diagenesis in Ancient Bone: Towards a Validation of Stable Isotope Data. In: AMBROSE, S. & KATZENBERG, M., editors. *Biogeochemical Approaches to Paleodietary Analysis*: Springer US. p 173-187.
- GRUPE, G., PRICE, T.D., SCHRÖTER, P., SÖLLNER, F., JOHNSON, C.M. & BEARD, B.L. 1997. Mobility of Bell Beaker people revealed by strontium isotope ratios of tooth and bone: a study of southern Bavarian skeletal remains. *Applied Geochemistry* 12(4):517-525.
- GRUPE, G. & TURBAN-JUST, S. 1998. Amino acid composition of degraded matrix collagen from archaeological human bone. *Anthropologischer Anzeiger* 56(3):213-226.
- GUEGUEN, J., WALRAND, S. & BOURGEOIS, O. 2016. Les protéines végétales : contexte et potentiels en alimentation humaine. *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 51(4):177-185.
- GUERRERO, E., NAJI, S. & BOCQUET-APPEL, J.-P. 2008. The Signal of the Neolithic Demographic Transition in the Levant. In: BOCQUET-APPEL, J.-P. & BAR-YOSEF, O., editors. *The Neolithic Demographic Transition and its Consequences*. Dordrecht: Springer. p 57-80.
- GUILAINE, J. 1987. *Premières communautés paysannes en Méditerranée occidentale: Actes du Colloque International du CNRS (Montpellier, 26-29 avril 1983)*. Paris: Editions du CNRS. 764 p.
- GUILAINE, J. 2000-2001. La diffusion de l'agriculture en Europe: une hypothèse arithmétique. *Zephyrus: Revista de prehistoria y arqueología* 53-54:267-272.
- GUILAINE, J. 2003. *De la vague à la tombe. La conquête néolithique de la Méditerranée (8000-2000 avant J-C)*. Paris: Seuil. 375 p.
- GUILAINE, J. 2005. Du Proche-Orient à l'Atlantique. Actualités de la recherche sur le Néolithique. *Annales HSS* 5:925-952.
- GUILAINE, J. 2015. *La seconde naissance de l'homme. Le Néolithique*: Editions Odile Jacob.
- GUIRY, E.J., SZPAK, P. & RICHARDS, M.P. 2016. Effects of lipid extraction and ultrafiltration on stable carbon and nitrogen isotopic compositions of fish bone collagen. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 30(13):1591-1600.
- HACHEM, L. 2008. La révolution néolithique dans le monde. Aux origines de l'emprise humaine sur le vivant *Élevage, chasse et société dans le Néolithique français*
- HACHEM, L. 2011a. *Le site néolithique de Cuiry-lès-Chaudardes - I. De l'analyse de la faune à la structuration sociale*: Internationale Archäologie. 549 p.
- HACHEM, L. 2011b. Les faunes du Néolithique moyen dans le Nord de la France : bilan et pistes de recherches. *Revue archéologique de Picardie*:313-329.
- HACHEM, L. 2018. Animals in LBK society: Identity and gender markers. *Journal of Archaeological Science: Reports* 20:910-921.
- HACHEM, L., BEDAULT, L. & LEDUC, C. 2016. L'élevage et la chasse au Chasséen septentrional : renouvellement des connaissances d'après l'étude des enceintes de Villers-Carbonnel (Somme) et de Passel (Oise). In: PERRIN, T., CHAMBON, P., GIBAJA, J.F. & GOUDE, G., editors. *Le*

- Chasséen, des Chasséens : retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortailod, Lagozza.* Toulouse: Archives d'Écologie Préhistorique. p 241-258.
- HACHEM, L. & HAMON, C. 2014. Linear pottery household organization: an economic model. In: WHITTLE, A. & BICKLE, P., editors. *Early Farmers: The View from Archaeology and Science*: OUP/British Academy, Proceedings of the British Academy.
- HAMON, C. 2003. De l'utilisation des outils de mouture, broyage et polissage au Néolithique en Bassin parisien : apports de la tracéologie. *Bulletin de la Société préhistorique française* 100(1):101-116.
- HAMON, C. 2005. Quelle signification archéologique pour les dépôts de meules néolithiques dans la vallée de l'Aisne? *Revue archéologique de Picardie*:39-48.
- HAMON, C. 2006. *Broyage et abrasion au Néolithique ancien. Caractérisation technique et fonctionnelle des outillages en grès du Bassin parisien*: BAR International Reports S1551, Oxford. 342 p. p.
- HAMON, C. 2020. Isn't it strange? Grinding tool deposits and deposition in the north-western LBK. In: HOFMAN, D., editor. *Magical, mundane or marginal?: Deposition practices in the Early Neolithic Linearbandkeramik culture* Leiden: Sidestone Press. p 250p.
- HAMON, C., EMERY-BARBIER, A. & MESSEGER, E. 2011. Quelle fonction pour les meules du Néolithique ancien de la moitié Nord de la France ? Apports et limites de l'analyse phytolithique. *Revue archéologique de Picardie*:515-521.
- HAMON, C. & MANEN, C. 2021. The Mechanisms of Neolithisation of Western Europe: Beyond a South/North Approach. *Open Archaeology* 7(1):718-735.
- HAMON, C., SALAVERT, A., DIETSCH-SELLAMI, M.-F. & MONCHABLON, C. 2019. Cultiver et consommer les plantes au Néolithique entre Seine et Meuse : technologie des meules et analyses carpologiques. In: MONTROYA, C., FAGNART, J.-P. & LOCHT, J.-L., editors. *Préhistoire de l'Europe du Nord-Ouest : mobilité, climats et identités culturelles Actes du XXVIII Congrès préhistorique de France Amiens 30 mai-4 juin 2016*. Paris: Société Préhistorique française.
- HAMON, T., IRRIBARRIA, R., RIALLAND, Y. & VERJUX, C. 1997. Le groupe de Chambon à la lumière des découvertes récentes en région Centre. In: CONSTANTIN, C., MORDANT, D. & SIMONIN, D., editors. *La culture de Cerny Nouvelle économie, nouvelle société au Néolithique Actes du Colloque International de Nemours 9, 10, 11 mai 1994*: Mémoires du Musée de préhistoire d'Ile-de-France. p 195-217.
- HANDLEY, L.L. & RAVEN, J.A. 1992. The use of natural abundance of nitrogen isotopes in plant physiology and ecology. *Plant, Cell & Environment* 15(9):965-985.
- HARE, P.E., FOGEL, M.L., STAFFORD, T.W., MITCHELL, A.D. & HOERING, T.C. 1991. The isotopic composition of carbon and nitrogen in individual amino acids isolated from modern and fossil proteins. *Journal of Archaeological Science* 18(3):277-292.
- HARTER-LAILHEUGUE, S., LE MORT, F., VIGNE, J.-D., GUILAINE, J., LE BRUN, A. & BOUCHET, F. 2005. Premières données parasitologiques sur les populations humaines précéramiques chypriotes (VIIIe et VIIe millénaires av. J.-C.). *Paléorient* 31(2):43-54.
- HATCH, K., CRAWFORD, M., KUNZ, A., THOMSEN, S., EGGETT, D., NELSON, S. & ROEDER, B. 2006. An objective means of diagnosing anorexia nervosa and bulimia nervosa using  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  and  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios in hair. *Rapid communications in mass spectrometry : RCM* 20:3367-3373.
- HAYTOWITZ, D.B., AHUJA, J.K.C., WU, X., SOMANCHI, M., NICKLE, M., NGUYEN, Q.A., ROSELAND, J.M., WILLIAMS, J.R., PATTERSON, K.Y., LI, Y. & PEHRSSON, P.R. 2019. USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Legacy Release. Nutrient Data Laboratory, Beltsville Human Nutrition Research Center, ARS, USDA. <https://data.nal.usda.gov/dataset/usda-national-nutrient-database-standard-reference-legacy-release>. Accessed 2021-02-26.
- HEATON, T.H.E. 1999. Spatial, species, and temporal variations in the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios of  $\text{C}_3$  plants : implications for palaeodiet studies. *Journal of Archaeological Science* 26(6):637-649.
- HEATON, T.H.E., SPIRO, B. & ROBERTSON, S.M.C. 1997. Potential canopy influences on the isotopic composition of nitrogen and sulphur in atmospheric deposition. *Oecologia* 109(4):600-607.
- HEATON, T.H.E., VOGEL, J.C., VON LA CHEVALLERIE, G. & COLLETT, G. 1986. Climatic influence on the isotopic composition of bone nitrogen. *Nature* 322:822-823.

- HEDGES, J.M., STEVENS, R. & KOCH, P. 2006. Isotopes in bones and teeth. In: LENG, M.J., editor. *Isotopes in Palaeoenvironmental Research*: Springer Netherlands. p 117-145.
- HEDGES, R.E., CLEMENT, J.G., THOMAS, C.D. & O'CONNELL T, C. 2007. Collagen turnover in the adult femoral mid-shaft: modeled from anthropogenic radiocarbon tracer measurements. *American journal of physical anthropology* 133(2):808-816.
- HEDGES, R.E.M., MILLARD, A.R. & PIKE, A.W.G. 1995. Measurements and Relationships of Diagenetic Alteration of Bone from Three Archaeological Sites. *Journal of Archaeological Science* 22(2):201-209.
- HEDGES, R.E.M. & REYNARD, L.M. 2007. Nitrogen isotopes and the trophic level of humans in archaeology. *Journal of Archaeological Science* 34(8):1240-1251.
- HELMER, D. 1992. *La domestication des animaux par les hommes préhistoriques*. Paris: Masson.
- HELMER, D., BLAISE, É., GOURICHON, L. & SAÑA-SEGUI, M. 2018. Using cattle for traction and transport during the Neolithic period: Contribution of the study of the first and second phalanxes. *Bulletin de la Société préhistorique française* 115(1):71-98.
- HELMER, D., GOURICHON, L., SIDI MAAMAR, H. & VIGNE, J.-D. 2005. L'élevage des caprinés néolithiques dans le sud-est de la France : saisonnalité des abattages, relations entre grottes-bergeries et sites de plein air. *Anthropozoologica* 40(1):167-189.
- HENDY, J., COLONESE, A.C., FRANZ, I., FERNANDES, R., FISCHER, R., ORTON, D., LUCQUIN, A., SPINDLER, L., ANVARI, J., STROUD, E., BIEHL, P.F., SPELLER, C., BOIVIN, N., MACKIE, M., JERSIE-CHRISTENSEN, R.R. *et al.* . 2018. Ancient proteins from ceramic vessels at Çatalhöyük West reveal the hidden cuisine of early farmers. *Nat Commun* 9(1):018-06335.
- HERRSCHER, E. 2003. Alimentation d'une population historique : Analyse des données isotopiques de la nécropole Saint-Laurent de Grenoble (XIII<sup>e</sup>-XV<sup>e</sup> siècle, France). *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 15(3-4):145-320.
- HERRSCHER, E. 2013. Détection isotopique des modalités d'allaitement et de sevrage à partir des ossements archéologiques. *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 48(2):75-85.
- HERRSCHER, E., GOUDE, G. & METZ, L. 2017. Longitudinal study of stable isotope compositions of maternal milk and implications for the palaeo-diet of infants. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 29(3):131-139.
- HERRSCHER, E. & LE BRAS-GOUDE, G. 2010. Southern french neolithic populations: isotopic evidence for regional specificities in environment and diet. *American Journal of Physical Anthropology* 141(2):259-272.
- HIGHAM, T. 2019. Removing contaminants: a restatement of the value of isolating single compounds for AMS dating. *Antiquity* 93:1072-1075.
- HILLSON, S. 1996. *Dental Anthropology*: Cambridge University Press.
- HILLSON, S. 2001. Recording dental caries in archaeological human remains. *International Journal of Osteoarchaeology* 11:249-289.
- HILLSON, S. 2005. *Teeth*. Cambridge: Cambridge University Press.
- HILLSON, S. & BOND, S. 1997. Relationship of enamel hypoplasia to the pattern of tooth crown growth: a discussion. *Am J Phys Anthropol* 104(1):89-103.
- HINNERS, T., HUGHES, R., OUTRIDGE, P.M., DAVIS, W.J., SIMON, K. & WOOLARD, D.R. 1998. Interlaboratory comparison of mass spectrometric methods for lead isotopes and trace elements in NIST SRM 1400 Bone Ash. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 13(9):963-970.
- HOFMANN, D. 2020. Not going anywhere? Migration as a social practice in the early Neolithic Linearbandkeramik. *Quaternary International* 560-561:228-239.
- HOLLUND, H., JANS, M. & KARS, H. 2014. How are teeth better than bone? An investigation of dental tissue diagenesis and state of preservation at histological scale (with photo catalogue). *Internet Archaeology*.
- HOPPE, K.A., KOCH, P.L. & FURUTANI, T.T. 2003. Assessing the preservation of biogenic strontium in fossil bones and tooth enamel. *International Journal of Osteoarchaeology* 13(1-2):20-28.
- HORSTWOOD, M.S.A., EVANS, J.A. & MONTGOMERY, J. 2008. Determination of Sr isotopes in calcium phosphates using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry and their application to archaeological tooth enamel. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72(23):5659-5674.

- HOWLAND, M.R., CORR, L.T., YOUNG, S.M.M., JONES, V., JIM, S., VAN DER MERWE, N.J., MITCHELL, A.D. & EVERSLED, R.P. 2003. Expression of the dietary isotope signal in the compound-specific  $\delta^{13}\text{C}$  values of pig bone lipids and amino acids. *International Journal of Osteoarchaeology* 13(1-2):54-65.
- HUMPHREY, L.T. 2014. Isotopic and trace element evidence of dietary transitions in early life. *Annals of Human Biology* 41(4):348-357.
- HUMPHREY, L.T., DEAN, M.C., JEFFRIES, T.E. & PENN, M. 2008. Unlocking evidence of early diet from tooth enamel. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(19):6834-6839.
- HUSSON, F., LUBBERS, S., SAUREL, R., WACHÉ, Y., HO, P.-H., TU, V.P. & CHU-KY, S. 2015. Fermentation des protéines végétales : atouts organoleptique et nutritionnel. *IAA La revue des industries agroalimentaires*:24-26.
- IBAÑEZ, J., GIBAJA, J., GASSIN, B. & MAZZUCCO, N. 2015. Les premières faucilles et l'expansion de l'agriculture en Europe, ArchéOrient – Le Blog (Hypotheses.org), 6 mars 2015. [En ligne] <http://archeorient.hypotheses.org/3788>.
- ILETT, M., CONSTANTIN, C., FARRUGGIA, J.-P. & BAKELS, C. 1995. Bâtiments voisins du Rubané et du groupe de Villeneuve-Saint-Germain sur le site de Bucy-le-Long «La Fosse Tounise» (Aisne). *Revue archéologique de Picardie* 9:17-39.
- ILLET, M. & PLATEAUX, M. 1995. *Le Site néolithique de Berry-au-Bac « Le chemin de la Pêcherie » (Aisne)*. Paris: CNRS Editions. 222 p.
- IRRIBARRIA, R. 1997. Comparaison céramologique du Cerny et du Chambon. In: CHAMBON, P. & LECLERC, J., editors. *Les pratiques funéraires néolithiques avant 3500 av J-C en France et dans les régions limitrophes Table Ronde de Saint-Germain-en-Laye (15-17 juin 2001)*: Société préhistorique française. p 219-238.
- IRVINE, B. & ERDAL, Y.S. 2020. Analysis of dietary habits in a prehistoric coastal population from İkiztepe, North Turkey, using stable isotopes of Carbon, Nitrogen, and sulphur. *Journal of Archaeological Science: Reports* 29:102067.
- ISHIKAWA, N.F., CHIKARAISHI, Y., TAKANO, Y., SASAKI, Y., TAKIZAWA, Y., TSUCHIYA, M., TAYASU, I., NAGATA, T. & OHKOUCHI, N. 2018. A new analytical method for determination of the nitrogen isotopic composition of methionine: Its application to aquatic ecosystems with mixed resources. *Limnology and Oceanography: Methods* 16(9):607-620.
- ISHIKAWA, N.F., HAYASHI, F., SASAKI, Y., CHIKARAISHI, Y. & OHKOUCHI, N. 2017. Trophic discrimination factor of nitrogen isotopes within amino acids in the dobsonfly *Protohermes grandis* (Megaloptera: Corydalidae) larvae in a controlled feeding experiment. *Ecology and Evolution* 7(6):1674-1679.
- ISHIKAWA, N.F., KATO, Y., TOGASHI, H., YOSHIMURA, M., YOSHIMIZU, C., OKUDA, N. & TAYASU, I. 2014. Stable nitrogen isotopic composition of amino acids reveals food web structure in stream ecosystems. *Oecologia* 175(3):911-922.
- ITAHASHI, Y., ERDAL, Y.S., TEKIN, H., OMAR, L., MIYAKE, Y., CHIKARAISHI, Y., OHKOUCHI, N. & YONEDA, M. 2019. Amino acid  $^{15}\text{N}$  analysis reveals change in the importance of freshwater resources between the hunter-gatherer and farmer in the Neolithic upper Tigris. *American Journal of Physical Anthropology* 168(4):676-686.
- ITAHASHI, Y.U., CHIKARAISHI, Y., OHKOUCHI, N. & YONEDA, M. 2014. Refinement of reconstructed ancient food webs based on the nitrogen isotopic compositions of amino acids from bone collagen: A case study of archaeological herbivores from Tell Ain el-Kerkh, Syria. *GEOCHEMICAL JOURNAL* 48(4):e15-e19.
- JACOB, E., QUERCI, D., CAPARRÓS, M., RUIZ, C., HIGHAM, T. & DEVIÈSE, T. 2018. Nitrogen content variation in archaeological bone and its implications for stable isotope analysis and radiocarbon dating. *Journal of Archaeological Science* 93:68-73.
- JACOMET, S. 2009. Plant economy and village life in Neolithic lake dwellings at the time of the Alpine Iceman. *Veget Hist Archaeobot* 18(1):47-59.
- JACOMET, S. & SCHIBLER, J. 2006. Traction animale et données paléoenvironnementales au Néolithique dans le nord des Alpes. In: PETREQUIN, P., ARBOGAST, R.-M., PETREQUIN, A.-M., VAN WILLIGEN, S. & BAILLY, M., editors. *Premiers chariots, premiers araires La diffusion de la traction animale en Europe pendant les IVe et IIIe millénaires avant notre ère*. Paris: CNRS Editions. p 141-155.

- JAMES, H.F., WILLMES, M., BOEL, C.A., COURTAUD, P., CHANCEREL, A., CIESIELSKI, E., DESIDERI, J., BRIDY, A., WOOD, R., MOFFAT, I., FALLON, S., MCMORROW, L., ARMSTRONG, R.A., WILLIAMS, I.S., KINSLEY, L. *et al.* . 2019. Who's been using my burial mound? Radiocarbon dating and isotopic tracing of human diet and mobility at the collective burial site, Le Tumulus des Sables, southwest France. *Journal of Archaeological Science: Reports* 24:955-966.
- JANZEN, A., BATAILLE, C., COPELAND, S.R., QUINN, R.L., AMBROSE, S.H., REED, D., HAMILTON, M., GRIMES, V., RICHARDS, M.P., LE ROUX, P. & ROBERTS, P. 2020. Spatial variation in bioavailable strontium isotope ratios ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) in Kenya and northern Tanzania: Implications for ecology, paleoanthropology, and archaeology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 560:109957.
- JAOUEN, K. & PONS, M.-L. 2017. Potential of non-traditional isotope studies for bioarchaeology. *Archaeol Anthropol Sci* 9(7):1389-1404.
- JARVIS, K.E. & WILLIAMS, J.G. 1993. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS): a rapid technique for the direct, quantitative determination of major, trace and rare-earth elements in geological samples. *Chemical Geology* 106(3):251-262.
- JENKINS, S., PARTRIDGE, S., STEPHENSON, T., FARLEY, S. & ROBBINS, C. 2001. Nitrogen and carbon isotope fractionation between mothers, neonates, and nursing offspring. *Oecologia* 129(3):336-341.
- JEUNESSE, C. 1995. Les groupes régionaux occidentaux du Rubané (Rhin et Bassin parisien) à travers les pratiques funéraires. *Gallia préhistoire* 37:115-154.
- JEUNESSE, C. 1996. Variabilité des pratiques funéraires et différenciation sociale dans le Néolithique ancien danubien. *Gallia préhistoire* 38:249-286.
- JEUNESSE, C. 1998. Villeneuve-Saint-Germain, Cerny, Grossgartach, Roessen et la synchronisation entre les séquences Néolithique moyen du Rhin et du Bassin parisien. *Bulletin de la Société préhistorique de France* 95(2):277-282.
- JEUNESSE, C. 2003. Les pratiques funéraires du Néolithique ancien danubien et l'identité rubanée : découvertes récentes, nouvelles tendances de la recherche. In: CHAMBON, P. & LECLERC, J., editors. *Les pratiques funéraires néolithiques avant 3500 av J-C en France et dans les régions limitrophes*. Table Ronde de Saint-Germain-en-Laye (15-17 juin 2001): Société préhistorique française (Mémoire 33). p 19-32.
- JEUNESSE, C. 2010. Changements sociaux et signification de la chasse dans les sociétés du Néolithique circumalpin. Une hypothèse alternative au déterminisme écologique. *Vernetzung Aspekte siedlungsarchäologischer Forschung Festschrift für Helmut Schlichtherle zum 60 Geburtstag*: Lavori Verlag. p 127-139.
- JEUNESSE, C. 2016a. Biens précieux et biens exceptionnels dans la Préhistoire récente de l'Europe. Le système du dépôt et de la tombe élitare et la naissance de l'Europe barbare. *Préhistoires Méditerranéennes* 5.
- JEUNESSE, C. 2016b. Des indigènes récalcitrants. Le Massif jurassien et ses marges au 5e millénaire. Une poche de résistance à la néolithisation ? Journée du laboratoire 2016: Archimède. p 246-249.
- JEUNESSE, C. 2016c. *Spatial Organization in European Neolithic Settlements: Example of the Central-European Danubian Neolithic (5600–3600 BC)*. Bratislava: Univerzita komenského v Bratislave.
- JEUNESSE, C. 2018. Organisation de l'espace dans les habitats du Néolithique européen : le cas du Néolithique danubien (3600 – 3600 av. J.-C.). In: LEMERCIER, O., SENEPART, I., BESSE, M. & MORDANT, C., editors. *Habitations et habitat du Néolithique à l'âge du Bronze en France et ses marges*. Toulouse: Archives d'Ecologie Préhistorique. p 61-76.
- JEUNESSE, C. & ARBOGAST, R.-M. 1997. A propos du statut de la chasse au Néolithique moyen. La faune sauvage dans les déchets domestiques et dans les mobiliers funéraires. In: JEUNESSE, C., editor. *Le Néolithique danubien et ses marges entre Rhin et Seine*. Actes du 22<sup>e</sup> colloque interrégional sur le Néolithique, Strasbourg (27-29 octobre 1995): Cahiers de l'association pour la promotion de la recherche archéologique en Alsace, supplément. p 81-102.
- JOANNES-BOYAU, R., ADAMS, J.W., AUSTIN, C., ARORA, M., MOFFAT, I., HERRIES, A.I.R., TONGE, M.P., BENAZZI, S., EVANS, A.R., KULLMER, O., WROE, S., DOSSETO, A. & FIORENZA, L.

2019. Elemental signatures of *Australopithecus africanus* teeth reveal seasonal dietary stress. *Nature* 572(7767):112-115.
- JOHNSON, E.V., TIMPSON, A., THOMAS, M.G. & OUTRAM, A.K. 2018. Reduced intensity of bone fat exploitation correlates with increased potential access to dairy fats in early Neolithic Europe. *Journal of Archaeological Science* 94:60-69.
- JOHNSON, L., MONTGOMERY, J., EVANS, J. & HAMILTON, E. 2019. Contribution of strontium to the human diet from querns and millstones: an experiment in digestive strontium isotope uptake. *Archaeometry* 61(6):1366-1381.
- JOVANOVIĆ, J., DE BECDELIÈVRE, C., GOUDE, G., LE ROY, M., HERRSCHER, E. & STEFANOVIĆ, S. 2015. Diet and health status of children at the Mesolithic Neolithic transition in the Danube Gorges. *Archaiika* 3:42-65.
- JOVANOVIĆ, J., DE BECDELIÈVRE, C., STEFANOVIĆ, S., ŽIVALJEVIĆ, I., DIMITRIJEVIĆ, V. & GOUDE, G. 2019. Last hunters–first farmers: new insight into subsistence strategies in the Central Balkans through multi-isotopic analysis. *Archaeol Anthropol Sci* 11(7):3279-3298.
- JOVANOVIĆ, J., POWER, R.C., DE BECDELIÈVRE, C., GOUDE, G. & STEFANOVIĆ, S. 2021. Microbotanical evidence for the spread of cereal use during the Mesolithic-Neolithic transition in the Southeastern Europe (Danube Gorges): Data from dental calculus analysis. *Journal of Archaeological Science* 125:105288.
- KAMJAN, S., GILLIS, R.E., ÇAKIRLAR, C. & RAEMAEEKERS, D.C.M. 2020. Specialized cattle farming in the Neolithic Rhine-Meuse Delta: Results from zooarchaeological and stable isotope ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) analyses. *PLoS ONE* 15(10):e0240464.
- KANG, D., AMARASIRIWARDENA, D. & GOODMAN, A.H. 2004. Application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) to investigate trace metal spatial distributions in human tooth enamel and dentine growth layers and pulp. *Anal Bioanal Chem* 378(6):1608-1615.
- KANSTRUP, M., THOMSEN, I.K., ANDERSEN, A.J., BOGAARD, A. & CHRISTENSEN, B.T. 2011. Abundance of  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  in emmer, spelt and naked barley grown on differently manured soils: towards a method for identifying past manuring practice. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 25(19):2879-2887.
- KANSTRUP, M., THOMSEN, I.K., MIKKELSEN, P.H. & CHRISTENSEN, B.T. 2012. Impact of charring on cereal grain characteristics : linking prehistoric manuring practice to  $\delta^{15}\text{N}$  signatures in archaeobotanical material. *Journal of Archaeological Science* 39(7):2533-2540.
- KATZENBERG, M.A. 1999. A re-examination of factors contributing to elevated stable nitrogen isotope values in infants and young children. *American Journal of Physical Anthropology*:165-165.
- KATZENBERG, M.A. 2007. Stable isotope analysis: a tool for studying past diet, demography, and life history. In: KATZENBERG, M.A. & SAUNDERS, S.R., editors. *Biological anthropology of the human skeleton, Second Edition*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons.
- KATZENBERG, M.A. & LOVELL, N.C. 1999. Stable isotope variation in pathological bone. *International Journal of Osteoarchaeology* 9(5):316-324.
- KATZENBERG, M.A. & WEBER, A. 1999. Stable isotope ecology and palaeodiet in the Lake Baikal region of Siberia. *Journal of Archaeological Science* 26(6):651-659.
- KENDALL, I., WOODWARD, P., CLARK, J., STYRING, A., HANNA, J. & EVERSHERD, R. 2019. Compound-specific  $\delta^{15}\text{N}$  values express differences in amino acid metabolism in plants of varying lignin content. *Phytochemistry* 161:130-138.
- KENDALL, I.P., LEE, M.R.F. & EVERSHERD, R.P. 2017. The effect of trophic level on individual amino acid  $\delta^{15}\text{N}$  values in a terrestrial ruminant food web. *STAR: Science & Technology of Archaeological Research* 3(1):135-145.
- KLEPINGER, L.L. 1984. Nutritional Assessment From Bone. *Annual Review of Anthropology* 13(1):75-96.
- KNUDSON, K.J., TUNG, T.A., NYSTROM, K.C., PRICE, T.D. & FULLAGAR, P.D. 2005. The origin of the Juch'uympa Cave mummies: strontium isotope analysis of archaeological human remains from Bolivia. *Journal of Archaeological Science* 32:903-913.
- KOHN, M.J., MORRIS, J. & OLIN, P. 2013. Trace element concentrations in teeth – a modern Idaho baseline with implications for archeometry, forensics, and palaeontology. *Journal of Archaeological Science* 40(4):1689-1699.

- KOHN, M.J. & MOSES, R.J. 2013. Trace element diffusivities in bone rule out simple diffusive uptake during fossilization but explain in vivo uptake and release. *P Natl Acad Sci USA* 110(2):419-424.
- KOHN, M.J., SCHOENINGER, M.J. & BARKER, W.W. 1999. Altered states: effects of diagenesis on fossil tooth chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63(18):2737-2747.
- KOWALYK-MAHR, C. inédit. *Variabilité des pratiques funéraires au Néolithique moyen à la confluence du Serein et de l'Yonne (Yonne, France)* [mémoire de Master 2]: Université de Paris 1.
- KRACHLER, M., ROSSIPAL, E. & MICETIC-TURK, D. 1999. Concentrations of trace elements in sera of newborns, young infants, and adults. *Biological Trace Element Research* 68(2):121.
- KRUEGER, H.W. & SULLIVAN. 1984. Models for carbon isotope fractionation between diet and bone. In: TURNLAND, J.F. & JOHNSON, P.E., editors. *Stable isotopes in nutrition*. Washington: American Chemical Society. p 205-222.
- LAHTINEN, M., ARPPE, L. & NOWELL, G. 2020. Source of strontium in archaeological mobility studies—marine diet contribution to the isotopic composition. *Archaeol Anthropol Sci* 13(1):1.
- LANCHON, Y. 2008. La culture de Blicquy/Villeneuve-Saint-Germain dans la basse vallée de la Marne : première approche chronologique à partir de la céramique. In: BURNEZ-LANOTTE, L., ILETT, M. & ALLARD, P., editors. *Fin des traditions danubiennes dans le Néolithique du Bassin parisien et de la Belgique (5100–4700 av J-C) Autour des recherches de Cl Constantin*. Paris, Namur: Société Préhistorique Française et Presses universitaires de Namur. p 143-159.
- LANDI, E., TAMPIERI, A., CELOTTI, G., SPRIO, S., SANDRI, M. & LOGROSCINO, G. 2007. Sr-substituted hydroxyapatites for osteoporotic bone replacement. *Acta Biomaterialia* 3(6):961-969.
- LARSEN, C.S. 1995. Biological changes in human populations with agriculture. *Annual Review of Anthropology* 24:185-213.
- LARSEN, C.S. 2006. The agricultural revolution as environmental catastrophe: Implications for health and lifestyle in the Holocene. *Quaternary International* 150(1):12-20.
- LAST, J. 2013. The End of the Longhouse. In: HOFMANN, D. & SMYTH, J., editors. *Tracking the Neolithic House in Europe One World Archaeology*. New York, NY: Springer. p 261-282.
- LAZZERINI, N., BALTER, V., COULON, A., TACAÏL, T., MARCHINA, C., LEMOINE, M., BAYARKHUU, N., TURBAT, T., LEPETZ, S. & ZAZZO, A. 2021. Monthly mobility inferred from isoscapes and laser ablation strontium isotope ratios in caprine tooth enamel. *Scientific Reports* 11(1):2277.
- LE BAILLY, M., LEUZINGER, U., SCHLICHOTHERLE, H. & BOUCHET, F. 2005. Diphyllbothrium: Neolithic parasite? *J Parasitol* 91(4):957-959.
- LE BRAS-GOUDE, G., BINDER, D., FORMICOLA, V., DUDAY, H., COUTURE-VESCHAMBRE, C., HUBLIN, J.-J. & RICHARDS, M. 2006. Stratégies de subsistance et analyse culturelle de populations néolithiques de Ligurie : approche par l'étude isotopique ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) des restes osseux. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 18(1-2):43-53.
- LE BRAS-GOUDE, G. & CLAUSTRE, F. 2009. Exploitation of domestic mammals in the Eastern Pyrenees during the Neolithic : human dietary patterns at the site of Montou (Corbère-les-Cabanes, France) using bone collagen stable isotopes ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) *Vie et milieu* 59(2):219-225.
- LE BRAS-GOUDE, G., HERRSCHER, E. & VAQUER, J. 2010. Variabilité isotopique de populations chasséennes : implications paléalimentaires. In: BEECHING, A., THIRAULT, E. & VITAL, J., editors. *Economie et sociétés à la fin de la Préhistoire Actualité de la recherche Actes des 7e Rencontres méridionales de Préhistoire récente tenues à Bron (Rhône), les 3 et 4 novembre 2006*. Lyon: Maison de l'Orient et de la Méditerranée. p 57-67.
- LE BRAS-GOUDE, G., HERRSCHER, E. & VAQUER, J. 2012. Funeral practices and foodstuff behaviour : what does eat meat mean ? Stable isotope analysis of Middle Neolithic populations in the Languedoc region (France). *Journal of Anthropological Archaeology* 32(3):280-287.
- LE LUYER, M. 2016. *Dental evolution in Late Pleistocene and Early Holocene human populations (19000 – 5500 cal. BP) : a whole crown perspective in the Aquitaine Basin, southwest France, and its margins* [PhD Thesis]: Université de Bordeaux.
- LE LUYER, M., COQUERELLE, M., ROTTIER, S. & BAYLE, P. 2016. Internal Tooth Structure and Burial Practices: Insights into the Neolithic Necropolis of Gurgy (France, 5100-4000 cal. BC). *PLoS ONE* 11(7):e0159688.
- LE MIERE, M. & PICON, M. 1998. Les débuts de la céramique au Proche-Orient. *Paléorient*:5-26.

- LE MORT, F., CHAMEL, B. & SANSILBANO-COLLILIEUX, M. 2015. État de santé bucco-dentaire des populations précéramiques de Chypre et du Levant : une analyse comparative. Séance de la Société Préhistorique Française : Nouvelles données sur les débuts du Néolithique à Chypre. Paris, France.
- LE ROY, M. 2015. *Les enfants au Néolithique : du contexte funéraire à l'interprétation socio-culturelle en France de 5700 à 2100 ans av. J.C.* [PhD]: Université de Bordeaux.
- LE ROY, M., DE BECDELIEVRE, C., ROTTIER, S., THIOL, S., COUTELIER, C. & TILLIER, A.-M. 2013. Changes in funerary behaviour from middle to late Neolithic in France: evidence from two settlements in the Paris basin. *Archaeologische Korrespondenzblatt* 44(3):337-351.
- LE ROY, M., ROTTIER, S. & TILLIER, A.-M. 2018. Who was a 'Child' During the Neolithic in France? *Childhood in the Past* 11(2):69-84.
- LEACH, B.F., QUINN, C.J. & LYON, G.L. 1996. A stochastic approach to the reconstruction of prehistoric human diet in the Pacific region from bone isotope signatures. *Tuhinga*(8):1-54.
- LEBLOND, C. & WEINSTOCK, M. 1976. A comparative study of dentin and bone formation. In: BOURNE, G.H., editor. *The biochemistry and physiology of bone*. New York: Academic Press. p 517-562.
- LEBON, M., REICHE, I., GALLET, X., BELLOT-GURLET, L. & ZAZZO, A. 2016. Rapid Quantification of Bone Collagen Content by ATR-FTIR Spectroscopy. *Radiocarbon* 58:131-145.
- LECLERC, J. 1997. Analyse spatiale des sites funéraires néolithiques. *Espaces physiques, espaces sociaux dans l'analyse interne des sites du Néolithique à l'Age du Fer, Paris, CTHS (actes du colloque d'Amiens, 119e Congrès du CTHS, 26-30 oct 1994)*
- LEE-THORP, J. & SPONHEIMER, M. 2003. Three case studies used to reassess the reliability of fossil bone and enamel isotope signals for paleodietary studies. *Journal of Anthropological Archaeology* 22(3):208-216.
- LEE-THORP, J.A. 2008. On isotopes and old bones. *Archaeometry* 50(6):925-950.
- LEGEROS, R. 1991. 6. Calcium Phosphates in Enamel, Dentin and Bone. In: MEYER, H.M., editor. *Calcium phosphates in oral biology and medicine*. Basel: Karger Publishers. p 108-129.
- LEGEROS, R.Z. 1981. Apatites in biological systems. *Progress in Crystal Growth and Characterization* 4(1):1-45.
- LEMERCIER, O., MARTINEAU, R., DUHAMEL, P. & PAULSSON, B.S. 2015. 16. Bilan des datations radiocarbone et cadre chrono-culturel du Néolithique en Bourgogne. In: MARTINEAU, R., PAUTRAT, Y. & LEMERCIER, O., editors. *La Préhistoire en Bourgogne: État des connaissances et bilan 1994-2005*. Dijon: Société Archéologique de l'Est. p 286.
- LENGFELDER, F., GRUPE, G., STALLAUER, A., HUTH, R. & SÖLLNER, F. 2019. Modelling strontium isotopes in past biospheres – Assessment of bioavailable  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios in local archaeological vertebrates based on environmental signatures. *Science of The Total Environment* 648:236-252.
- LEONARDI, M., GERBAULT, P., THOMAS, M.G. & BURGER, J. 2012. The evolution of lactase persistence in Europe. A synthesis of archaeological and genetic evidence. *International Dairy Journal* 22(2):88-97.
- LEROYER, C. 2003. Environnement végétal des structures funéraires et anthropisation du milieu durant le Néolithique récent/final dans le Bassin parisien. *Revue archéologique de Picardie*:83-92.
- LEROYER, C. 2006. L'impact des groupes néolithiques du Bassin Parisien sur le milieu végétal : évolution et approche territoriale d'après les données polliniques. In: DUHAMEL, P., editor. *Impacts interculturels au Néolithique moyen Du terroir au territoire : sociétés et espace*. Actes du 25<sup>e</sup> colloque interrégional sur le Néolithique, Dijon (20-21 octobre 2001): Revue archéologique de l'Est, 25<sup>e</sup> supplément. p 131-149.
- LEROYER, C. & ALLENET, G. 2006. L'anthropisation du paysage végétal d'après les données polliniques : l'exemple des fonds de vallées du Bassin parisien. In: ALLEE, P. & LESPEZ, L., editors. *L'érosion entre Société, Climat et Paléoenvironnement* Edition: Editors: . Clermont-Ferrand: Presses Universitaires Blaise Pascal. p 63-72.
- LEROYER, C., BROCHIER, J.E. & THIEBAULT, S. 2008. L'environnement végétal : néolithisation et transformations du paysage végétal : rythmes et modalités. In: TARRETE, J. & LE ROUX, C.-T., editors. *Le Néolithique, Archéologie de la France*: Picard et Ministère de la culture. p 53-75.

- LEROYER, C., COUBRAY, S., ALLENET, G., PERRIERE, J. & PERNAUD, J.-M. 2011. Vegetation dynamics, human impact and exploitation patterns in the Paris Basin through the Holocene palynology vs. anthracology. 5th International Meeting of Charcoal Analysis ; The charcoal as cultural and biological heritage. *Saguntum: Papeles del Laboratorio de Arqueología de Valencia* N° Extra 11:81-82.
- LETOLLE, R. 1980. Nitrogen-15 in the natural environment. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company. p 407-433.
- LEVI-STRAUSS, C. 2001. *Tristes tropiques*: Pocket.
- LEWIS, J., PIKE, A.W.G., COATH, C.D. & EVERSHED, R.P. 2017. Strontium concentration, radiogenic ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) and stable ( $\delta^{88}\text{Sr}$ ) strontium isotope systematics in a controlled feeding study. *STAR: Science & Technology of Archaeological Research* 3(1):45-57.
- LIBBY, W.F. 1961. Radiocarbon dating. *Science* 133:593-610.
- LIBBY, W.F., BERGER, R., MEAD, J.F., ALEXANDER, G.V. & ROSS, J.F. 1964. Replacement rates for human tissue from atmospheric radiocarbon. *Science* 146(3648):1170-1172.
- LIDÉN, K., ERIKSSON, G., NORDQVIST, B., GÖTHERSTRÖM, A. & BENDIXEN, E. 2004. "The wet and the wild followed by the dry and the tame" – or did they occur at the same time? Diet in Mesolithic – Neolithic southern Sweden. *Antiquity* 78(299):23-33.
- LILLIE, M.C., BUDD, C.E., POTEKHINA, I.D., PRICE, D., SOKHATSKY, M. & NIKITIN, A.G. 2017. First isotope analysis and new radiocarbon dating of Trypillia (Tripolye) farmers from Verteba Cave, Bilche Zolote, Ukraine. *Documenta Praehistorica* 44:306.
- LILLIE, M.C. & RICHARDS, M. 2000. Stable isotope analysis and dental evidence of diet at the Mesolithic–Neolithic transition in Ukraine. *Journal of Archaeological Science* 27(10):965-972.
- LIU, L., WANG, J., LEVIN, M.J., SINNOTT-ARMSTRONG, N., ZHAO, H., ZHAO, Y., SHAO, J., DI, N. & ZHANG, T.E. 2019. The origins of specialized pottery and diverse alcohol fermentation techniques in Early Neolithic China. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(26):12767-12774.
- LIU, L., WANG, J., ROSENBERG, D., ZHAO, H., LENGYEL, G. & NADEL, D. 2018. Fermented beverage and food storage in 13,000 y-old stone mortars at Raqefet Cave, Israel: Investigating Natufian ritual feasting. *Journal of Archaeological Science: Reports* 21:783-793.
- LIVERSIDGE, H.M. & MOLLESON, T. 2004. Variation in crown and root formation and eruption of human deciduous teeth. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists* 123(2):172-180.
- LOISON, G. 1998. La nécropole de Pontcharaud en basse Auvergne. In: GUILAINE, J., editor. *Sépultures d'Occident et genèses des mégalithismes*. Paris: Errance. p 189-206.
- LOISON, G., FABRE, V. & VILLEMEUR, I. 2004. Le Crès. Habitats Préhistoriques en Bordure de l'Orb. Structures Domestiques et Sépulture du Chasséen Ancien. *Unpublished Report Montpellier: INRAP*.
- LOISON, G., GISCLON, J.-L. & LAGRUE, A. 1991. La nécropole de Pontcharaud 2 dans le cadre de nouvelles approches du peuplement néolithique de la Basse-Auvergne. *Mémoires du Musée de préhistoire d'Ile-de-France*(4):399-408.
- LOISON, G. & SCHMITT, A. 2009. Diversité des pratiques funéraires et espaces sépulcraux sectorisés au Chasséen ancien sur le site du Crès à Béziers (Hérault) : croisements de données archéologiques et anthropologiques. *Gallia Préhistoire – Préhistoire de la France dans son contexte européen* 51:245-272.
- LONGIN, R. 1971. New method of collagen extraction for radiocarbon dating. *Nature* 230:241-242.
- LÓPEZ-BULTÓ, O. & PIQUÉ HUERTA, R. 2018. Wood Procurement at the Early Neolithic site of La Draga (Banyoles, Barcelona). *Journal of Wetland Archaeology* 18(1):56-76.
- LÓPEZ-COSTAS, O., LANTES-SUÁREZ, Ó. & CORTIZAS, A.M. 2016. Chemical compositional changes in archaeological human bones due to diagenesis: Type of bone vs soil environment. *Journal of Archaeological Science* 67:43-51.
- LORRAIN, A., GRAHAM, B., MÉNARD, F., POPP, B., BOUILLON, S., VAN BREUGEL, P. & CHEREL, Y. 2009. Nitrogen and carbon isotope values of individual amino acids: a tool to study foraging ecology of penguins in the Southern Ocean. *Marine ecology progress series* 391:293-306.

- LÖSCH, S., MOGHADDAM, N., GROSSSCHMIDT, K., RISSER, D.U. & KANZ, F. 2014. Stable Isotope and Trace Element Studies on Gladiators and Contemporary Romans from Ephesus (Turkey, 2nd and 3rd Ct. AD) - Implications for Differences in Diet. *PLoS ONE* 9(10):e110489.
- LUBELL, D., JACKES, M., SCHWARCZ, H., KNYF, M. & MEIKLEJOHN, C. 1994. The Mesolithic-Neolithic transition in Portugal: isotopic and dental evidence of diet. *Journal of Archaeological Science* 21(2):201-216.
- LUGLI, F. 2019. Accurate Sr isotope determination of human bone and tooth samples by LA-MC-ICP-MS: A comment on “Meijer et al., (2019)”. *International Journal of Osteoarchaeology* 29(6):1109-1111.
- LUGLI, F., BRUNELLI, D., CIPRIANI, A., BOSI, G., TRAVERSARI, M. & GRUPPIONI, G. 2017. C4-Plant Foraging in Northern Italy: Stable Isotopes, Sr/Ca and Ba/Ca Data of Human Osteological Samples from Roccapelago (16th–18th Centuries AD). *Archaeometry* 59(6):1119-1134.
- LUGLI, F. & CIPRIANI, A. 2017. Commentary on “Analyses of human dentine and tooth enamel by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) to study the diet of medieval Muslim individuals from Tauste (Spain)” by Guede et al. 2017. *Microchemical Journal* 133:287–294.
- LUGLI, F. & CIPRIANI, A. 2018. Comment on: metals in bones of the middle-aged inhabitants of Sardinia island (Italy) to assess nutrition and environmental exposure [Bocca et al. (2018), *Environ Sci Pollut Res*]. *Environmental Science and Pollution Research* 25(33):33827-33831.
- MACAVOY, S., MACKO, S. & ARNESON, L. 2005. Growth versus metabolic tissue replacement in mouse tissues determined by stable carbon and nitrogen isotope analysis. *Canadian Journal of Zoology-revue Canadienne De Zoologie - CAN J ZOOL* 83:631-641.
- MACKO, S., FOGEL, M., HARE, P.E. & HOERING, T.C. 1983. Stable nitrogen and carbon isotopic composition of individual amino acids isolated from cultured microorganisms. *Carnegie Institution of Washington Year Book* 82:404-410.
- MACKO, S.A., ESTEP, M.L.F., ENGEL, M.H. & HARE, P.E. 1986. Kinetic fractionation of stable nitrogen isotopes during amino acid transamination. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 50(10):2143-2146.
- MAHIEU, É. 1992. I. Réflexion sur les sépultures chasséennes. La nécropole de Najac à Siran (Hérault). *Gallia Préhistoire – Fouilles et monuments archéologiques en France métropolitaine* 34:141-164.
- MAIGROT, Y. 2016. Chapitre 15. L’outillage en os, en bois de cerf et sur dent de Clairvaux VII et XIV. In: PETREQUIN, P. & PETREQUIN, A.-M., editors. *Clairvaux et le "Néolithique Moyen Bourguignon"*: Presses universitaires de Franche-Comté et Centre de Recherche Archéologique de la Vallée de l’Ain. p 813-865.
- MALLET, N., VERJUX, C. & IHUEL, E. 2012. La diffusion des silex du Grand-Pressigny au néolithique. Actes de la table-ronde internationale. Tours, Septembre 2007: Supplément à la Revue archéologique du centre de la France. p 131-147.
- MANEN, C., CAROZZA, J.-M., MARCHAND, G. & PERRIN, T. 2016. Prolongements continentaux et atlantiques de la néolithisation méditerranéenne. *Entre deux mers 12e Rencontres Méridionales de Préhistoire Récente, Bayonne* 27.
- MANEN, C. & GUILAINE, J. 2007. Aspects géographiques et chronoculturels du Néolithique ancien languedocien. *Séance de la Société préhistorique française Premières sociétés paysannes de Méditerranée occidentale Structures des productions céramiques*
- MANEN, C. & HAMON, C. 2018. Les mécanismes de la néolithisation de la France. In: GUILAINE, J. & GARCIA, D., editors. *La Protohistoire de la France*. Paris: Hermann Éditeurs. p 11-26.
- MANEN, C. & MAZURIE DE KEROUALIN, K. 2003. Les concepts « La Hoguette » et « Limbourg » : un bilan des données. In: BESSE, M., STAHL GRETSCH, L.-I. & CURDY, P., editors. *ConstellaSion Hommage à Alain Gallay*. Lausanne: Cahiers d’archéologie romande. p 115-145.
- MANOLAGAS, S.C. 2000. Birth and Death of Bone Cells: Basic Regulatory Mechanisms and Implications for the Pathogenesis and Treatment of Osteoporosis\*. *Endocrine Reviews* 21(2):115-137.
- MARESH, M. 1970. Measurements from roentgenograms, heart size, long bone lengths, bone, muscles and fat widths, skeletal maturation. *Human growth and development*:155-200.

- MARGUERIE, D. & GEBHARDT, A. 2006. II. Les sols, leur couvert végétal et leur utilisation au Néolithique. *Gallia préhistoire*:13-23.
- MARINO, B.D. & MCELROY, M.B. 1991. Isotopic composition of atmospheric CO<sub>2</sub> inferred from carbon in C<sub>4</sub> plant cellulose. *Nature* 349(6305):127-131.
- MARINVAL, P. 1992. Archaeobotanical data on millets (*Panicum miliaceum* and *Setaria italica*) in France. *Review of Palaeobotany and Palynology* 73(1-4):259-270.
- MARINVAL, P. 1995. Réserve et consommation sur un site post-rubané : «Les Plantes-du-Monts», Gurgy (Yonne). *Revue archéologique de Picardie Numéro spécial* 9.
- MARINVAL, P. & RUAS, M.-P. 1991. Les céréales vêtues en France du Néolithique au Moyen Age : approche carpologique. In: AMOURETTI, M.C. & COMET, G., editors. *L'évolution des techniques est-elle autonome ?*: Etats généraux de la culture scientifique technique et industrielle. p 129-138.
- MARIOTTI, A., MARIOTTI, F., AMARGER, N., PIZELLE, G., NGAMBI, J., CHAMPIGNY, M. & MOYSE, A. 1980. Fractionnements isotopiques de l'azote lors des processus d'absorption des nitrates et de fixation de l'azote atmosphérique par les plantes. *Physiologie végétale* 18:163-181.
- MAROM, A., MCCULLAGH, J.S.O., HIGHAM, T.F.G. & HEDGES, R.E.M. 2013. Hydroxyproline Dating: Experiments on the <sup>14</sup>C Analysis of Contaminated and Low-Collagen Bones. *Radiocarbon* 55(2):698-708.
- MARTIN, J.E., TACAIL, T. & BALTER, V. 2017. Non-traditional isotope perspectives in vertebrate palaeobiology. *Palaeontology* 60(4):485-502.
- MARTIN, L. 2011. Agriculture et alimentation végétale en milieu montagnard au Néolithique : nouvelles données carpologiques dans les Alpes françaises du Nord. *Bulletin de la Société préhistorique française* 108:764-765.
- MARTIN, L. 2013. Economie végétale en milieu montagnard durant le Néolithique : nouvelles données carpologiques dans les Alpes françaises du Nord. In: DAUDRY, D., editor. *Le travail dans les Alpes – Exploitation des ressources naturelles, activités anthropiques de la Préhistoire au Moyen Âge Nouveaux acquis 2000-2010 Actes du XIIIème Colloque sur les Alpes dans l'Antiquité, Brusson/Vallée d'Aoste, octobre 2012, Bulletin d'études préhistoriques et archéologiques alpines XXIV*. Brusson/Vallée d'Aoste: Bulletin d'études préhistoriques et archéologiques alpines. p 149-166.
- MARTIN, L. 2014. Plant economy and territory exploitation in the Alps during the Neolithic (5000–4200 cal bc): first results of archaeobotanical studies in the Valais (Switzerland). *Veget Hist Archaeobot*:1-11.
- MARTIN, L., BOUBY, L., MARINVAL, P., DIETSCH-SELLAMI, M.-F., ROUSSELET, O., CABANIS, M., DURAND, F. & FIGUEIRAL, I. 2016. L'exploitation des ressources végétales durant le Chasséen: un bilan des données carpologiques en France entre 4400 et 3500 avant notre ère. In: PERRIN, T., CHAMBON, P., GIBAJA, J.F. & GOUDE, G., editors. *Le Chasséen, des Chasséens... Retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortaillod, Lagozza*. Toulouse: Archives d'Ecologie Préhistorique. p 259-272.
- MARTIN, L., DELHON, C., DUFRAISSE, A., THIEBAULT, S. & BESSE, M. 2019. De l'arolle ou du chêne ? Mobilité verticale et exploitation des ressources végétales au Néolithique dans les Alpes occidentales.
- MARTIN, L., DELHON, C., THIEBAULT, S. & PELLETIER, D. 2012. Plant exploitation and diet in altitude during Mesolithic and Neolithic: Archaeobotanical analysis from a hunting camp in the Chartreuse massif (l'Aulp-du-Seuil, Isère, France). *Review of Palaeobotany and Palynology* 185:26-34.
- MARTIN, L. & JACOMET, S. 2014. *From lakes to mountains: a comparison of Neolithic plant economies between wetland sites of the Swiss Plateau and the Valais (4500-3000 cal BC)*.
- MARTIN, L., JACOMET, S. & THIEBAULT, S. 2008. Plant economy during the Neolithic in a mountain context: the case of "Le Chenet des Pierres" in the French Alps (Bozel-Savoie, France). *Veget Hist Archaeobot* 17(1):113-122.
- MARTIN, L. & LUNDSTRÖM-BAUDAIS, K. 2013. Du blé, de l'orge et du pavot... Economie végétale et agriculture en Valais au début du Néolithique. *Bulletin de la Murithienne* 131:27-47.
- MARTINEAU, R., LEMERCIER, O., BONTEMPS, C., DUCREUX, F., DUHAMEL, P., DURIAUD, J., MOREAU, C., NICOLARDOT, J.-P., PILLOT, L., PRESTREAU, M. & THEVENOT, J.-P. 2015.

- Quelques perspectives pour le Néolithique de Bourgogne : réflexions pour une programmation des recherches. In: MARTINEAU, R., PAUTRAT, Y. & LEMERCIER, O., editors. *La Préhistoire en Bourgogne: état des connaissances et bilan 1994-2005*. Dijon: Revue Archéologique de l'Est. p 237-249.
- MARTINEAU, R., LINTON, J., AFFOLTER, J., FRANCISCO, S., SALIGNY, L. & BASSET, L. 2011. Le Néolithique du Morvan : état des connaissances. *Revue Archéologique de l'Est* 60:5-44.
- MASCLANS, A., BICKLE, P. & HAMON, C. 2020. Sexual Inequalities in the Early Neolithic? Exploring Relationships Between Sexes/Genders at the Cemetery of Vedrovice Using Use-Wear Analysis, Diet and Mobility. *Journal of Archaeological Method and Theory*.
- MASCLANS, A., HAMON, C., JEUNESSE, C. & BICKLE, P. 2021. A sexual division of labour at the start of agriculture? A multi-proxy comparison through grave good stone tool technological and use-wear analysis. *PLoS ONE* 16(4):e0249130.
- MASCLANS LATORRE, A., PALOMO, A. & GIBAJA BAO, J.F. 2017. Functional studies of Neolithic stone axes and adzes: experimental program and archaeological applications= Estudios funcionales de hachas y azuelas de piedra neolíticas: programa experimental y aplicaciones metodológicas. *Cuadernos de prehistoria y arqueología de la Universidad de Granada*, 2017, vol 27, p 177-210.
- MATSUBAYASHI, J. & TAYASU, I. 2019. Collagen turnover and isotopic records in cortical bone. *Journal of Archaeological Science* 106:37-44.
- MAURER, A.-F., GALER, S.J.G., KNIPPER, C., BEIERLEIN, L., NUNN, E.V., PETERS, D., TÜTKEN, T., ALT, K.W. & SCHÖNE, B.R. 2012. Bioavailable  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in different environmental samples — Effects of anthropogenic contamination and implications for isoscapes in past migration studies. *Science of The Total Environment* 433:216-229.
- MAXWELL, T.M., SILVA, L.C.R. & HORWATH, W.R. 2014. Using multielement isotopic analysis to decipher drought impacts and adaptive management in ancient agricultural systems. *P Natl Acad Sci USA* 111(45):E4807-E4808.
- MAYS, S. 2003. Bone strontium: calcium ratios and duration of breastfeeding in a Mediaeval skeletal population. *Journal of Archaeological Science* 30(6):731-741.
- MAYS, S., ROBERTS, D., MARSHALL, P., PIKE, A.W.G., VAN HEEKEREN, V., BRONK RAMSEY, C., DUNBAR, E., REIMER, P., LINSKOTT, B., RADINI, A., LOWE, A., DOWLE, A., SPELLER, C., VALLENDER, J. & BEDFORD, J. 2018. Lives before and after Stonehenge: An osteobiographical study of four prehistoric burials recently excavated from the Stonehenge World Heritage Site. *Journal of Archaeological Science: Reports* 20:692-710.
- MAZURIE DE KEROUALIN, K. 2003. *Genèse et diffusion de l'agriculture en Europe*. Paris: Errance. 184 p.
- MCCARROLL, D. & LOADER, N.J. 2006. Isotopes in tree rings. In: M.J., L., editor. *Isotopes in Palaeoenvironmental Research vol 10*. Dordrecht: Springer.
- MCCLELLAND, J.W. & MONTOYA, J. 2002. Trophic relationships and the nitrogen isotopic composition of amino acids in plankton. *Ecology* 83:2173-2180.
- MCCUTCHAN, J.H., LEWIS, W.M., KENDALL, C. & MCGRATH, C.C. 2003. Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur. *Oikos* 102(2):378-390.
- MCMAHON, K.W. & MCCARTHY, M.D. 2016. Embracing variability in amino acid  $\delta^{15}\text{N}$  fractionation: mechanisms, implications, and applications for trophic ecology. *Ecosphere* 7(12):e01511.
- MEADOWS, J., BĒRZIŅŠ, V., BRINKER, U., LÜBKE, H., SCHMÖLCKE, U., STAUDE, A., ZAGORSKA, I. & ZARIŅA, G. 2016. Dietary freshwater reservoir effects and the radiocarbon ages of prehistoric human bones from Zvejnieki, Latvia. *Journal of Archaeological Science: Reports* 6:678-689.
- MEADOWS, J., ROBSON, H.K., GROB, D., HEGGE, C., LÜBKE, H., SCHMÖLCKE, U., TERBERGER, T. & GRAMSCH, B. 2018. How fishy was the inland Mesolithic? New data from Friesack, Brandenburg, Germany. *Radiocarbon* 60(5):1621-1636.
- MEIJER, J., DOLPHIN, A.E., YAKYMCHUK, C. & GERVERS, M. 2019. Interpreting medieval mobility from burials at the rock-hewn church of St. Georges, Gurat (France): Insights from strontium isotope analysis of bones and teeth. *International Journal of Osteoarchaeology* 29(4):574-583.

- MEKOTA, A.-M., GRUPE, G., UFER, S. & CUNTZ, U. 2006. Serial analysis of stable nitrogen and carbon isotopes in hair: monitoring starvation and recovery phases of patients suffering from anorexia nervosa. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 20(10):1604-1610.
- MENIEL, P. 1984. Contribution à l'histoire de l'élevage en Picardie. Du néolithique à la fin de l'Âge du Fer. *Revue archéologique de Picardie*:1-56.
- MERLANGE, A. & POULAIN, T. 1991. Une fosse à inhumations néolithiques à Bonnard (Yonne). *L'Echo de Joigny* (47):1-46.
- MERTZ, W. 1981. The essential trace elements. *Science* 213(4514):1332-1338.
- MEUNIER, K. 2007. Gurgy "Le Nouzeau" (89 - Bourgogne). INRAP, Rapport Final d'Opération. p 189.
- MEUNIER, K. 2010. La céramique du Néolithique ancien dans le sud-est du Bassin parisien : résumé de thèse. *Bulletin de la Société préhistorique française* 107(4):772-774.
- MEUNIER, K., AUGEREAU, A., HAMON, C. & DUHAMEL, P. 2006. Le site Villeneuve-Saint-Germain de Gurgy 'Les Grands Champs' (Yonne). In: DUHAMEL, P., editor. *Impacts interculturels au Néolithique moyen Du terroir au territoire : sociétés et espace Actes du 25<sup>e</sup> colloque interrégional sur le Néolithique, Dijon (20-21 octobre 2001)*: Revue archéologique de l'Est. p 287-301.
- MEYER, C., KNIPPER, C., NICKLISCH, N., MÜNSTER, A., KÜRBIS, O., DRESELY, V., MELLER, H. & ALT, K.W. 2018. Early Neolithic executions indicated by clustered cranial trauma in the mass grave of Halberstadt. *Nature Communications* 9(1):2472.
- MICLON, V. 2020. *Alimentation, état sanitaire et statut social des populations médiévales dans le centre de la France : approche archéo-anthropologique et paléobiochimique*. [PhD]: Université de Tours.
- MIDGLEY, M.S. 2006. From Ancestral Village to Monumental Cemetery: The Creation of Monumental Neolithic Cemeteries. *Journal of Neolithic Archaeology* 0(0).
- MILLARD, A.R. & HEDGES, R.E.M. 1996. A diffusion-adsorption model of uranium uptake by archaeological bone. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60(12):2139-2152.
- MILLER, M.J., CHIKARAISHI, Y., OGAWA, N.O., YAMADA, Y., TSUKAMOTO, K. & OHKOUCHI, N. 2013. A low trophic position of Japanese eel larvae indicates feeding on marine snow. *Biology Letters* 9(1):20120826.
- MINAGAWA, M. & WADA, E. 1984. Stepwise enrichment of <sup>15</sup>N along food chains: further evidence and the relation between  $\delta^{15}\text{N}$  and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48(5):1135-1140.
- MINTZ, S.W. & DU BOIS, C.M. 2002. The anthropology of food and eating. *Annual Review of Anthropology*:99-119.
- MION, L. 2019. *The origins of the Mediterranean diet: Isotopic analyses of bioarchaeology remains from Antiquity to the early Middle Ages in South-East France* [PhD]: Aix Marseille Université.
- MOFFAT, I. 2013. *Spatially resolved strontium isotope micro-analysis of lower and middle palaeolithic fauna from archaeological sites in Israel and Southern France* [PhD]: Australian National University.
- MOGHADDAM, N., MÜLLER, F., HAFNER, A. & LÖSCH, S. 2016. Social stratigraphy in Late Iron Age Switzerland: stable carbon, nitrogen and sulphur isotope analysis of human remains from Münsingen. *Archaeol Anthropol Sci* 8(1):149-160.
- MOINAT, P. 2003. Pectoral en défenses de suidés, parure de Chamblandes ? In: CHAMBON, P. & LECLERC, J., editors. *Les pratiques funéraires néolithiques avant 3500 av J-C en France et dans les régions limitrophes*. Table Ronde de Saint-Germain-en-Laye (15-17 juin 2001): Société préhistorique française (Mémoire 33). p 125-129.
- MOINAT, P. 2007. Cistes en pierre et coffres en bois, inhumations simples et dépôts complexes : un bilan des pratiques funéraires à Vidy (Lausanne, Vaud) et à Chamblande (Pully, Vaud). In: MOINAT, P. & CHAMBON, P., editors. *Les cistes de Chamblandes et la place des coffres dans les pratiques funéraires du Néolithique moyen occidental*. Actes du colloque de Lausanne (12-13 mai 2006): Cahiers d'archéologie romande (110) et Société préhistorique française (Mémoire 43). p 195-220.
- MOINAT, P. & CHAMBON, P. 2007. *Les cistes de Chamblandes et la place des coffres dans les pratiques funéraires du Néolithique moyen Occidental*. Actes du colloque de Lausanne (12-13

- mai 2006): Cahiers d'archéologie romande (110) et Société préhistorique française (Mémoire 43).
- MOLNAR, S. 1971. Human tooth wear, tooth function and cultural variability. *American Journal of Physical Anthropology* 34(2):175-189.
- MONTANARI, M. 2009. *Entre la poire et le fromage. Ou comment un proverbe peut raconter l'histoire*. Paris: Agnès Viénot.
- MONTEMURRO, M., PONTONIO, E., GOBBETTI, M. & RIZZELLO, C.G. 2019. Investigation of the nutritional, functional and technological effects of the sourdough fermentation of sprouted flours. *International Journal of Food Microbiology* 302:47-58.
- MONTGOMERY, J. 2010. Passports from the past: Investigating human dispersals using strontium isotope analysis of tooth enamel. *Ann Hum Biol* 37(3):325-346.
- MONTGOMERY, J., EVANS, J.A. & HORSTWOOD, M.S.A. 2010. Evidence for long-term averaging of strontium in bovine enamel using TIMS and LA-MC-ICP-MS strontium isotope intra-molar profiles. *Environmental Archaeology* 15(1):32-42.
- MOORREES, C.F.A., FANNING, E.A. & HUNT, E.E. 1963. Age variation of formation stages for 10 permanent teeth. *Journal of Dental Research* 42:1490-1502.
- MORDANT, D. 1997. Le complexe des Réaudins à Balloy: enceinte et nécropole monumentale. *Mémoires du Musée de préhistoire d'Ile-de-France*(6):449-479.
- MORDANT, D. & SIMONIN, D. 1997. Sites d'habitats Cerny. *Mémoires du Musée de préhistoire d'Ile-de-France*(6):319-339.
- MORRISON, D.J., DODSON, B., SLATER, C. & PRESTON, T. 2000.  $^{13}\text{C}$  natural abundance in the British diet: implications for  $^{13}\text{C}$  breath tests. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 14(15):1321-1324.
- MÜLLER, W. & ANCZKIEWICZ, R. 2016. Accuracy of laser-ablation (LA)-MC-ICPMS Sr isotope analysis of (bio)apatite – a problem reassessed. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 31(1):259-269.
- MÜLLER, W., FRICKE, H., HALLIDAY, A.N., MCCULLOCH, M.T. & WARTH, J.-A. 2003. Origin and Migration of the Alpine Iceman. *Science* 302(5646):862-866.
- MÜLLER, W., NAVA, A., EVANS, D., ROSSI, P.F., ALT, K.W. & BONDIOLI, L. 2019. Enamel mineralization and compositional time-resolution in human teeth evaluated via histologically-defined LA-ICPMS profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 255:105-126.
- MURAIL, P., BRUZEK, J., HOUËT, F. & CUNHA, E. 2005. DSP : a tool for probabilistic sex diagnosis using worldwide variability in hip-bone measurements. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 17(3-4):167-176.
- MURSHED, M. 2018. Mechanism of Bone Mineralization. *Cold Spring Harb Perspect Med* 8(12).
- NAIMAN, Z., QUADE, J. & PATCHETT, P.J. 2000. Isotopic evidence for eolian recycling of pedogenic carbonate and variations in carbonate dust sources throughout the southwest United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64(18):3099-3109.
- NAITO, Y.I., BOCHERENS, H., CHIKARAISHI, Y., DRUCKER, D.G., WIBING, C., YONEDA, M. & OHKOUCHI, N. 2016a. An overview of methods used for the detection of aquatic resource consumption by humans: Compound-specific delta N-15 analysis of amino acids in archaeological materials. *Journal of Archaeological Science: Reports* 6:720-732.
- NAITO, Y.I., CHIKARAISHI, Y., DRUCKER, D.G., OHKOUCHI, N., SEMAL, P., WIBING, C. & BOCHERENS, H. 2016b. Ecological niche of Neanderthals from Spy Cave revealed by nitrogen isotopes of individual amino acids in collagen. *Journal of Human Evolution* 93:82-90.
- NAITO, Y.I., CHIKARAISHI, Y., DRUCKER, D.G., OHKOUCHI, N., SEMAL, P., WIBING, C. & BOCHERENS, H. 2018. Reply to “Comment on “Ecological niche of Neanderthals from Spy Cave revealed by nitrogen isotopes of individual amino acids in collagen.” [J. Hum. Evol. 93 (2016) 82–90]” [J. Hum. Evol. 117 (2018) 53–55]. *Journal of Human Evolution* 117:56-60.
- NAITO, Y.I., CHIKARAISHI, Y., OHKOUCHI, N., DRUCKER, D. & BOCHERENS, H. 2013a. Nitrogen isotopic composition of collagen amino acids as an indicator of aquatic resource consumption: insights from Mesolithic and Epipalaeolithic archaeological sites in France. *World Archaeology* 45(3):338-359.

- NAITO, Y.I., CHIKARAISHI, Y., OHKOUCHI, N. & YONEDA, M. 2013b. Evaluation of carnivory in inland Jomon hunter-gatherers based on nitrogen isotopic compositions of individual amino acids in bone collagen. *Journal of Archaeological Science* 40(7):2913-2923.
- NAITO, Y.I., HONCH, N.V., CHIKARAISHI, Y., OHKOUCHI, N. & YONEDA, M. 2010. Quantitative evaluation of marine protein contribution in ancient diets based on nitrogen isotope ratios of individual amino acids in bone collagen: An investigation at the Kitakogane Jomon site. *American Journal of Physical Anthropology* 143(1):31-40.
- NAITO, Y.I., MELEG, I.N., ROBU, M., VLAICU, M., DRUCKER, D.G., WIBING, C., HOFREITER, M., BARLOW, A. & BOCHERENS, H. 2020. Heavy reliance on plants for Romanian cave bears evidenced by amino acid nitrogen isotope analysis. *Scientific Reports* 10(1):6612.
- NAKASHITA, R., SUZUKI, Y., AKAMATSU, F., NAITO, Y.I., SATO-HASHIMOTO, M. & TSUBOTA, T. 2011. Ecological application of compound-specific stable nitrogen isotope analysis of amino acids : A case study of captive and wild bears. *Researches in organic geochemistry* 27:73-79.
- NANCI, A. 2003. *Ten Cate's oral histology: development, structure and function*. Missouri: Mosby. 400 p.
- NAU, F., NYS, Y., Y., YAMAKAWA, Y. & REHAULT-GODBERT, S. 2010. Intérêt nutritionnel de l'oeuf en alimentation humaine. *INRA Productions Animales* 23(2):225-236.
- NÉGREL, P. & DESCHAMPS, P. 1996. Natural and anthropogenic budgets of a small watershed in the massif central (France): Chemical and strontium isotopic characterization of water and sediments. *Aquatic Geochemistry* 2(1):1-27.
- NEHLICH, O. 2015. The application of sulphur isotope analyses in archaeological research: A review. *Earth-Science Reviews* 142:1-17.
- NEHLICH, O., BORIC, D., STEFANOVIĆ, S. & RICHARDS, M.P. 2010. Sulphur isotope evidence for freshwater fish consumption: a case study from the Danube Gorges, SE Europe. *Journal of Archaeological Science* 37(5):1131-1139.
- NEHLICH, O., FULLER, B.T., MÁRQUEZ-GRANT, N. & RICHARDS, M.P. 2012. Investigation of diachronic dietary patterns on the islands of Ibiza and Formentera, Spain: Evidence from sulfur stable isotope ratio analysis. *American Journal of Physical Anthropology* 149(1):115-124.
- NEHLICH, O., MONTGOMERY, J., EVANS, J., SCHADE-LINDIG, S., PICHLER, S.L., RICHARDS, M.P. & ALT, K.W. 2009. Mobility or migration: a case study from the Neolithic settlement of Nieder-Mörlen (Hessen, Germany). *Journal of Archaeological Science* 36(8):1791-1799.
- NEHLICH, O., OELZE, V., JAY, M., CONRAD, M., STÄUBLE, H., TEEGEN, W.-R. & RICHARDS, M. 2014. Sulphur isotope ratios of multi-period archaeological skeletal remains from central Germany: A dietary and mobility study. *Anthropologie (Brno)* 52:15-33.
- NEHLICH, O. & RICHARDS, M. 2009. Establishing collagen quality criteria for sulphur isotope analysis of archaeological bone collagen. *Archaeol Anthropol Sci* 1(1):59-75.
- NEWSOME, S.D., FOGEL, M.L., KELLY, L. & DEL RIO, C.M. 2011. Contributions of direct incorporation from diet and microbial amino acids to protein synthesis in Nile tilapia. *Functional Ecology* 25(5):1051-1062.
- NIELSEN-MARSH, C., GERNAEY, A., TURNER-WALKER, G., HEDGES, R., PIKE, A. & COLLINS, M. 2000. *The chemical degradation of bone*.
- NITSCH, E.K., CHARLES, M. & BOGAARD, A. 2015. Calculating a statistically robust  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  offset for charred cereal and pulse seeds. *STAR: Science & Technology of Archaeological Research* 1(1):1-8.
- O'CONNELL, T.C. 2017. 'Trophic' and 'source' amino acids in trophic estimation: a likely metabolic explanation. *Oecologia* 184(2):317-326.
- O'CONNELL, T.C. & COLLINS, M.J. 2018. Comment on "Ecological niche of Neanderthals from Spy Cave revealed by nitrogen isotopes of individual amino acids in collagen" [J. Hum. Evol. 93 (2016) 82-90]. *J Hum Evol* 117:53-55.
- O'CONNELL, T.C., HEDGES, R.E.M., HEALEY, M.A. & SIMPSON, A.H.R.W. 2001. Isotopic Comparison of Hair, Nail and Bone: Modern Analyses. *Journal of Archaeological Science* 28(11):1247-1255.

- O'CONNELL, T.C., KNEALE, C.J., TASEVSKA, N. & KUHNLE, G.G.C. 2012. The diet-body offset in human nitrogen isotopic values: A controlled dietary study. *American Journal of Physical Anthropology* 149(3):426-434.
- O'LEARY, M.H. 1981. Carbon isotope fractionation in plants. *Phytochemistry* 20(4):553-567.
- O'LEARY, M.H. 1988. Carbon isotopes in photosynthesis. *BioScience* 38(5):328-336.
- O'BRIEN, M. & BENTLEY, R.A. 2015. The role of food storage in human niche construction: An example from Neolithic Europe. *Environmental Archaeology* 20:150713230644004.
- O'BRIEN, M. & LALAND, K. 2012. Genes, Culture, and Agriculture: An Example of Human Niche Construction. *Current Anthropology* 53:434-470.
- OELZE, V.M., KOCH, J.K., KUPKE, K., NEHLICH, O., ZÄUNER, S., WAHL, J., WEISE, S.M., RIECKHOFF, S. & RICHARDS, M.P. 2012. Multi-isotopic analysis reveals individual mobility and diet at the Early Iron Age monumental tumulus of Magdalenenberg, Germany. *American Journal of Physical Anthropology* 148(3):406-421.
- OELZE, V.M., SIEBERT, A., NICKLISCH, N., MELLER, H., DRESELY, V. & ALT, K.W. 2011. Early Neolithic diet and animal husbandry: stable isotope evidence from three Linearbandkeramik (LBK) sites in Central Germany. *Journal of Archaeological Science* 38(2):270-279.
- OGRINC, N. & BUDJA, M. 2005. Paleodietary reconstruction of a Neolithic population in Slovenia: a stable isotope approach. *Chemical Geology* 218(1-2):103-116.
- OHKOUCHI, N. & TAKANO, Y. 2014. 12.10 - Organic Nitrogen: Sources, Fates, and Chemistry. In: HOLLAND, H.D. & TUREKIAN, K.K., editors. *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*. Oxford: Elsevier. p 251-289.
- OLSEN, J., HEINEMEIER, J., LÜBKE, H., LÜTH, F. & TERBERGER, T. 2010. Dietary Habits and Freshwater Reservoir Effects in Bones from a Neolithic NE German Cemetery. *Radiocarbon* 52(2):635-644.
- OLSEN, K.C., WHITE, C.D., LONGSTAFFE, F.J., VON HEYKING, K., MCGLYNN, G., GRUPE, G. & RÜHLI, F.J. 2014. Intraskelletal isotopic compositions ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) of bone collagen: Nonpathological and pathological variation. *American Journal of Physical Anthropology* 153(4):598-604.
- OPPLIGER, J. 2013. *La pêche au temps des lacustres sur les lacs de Neuchâtel et de Morat (Suisse) : saisonnalité et stratégie du Néolithique moyen au Bronze final*: Université de Genève.
- OTTONI, C., BORIC, D., CHERONET, O., SPARACELLO, V., DORI, I., COPPA, A., ANTONOVIC, D., VUJEVIC, D., PRICE, T.D. & PINHASI, R. 2021. Tracking the transition to agriculture in Southern Europe through ancient DNA analysis of dental calculus. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118(32).
- PALEAU, L. inédit. *La faune du site néolithique de Beaumont "Crot aux Moines" (Yonne)* [mémoire de Master 2]: Université de Dijon.
- PAOLINI, M., ZILLER, L., LAURSEN, K.H., HUSTED, S. & CAMIN, F. 2015. Compound-Specific  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  Analyses of Amino Acids for Potential Discrimination between Organically and Conventionally Grown Wheat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 63(25):5841-5850.
- PAPATHANASIOU, A. 2003. Stable isotope analysis in Neolithic Greece and possible implications on human health. *International Journal of Osteoarchaeology* 13(5):314-324.
- PARIAT, J.-G. 2005. Des pratiques funéraires marginales entre les VIe et IIIe millénaires Av. J.-C. en Europe tempérée ? Le cas des ossements humains en contexte non sépulcral. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 17(3-4):301-305.
- PARIAT, J.-G. 2007. *Des morts sans tombe ? Le cas des ossements humains en contexte non sépulcral en Europe tempérée entre les 6e et 3e millénaires av. J.-C.* Oxford: BAR International Series 1683. 195 p.
- PARIAT, J.-G. 2016. Un chasséen, des chasséens ? Des restes humains épars. *Le Chasséen, des Chasséens : retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortaillod, Lagozza Conference Proceedings, Paris, 18-20 novembre 2014*. Toulouse: Archives d'Ecologie Préhistorique. p 421-431.
- PARIAT, J.-G. & THEVENET, C. 2008. Restes humains en contexte domestique, quelles perspectives ? Les sites Villeneuve-Saint-Germain de la basse vallée de la Marne. In: BURNEZ-LANOTTE, L., ILETT, M. & ALLARD, P., editors. *Fin des traditions danubiennes dans le Néolithique du*

- Bassin parisien et de la Belgique (5100–4700 av J-C) Autour des recherches de Cl Constantin*. Paris, Namur: Société Préhistorique Française et Presses universitaires de Namur. p 383–393.
- PARK, R. & EPSTEIN, S. 1960. Carbon isotope fractionation during photosynthesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 21(1-2):110-126.
- PASSEY, B.H. & CERLING, T.E. 2002. Tooth enamel mineralization in ungulates: implications for recovering a primary isotopic time-series. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66(18):3225-3234.
- PEEK, S. & CLEMENTZ, M.T. 2012a. Ontogenetic variations in Sr/Ca and Ba/Ca ratios of dental bioapatites from *Bos taurus* and *Odocoileus virginianus*. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 26(4):248-254.
- PEEK, S. & CLEMENTZ, M.T. 2012b. Sr/Ca and Ba/Ca variations in environmental and biological sources: A survey of marine and terrestrial systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 95:36-52.
- PERLES, C. 2011. Le statut des échanges au Néolithique. p 539-546.
- PERRIERE, J., LEROYER, C. & DUHAMEL, P. 2006. Impact sur le milieu végétal et activités agropastorales des groupes néolithiques d'après la séquence pollinique d'Armancourt (Oise). In: DUHAMEL, P., editor. *Impacts interculturels au Néolithique moyen Du terroir au territoire : sociétés et espace*. Actes du 25<sup>e</sup> colloque interrégional sur le Néolithique, Dijon (20-21 octobre 2001): Revue archéologique de l'Est, 25<sup>e</sup> supplément. p 151-160.
- PERRIN, T. 2016. La chronologie du Chasséen dans son contexte européen. *Le Chasséen, des Chasséens... Retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortaillod, Lagozza Actes du colloque international tenu à Paris (France) du 18 au 20 novembre 2014*. Paris.
- PERRIN, T., CHAMBON, P., GIBAJA, J.F. & GOUDE, G. 2016. *Le Chasséen, des Chasséens... Retour sur une culture nationale et ses parallèles, Sepulcres de fossa, Cortaillod, Lagozza. Actes du colloque international tenu à Paris (France) du 18 au 20 novembre 2014*. Toulouse: Archives d'Ecologie Préhistorique.
- PESTLE, W.J., CROWLEY, B.E. & WEIRAUCH, M.T. 2014. Quantifying Inter-Laboratory Variability in Stable Isotope Analysis of Ancient Skeletal Remains. *PLoS ONE* 9(7):e102844.
- PETERSON, B.J. & FRY, B. 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual review of ecology and systematics* 18(1):293-320.
- PÉTREQUIN, P. 1984a. Chapitre V. Cultivateurs des lacs et des tourbières. In: PÉTREQUIN, P., editor. *Gens de l'Eau, Gens de la Terre, Ethno-archéologie des communautés lacustres Collection La Mémoire du Temps*. Paris: Hachette. p 131-166.
- PÉTREQUIN, P. 1984b. *Gens de l'Eau, Gens de la Terre, Ethno-archéologie des communautés lacustres*. Paris: Hachette. 345 p.
- PÉTREQUIN, P., CASSEN, S., CROUTSCH, C. & WELLER, O. 1997. Haches alpines et haches carnacéennes dans l'Europe du Ve millénaire. *Notae Praehistoricae* 17:135-150.
- PÉTREQUIN, P., CASSEN, S., ERRERA, M., KLASSEN, L. & SHERIDAN, A. 2012a. Des choses sacrées... fonctions idéelles des jades alpins en Europe occidentale. *Jade Grandes haches alpines du Néolithique européen Ve et IVe millénaires av J-C Cahiers de la MSHE CN Ledoux, Besançon, Presses Universitaires de Franche-Comté et Centre de Recherche Archéologique de la Vallée de l'Ain* 2:1354-1423.
- PÉTREQUIN, P., CASSEN, S., ERRERA, M., KLASSEN, L., SHERIDAN, A. & PÉTREQUIN, A.M. 2012b. *Jade. Grandes haches alpines du Néolithique européen. Ve et IVe millénaires av. J-C*: Besançon, Presses Universitaires de Franche-Comté et Centre de Recherche Archéologique de la Vallée de l'Ain. 1524 p.
- PÉTREQUIN, P., CASSEN, S., GAUTHIER, E., KLASSEN, L., PAILLER, Y. & SHERIDAN, A. 2012c. Typologie, chronologie et répartition des grandes haches alpines en Europe occidentale. In: PÉTREQUIN, P., CASSEN, S., ERRERA, M., KLASSEN, L. & PÉTREQUIN, A.S.E.A.M., editors. *Jade Grandes haches alpines du Néolithique européen Ve et IVe millénaires av J-C*: Besançon, Presses Universitaires de Franche-Comté et Centre de Recherche Archéologique de la Vallée de l'Ain. p 574-727.

## Bibliographie

---

- PETREQUIN, P., CASSEN, S., KLASSEN, L. & FABREGAS VALCARCE, R. 2012d. La circulation des haches carnacéennes en Europe occidentale. *Pétrequin, Cassen et al* 2:1015-1045.
- PETREQUIN, P., GAUTHIER, E. & PETREQUIN, A.-M. 2017. *Jade. Objets-signes et interprétations sociales des jades alpins dans l'Europe néolithique (Tomes 3 et 4)*. Besançon: Presses universitaires de Franche-Comté et Centre de recherche archéologique de la vallée de l'Ain. 1468 p.
- PETREQUIN, P. & JEUNESSE, C. 1995. *La hache de pierre: carrières vosgiennes et échanges de lames polies pendant le néolithique, 5400-2100 av. J.-C.* Paris: Errance. 127 p.
- PETREQUIN, P. & PETREQUIN, A.-M., editors. 2016. *Clairvaux et le "Néolithique Moyen Bourguignon"*. Besançon: Presses universitaires de Franche-Comté.
- PETZKE, K.J., FEIST, T., FLEIG, W.E. & METGES, C.C. 2006. Nitrogen isotopic composition in hair protein is different in liver cirrhotic patients. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 20(19):2973-2978.
- PETZKE, K.J., FULLER, B.T. & METGES, C.C. 2010. Advances in natural stable isotope ratio analysis of human hair to determine nutritional and metabolic status. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care* 13(5):532-540.
- PHILIPPSEN, B. & HEINEMEIER, J. 2013. Freshwater Reservoir Effect Variability in Northern Germany. *Radiocarbon* 55(3):1085-1101.
- POLET, C. 2013. L'apport de l'anthropologie biologique à la connaissance des régimes alimentaires des populations du passé. *Bulletin de la Fédération des Archéologues de Wallonie et de Bruxelles ASBL* 72:67-76.
- POLLARD, A.M., HERON, C. & ARMITAGE, R.A. 2017. *Archaeological Chemistry (3rd Edition)*: Royal Society of Chemistry. 585 p.
- POLLOCK, D.K. 1985. Food and sexual identity among the Culina. *Food and Foodways* 1(1-2):25-41.
- PONSARD, S. & AVERBUCH, P. 1999. Should growing and adult animals fed on the same diet show different  $\delta^{15}\text{N}$  values? *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 13(13):1305-1310.
- POSNER, A.S. 1987. Bone mineral and the mineralization process. *Bone and Mineral Research*/5.
- POULAIN, T. 2005. La faune des niveaux néolithiques de la redoute au camp de Chassey : les niveaux néolithiques du rempart de «la Redoute». In: THEVENOT, J.-P., editor. *Le Camp de Chassey (Chassey-le-Camp, Saône-et-Loire)*. Dijon: ARTEHIS Edition. p 387-413.
- POWER, R.C., SALAZAR-GARCÍA, D.C., RUBINI, M., DARLAS, A., HARVATI, K., WALKER, M., HUBLIN, J.-J. & HENRY, A.G. 2018. Dental calculus indicates widespread plant use within the stable Neanderthal dietary niche. *Journal of Human Evolution* 119:27-41.
- POWER, R.C., SALAZAR-GARCÍA, D.C., STRAUS, L.G., GONZÁLEZ MORALES, M.R. & HENRY, A.G. 2015. Microremains from El Mirón Cave human dental calculus suggest a mixed plant–animal subsistence economy during the Magdalenian in Northern Iberia. *Journal of Archaeological Science* 60:39-46.
- PRAT, F. 1970-1975. *Quelques mammifères pléistocènes. Odontologie, ostéologie*: Université Bordeaux 1, Institut du Quaternaire, cours ronéot. 245 p.
- PRESTREAU, M. 2006. Le complexe chasséen dans l'Yonne. In: BARAY, L., editor. *Artisanats, sociétés et civilisations : hommage à Jean-Paul Thevenot*. Dijon: Société Archéologique de l'Est. p 87-114.
- PRESTREAU, M. & THEVENOT, J.P. 1996. L'axe Yonne-Armançon-Saône au Néolithique moyen : Cadre chronologique et interpénétrations culturelles. *Revue archéologique de l'Est et du Centre-Est* Supplément 14:383-396.
- PRICE, D., BENTLEY, R.A., LUNING, J., GRONENBORN, D. & WAHL, J. 2001. Prehistoric human migration in the Linearbankeramik of Central Europe. *Antiquity* 75.
- PRICE, T.D., BLITZ, J., BURTON, J. & EZZO, J.A. 1992. Diagenesis in prehistoric bone: Problems and solutions. *Journal of Archaeological Science* 19(5):513-529.
- PRICE, T.D., BURTON, J.H. & BENTLEY, R.A. 2002. The Characterization of Biologically Available Strontium Isotope Ratios for the Study of Prehistoric Migration. *Archaeometry* 44(1):117-135.
- PRICE, T.D., FREI, R., BRINKER, U., LIDKE, G., TERBERGER, T., FREI, K.M. & JANTZEN, D. 2019. Multi-isotope proveniencing of human remains from a Bronze Age battlefield in the Tollense Valley in northeast Germany. *Archaeol Anthropol Sci* 11(1):33-49.

- PRICE, T.D., SCHOENINGER, M.J. & ARMELAGOS, G.J. 1985. Bone chemistry and past behavior: an overview. *Journal of Human Evolution* 14(5):419-447.
- PRICE, T.D., WAHL, J. & BENTLEY, R.A. 2006. Isotopic evidence for mobility and group organization among Neolithic farmers at Talheim, Germany, 5000 BC. *European Journal of Archaeology* 9(2-3):259-284.
- PRIVAT, K.L., O'CONNELL, T.C. & HEDGES, R.E.M. 2007. The distinction between freshwater- and terrestrial-based diets: methodological concerns and archaeological applications of sulphur stable isotope analysis. *Journal of Archaeological Science* 34(8):1197-1204.
- PROBST, A., EL GH'MARI, A., AUBERT, D., FRITZ, B. & MCNUTT, R. 2000. Strontium as a tracer of weathering processes in a silicate catchment polluted by acid atmospheric inputs, Strengbach, France. *Chemical Geology* 170(1):203-219.
- PRODEO, F., MALRAIN, F., PASTRE, J.-F., ARBOGAST, R.-M., BOSTYN, F., LEROYER, C. & VALENTIN, B. 1990. Les occupations néolithiques et protohistoriques sur le site de "La Butte de Rhuis II" à Longueuil-Sainte-Marie (Oise). Fouilles de 1989. *Revue archéologique de Picardie*:93-114.
- RAMIREZ ROZZI, F. 1993. Le développement dentaire des hominidés plio-pléistocènes. *Cahiers Du Centre De Recherches Anthropologiques* 5:131-142.
- RAMIREZ ROZZI, F. 2010. Quantification de la croissance à partir des indices dentaires. *L'anthropologie du vivant : objets et méthodes*:41-46.
- RASTEIRO, R. & CHIKHI, L. 2013. Female and male perspectives on the neolithic transition in Europe: clues from ancient and modern genetic data. *PLoS ONE* 8(4):e60944-e60944.
- RAŽIĆ, S., ONJIA, A. & POTKONJAK, B. 2003. Trace elements analysis of *Echinacea purpurea*—herbal medicinal. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* 33(4):845-850.
- REES, C.E., JENKINS, W.J. & MONSTER, J. 1978. The sulphur isotopic composition of ocean water sulphate. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42(4):377-381.
- REGERT, M. 2021. Bioarchéologie des substances naturelles dans des céramiques. *Histoire de la recherche contemporaine* Tome IX(n°2).
- REGERT, M. 2007. Produits de la ruche, produits laitiers et matières végétales : quels vestiges pour appréhender les substances naturelles exploitées par l'homme pendant la préhistoire? In: POULAIN, J.-P., editor. *L'homme, le mangeur et l'animal Qui nourrit l'autre ?*
- REGERT, M., GARNIER, N., DECAVALLAS, O., CREN-OLIV, C.C. & ROLANDO, C. 2003. Structural characterization of lipid constituents from natural substances preserved in archaeological environments. *Measurement Science and Technology* 14(9):1620-1630.
- REICHE, I., CHADEFaux, C., VIGNAUD, C. & MENU, M. 2007. Les matériaux osseux archéologiques. *L'actualité chimique*(312-313):86.
- REICHE, I., FAVRE-QUATTROPANI, L., VIGNAUD, C., BOCHERENS, H., CHARLET, L. & MENU, M. 2003. A multi-analytical study of bone diagenesis: the Neolithic site of Bercy (Paris, France). *Measurement Science and Technology* 14(9):1608.
- REIMER, P., AUSTIN, W., BARD, É., BAYLISS, A., BLACKWELL, P., BRONK RAMSEY, C., BUTZIN, M., CHENG, H., EDWARDS, R.L., FRIEDRICH, M., GROOTES, P., GUILDERTSON, T., HAJDAS, I., HEATON, T., HOGG, A. *et al.* . 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62(4):725-757.
- REY, C., COMBES, C., DROUET, C. & GLIMCHER, M.J. 2009. Bone mineral: update on chemical composition and structure. *Osteoporos Int* 20(6):1013-1021.
- REY, L. inédit. *Comportements alimentaires au Néolithique : étude isotopique de la nécropole de Gurgy « Les Noisats », Yonne (Bassin parisien)* [mémoire de Master 2]: Université Bordeaux 1. 70 p.
- REY, L., GOUDE, G. & ROTTIER, S. 2017. Comportements alimentaires au Néolithique : nouveaux résultats dans le Bassin parisien à partir de l'étude isotopique ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) de la nécropole de Gurgy « Les Noisats » (Yonne, Ve millénaire av. J.-C.). *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 29(1-2):54-69.
- REY, L., NAITO, Y.I., CHIKARAISHI, Y., ROTTIER, S., GOUDE, G. & OHKOUCHI, N. en révision. Specifying subsistence strategies of Early farmers: new results from compound specific isotopic analysis of amino acids (CSIA-AA). *International Journal of Osteoarchaeology*.

- REY, L., ROTTIER, S., SANTOS, F. & GOUDE, G. 2021. Sex and age-related social organization in the Neolithic: A promising survey from the Paris Basin. *Journal of Archaeological Science: Reports* 38:103092.
- REY, L., SALAZAR-GARCÍA, D.C., CHAMBON, P.H., SANTOS, F., ROTTIER, S. & GOUDE, G. 2019. A multi-isotope analysis of Neolithic human groups in the Yonne valley, Northern France: insights into dietary patterns and social structure. *Archaeol Anthropol Sci* 11(10):5591–5616.
- REY, L., TACAÏL, T., LE LUYER, M., SALAZAR-GARCÍA, D.C., BALTER, V., ROTTIER, S. & GOUDE, G. 2016. Tracking male vs. female Neolithic behaviors: a new multi-element and multi-isotope-ratio analysis to reconstruct diet and mobility in northern France. 8th World Archaeological Congress. Kyoto (Japan).
- REY, L., TACAÏL, T., SANTOS, F., ROTTIER, S., GOUDE, G. & BALTER, V. 2022. Disentangling diagenetic and biogenic trace elements and Sr radiogenic isotopes in fossil dental enamel using laser ablation analysis. *Chemical Geology* 587:120608.
- REYNARD, B. & BALTER, V. 2014. Trace elements and their isotopes in bones and teeth: Diet, environments, diagenesis, and dating of archeological and paleontological samples. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 416:4-16.
- REZAIE, N., D'ANDREA, E., BRÄUNING, A., MATTEUCCI, G., BOMBI, P. & LAUTERI, M. 2018. Do atmospheric CO<sub>2</sub> concentration increase, climate and forest management affect iWUE of common beech? Evidences from carbon isotope analyses in tree rings. *Tree Physiology* 38(8):1110-1126.
- RICHARDS, M.P. 2019. Isotope Analysis for Diet Studies. In: BRITTON, K. & RICHARDS, M., editors. *Archaeological Science: An Introduction*. Cambridge: Cambridge University Press. p 125-144.
- RICHARDS, M.P., FULLER, B.T. & HEDGES, R.E.M. 2001. Sulphur isotopic variation in ancient bone collagen from Europe: implications for human palaeodiet, residence mobility, and modern pollutant studies. *Earth and Planetary Science Letters* 191(3–4):185-190.
- RICHARDS, M.P., FULLER, B.T., SPONHEIMER, M., ROBINSON, T. & AYLIFFE, L. 2003a. Sulphur isotopes in palaeodietary studies: a review and results from a controlled feeding experiment. *International Journal of Osteoarchaeology* 13(1-2):37-45.
- RICHARDS, M.P. & HEDGES, R.E.M. 1999. Stable Isotope Evidence for Similarities in the Types of Marine Foods Used by Late Mesolithic Humans at Sites Along the Atlantic Coast of Europe. *Journal of Archaeological Science* 26(6):717-722.
- RICHARDS, M.P., PRICE, T.D. & KOCH, E. 2003b. Mesolithic and neolithic subsistence in Denmark : new stable isotope data. *Current anthropology* 44(2):288-294.
- RICHARDS, M.P. & SCHULTING, R.J. 2006. Touch not the fish: the Mesolithic-Neolithic change of diet and its significance. *Antiquity* 80(308):444-456.
- RICHARDS, M.P., SCHULTING, R.J. & HEDGES, R.E.M. 2003c. Sharp shift in diet at onset of Neolithic. *Nature* 425:366.
- RICHTER, K.K., WILSON, J., JONES, A.K., BUCKLEY, M., VAN DOORN, N. & COLLINS, M.J. 2011. Fish'n chips: ZooMS peptide mass fingerprinting in a 96 well plate format to identify fish bone fragments. *Journal of Archaeological Science* 38(7):1502-1510.
- RIEHL, S., PUSTOVOYTOV, K.E., WEIPPERT, H., KLETT, S. & HOLE, F. 2014. Drought stress variability in ancient Near Eastern agricultural systems evidenced by  $\delta(13)C$  in barley grain. *P Natl Acad Sci USA* 111(34):12348-12353.
- RIGAUD, S., D'ERRICO, F. & VANHAEREN, M. 2015. Ornaments Reveal Resistance of North European Cultures to the Spread of Farming. *PLoS ONE* 10(4):e0121166.
- RIVOLLAT, M.T. 2016. *From the function of funerary sites to Neolithisation processes in the French Early and Middle Neolithic : initial insights from a paleogenetic perspective* [PhD]: Université de Bordeaux.
- RIVOLLAT, M.T., RINGBAUER, H., CHILDEBAYEVA, A., BEN ROHRLACH, A., BARQUERA, R., SZOLEK, A., LE ROY, M., REY, L., GOUDE, G., BALTER, V., ROTTIER, S., DEGUILLOUX, M.-F. & HAAK, W. 2021a. Insights from unprecedentedly large family trees from the Neolithic site Gurgy “les Noisats” in France. *9th International Symposium on Biomolecular Archaeology*
- RIVOLLAT, M.T., RINGBAUER, H., CHILDEBAYEVA, A., LE ROY, M., REY, L., GOUDE, G., BALTER, V., ROTTIER, S., DEGUILLOUX, M.-F. & HAAK, W. 2021b. Investigating Neolithic social

- structures on the basis of unprecedentedly large family trees from the site Gurgy "Les Noisats" in France. *27th EAA Annual Meeting (6-11 sept)*
- ROBB, J. & HARRIS, O.J.T. 2018. Becoming gendered in european prehistory: Was neolithic gender fundamentally different? *Am Antiquity* 83(1):128-147.
- ROBBINS, C.T., FELICETTI, L.A. & SPONHEIMER, M. 2005. The effect of dietary protein quality on nitrogen isotope discrimination in mammals and birds. *Oecologia* 144(4):534-540.
- ROBERTS, P., FERNANDES, R., CRAIG, O.E., LARSEN, T., LUCQUIN, A., SWIFT, J. & ZECH, J. 2018. Calling all archaeologists: guidelines for terminology, methodology, data handling, and reporting when undertaking and reviewing stable isotope applications in archaeology. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 32(5):361-372.
- ROBSON, H.K., SKIPITYTĖ, R., PILIČIAUSKIENĖ, G., LUCQUIN, A., HERON, C., CRAIG, O.E. & PILIČIAUSKAS, G. 2019. Diet, cuisine and consumption practices of the first farmers in the southeastern Baltic. *Archaeol Anthropol Sci*.
- RODIERE, E., BOCHERENS, H., ANGIBAULT, J.M. & MARIOTTI, A. 1996. Particularités isotopiques de l'azote chez le chevreuil (*Capreolus capreolus* L.) : implications pour les reconstitutions paléoenvironnementales. *Comptes rendus de l'Académie des sciences Série 2 Sciences de la terre et des planètes* 323(2):179-185.
- ROFFET-SALQUE, M., MARCINIAK, A., VALDES, P.J., PAWLOWSKA, K., PYZEL, J., CZERNIAK, L., KRÜGER, M., ROBERTS, C.N., PITTER, S. & EVERSLED, R.P. 2018. Evidence for the impact of the 8.2-kyBP climate event on Near Eastern early farmers. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(35):8705-8709.
- ROFFET-SALQUE, M., REGERT, M., EVERSLED, R.P., OUTRAM, A.K., CRAMP, L.J.E., DECAVALLAS, O., DUNNE, J., GERBAULT, P., MILETO, S., MIRABAUD, S., PÄÄKKÖNEN, M., SMYTH, J., ŠOBERL, L., WHELTON, H.L., ALDAY-RUIZ, A. *et al.* . 2015. Widespread exploitation of the honeybee by early Neolithic farmers. *Nature* 527(7577):226-230.
- ROMEK, K., JULIEN, M., FRASQUET-DARRIEUX, M., TEA, I., ANTHEAUME, I., HANKARD, R. & ROBINS, R. 2018. Correction to: Human baby hair amino acid natural abundance  $^{15}\text{N}$ -isotope values are not related to the  $^{15}\text{N}$ -isotope values of amino acids in mother's breast-milk protein. *Amino acids* 50.
- ROSMAN, K.J.R. & TAYLOR, P.D.P. 1998. Isotopic composition of the elements 1997. IUPAC Technical Report. Subcommittee for isotopic abundance measurements. *Pure Appl Chem* 70(1):217-235.
- ROTTIER, S. 2006. Observations préliminaires à l'étude des remplissages des tombes du Néolithique Moyen I de Gurgy "Les Noisats" (Yonne). *Revue archéologique de l'Est* 55:279-285.
- ROTTIER, S. 2007. L'architecture funéraire des sépultures du Néolithique moyen des Noisats à Gurgy (Yonne, France). In: MOINAT, P. & CHAMBON, P., editors. *Les cistes de Chamblandes et la place des coffres dans les pratiques funéraires du Néolithique moyen occidental*. Actes du colloque de Lausanne (12-13 mai 2006): Cahiers d'archéologie romande (110) et Société préhistorique française (Mémoire 43). p 99-107.
- ROTTIER, S., MORDANT, C., CHAMBON, P. & THEVENET, C. 2005. Découverte de plus d'une centaine de sépultures du Néolithique moyen à Gurgy, les Noisats (Yonne). *Bulletin de la Société préhistorique de France* 102(3):641-645.
- ROUSSOT-LARROQUE, J. & BURNEZ, C. 1992. Aux sources du Néolithique atlantique: le cardial, le danubien, et les autres. *Revue archéologique de l'Ouest Supplément n°5*:127-138.
- ROYER, A., DAUX, V., FOUREL, F. & LECUYER, C. 2017. Carbon, nitrogen and oxygen isotope fractionation during food cooking: Implications for the interpretation of the fossil human record. *American Journal of Physical Anthropology* 163(4):759-771.
- SAFI, A. inédit. *Analyse paléogénétique des nécropoles néolithiques de Gurgy - les Noisats (Yonne) et d'Entzheim (Bas-Rhin)*. Nouveaux éléments pour la compréhension du phénomène de néolithisation en Europe [Mémoire de Master]: Université Bordeaux 1.
- SALANOVA, L., CHAMBON, P., BAYLISS, A., HEALY, F. & WHITTE, A. 2018. Violent Deaths in the Development of the Farming Economy: The Case of Bury. 2018:1-11.
- SALAVERT, A., BOULEN, M., COUBRAY, S., DUFRAISSE, A., AMPOSTA, A., BOSTYN, F., CONSTANTIN, C., MARTIAL, E., MÛNCHABLON, C., NEGRONI, S., PANLOUPS, E. & PRAUD, I. 2018a.

- Environnement végétal et collecte du bois de feu au Néolithique dans le sud du bassin de l'Escaut (5 200-2 200 BC). *Bulletin de la Société préhistorique française* 115(4):701-732.
- SALAVERT, A., MARTIN, L., ANTOLIN, F. & ZAZZO, A. 2018b. The opium poppy in Europe: exploring its origin and dispersal during the Neolithic. *Antiquity* 92.
- SALAVERT, A., ZAZZO, A., MARTIN, L., ANTOLIN, F., GAUTHIER, C., THIL, F., TOMBRET, O., BOUBY, L., MANEN, C., MINEO, M., MUELLER-BIENIEK, A., PIQUE, R., ROTTOLI, M., ROVIRA, N., TOULEMONDE, F. *et al.* . 2020. Direct dating reveals the early history of opium poppy in Western Europe. *Scientific Reports* 10.
- SALAZAR-GARCIA, D.C., FONTANALS-COLL, M., GOUDE, G. & SUBIRA, M.E. 2018. "To 'seafood' or not to 'seafood'?" An isotopic perspective on dietary preferences at the Mesolithic-Neolithic transition in the Western Mediterranean. *Quaternary International*.
- SALAZAR-GARCÍA, D.C., RICHARDS, M.P., NEHLICH, O. & HENRY, A.G. 2014. Dental calculus is not equivalent to bone collagen for isotope analysis: a comparison between carbon and nitrogen stable isotope analysis of bulk dental calculus, bone and dentine collagen from same individuals from the Medieval site of El Raval (Alicante, Spain). *Journal of Archaeological Science* 47:70-77.
- SALAZAR-GARCÍA, D.C., ROMERO, A., GARCÍA-BORJA, P., SUBIRÀ, M.E. & RICHARDS, M.P. 2016. A combined dietary approach using isotope and dental buccal-microwear analysis of human remains from the Neolithic, Roman and Medieval periods from the archaeological site of Tossal de les Basses (Alicante, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports* 6:610-619.
- SALESSE, K. 2015. *Isotopic archeo-biogeochemistry, reconstitution of diet and patterns of mobility, bio-cultural interactions : the plural burials of the region X of the catacomb of Saints Peter and Marcellinus (Rome, 1st-3rd cent. AD)* [PhD Thesis]: Université de Bordeaux.
- SALESSE, K., KAPOVÁ, S., BRŮŽEK, J., KUŽELKA, V. & VELEMÍNSKÝ, P. 2019. An isotopic case study of individuals with syphilis from the pathological-anatomical reference collection of the national museum in Prague (Czech Republic, 19th century A.D.). *International Journal of Paleopathology* 25:46-55.
- SALQUE, M., BOGUCKI, P.I., PYZEL, J., SOBKOWIAK-TABAKA, I., GRYGIEL, R., SZMYT, M. & EVERSLED, R.P. 2013. Earliest evidence for cheese making in the sixth millennium bc in northern Europe. *Nature* 493(7433):522-525.
- SALVAGNO, L. & ALBARELLA, U. 2017. A morphometric system to distinguish sheep and goat postcranial bones. *PLoS ONE* 12(6):e0178543.
- SÁNCHEZ-QUINTO, F., MALMSTRÖM, H., FRASER, M., GIRDLAND-FLINK, L., SVENSSON, E.M., SIMÕES, L.G., GEORGE, R., HOLLFELDER, N., BURENHULT, G., NOBLE, G., BRITTON, K., TALAMO, S., CURTIS, N., BRZOBOHATA, H., SUMBEROVA, R. *et al.* . 2019. Megalithic tombs in western and northern Neolithic Europe were linked to a kindred society. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(19):9469-9474.
- SARWAR, G. 1997. The Protein Digestibility–Corrected Amino Acid Score Method Overestimates Quality of Proteins Containing Antinutritional Factors and of Poorly Digestible Proteins Supplemented with Limiting Amino Acids in Rats. *The Journal of Nutrition* 127(5):758-764.
- SCHARLOTTA, I., GORIUNOVA, O.I. & WEBER, A. 2013. Micro-sampling of human bones for mobility studies: diagenetic impacts and potentials for elemental and isotopic research. *Journal of Archaeological Science* 40(12):4509-4527.
- SCHARLOTTA, I., GOUDE, G., HERRSCHER, E., BAZALIISKII, V.I. & WEBER, A.W. 2018. "Mind the gap"—Assessing methods for aligning age determination and growth rate in multi-molar sequences of dietary isotopic data. *Am J Hum Biol* 30(5):e23163.
- SCHEUER, L. & BLACK, S. 2000. *Developmental Juvenile Osteology*: Elsevier Academic Press.
- SCHIBLER, J., JEUNESSE, C. & ARBOGAST, R.-M. 1997. Rôle et statut de la chasse dans le Néolithique ancien danubien. *Bulletin de la Société préhistorique française*:27-28.
- SCHMIDT, C.W., REMY, A., VAN SENSSEN, R., WILLMAN, J., KRUEGER, K., SCOTT, R., MAHONEY, P., BEACH, J., MCKINLEY, J., D'ANASTASIO, R., CHIU, L., BUZON, M., DE GREGORY, J.R., SHERIDAN, S., ENG, J. *et al.* . 2019. Dental microwear texture analysis of Homo sapiens sapiens: Foragers, farmers, and pastoralists. *American Journal of Physical Anthropology* 169(2):207-226.

- SCHMITT, A. 2005. Une nouvelle méthode pour estimer l'âge au décès des adultes à partir de la surface sacro-pelvienne iliaque. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 17(1-2):89-101.
- SCHMITT, A. & BROQUA, C. 2000. Approche probabiliste pour estimer l'âge au décès à partir de la surface auriculaire de l'ilium. *Cahiers Du Centre De Recherches Anthropologiques* 12:279-301.
- SCHMÖLCKE, U. & GROß, D. 2021. Cattle husbandry and aurochs hunting in the Neolithic of northern Central Europe and southern Scandinavia. A statistical approach to distinguish between domestic and wild forms. *International Journal of Osteoarchaeology* 31(1):108-118.
- SCHOENHEIMER, R. & RITTENBERG, D. 1939. Studies in protein metabolism: I. General considerations in the application of isotopes to the study of protein metabolism. The normal abundance of nitrogen isotopes in amino acids. *Journal of Biological Chemistry* 127(1):285-290.
- SCHOENINGER, M.J. 1995. Stable isotope studies in human evolution. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews* 4(3):83-98.
- SCHOENINGER, M.J. & DENIRO, M.J. 1984. Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48(4):625-639.
- SCHOENINGER, M.J. & MOORE, K. 1992. Bone stable isotope studies in archaeology. *Journal of World Prehistory* 6(2):247-296.
- SCHROEDER, H., MARGARYAN, A., SZMYT, M., THEULOT, B., WŁODARCZAK, P., RASMUSSEN, S., GOPALAKRISHNAN, S., SZCZEPANEK, A., KONOPKA, T., JENSEN, T.Z.T., WITKOWSKA, B., WILK, S., PRZYBYŁA, M.M., POSPIESZNY, Ł., SJÖGREN, K.-G. *et al.* . 2019. Unraveling ancestry, kinship, and violence in a Late Neolithic mass grave. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(22):10705-10710.
- SCHULTING, R. 2018. Dietary shifts at the Mesolithic-Neolithic transition in Europe: an overview of the stable isotope data. . *The Oxford Handbook of the Archaeology of Diet*.
- SCHULTING, R. & HAMILTON, J. 2012. Stable carbon and nitrogen isotope analysis of human and faunal remains from Champ-Duranda Nieul-sur-l'Autise, Vendée (France). *L'Enceinte néolithique de Champ-Duranda Nieul-sur-l'Autise, Vendée (France) Association des Publications Chauvinoises, Chauvigny*:527-538.
- SCHULTING, R.J. 2015. Stable Isotopes and Neolithic Substance. In: FOWLER, C., HARDING, J. & HOFMANN, D., editors. *The Oxford Handbook in Neolithic Europe*. Oxford: Oxford University Press. p 361–383.
- SCHULTING, R.J., RAMSEY, C.B., BAZALIISKII, V.I., GORIUNOVA, O.I. & WEBER, A. 2014. Freshwater reservoir offsets investigated through paired human-faunal <sup>14</sup>C dating and stable carbon and nitrogen isotope analysis at Lake Baikal, Siberia. *Radiocarbon* 56(3):991-1008.
- SCHULZE, E.D., CHAPIN, F.S. & GEBAUER, G. 1994. Nitrogen nutrition and isotope differences among life forms at the northern treeline of Alaska. *Oecologia* 100(4):406-412.
- SCHWARTZ, G.T. & DEAN, M.C. 2000. Interpreting the hominid dentition: ontogenetic and phylogenetic aspects. In: P., O.H. & M., C., editors. *Development, growth and evolution Implications for the study of the hominid skeleton*: London : Academic Press. p 207-233.
- SCHWEISSING, M.M. & GRUPE, G. 2003a. Stable strontium isotopes in human teeth and bone: a key to migration events of the late Roman period in Bavaria. *Journal of Archaeological Science* 30(11):1373-1383.
- SCHWEISSING, M.M. & GRUPE, G. 2003b. Tracing migration events in man and cattle by stable strontium isotope analysis of appositionally grown mineralized tissue. *International Journal of Osteoarchaeology* 13(1-2):96-103.
- SCORRANO, G., BRILLI, M., MARTÍNEZ-LABARGA, C., GIUSTINI, F., PACCIANI, E., CHILLERI, F., SCALDAFERRI, F., GASBARRINI, A., GASBARRINI, G. & RICKARDS, O. 2014. Palaeodiet reconstruction in a woman with probable celiac disease: A stable isotope analysis of bone remains from the archaeological site of Cosa (Italy). *American Journal of Physical Anthropology* 154(3):349-356.
- SCOTT, R.S., UNGAR, P.S., BERGSTROM, T.S., BROWN, C.A., CHILDS, B.E., TEAFORD, M.F. & WALKER, A. 2006. Dental microwear texture analysis: technical considerations. *Journal of Human Evolution* 51(4):339-349.

- SCOTT, R.S., UNGAR, P.S., BERGSTROM, T.S., BROWN, C.A., GRINE, F.E., TEAFORD, M.F. & WALKER, A. 2005. Dental microwear texture analysis shows within-species diet variability in fossil hominins. *Nature* 436(7051):693-695.
- SEALY, J., ARMSTRONG, R. & SCHRIRE, C. 1995. Beyond lifetime averages : tracing life histories through isotopic analysis of different calcified tissues from archaeological human skeletons. *Antiquity* 69(263):290-300.
- SEALY, J., JOHNSON, M., RICHARDS, M. & NEHLICH, O. 2014. Comparison of two methods of extracting bone collagen for stable carbon and nitrogen isotope analysis: comparing whole bone demineralization with gelatinization and ultrafiltration. *Journal of Archaeological Science* 47:64-69.
- SEALY, J.C., VAN DER MERWE, N.J., SILLEN, A., KRUGER, F.J. & KRUEGER, H.W. 1991.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  as a dietary indicator in modern and archaeological bone. *Journal of Archaeological Science* 18(3):399-416.
- SEALY, J.C., VAN DER MERWE, N.J., THORP, J.A.L. & LANHAM, J.L. 1987. Nitrogen isotopic ecology in southern Africa: Implications for environmental and dietary tracing. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51(10):2707-2717.
- SÉGUREL, L. & BON, C. 2017. On the Evolution of Lactase Persistence in Humans. *Annual Review of Genomics and Human Genetics* 18(1):297-319.
- SELLIER, P. 1993. L'estimation de l'âge des foetus et des enfants morts en période périnatale : une révision de Fazekas et Kosa (1978).
- SEMAL, P., GARCIA, M., POLET, C. & RICHARDS, M.P. 1999. Considérations sur l'alimentation des Néolithiques du Bassin mosan : Usures dentaires et analyses isotopiques du collagène osseux. *Notae Praehistoricae* 19:127-135.
- SFORNA, M.C. & LUGLI, F. 2017. MapIT!: a simple and user-friendly MATLAB script to elaborate elemental distribution images from LA-ICP-MS data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 32(5):1035-1043.
- SHERRATT, A. 1997. Climatic cycles and behavioural revolutions: the emergence of modern humans and the beginning of farming. *Antiquity* 71(272):271-287.
- SHOULDERS, M.D. & RAINES, R.T. 2009. Collagen Structure and Stability. *Annual Review of Biochemistry* 78(1):929-958.
- SIBBESSON, E. 2019. Reclaiming the Rotten: Understanding Food Fermentation in the Neolithic and Beyond. *Environmental Archaeology*:1-12.
- SIDERA, I. 1997. Le mobilier en matières dures animales en milieu funéraire Cerny : symbolisme et socio-économie. In: CONSTANTIN, C., MORDANT, D. & SIMONIN, D., editors. *La culture de Cerny Nouvelle économie, nouvelle société au Néolithique*. Actes du Colloque International de Nemours: Mémoires du Musée de Préhistoire d'Ile-de-France. p 499-513.
- SIDERA, I. 2000. Animaux domestiques, bêtes sauvages et objets en matières animales du Rubané au Michelsberg : de l'économie aux symboles, des techniques à la culture. *Gallia préhistoire* 42:107-194.
- SIDERA, I. 2003. De l'usage des produits de la chasse pour différencier des hommes. Fonctions votive et sociale de la chasse au Néolithique ancien et moyen du Bassin parisien. In: CHAMBON, P. & LECLERC, J., editors. *Les pratiques funéraires néolithiques avant 3500 av J-C en France et dans les régions limitrophes Table ronde de Saint-Germain-en-Laye (15-17 juin 2001)*. Paris: Société préhistorique française. p 91-98.
- SIDERA, I., VILA, E. & ERIKSON, P. 2006. *La chasse. Pratiques sociales et symboliques*. Paris: De Boccard.
- SIEBKE, I., FURTWÄNGLER, A., STEURI, N., HAFNER, A., RAMSTEIN, M., KRAUSE, J. & LÖSCH, S. 2020. Crops vs. animals: regional differences in subsistence strategies of Swiss Neolithic farmers revealed by stable isotopes. *Archaeol Anthropol Sci* 12(10):235.
- SILLEN, A., HALL, G. & ARMSTRONG, R. 1995. Strontium calcium ratios (Sr/Ca) and strontium isotopic ratios ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) of *Australopithecus robustus* and *Homo* sp. from Swartkrans. *Journal of Human Evolution* 28(3):277-285.
- SILLEN, A. & KAVANAGH, M. 1982. Strontium and paleodietary research: A review. *American Journal of Physical Anthropology* 25(S3):67-90.

- SILLEN, A., SEALY, J.C. & VAN DER MERWE, N.J. 1989. Chemistry and Paleodietary Research: No More Easy Answers. *Am Antiquity* 54(3):504-512.
- SILLEN, A. & SMITH, P. 1984. Weaning patterns are reflected in strontium-calcium ratios of juvenile skeletons. *Journal of Archaeological Science* 11(3):237-245.
- SIMONETTI, A., BUZON, M.R. & CREASER, R.A. 2008. In-situ elemental and Sr isotope investigation of human tooth enamel by laser ablation-(MC)-ICP-MS: Successes and pitfalls\*. *Archaeometry* 50(2):371-385.
- SIMPSON, R., COOPER, D., SWANSTON, T., COULTHARD, I. & VARNEY, T. 2021. Historical overview and new directions in bioarchaeological trace element analysis: a review. *Archaeol Anthropol Sci* 13.
- SJÖGREN, K., AXELSSON, T., VRETEMARK, M., MEIGGS, D., PRICE, T.D. & PIKE, A. 2021. Complex Cattle Exchange in the Scandinavian Funnel Beaker Culture. The Case of Falbygden, Sweden. In: SALMI, A. & NIINIMÄKI, S., editors. *Archaeologies of Animal Movement Animals on the Move Themes in Contemporary Archaeology*: Springer, Cham.
- SMITH, B.H. 1984. Patterns of molar wear in hunter-gatherers and agriculturalists. *American Journal of Physical Anthropology* 63:39-56.
- SMITH, B.N. & EPSTEIN, S. 1971. Two categories of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios for higher plants. *Plant Physiology* 47(3):380-384.
- SMITH, T.M. 2013. Teeth and Human Life-History Evolution. *Annual Review of Anthropology* 42(1):191-208.
- SMITH, T.M. & TAFFOREAU, P. 2008. New visions of dental tissue research: Tooth development, chemistry, and structure. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews* 17(5):213-226.
- SNOECK, C., SCHULTING, R.J., LEE-THORP, J.A., LEBON, M. & ZAZZO, A. 2016. Impact of heating conditions on the carbon and oxygen isotope composition of calcined bone. *Journal of Archaeological Science* 65:32-43.
- SONCIN, S., TALBOT, H.M., FERNANDES, R., HARRIS, A., VON TERSCH, M., ROBSON, H.K., BAKKER, J.K., RICHTER, K.K., ALEXANDER, M., ELLIS, S., THOMPSON, G., AMORETTI, V., OSANNA, M., CASO, M., SIRANO, F. *et al.* . 2021. High-resolution dietary reconstruction of victims of the 79 CE Vesuvius eruption at Herculaneum by compound-specific isotope analysis. *Science Advances* 7(35):eabg5791.
- SOZER, N., MELAMA, L., SILBIR, S., RIZZELLO, C.G., FLANDER, L. & POUTANEN, K. 2019. Lactic Acid Fermentation as a Pre-Treatment Process for Faba Bean Flour and Its Effect on Textural, Structural and Nutritional Properties of Protein-Enriched Gluten-Free Faba Bean Breads. *Foods* 8(10):431.
- SPATZ, H. & VON DEN DRIESCH, A. 2001. Zu den tierischen Beigaben aus dem Hinkelsteiner und Grossgartacher Gräberfeld von Trebur, Kr. Gross-Gerau. In: ARBOGAST, R.-M., JEUNESSE, C. & SCHIBLER, J., editors. *Premières rencontres danubiennes : Strasbourg 20 et 21 novembre 1996; actes de la première table-ronde; rôle et statut de la chasse dans le Néolithique ancien danubien (5500 - 4900 av J-C)*. Rahden/Westf: Leidorf. p 113-128.
- SPONHEIMER, M., DE RUITER, D., LEE-THORP, J. & SPÄTH, A. 2005. Sr/Ca and early hominin diets revisited: new data from modern and fossil tooth enamel. *Journal of Human Evolution* 48(2):147-156.
- SPONHEIMER, M. & LEE-THORP, J.A. 2006. Enamel diagenesis at South African Australopith sites: Implications for paleoecological reconstruction with trace elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70(7):1644-1654.
- SPONHEIMER, M., ROBINSON, T., AYLIFFE, L., ROEDER, B., HAMMER, J., PASSEY, B., WEST, A., CERLING, T., DEARING, D. & EHLERINGER, J. 2003. Nitrogen isotopes in mammalian herbivores: hair  $\delta^{15}\text{N}$  values from a controlled feeding study. *International Journal of Osteoarchaeology* 13(1-2):80-87.
- STEFFAN, S.A., CHIKARAI, Y., CURRIE, C.R., HORN, H., GAINES-DAY, H.R., PAULI, J.N., ZALAPA, J.E. & OHKOUCHI, N. 2015. Microbes are trophic analogs of animals. *P Natl Acad Sci USA* 112(49):15119-15124.

- STEFFAN, S.A., CHIKARAISHI, Y., HORTON, D.R., OHKOUCHI, N., SINGLETON, M.E., MILICZKY, E., HOGG, D.B. & JONES, V.P. 2013. Trophic Hierarchies Illuminated via Amino Acid Isotopic Analysis. *PLoS ONE* 8(9):e76152.
- STENHOUSE, M.J. & BAXTER, M.S. 1979. The Uptake of Bomb  $^{14}\text{C}$  in Humans. In: RAINER, B. & HANS, E.S., editors. *Radiocarbon Dating*: University of California Press. p 324-341.
- STLOUKAL, M. & HANÁKOVÁ, H. 1978. Length of long bones in ancient slavonic populations-with particular consideration to questions of growth. *Homo-Journal of comparative human biology* 29(1):53-69.
- STORDEUR, D. & KHAWAM, R. 2007. Les crânes surmodelés de Tell Aswad (PPNB, Syrie). Premier regard sur l'ensemble, premières réflexions. *Syria* 84:5-32.
- STRIEN, H.-C. 2006. VSG, RRB, Rubané : fin du Néolithique ancien, début du Néolithique moyen. In: DUHAMEL, P., editor. *Impacts interculturels au Néolithique moyen Du terroir au territoire : sociétés et espaces*. Actes du 25<sup>e</sup> colloque interrégional sur le Néolithique, Dijon (20-21 octobre 2001): Revue Archéologique de l'Est, 25<sup>e</sup> supplément. p 13-18.
- STUART-MACADAM, P. & DETTWYLER, K.A. 1995. *Breastfeeding: biocultural perspectives*. New York: Aldine De Gruyter.
- STYRING, A., EVANS, J., NITSCH, E., LEE-THORP, J. & BOGAARD, A. 2019. Revisiting the potential of carbonized grain to preserve biogenic  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  signatures within the burial environment. *Archaeometry* 61:179-193.
- STYRING, A., FRASER, R., BOGAARD, A. & EVERSLED, R. 2014a. The effect of manuring on cereal and pulse amino acid  $\delta^{15}\text{N}$  values. *Phytochemistry* 102.
- STYRING, A., MANNING, H., FRASER, R., WALLACE, M., JONES, G., CHARLES, M., HEATON, T.H.E., BOGAARD, A. & EVERSLED, R. 2013. The effect of charring and burial on the biochemical composition of cereal grains: Investigating the integrity of archaeological plant material. *Journal of Archaeological Science* 40:4767-4779.
- STYRING, A., RÖSCH, M., STEPHAN, E., STIKA, H.-P., FISCHER, E., SILLMANN, M. & BOGAARD, A. 2017. Centralisation and long-term change in farming regimes: Comparing agricultural practices in Neolithic and Iron Age south-west Germany. *Proceedings of the Prehistoric Society* 83:357-381.
- STYRING, A., SEALY, J. & EVERSLED, R. 2010. Resolving the bulk  $\delta^{15}\text{N}$  values of ancient human and animal bone collagen via compound-specific nitrogen isotope analysis of constituent amino acids. *Geochimica Et Cosmochimica Acta - GEOCHIM COSMOCHIM ACTA* 74:241-251.
- STYRING, A.K., FRASER, R.A., ARBOGAST, R.-M., HALSTEAD, P., ISAAKIDOU, V., PEARSON, J.A., SCHÄFER, M., TRIANTAPHYLLOU, S., VALAMOTI, S.M., WALLACE, M., BOGAARD, A. & EVERSLED, R.P. 2015. Refining human palaeodietary reconstruction using amino acid  $\delta^{15}\text{N}$  values of plants, animals and humans. *Journal of Archaeological Science* 53:504-515.
- STYRING, A.K., FRASER, R.A., BOGAARD, A. & EVERSLED, R.P. 2014b. Cereal grain, rachis and pulse seed amino acid  $\delta^{15}\text{N}$  values as indicators of plant nitrogen metabolism. *Phytochemistry* 97:20-29.
- SUGA, S. 1982. Progressive mineralization pattern of developing enamel during the maturation stage. *Journal of Dental Research Spec No*:1532-1542.
- SUPRYK, A. inédit. *Etude des structures néolithiques du site du « Crot aux Moines »* [mémoire de Master 2]: Université de Bourgogne.
- SYRIKOVA, P. inédit. *Caractérisation du comportement alimentaire des individus Néolithiques Cerny : étude de la macro- et micro-usure dentaire* [Mémoire de Master 2]: Université de Bordeaux.
- SYRIKOVA, P., LE LUYER, M., CHEUNG, C. & THOMAS, A. 2021a. Au-delà de l'apport nutritionnel : l'analyse combinée de la macro-/micro-usure dentaire et des isotopes stables révèle des comportements alimentaires néo-lithiques genrés. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, Supplément 33 | Résumés des journées 2021.
- SYRIKOVA, P., LE LUYER, M., SOURON, A. & THOMAS, A. 2021b. Altérations taphonomiques et micro-usures dentaires : impact sur la caractérisation des régimes alimentaires. Taphonomic alterations and dental microwear: impact on the characterization of dietary regimes. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 33 Supplément | 2021, Résumés des journées 2021.

- SZPAK, P. 2011. Fish bone chemistry and ultrastructure: implications for taphonomy and stable isotope analysis. *Journal of Archaeological Science* 38(12):3358-3372.
- SZPAK, P., KRIPPNER, K. & RICHARDS, M.P. 2017a. Effects of Sodium Hydroxide Treatment and Ultrafiltration on the Removal of Humic Contaminants from Archaeological Bone. *International Journal of Osteoarchaeology* 27(6):1070-1077.
- SZPAK, P., METCALFE, J.Z. & MACDONALD, R.A. 2017b. Best practices for calibrating and reporting stable isotope measurements in archaeology. *Journal of Archaeological Science: Reports* 13:609-616.
- SZULC, P., SEEMAN, E. & DELMAS, P.D. 2000. Biochemical Measurements of Bone Turnover in Children and Adolescents. *Osteoporosis International* 11(4):281-294.
- TACAÏL, T., KOVAČIKOVÁ, L., BRŮŽEK, J. & BALTER, V. 2017. Spatial distribution of trace element Ca-normalized ratios in primary and permanent human tooth enamel. *Science of The Total Environment* 603-604:308-318.
- TACAÏL, T., MARTIN, J.E., HERRSCHER, E., ALBALAT, E., VERNA, C., RAMIREZ-ROZZI, F., CLARK, G., VALENTIN, F. & BALTER, V. 2021. Quantifying the evolution of animal dairy intake in humans using calcium isotopes. *Quaternary Science Reviews* 256:106843.
- TAKIZAWA, Y., DHARAMPAL, P.S., STEFFAN, S.A., TAKANO, Y., OHKOUCHI, N. & CHIKARAISHI, Y. 2017. Intra-trophic isotopic discrimination of  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  for amino acids in autotrophs: Implications for nitrogen dynamics in ecological studies. *Ecology and Evolution* 7(9):2916-2924.
- TALAMO, S., FEWLASS, H., MARIA, R. & JAOUEN, K. 2021. "Here we go again": the inspection of collagen extraction protocols for  $^{14}\text{C}$  dating and palaeodietary analysis. *STAR: Science & Technology of Archaeological Research* 7(1):62-77.
- TANGYU, M., MULLER, J., BOLTEN, C.J. & WITTMANN, C. 2019. Fermentation of plant-based milk alternatives for improved flavour and nutritional value. *Applied Microbiology and Biotechnology* 103(23):9263-9275.
- TANZ, N. & SCHMIDT, H.-L. 2010.  $\delta^{34}\text{S}$ -Value Measurements in Food Origin Assignments and Sulfur Isotope Fractionations in Plants and Animals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58(5):3139-3146.
- TAUBER, H. 1981.  $^{13}\text{C}$  evidence for dietary habits of prehistoric man in Denmark. *Nature* 292(5821):332-333.
- TEA, I., GUENNEC, A., FRASQUET-DARRIEUX, M., JULIEN, M., ROMEK, K., ANTHEAUME, I., HANKARD, R. & ROBINS, R. 2013. Simultaneous determination of natural-abundance  $^{15}\text{N}$  values and quantities of individual amino acids in proteins from milk of lactating women and from infant hair using gas chromatography/isotope ratio mass spectrometry. *Rapid communications in mass spectrometry : RCM* 27:1345-1353.
- TESTART, A. 2014. *L'amazone et la cuisinière. Anthropologie de la division sexuelle du travail*. Paris: Gallimard. 192 p.
- THEVENET, C. 2004. Une relecture des pratiques funéraires du Rubané récent et final du Bassin parisien : l'exemple des fosses sépulcrales dans la vallée de l'Aisne. *Bulletin de la Société préhistorique de France* 101(4):815-826.
- THEVENET, C. 2010. *Des faits aux gestes, des gestes aux sens ? Pratiques funéraires et société durant le Néolithique ancien en Bassin parisien*: Université de Paris I.
- THEVENET, C. 2016. L'enceinte rubanée de Menneville "Derrière le Village" et les structures associées (Aisne, France) : de la diversité du traitement des défunts à la cohérence d'un système. *Gallia Préhistoire* 56:32-92.
- THEVENET, C. 2009. Les sépultures Rubanées du Bassin parisien: composition de l'échantillon funéraire et implantation sépulcrale. In: ZEEB-LANZ, A., editor. *Krisen – Kulturwandel – Kontinuitäten Zum Ende der Bandkeramik in Mitteleuropa 17/06/2007*. Herxheim: Verlag Marie Leidorf GmbH. Rahden/Westf.
- THEVENOT, J.-P. 2005. *Le Camp de Chassey (Chassey-le-Camp, Saône-et-Loire) : les niveaux néolithiques du rempart de «la Redoute»*. Dijon: ARTEHIS Éditions, Revue Archéologique de l'Est, Supplément 22. 464 p.
- THEVENOT, J.-P., MARTINEAU, R., MOREAU, C., BONTEMPS, C., DUCREUX, F., LEMERCIER, O., PRESTREAU, M., DURIAUD, J. & NICOLARDOT, J.-P. 2015. 13. Le Néolithique du Bassin

- versant de la Saône (Saône-et-Loire, Côte-d'Or). In: MARTINEAU, R., PAUTRAT, Y. & LEMERCIER, O., editors. *La Préhistoire en Bourgogne: État des connaissances et bilan 1994-2005*. Dijon: Société Archéologique de l'Est. p 193-206.
- THIEBAULT, S. 2005. L'apport du fourrage d'arbre dans l'élevage depuis le Néolithique. *Anthropozoologica* 40.
- THIRAULT, E. 2005. Diffusions de biens et structuration territoriale au Néolithique : le cas des lames de hache en roches tenaces polies dans les Alpes occidentales. *Territoires, déplacements, mobilité, échanges pendant la Préhistoire : terres et hommes du Sud Actes du 126e Congrès national des sociétés historiques et scientifiques, « Terres et hommes du Sud », Toulouse, 2001*. Paris: Editions du CTHS. p 537-557.
- THODE, H. 1991. Sulphur isotopes in nature and the environment: an overview. *Stable isotopes: natural and anthropogenic sulphur in the environment* 43:1-26.
- THOMAS, A. 2011. *Identités funéraires, variants biologiques et facteurs chronologiques : une nouvelle perception du contexte culturel et social du Cerny (Bassin parisien, 4700-4300 avant J.-C.)* [PhD]. Bordeaux: Université Bordeaux 1. 788 p.
- THOMAS, A. 2014a. Bioarchaeology of the middle Neolithic: Evidence for archery among early european farmers. *American Journal of Physical Anthropology* 154(2):279-290.
- THOMAS, A. 2014b. Social discriminations through the grave: identity and status of the dead in the Cerny culture (Middle Neolithic, Paris Basin, France). *Anthropologie (1962-)* 52(2):171-182.
- THOMAS, A. 2019. Impacts sanitaires de la transition néolithique. *Archéologie de la santé, anthropologie du soin*. Paris: La Découverte. p 30-40.
- THOMAS, A., CHAMBON, P. & MURAIL, P. 2011. Unpacking burial and rank: the role of children in the first monumental cemeteries of Western Europe (4600–4300 BC). *Antiquity* 85(329):772-786.
- THOMAS, A. & CHENAL, F. 2014. Le sexe et le genre dans la structuration funéraire : asymétrie ou dualité sociale des entités Cerny et Grossgartach du Néolithique moyen d'Europe occidentale. 1839e réunion scientifique de la Société d'Anthropologie de Paris, 28-31 Janvier 2014. Montpellier, France. p S39.
- TIESZEN, L.L. 1991. Natural variations in the carbon isotope values of plants: Implications for archaeology, ecology, and paleoecology. *Journal of Archaeological Science* 18(3):227-248.
- TIESZEN, L.L., BOUTTON, T.W., TESDAHL, K.G. & SLADE, N.A. 1983. Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues : implications for  $\delta^{13}\text{C}$  analysis of diet. *Oecologia* 57:32-37.
- TIESZEN, L.L. & FAGRE, T. 1993. Effect of diet quality and composition on the isotopic composition of respiratory  $\text{CO}_2$ , bone collagen, bioapatite, and soft tissues. In: LAMBERT, J.B. & GRUPE, G., editors. *Prehistoric human bone*. Berlin: Springer. p 121-155.
- TREASURE, E.R., GRÖCKE, D.R., CASELDINE, A.E. & CHURCH, M.J. 2019. Neolithic Farming and Wild Plant Exploitation in Western Britain: Archaeobotanical and Crop Stable Isotope Evidence from Wales (c. 4000–2200 cal BC). *Proceedings of the Prehistoric Society*, 85.
- TRESSET, A. 1989. La Faune de l'enceinte néolithique de Barbuise Courtavant (Aube). In: DIRECTION REGIONALE DES AFFAIRES CULTURELLES DE CHAMPAGNE-ARDENNE, C.D.A.P., LA CONSERVATION DU MUSEE DE NOGENT-SUR-SEINE ET L'ASSOCIATION REGIONALE POUR LA PROTECTION ET L'ETUDE DU PATRIMOINE PREHISTORIQUE, editor. *Pré et Protohistoire de l'Aube, livret de l'exposition*. Vertus: Association régionale pour la protection et l'étude du patrimoine préhistorique (A.R.P.E.P.P.). p 135-138.
- TRESSET, A. 1993. Le rôle de la chasse dans la néolithisation de l'Europe tempérée : l'exemple de la vallée de la "Petite Seine". In: AUDOUIN-ROUZEAU, F. & DESSE, J., editors. *Exploitation des animaux sauvages à travers le temps : Actes des XIIIe Rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, IVe colloque international de L'Homme et l'animal*. Juan-les-Pins: APDCA. p 247-259.
- TRESSET, A. 1997. L'approvisionnement carné Cerny dans le contexte néolithique du Bassin parisien. In: CONSTANTIN, C., MORDANT, D. & SIMONIN, D., editors. *La culture de Cerny Nouvelle économie, nouvelle société au Néolithique Actes du Colloque International de Nemours, 1994: Mémoires du Musée de Préhistoire d'Ile-de-France*. p 299-314.

- TRESSET, A. & VIGNE, J.-D. 2007. Substitution of species, techniques and symbols at the Mesolithic/Neolithic transition in Western Europe. *Proceedings of the British Academy* 144:189-210.
- TRESSET, A. & VIGNE, J.-D. 2011. Last hunter-gatherers and first farmers of Europe. *Comptes Rendus Biologies* 334(3):182-189.
- TROTTER, M. & GLEESER, G.C. 1952. Estimation of stature from long bones of American Whites and Negroes. *American Journal of Physical Anthropology* 10(4):463-514.
- TRUST, B.A. & FRY, B. 1992. Stable sulphur isotopes in plants: a review. *Plant, Cell & Environment* 15(9):1105-1110.
- TSUTAYA, T., TAKAHASHI, T., SCHULTING, R.J., SATO, T., YONEDA, M., KATO, H. & WEBER, A.W. 2018. Effects of lipid extraction and different collagen extraction methods on archaeological fish bones and its implications for fish bone diagenesis. *Journal of Archaeological Science: Reports* 20:626-633.
- TSUTAYA, T. & YONEDA, M. 2015. Reconstruction of breastfeeding and weaning practices using stable isotope and trace element analyses: A review. *American Journal of Physical Anthropology* 156:2-21.
- TURBAN-JUST, S. & SCHRAMM, S. 1998. Stable carbon and nitrogen isotope ratios of individual amino acids give new insights into bone collagen degradation. *Bulletin de la Societe Geologique de France* 169(1):109-114.
- TWISS, K. 2012. The Archaeology of Food and Social Diversity. *J Archaeol Res* 20(4):357-395.
- UBELAKER, D.H. 1978. Human Skeletal Remains. Excavation, Analyses. *Interpretation, Chicago: Smithsonian Institution, Aldine Publishing Company.*
- UNGAR, P.S., BROWN, C.A., BERGSTROM, T.S. & WALKERS, A. 2003. Quantification of dental microwear by tandem scanning confocal microscopy and scale-sensitive fractal analyses. *Scanning* 25(4):185-193.
- VALENTIN, J. 2002. Bone remodelling. In: VALENTIN, J., editor. *Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values*. Ann. ICRP ed: Pergamon. p 185-188.
- VAN DER MERWE, N.J. 1989. Natural variation in  $^{13}\text{C}$  concentration and its effect on environmental reconstruction using  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios in animal bones. In: PRICE, D., editor. *Bone Chemistry and Past Behaviour: School of American Research Advanced Seminar Series*, Cambridge University Press. p 105-125.
- VAN DER MERWE, N.J. & VOGEL, J.C. 1978.  $^{13}\text{C}$  Content of human collagen as a measure of prehistoric diet in woodland North America. *Nature* 276(5690):815-816.
- VAN KLINKEN, G.J. 1999. Bone collagen quality indicators for paleodietary and radiocarbon measurements. *Journal of Archaeological Science* 26(6):687-695.
- VAN KLINKEN, G.J., RICHARDS, M.P. & HEDGES, R.E.M. 2000. An overview of causes for stable isotopic variations in past European human populations: environmental, ecophysiological, and cultural effects. In: AMBROSE, S.H. & KATZENBERG, M.A., editors. *Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*: Springer US. p 39-63.
- VAN KLINKEN, G.J., VAN DER PLICHT, H. & HEDGES, R.E.M. 1994. Bond  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios reflect (palaeo-)climatic variations. *Geophysical Research Letters* 21(6):445-448.
- VAN RENSBURG, B.G.J. 1987. Secondary dentine—cause and effect. *Journal of Dental Research* 66:949.
- VAN STRYDONCK, M., ERVYNCK, A., BOUDIN, M., VAN BOS, M. & DE WILDE, R. 2009. The relationship between  $^{14}\text{C}$  content,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values in bone collagen and the proportion of fish, meat and plant material in the diet: a controlled feeding experiment.
- VAN WILLIGEN, S. 1999. L'Épicardial Et La Néolithisation De La France Méditerranéenne. *Saguntum: Papeles del Laboratorio de Arqueología de Valencia* Extra-2:571-581.
- VAN WILLIGEN, S. 2004. Aspects culturels de la néolithisation en Méditerranée occidentale : le Cardial et l'Épicardial. *Bulletin de la Société préhistorique française*:463-495.
- VAQUER, J. 1991. Aspects du Chasséen en Languedoc occidental. Habitat et culture matérielle. *Mémoires du Musée de préhistoire d'Ile-de-France*(4):27-37.

- VAQUER, J. 1998. Les sépultures du Néolithique moyen en France méditerranéenne. In: VAQUER, J., editor. *Sépultures d'Occident et genèses des mégalithismes Séminaire de J Guilaine au Collège de France*. Paris: Errance. p 167-186.
- VAQUER, J. 2015. L'obsidienne, exploitation et diffusion en Méditerranée occidentale. In: CHANCEREL, A., VAQUER, J. & CLEYET-MERLE, J.J., editors. *Signes de richesse, inégalités au Néolithique Catalogue d'exposition du musée national de préhistoire*. Paris: Réunion des Musées nationaux-Grand Palais, 2. p 25-28.
- VAQUER, J., DUDAY, H., GANDELIN, M., HEROUIN, S. & TRESSET, A. 2007. La tombe de Coste Rouge à Beaufort (Hérault) et la question des tombes à dalles néolithiques dans le nord-est des Pyrénées. *Gallia préhistoire* 49:127-159.
- VARALLI, A., DESIDERI, J., DAVID-ELBIALI, M., GOUDE, G., HONEGGER, M. & BESSE, M. 2021. Bronze Age innovations and impact on human diet: A multi-isotopic and multi-proxy study of western Switzerland. *PLoS ONE* 16(1):e0245726.
- VIEUGUÉ, J. 2014. Use-wear analysis of prehistoric pottery: methodological contributions from the study of the earliest ceramic vessels in Bulgaria (6100–5500 BC). *Journal of Archaeological Science* 41:622-630.
- VIEUGUE, J. 2016. Fonction des poteries et alimentation au Néolithique : une approche diachronique en Languedoc. *Les cuisines Actes du 138e Congrès national des sociétés historiques et scientifiques, « Se nourrir : pratiques et stratégies alimentaires », Rennes, 2013*. Paris: Editions du CTHS. p 174-195.
- VIGNE, J.-D. 1988. *Les mammifères post-glaciaires de Corse. Étude archéozoologique*. Paris: Gallia Préhistoire.
- VIGNE, J.-D. 2006. Maîtrise et usages de l'élevage et des animaux domestiques au Néolithique : quelques illustrations au Proche-Orient et en Europe In: GUILAINE, J., editor. *Populations néolithiques et environnements Séminaire du Collège de France*. Paris: Errance. p 85-116.
- VIGNE, J.-D. 2011. The origins of animal domestication and husbandry: A major change in the history of humanity and the biosphere. *Comptes Rendus Biologies* 334(3):171-181.
- VIGNE, J.-D. 2012. *Les débuts de l'élevage*: Le Pommier. 192 p.
- VIGNE, J.-D., BALASSE, M., GOURICHON, L., HELMER, D., LESUR, J., MASHKOUR, M., TRESSET, M. & VILA, E. 2012. Etat des connaissances archéozoologiques sur les débuts de l'élevage du mouton dans l'ancien monde. *Ethnozootechnie* 91:11-19.
- VIGNE, J.-D. & HELMER, D. 2007. Was milk a « secondary product » in the Old World Neolithisation process? Its role in the domestication of cattle, sheep and goats, in BALASSE M., YACOBACCIO H., VIGNE J.-D., HELMER D. & GOEPFERT N. (éds), Actes de la session de l'ICAZ (Mexico, août 2006). Pratiques et techniques d'élevage : modèles et outils méthodologiques pour l'analyse archéozoologique. *Anthropozoologica* 42(2):9-40.
- VIKA, E., ARAVANTINOS, V. & RICHARDS, M.P. 2009. Aristophanes and stable isotopes: a taste for freshwater fish in Classical Thebes, (Greece). *Antiquity* 83(322):1076–1083.
- VILLALBA-MOUCO, V., UTRILLA, P., LABORDA LORENTE, R., LIZALDE, J.I., MARTINEZ-LABARGA, C. & SALAZAR-GARCIA, D. 2018. Reconstruction of human subsistence and husbandry strategies from the Iberian Early Neolithic: A stable isotope approach. *American Journal of Physical Anthropology* 167:1-15.
- VILLOTTE, S. 2008. Les marqueurs ostéoarticulaires d'activité. In: CHARLIER, P., editor. *Ostéo-archéologie et techniques médico-légales : tendances et perspectives*. Paris: Editions De Boccard. p 383-389.
- VILLOTTE, S. 2009. *Enthésopathies et activités des hommes préhistoriques - Recherche méthodologique et application aux fossiles européens du Paléolithique supérieur et du Mésolithique*. . Oxford: BAR International Series 1992. 206 p.
- VILLOTTE, S., CASTEX, D., COUALLIER, V., DUTOUR, O., KNÜSEL, C.J. & HENRY-GAMBIER, D. 2010a. Enthesopathies as occupational stress markers: Evidence from the upper limb. *American Journal of Physical Anthropology* 142(2):224-234.
- VILLOTTE, S., CHURCHILL, S.E., DUTOUR, O.J. & HENRY-GAMBIER, D. 2010b. Subsistence activities and the sexual division of labor in the European Upper Paleolithic and Mesolithic: Evidence from upper limb enthesopathies. *Journal of Human Evolution* 59(1):35-43.

- VILLOTTE, S. & KNÜSEL, C.J. 2013. Understanding Enthesal Changes: Definition and Life Course Changes. *International Journal of Osteoarchaeology* 23(2):135-146.
- VILLOTTE, S. & KNÜSEL, C.J. 2014. "I sing of arms and of a man...": medial epicondylitis and the sexual division of labour in prehistoric Europe. *Journal of Archaeological Science* 43:168-174.
- VILLOTTE, S. & KNÜSEL, C.J. 2016. External auditory exostoses and prehistoric aquatic resource procurement. *Journal of Archaeological Science: Reports* 6:633-636.
- VILLOTTE, S., STEFANOVIC, S. & KNÜSEL, C.J. 2014. External auditory exostoses and aquatic activities during the Mesolithic and the Neolithic in Europe: results from a large prehistoric sample. *Anthropologie* 52(1):73-89.
- VIRGINIA, R. & DELWICHE, C.C. 1982. Natural  $^{15}\text{N}$  abundance of presumed  $\text{N}_2$ -fixing and non- $\text{N}_2$ -fixing plants from selected ecosystems. *Oecologia* 54(3):317-325.
- VOGEL, J.C. & VAN DER MERWE, N.J. 1977. Isotopic Evidence for Early Maize Cultivation in New York State. *Am Antiquity* 42(2):238-242.
- WALLACE, M., JONES, G., CHARLES, M., FRASER, R., HALSTEAD, P., HEATON, T.H.E. & BOGAARD, A. 2013. Stable carbon isotope analysis as a direct means of inferring crop water status and water management practices. *World Archaeology* 45(3):388-409.
- WARINNER, C. & TUROSS, N. 2009. Alkaline cooking and stable isotope tissue-diet spacing in swine: archaeological implications. *Journal of Archaeological Science* 36(8):1690-1697.
- WARINNER, C. & TUROSS, N. 2010. Brief communication: Tissue isotopic enrichment associated with growth depression in a pig: Implications for archaeology and ecology. *American Journal of Physical Anthropology* 141(3):486-493.
- WASHBURN, E., NESBITT, J., IBARRA, B., FEHREN-SCHMITZ, L. & OELZE, V.M. 2021. A strontium isoscape for the Conchucos region of highland Peru and its application to Andean archaeology. *PLoS ONE* 16(3):e0248209.
- WATERS-RIST, A.L. & KATZENBERG, M.A. 2010. The Effect of Growth on Stable Nitrogen Isotope Ratios in Subadult Bone Collagen. *International Journal of Osteoarchaeology* 20(2):172-191.
- WEBER, M., TACAIL, T., LUGLI, F., CLAUSS, M., WEBER, K., LEICHLITER, J., WINKLER, D.E., MERTZ-KRAUS, R. & TÜTKEN, T. 2020. Strontium uptake and intra-population  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variability of bones and teeth—controlled feeding experiments with rodents (*Rattus norvegicus*, *Cavia porcellus*). *Frontiers in Ecology and Evolution* 8:569940.
- WELLER, O. 2002. Aux origines de la production du sel en Europe. Vestiges, fonctions et enjeux archéologiques. In: WELLER, O., editor. *Archéologie du sel: Techniques et sociétés Internationales Archéologie, XIV Congrès UISPP, Liège*. p 163-175.
- WELLER, O. 2015. First salt making in Europe: an overview from Neolithic times. *Documenta Praehistorica* 42(0):185-196.
- WHELTON, H.L., LEWIS, J., HALSTEAD, P., ISAAKIDOU, V., TRIANTAPHYLLOU, S., TZEVELEKIDI, V., KOTSAKIS, K. & EVERSLED, R.P. 2018. Strontium isotope evidence for human mobility in the Neolithic of northern Greece. *Journal of Archaeological Science: Reports* 20:768-774.
- WHITE, T.D. & FOLKENS, P.A. 2005. *The human bone manual*.
- WILLCOX, G. 2004. Measuring grain size and identifying Near Eastern cereal domestication: evidence from the Euphrates valley. *Journal of Archaeological Science* 31(2):145-150.
- WILLCOX, G. 2005. The distribution, natural habitats and availability of wild cereals in relation to their domestication in the Near East: multiple events, multiple centres. *Veget Hist Archaeobot* 14(4):534-541.
- WILLCOX, G. 2007. The adoption of farming and the beginnings of the Neolithic in the Euphrates valley: cereal exploitation between the 12th and 8th millennia cal BC. *The Origins and Spread of Domestic Plants in Southwest Asia and Europe*.
- WILLCOX, G. 2013. The Roots of Cultivation in Southwestern Asia. *Science* 341(6141):39-40.
- WILLCOX, G. & STORDEUR, D. 2012. Large-scale cereal processing before domestication during the tenth millennium cal BC in northern Syria. *Antiquity* 86(331):99-114.
- WILLMES, M., BATAILLE, C.P., JAMES, H.F., MOFFAT, I., MCMORROW, L., KINSLEY, L., ARMSTRONG, R.A., EGGINS, S. & GRÜN, R. 2018. Mapping of bioavailable strontium isotope ratios in France for archaeological provenance studies. *Applied Geochemistry* 90:75-86.

- WILLMES, M., KINSLEY, L., MONCEL, M.H., ARMSTRONG, R.A., AUBERT, M., EGGINS, S. & GRÜN, R. 2016. Improvement of laser ablation in situ micro-analysis to identify diagenetic alteration and measure strontium isotope ratios in fossil human teeth. *Journal of Archaeological Science* 70:102-116.
- WILLMES, M., MCMORROW, L., KINSLEY, L., ARMSTRONG, R., AUBERT, M., EGGINS, S., FALGUÈRES, C., MAUREILLE, B., MOFFAT, I. & GRÜN, R. 2013. The IRHUM (Isotopic Reconstruction of Human Migration) database - bioavailable strontium isotope ratios for geochemical fingerprinting in France. *Earth System Science Data Discussions* 6:761-777.
- WINDEY, K., DE PRETER, V. & VERBEKE, K. 2012. Relevance of protein fermentation to gut health. *Molecular Nutrition & Food Research* 56(1):184-196.
- WOLF, N., CARLETON, S.A. & DEL RIO, C.M. 2009. Ten Years of Experimental Animal Isotopic Ecology. *Functional Ecology* 23(1):17-26.
- WOOD, J.W., MILNER, G.R., HARPENDING, H.C. & WEISS, K.M. 1992. The osteological paradox : problems of inferring prehistoric health from skeletal samples. *Current Anthropology* 33(4):343-370.
- WU, G. 2009. Amino acids: metabolism, functions, and nutrition. *Amino acids* 37(1):1-17.
- XU, Z., LI, Y., TANG, Y. & HAN, G. 2009. Chemical and strontium isotope characterization of rainwater at an urban site in Loess Plateau, Northwest China. *Atmospheric Research* 94(3):481-490.
- YAO, F., LEGEROS, J.P. & LEGEROS, R.Z. 2009. Simultaneous incorporation of carbonate and fluoride in synthetic apatites: Effect on crystallographic and physico-chemical properties. *Acta Biomater* 5(6):2169-2177.
- YONEDA, M., TANAKA, A., SHIBATA, Y., MORITA, M., UZAWA, K., HIROTA, M. & UCHIDA, M. 2002. Radiocarbon Marine Reservoir Effect in Human Remains from the Kitakogane Site, Hokkaido, Japan. *Journal of Archaeological Science* 29(5):529-536.
- YONEYAMA, T. & TANAKA, F. 1999. Natural abundance of  $^{15}\text{N}$  in nitrate, ureides, and amino acids from plant tissues. *Soil Science and Plant Nutrition* 45(3):751-755.
- YOSHINAGA, J., MINAGAWA, M., SUZUKI, T., OHTSUKA, R., KAWABE, T., INAOKA, T. & AKIMICHI, T. 1996. Stable carbon and nitrogen isotopic composition of diet and hair of Gidra-speaking Papuans. *American Journal of Physical Anthropology* 100(1):23-34.
- ZAZZO, A. 2001. *Validation méthodologique de l'utilisation des compositions isotopiques ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) des bioapatites fossiles pour la reconstitution des paléoenvironnements continentaux* [PhD thesis]: Université Pierre et Marie Curie, Paris VI. 252 p.
- ZAZZO, A. 2014. Bone and enamel carbonate diagenesis: A radiocarbon prospective. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 416:168-178.
- ZAZZO, A., BALASSE, M. & PATTERSON, W.P. 2005. High-resolution  $\delta^{13}\text{C}$  intratooth profiles in bovine enamel: implications for mineralization pattern and isotopic attenuation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69(14):3631-3642.
- ZAZZO, A., LÉCUYER, C., SHEPPARD, S.M.F., GRANDJEAN, P. & MARIOTTI, A. 2004. Diagenesis and the reconstruction of paleoenvironments: A method to restore original  $\delta^{18}\text{O}$  values of carbonate and phosphate from fossil tooth enamel. Associate editor: J. Horita. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68(10):2245-2258.
- ZAZZO, A., MONAHAN, F.J., MOLONEY, A.P., GREEN, S. & SCHMIDT, O. 2011. Sulphur isotopes in animal hair track distance to sea. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 25(17):2371-2378.
- ZEDER, M.A. & PILAAR, S.E. 2010. Assessing the reliability of criteria used to identify mandibles and mandibular teeth in sheep, Ovis, and goats, Capra. *Journal of Archaeological Science* 37(2):225-242.
- ZEEB-LANZ, A. 2019. The Herxheim ritual enclosure: a synthesis of results and interpretation approaches. *Ritualised Destruction in the Early Neolithic—The Exceptional Site of Herxheim (Palatinate, Germany)* 2:423-482.
- ZHANG, Q., CAI, Z., LIU, Y., LIN, H., WANG, Q., YAN, J., HAN, L., WANG, J., KE, P., ZHUANG, J. & HUANG, X. 2020. Comparison of bracketing calibration and classical calibration curve quantification methods in establishing a candidate reference measurement procedure for

- human serum 17 $\beta$ -estradiol by isotope dilution liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Microchemical Journal* 152:104270.
- ZOHARY, D. & HOPF, M. 1973. Domestication of Pulses in the Old World: Legumes were companions of wheat and barley when agriculture began in the Near East. *Science* 182(4115):887-894.
- ZVELEBIL, M. 2001. The agricultural transition and the origins of Neolithic society in Europe. *Documenta Praehistorica* 28:1-26.
- ZVELEBIL, M. & ROWLEY-CONWY, P. 1984. Transition to farming in Northern Europe: A hunter-gatherer perspective. *Norwegian Archaeological Review* 17(2):104-128.



## Table des figures

<b>Figure C1. 1</b> : Crânes surmodelés du site de Tell Aswad (PPNB, Syrie) agencés autour d'un crâne d'enfant non surmodelé dont on aperçoit le sommet, au centre. Photographie L. Dugué. D'après Stordeur et Khawam, 2007.....	9
<b>Figure C1. 2</b> : Carte de diffusion du Néolithique en Europe à partir du Proche-Orient selon les deux grands courants d'expansion, danubien et méditerranéen, par voie terrestre et maritime. D'après Demoule, 2007.....	10
<b>Figure C1. 3</b> : Carte et chronologie de la diffusion des plantes cultivées au Néolithique en Europe et premières preuves de la présence du pavot à opium en Europe occidentale. D'après Salavert <i>et al</i> , 2018.....	13
<b>Figure C1. 4</b> : Chronologie et principales route de diffusion des animaux domestiques en Europe au Néolithique. D'après Tresset et Vigne, 2011.....	14
<b>Figure C1. 5</b> : Dessin représentatif de récipient percé (type faisselle) reconstitué et photographie de fragment spécifiques provenant de la région de Kuyavia (Pologne) soumis à des analyses de résidus lipidiques et ayant contenu du lait. D'après Salque <i>et al</i> , 2013.....	15
<b>Figure C1. 6</b> : Répartition et propagation chronologique des cultures néolithiques « primaires » en Europe à partir du Proche-Orient. Les barres noires marquent les pauses créant des aires de mutation culturelles au contact des chasseurs-cueilleurs autochtones. D'après Guilaine 2003.....	21
<b>Figure C1. 7</b> : Cartes de répartition des différentes cultures du Néolithique ancien et moyen en France. Modifié d'après Demoule, 2007, p. 92-94.....	24
<b>Figure C1. 8</b> : Proposition de reconstitution d'un monument de type Passy par G. Tosello (dans Constantin <i>et al</i> , 1997). D'après Thomas, 2011.....	29
<b>Figure C1. 9</b> : Plan du site de Vignely « La Porte aux Bergers » (habitat VSG et nécropole du Néolithique moyen) et localisation des os humains épars côtoyant les sépultures. Les numéros en gras indiquent les maisons VSG (représentées par leurs trous de poteaux) et leurs fosses latérales (gris foncé). D'après Pariat et Thevenet, 2008.....	34
<b>Figure C1. 10</b> : Interprétation de la répartition des lames polies en roches alpines d'origine piémontaise ou ligure. D'après Petrequin <i>et al</i> , 1997.....	38
<b>Figure C1. 11</b> : Carte de localisation en Europe (en haut) de la portion de vallée de l'Yonne considérée dans ce travail (étoile) et au sein du contexte géologique (au milieu) et topographique (en bas) de la moitié nord de la France. La légende géologique concerne la zone encadrée en pointillée. Fonds de carte : Daniel Dalet©, Géoportail et <a href="http://www.cartesfrance.fr">www.cartesfrance.fr</a> .....	41
<b>Figure C1. 12</b> : Vue aérienne de l'enceinte néolithique moyen de Gurgy « Le Nouzeau ». d'après Meunier 2007.....	42
<b>Figure C1. 13</b> : Carte des principaux sites Néolithiques en Bourgogne en fonction des cultures. D'après Martineau <i>et al</i> , 2015.....	43
<b>Figure C1. 14</b> : Carte de répartition des sites inclus dans le PCR « Évolution, coexistence et confrontation de pratiques funéraires entre 4500 et 4000 av. J.-C. sur un micro-territoire : la vallée de l'Yonne, entre le Serein et le Baulche » dirigé par Ph. Chambon. Les sites de Chichery « Bois des Pâturaux », Gurgy « La ferme de Néron » et « La Raye Bossue » ne sont pas retenus dans l'étude des	

pratiques funéraires du Néolithique moyen, n'ayant à ce jour pas livré de restes humains ou datant d'une autre période. Les sites en rouge sont tous considérés dans ce travail. ....	48
<b>Figure C1. 15</b> : Proposition schématique de l'organisation du territoire au Néolithique moyen par entités territoriales d'après J.-P. Delor (1999).....	52
<b>Figure C1. 16</b> : a. Carte de répartition des sites ayant livré des restes de pavot à opium correspondant aux premières occurrences au Proche-Orient (points oranges), en Méditerranée (points bleus), en Europe tempérée (points violets) et dans l'ouest des Alpes (points verts) et populations actuelles de pavot sauvage (cercle pointillé). b. Nombre de sites du Néolithique ancien ayant livré du pavot par chronologie. D'après Salavert <i>et al</i> , 2020. ....	56
<b>Figure C1. 17</b> : Représentation schématique de l'évolution des principales ressources végétales exploitées en France au cours du Néolithique (© L. Bouby). D'après Bouby <i>et al</i> , 2018. ....	57
<b>Figure C1. 18</b> : Meule à céréales du site VSG de Loison-sous-Lens (Pas-de-Calais) avec un détail de la surface active (x50). D'après Hamon <i>et al</i> , 2011. ....	59
<b>Figure C1. 19</b> : Composition relative des espèces domestiques et sauvages (A) retrouvées dans plus de 70 sites VSG, localisation de ces sites (B) et composition relatives des espèces domestiques par phase d'occupation (C). Les zones grisées sur la carte correspondent à la vallée de l'Aisne (a), la basse vallée de la Marne (b), la haute vallée Seine/Yonne (c), la vallée de l'Oise (d) et la basse vallée de la Seine (e). Les références des sites sont disponibles en annexe de Bedault 2009, p26. Modifié d'après Bedault 2009.....	61
<b>Figure C1. 20</b> : Évolution de la consommation du bœuf, du porc et des caprinés du Néolithique ancien à l'âge du Fer dans le Nord de la France. Modifié d'après Hachem 2011 à partir d'Auxiette et Hachem, 2007. ....	63
<b>Figure C1. 21</b> : Représentation schématique de la corrélation entre la taille des maisons, la faune et le macro-outillage lithique du village rubané de Cuiry-les-Chaudardes (Aisne). D'après Hachem et Hamon, 2014. ....	66
<b>Figure C1. 22</b> : Répartition des sites français ayant fait l'objet d'analyses isotopiques pour le Néolithique ancien et moyen (ronds) et le Néolithique récent et final (carrés). Les symboles bleus indiquent les sites du sud, les symboles noirs ceux du centre et les symboles rouges et oranges ceux du nord comportant respectivement des restes humains (rouge) ou de la faune uniquement (orange). La zone grisée compte les sites Cerny ayant été publiés très récemment (Cheung <i>et al</i> , 2021). La localisation des sites étudiés dans ce travail est signalée par l'étoile. Modifié d'après Goude et Fontugne, 2016.....	77
<b>Figure C2. 1</b> : Représentation schématique des isotopes du carbone. Chaque atome possède le même nombre de protons (6, en rouge) et d'électrons (6, en bleu) mais un nombre différent de neutrons (en gris), leur conférant une masse différente. ....	88
<b>Figure C2. 2</b> : Formule générale d'un élément chimique.....	89
<b>Figure C2. 3</b> : Classification périodique des éléments ou table de Mendeleïv. Les éléments étudiés dans ce travail (pour leur concentration ou leur rapport isotopique) sont encadrés, en rouge pour leur intérêt biologique, en bleu pour leur intérêt diagénétique et leur fonction de contrôle. Modifié d'après ©www.elementsdatabase.com. ....	92
<b>Figure C2. 4</b> : Formules développées des 21 acides aminés naturels en fonction de leurs principales caractéristiques structurales. e = essentiel, en gris = non présents dans le collagène, en rouge les	

atomes de soufre. La lysine et la proline existent également sous forme hydrolysée (hydroxylysine et hydroxyproline) non représentées ici. Modifié d'après ©Wikimedia Commons.....	94
<b>Figure C2. 5 :</b> Structure générale et microscopique de l'os. A gauche, coupe transversale d'un tibia gauche. A droite, structure microscopique de l'os compact. Modifié d'après White et Folkens, 2005.	97
<b>Figure C2. 6 :</b> Structure générale et microscopique de la dent et de ses tissus de soutien. Modifié d'après Nanci 2003.....	99
<b>Figure C2. 7 :</b> Description des stades de croissance dentaire d'après Moorrees <i>et al</i> , 1963 utilisés pour identifier les étapes du développement dentaire des dents multiradiculées. *LPD : espace du Ligament ParoDontal. Modifié d'après l'atlas de la Queen Mary University of London (©www.atlas.dentistry.qmul.ac.uk).....	101
<b>Figure C2. 8 :</b> Atlas du développement dentaire de la Queen Mary University of London (©www.atlas.dentistry.qmul.ac.uk). D'après AlQhatani <i>et al</i> , 2010. ....	103
<b>Figure C2. 9 :</b> Différence de morphologie entre des dents d'herbivores (bovidé) à croissance prolongée et d'omnivores (suidé) à croissance limitée. A. denture de capriné actuel ( <i>Rupicapra sp.</i> ), B. denture de suidé actuel ( <i>Sus scrofa</i> ), C. dent de boviné néolithique ( <i>Bos taurus</i> ), D. dents de suidés néolithiques ( <i>Sus scrofa</i> ). Clichés L. Rey. ....	105
<b>Figure C2. 10 :</b> Représentation schématique d'une fibre de collagène. D'après Campbell 1995. ....	107
<b>Figure C2. 11 :</b> Tableau récapitulatif des principales caractéristiques d'intérêt des tissus osseux et dentaires pour l'analyse biogéochimique menée dans ce travail.....	109
<b>Figure C2. 12 :</b> Schéma théorique de la variabilité isotopique du carbone et de l'azote des ressources alimentaires. ....	111
<b>Figure C2. 13 :</b> Schéma théorique du transfert isotopique du carbone dans la chaîne trophique et principales sources de variabilité dans et entre les organismes.....	118
<b>Figure C2. 14 :</b> Schéma théorique du transfert isotopique de l'azote dans la chaîne trophique et principales sources de variabilité dans et entre les organismes.....	127
<b>Figure C2. 15 :</b> Distribution des valeurs isotopiques du soufre ( $\delta^{34}\text{S}$ ) des animaux et des humains des sites archéologiques de Chicha (a ; Age du Bronze Récent, sud-ouest de Sibérie) et de Bil' Shivtzi (b ; Énéolithique, ouest de l'Ukraine) montrant les distinctions entre poissons d'eau douce et animaux terrestres, d'une part, et entre ovicaprins et autres animaux terrestres d'autre part, d'après les données de Privat <i>et al</i> , 2007. Dans les deux cas, les valeurs des humains sont similaires à l'un des deux groupes, indiquant une consommation préférentielle et sélective des ressources. Les symboles entourés correspondent aux échantillons pour lesquels les rapports élémentaires N/S et C/S étaient inférieures aux valeurs modernes. Modifié d'après Privat <i>et al</i> , 2007. ....	132
<b>Figure C2. 16 :</b> Schéma théorique du transfert isotopique du soufre dans la chaîne trophique et des principales sources de variabilité dans et entre les organismes.....	134
<b>Figure C2. 17 :</b> Structure générale d'un acide aminé. Le radical correspond à la chaîne carbonée latérale qui est variable entre les acides aminés (voir Figure C2. 2). ....	140
<b>Figure C2. 18 :</b> Représentation schématique du devenir métabolique de l'azote dans les AA «trophiques» et «sources» chez les mammifères. Les flèches indiquent les migrations de l'azote entre AA et autres composés azotés. Les doubles flèches $\rightleftharpoons$ indiquent les échanges et les simples flèches $\rightarrow$ les transferts unidirectionnels d'azote (désamination ou transamination irréversible). Le rectangle bleu correspond au pool métabolique d'azote qui comprend les acides aminés «trophiques» (#), dont l'azote	

peut être facilement échangé en une seule étape chimique, et l'ammoniac libre ; ils sont reliés par une double flèche. Les acides aminés «sources» (†) et l'acide aminé «métabolique» (§), en dehors de ce pool, peuvent transférer de l'azote aux AA du pool métabolique mais ne peuvent pas en échanger (sauf entre Gly et Ser). D'après O'Connell 2017..... 141

**Figure C2. 19** : Composition isotopique de l'azote des acides aminés d'organismes photoautotrophes (*i.e.* macro et microalgues et cyanobactérie) et herbivores dans un écosystème aquatique. Les flèches symbolisent l'effet trophique. Les acides aminés encadrés sont essentiels (non synthétisés par les herbivores). D'après Ohkouchi et Takano, 2014 (données issues de Chikaraishi *et al*, 2010a)..... 142

**Figure C2. 20** : Représentation schématique de la relation entre le niveau trophique et la composition isotopique de l'azote de l'acide glutamique et de la phénylalanine dans A) les écosystèmes terrestres en C3 et B) les écosystèmes aquatiques. Les valeurs de  $\Delta^{15}\text{N}_{\text{Glu-Phe}}$  des producteurs primaires diffèrent entre les plantes en C3 (-8,4‰) et les plantes aquatiques telles que les algues et les cyanobactéries (+3,4‰ ; Chikaraishi *et al*, 2007, 2010a). D'après Naito *et al*, 2013a modifié d'après Chikaraishi *et al*, 2011..... 143

**Figure C2. 21** : Comparaison des estimations du niveau trophique (TP) basées sur a) la composition isotopique du carbone et de l'azote du collagène global (bulk) et b) la composition isotopique de l'azote de l'acide glutamique et de la phénylalanine (AA). Selon l'approche "bulk", la valeur de  $\delta^{15}\text{N}$  de consommateurs ayant le même niveau trophique peut varier en fonction de la valeur de  $\delta^{15}\text{N}$  à la base de la chaîne alimentaire (par exemple chez les plantes) et il est souvent difficile d'estimer cette valeur. Selon l'approche "AA", l'estimation de la valeur de  $\delta^{15}\text{N}$  à la base de la chaîne alimentaire n'est pas nécessaire car la méthode se base sur la différence entre deux acides aminés d'un même individu (le consommateur). Les organismes de même niveau trophique (TP) devraient présenter des valeurs sur la ligne pointillée correspondante car les plantes terrestres sont supposées avoir des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  et  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  cohérentes entre différents contextes environnementaux (Naito *et al*, 2013a), permettant ainsi une évaluation plus claire du TP des consommateurs. D'après Naito *et al*, 2016b. . 145

**Figure C2. 22** : Distribution des valeurs isotopiques de l'azote des acides aminés Glu et Phe chez les plantes modernes d'après les données de la littérature. Les résultats expriment la grande variabilité du facteur  $\beta$ . Parmi cette variabilité, les estimations d'A. Styring *et al*, 2015 ne sont pas aberrantes. \*blé fertilisés \*\*publication ancienne, valeurs extrêmes. .... 146

**Figure C2. 23** : Facteurs de discrimination trophique ( $\text{TDF}_{\text{Glu-Phe}}$ ) moyens (‰  $\pm$  SD) pour une large gamme de paires consommateur-régime alimentaire provenant d'études d'alimentation contrôlée publiées et de collections de terrain bien délimitées (indiquées par \*). Les valeurs  $\text{TDF}_{\text{Glu-Phe}}$  ont été calculées comme la différence des facteurs de fractionnement trophique ( $\Delta^{15}\text{N} = \delta^{15}\text{N}_{\text{consommateur}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{alimentation}}$ ) des valeurs d'acide glutamique et de phénylalanine des consommateurs. Les symboles bleu foncé, cyan et vert représentent respectivement les consommateurs marins, d'eau douce et terrestres ; les symboles remplis et ouverts représentent respectivement les consommateurs produisant de l'ammoniac et de l'urée/acide urique ; et les symboles carrés, circulaires et losanges représentent respectivement les consommateurs primaires, secondaires et tertiaires (et supérieurs). La ligne pointillée horizontale indique un  $\text{TDF}_{\text{Glu-Phe}}$  de 7,6‰. D'après McMahon et McCarthy, 2016. .... 149

**Figure C2. 24** : Dispersion des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  et  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$  des spécimens archéologiques de différentes espèces animales étudiés par Naito *et al* 2016b. Les lignes continues et pointillées représentent les niveaux trophiques théoriques (TP = 1, 2 et 3) pour les écosystèmes terrestre et aquatique, respectivement. D'après Naito *et al* 2016b..... 152

**Figure C2. 25** : Représentation de la diminution des rapports Sr/Ca et Ba/Ca avec l'augmentation du niveau trophique dans trois écosystèmes terrestres de la région du Cap (Afrique du Sud ; A, carrés), de

Californie (États-Unis ; B, losanges) et du Wisconsin (États-Unis ; C, ronds) d'après les données de Gilbert *et al*, 1994, Elias *et al*, 1982 et Burton *et al*, 1999, respectivement. Les données sont exprimées en log pour obtenir une représentation linéaire de la corrélation entre Sr/Ca et Ba/Ca (voir aussi Figure C2. 31). Les droites de régression d'équation  $\log(\text{Ba/Ca}) = \alpha \cdot \log(\text{Sr/Ca}) + \beta$  ont une pente similaire ( $\alpha = 1,71, 1,62$  et  $1,97$  respectivement) et un  $\beta$  variable du fait d'un décalage en  $\log(\text{Sr/Ba})$  entre les écosystèmes dû à la composition particulière des plantes, qui dépend elle même de la nature géologique des sols. D'après Balter *et al*, 2001. .... 156

**Figure C2. 26 :** Distribution des valeurs de  $\log(\text{Sr/Ca})$  vs  $\log(\text{Ba/Ca})$  des tissus mous, de l'os et des excréments de plusieurs mammifères - campagnols (ronds), écureuils (carrés) et martes (losanges) - d'après les données d'Elias *et al*, 1982 compilées par Balter 2004. La composition des tissus mous varie au sein d'un organisme mais les rapports Sr/Ca et Ba/Ca des muscles et des os sont similaires. L'élimination préférentielle de Sr et Ba chez les mammifères est illustrée par le fort enrichissement systématique des fèces. D'après Balter 2004. .... 158

**Figure C2. 27 :** Distribution des valeurs de Sr/Ca (a) et Ba/Ca (b) de cinq cerfs en fonction du type de dent. Les symboles gris foncé représentent l'émail (E), les symboles gris clair la dentine (D) et les symboles blancs l'os (B). Les erreurs liées à ces valeurs sont inférieures à la hauteur des symboles. Les dents sont classées par ordre de minéralisation de l'émail. D'après Peek et Clementz 2012a. .... 159

**Figure C2. 28 :** Distribution des valeurs de Sr/Ca alimentaire en fonction de la teneur en Ca des plantes. Modifié d'après Burton et Price 2002. .... 162

**Figure C2. 29 :** (a) Distribution des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca de plantes et d'animaux terrestres (en rouge) et aquatiques (en bleu) à partir des données de S. Peek et M.T. Clementz (2012b) et (b) représentation du ratio Ba/Sr (en  $\log^*1000$ ) montrant la variabilité entre les écosystèmes terrestres et aquatiques à partir des données mesurés dans divers échantillons terrestres (sol, plantes et animaux), d'eau douce et marins (eau, coquillages et os de poissons) ; d'après Burton et Price 1990. mammif = mammifère. Les points avec les barres d'erreur correspondent aux valeurs moyennes et écart-types. .... 167

**Figure C2. 30 :** Analyses à la microsonde ionique de la composition en fonction des éléments de l'émail moderne (carrés), l'émail fossile (triangles) et la dentine fossile (ronds), montrant de fortes augmentations des concentrations de nombreux éléments traces et mineurs associés à la fossilisation. Les zones notées "I" correspondent aux éléments probablement associés à l'altération chimique de l'apatite. La plus forte concentration des éléments de la zone "II" reflète probablement des analyses mixtes d'apatite et d'oxyhydroxyde. Bien que tous les matériaux fossiles soient altérés, l'altération est plus importante dans la dentine que dans l'émail. Les lignes verticales reliant les carrés montrent la gamme des concentrations mesurées pour les échantillons modernes, et reflètent principalement les différences de composition entre les espèces. D'après Kohn *et al*, 1999. .... 170

**Figure C2. 31 :** Schéma de synthèse théorique illustrant les différences en Sr/Ca et Ba/Ca entre les niveaux trophiques et les facteurs de variation de ces valeurs entre différentes catégories animales et végétales et différents tissus. Les données pour les mammifères terrestres sont celle de l'os. Les flèches fines symbolisent la succession des niveaux trophiques. La flèche épaisse symbolise le passage en logarithme décimal et l'inversion des valeurs sur les représentations graphiques pour une meilleure lecture. .... 172

**Figure C2. 32 :** Schéma illustrant les sources de Sr qui, si elles sont consommées (alimentation ou eau de boisson), peuvent contribuer au ratio moyen pondéré de l'émail dentaire des humains. La visibilité d'une source alimentaire dépend de son exploitation, de la quantité consommée et de la quantité de Sr incorporée à partir de cette source. La boisson d'eau de rivière peut entraîner l'ingestion de Sr

provenant de sources rocheuses éloignées et les sources atmosphériques peuvent, dans une moindre mesure et selon l'environnement, influencer la signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . D'après Montgomery 2010... 175

**Figure C2. 33 :** Exemple de l'influence de fortes précipitations apportant une signature en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  marin (en haut) et de l'influence du Sr marin sur la signature des humains ayant consommé des plantes cultivées en région côtière où l'eau, de plus forte concentration en Sr, est chargée en sels marins (en bas). La concentration en Sr permet de trancher entre l'influence des pluies et celle des plantes, apportant toutes deux une signature marine. D'après Montgomery 2010..... 178

**Figure C2. 34 :** Isotopes du strontium dans les os et l'émail des dents des humains de Vaihingen (Néolithique, Allemagne), d'après Bentley *et al*, 2003. La gamme "locale" de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  indiquée est définie par deux écarts types par rapport à la valeur moyenne des os humains. Une ligne pointillée définie arbitrairement représente la différence entre les valeurs du fossé et celles du village. Les valeurs de quatre dents d'animaux excavées dans les niveaux LBK de Vaihingen sont également indiquées à droite du graphique. La différence plus importante entre les os et les dents des sujets inhumés à l'extérieur du village, dans le fossé d'enceinte (symboles vides), indique une plus grande proportion de migrants parmi ces individus par rapport à ceux inhumés dans le village (symboles pleins), plus locaux. Ce résultat est corroboré par une plus grande variabilité des valeurs dans l'émail des sujets du fossé par rapport à ceux du village. Modifié d'après Bentley *et al*, 2003..... 182

**Figure C2. 35 :** (a) Échantillonnage séquentiel de dents de bovins (M2 et M3 supérieures droites, échantillon 3822) provenant du site Néolithique allemand de Vaihingen et (b) courbes de valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  obtenues à partir de cet échantillonnage pour trois bovins de ce site, d'après Bentley et Knipper 2005. L'émail de la M2 se forme entre la naissance et environ 10 mois, celui de la M3 entre environ 10 mois et 2 ans. Pour chaque animal, les courbes se recoupent, témoignant de la continuité des séquences dans le temps. Les lignes en pointillés délimitent la gamme de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  locale estimée à partir de l'émail dentaire des cochons du même site archéologiques. Modifié d'après Bentley *et al*, 2004..... 183

**Figure C2. 36 :** Schéma de synthèse des différents types d'échantillonnage et techniques de mesures associées réalisés dans cette étude. (a) analyses isotopiques de C, N et S du collagène osseux global, (b) analyses isotopiques C, N et S du collagène dentinaire global et (c) des sections incrémentielles par micro-échantillonnage, (d) analyse du Sr isotopique et des éléments traces par ablation laser dans l'émail dentaire (et l'os) et (e) analyse isotopique de l'azote des acides aminés spécifiques du collagène osseux. Les encadrés jaunes indiquent à quelle période de la vie correspond le signal enregistré, pour chaque type de prélèvement. .... 187

**Figure C2. 37 :** Schéma d'une torche ICP utilisée pour ioniser les échantillons en spectrométrie de masse. L'échantillon est chargé avec le gaz d'argon et enflammé par le chauffage radio-fréquence induit par les bobines RF. Le flux de gaz axial réagit avec les bobines RF pour produire le plasma chaud (jusqu'à 10 000 °C) et le flux de gaz tangentiel empêche la flamme de faire fondre l'enveloppe extérieure. Modifié d'après Pollard *et al*, 2017, p41..... 188

**Figure C2. 38 :** Schéma d'un analyseur quadripôle en spectrométrie de masse. Dans le plan formé par la paire d'électrodes négatives (A), les ions trop lourds sont déviés et heurtent les barres. Dans le plan formé par la paire d'électrodes positives (B), ce sont les ions trop légers qui sont déviés et heurtent les barres. Les ions ayant le rapport masse/charge désiré restent entre les barres et sont transmis au détecteur. D'après Pollard *et al*, 2017. .... 189

**Figure C2. 39 :** Exemple de chromatogramme où chaque pic représente un acide aminé séparé et analysé par GC/MS. D'après Chikaraishi, comm. pers. .... 191

- Figure C2. 40** : Schéma illustrant le principe de fonctionnement de la technique d’ablation laser couplée à un spectromètre de masse multicollecteur à plasma inductif (LA-MC-ICP-MS). A) L’échantillon est placé dans le dispositif laser relié à un ordinateur permettant de tracer le profil à l’endroit désiré grâce à une caméra intégrée. L’échantillon est ablaté par le faisceau laser le long du profil et envoyé vers le spectromètre de masse grâce à un flux d’argon et d’hélium. B) L’échantillon passe dans la torche plasma où il est ionisé puis dans l’analyseur électromagnétique qui va séparer les ions selon leur rapport masse/charge. Ceux-là sont alors détectés par les collecteurs pour chaque isotope. C) Les courants mesurés sont traduits en tension et les ratios isotopiques sont calculés au cours du temps. Modifié d’après Martin *et al*, 2017. .... 192
- Figure C4. 1** : Schéma de calibration de l’âge approximatif estimé des sections analysées dans cette étude, représentées à droite, de d1 à d6. La calibration est basée sur les estimations d’âge données par A. Czermak et collaborateurs (2020 ; à gauche) en fonction du taux de croissance différentiel des zones anatomiques de la deuxième molaire permanente et de leur stade de développement correspondant, d’après l’atlas de S. AlQahtani et collaborateurs (2010). Modifié d’après Czermak *et al*, 2020..... 306
- Figure C4. 2** : Coupe d’une dent (échantillon GLN 212) selon l’axe bucco-lingual en passant par les cuspides mésiales et moulage de la dent incluse dans la résine. Photographies L. Rey..... 308
- Figure C4. 3** : Illustration du dispositif d’ablation laser connecté à un MC-ICPMS (Nu500 HR) et du suivi d’acquisition des mesures en temps réel. Photographies L. Rey..... 309
- Figure C4. 4** : Exemple de profils d’ablation laser réalisés dans l’émail d’une M2 supérieure gauche, le long de la jonction émail-dentine, et dans l’os de l’échantillon GLN 221B. Le profil plus fin des éléments traces (TE) a été réalisé à côté du profil plus épais du Sr isotopique. Le côté vestibulaire (V), en meilleur état que le côté lingual (L), a été privilégié. .... 310
- Figure C4. 5** : Extrait du fichier généré par le code R pour les éléments traces à partir des fichiers eux-mêmes générés par le code Python pour 1) corriger les données par rapport aux standards SRM 1400 (« Corr » dans la colonne Variable), 2) les exprimer relativement au Ca (« R » dans la colonne Variable) et 3) par rapport aux abondances naturelles de  $^{44}\text{Ca}$ ,  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{138}\text{Ba}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{55}\text{Mn}$  et  $^{238}\text{U}$  (« T » dans la colonne Variable). Dans la colonne ID Type, « STD1 » et « STD2 » indiquent les standards qui encadrent les échantillons ; « s1 », « s2 », « s3 » indiquent les échantillons. Les colonnes V5 à V900 correspondent aux points d’ablation de chaque mesure. Chaque ligne correspond au profil d’un échantillon (ou standard) pour une variable considérée. Le fichier comprend 2590 lignes au total. .. 313
- Figure C4. 6** : Modèle de fiche-type du catalogue présentée en fin d’ouvrage (Annexe C) qui rassemble pour chaque individu toutes les données principales archéologiques, biologiques et biochimiques (sous forme de graphiques). 319
- Figure C5. 1** : Variation des valeurs isotopiques du carbone et de l’azote du collagène osseux des humains de Gurgy «Les Noisats» entre les mesures réalisées au laboratoire IsoAnalytical (IsoA) et à l’Université de Cap Town (UCT)..... 370
- Figure C5. 2** : Critères de conservations du collagène obtenus dans ce travail (rendement d’extraction, %C, %N et C/N) en fonction des datations. Aucune corrélation n’apparaît. .... 377
- Figure C5. 3** : D’après Cheung *et al*, 2021. Établissement d’un référentiel de  $\delta^{34}\text{S}$  pour la région du Bassin parisien : A. carte géologique de la région obtenue sur Géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr/>), indiquant les emplacements des sites mentionnés dans l’étude de Cheung *et al*, 2021 par rapport à la ville moderne de Paris. ★ correspond aux sites Cerny avec des données de  $\delta^{34}\text{S}$  présentées récemment dans l’étude de Cheung *et al*, 2021, ▲ correspond aux sites

avec des données de  $\delta^{34}\text{S}$  provenant de notre étude (Rey *et al*, 2017, 2019) et ■ correspond aux sites avec des données de  $\delta^{34}\text{S}$  provenant de rapports publiés précédemment (Bocherens *et al*, 2011, Drucker *et al*, 2018, Naito *et al*, 2013). B. boxplot montrant les valeurs  $\delta^{34}\text{S}$  des humains des quatre vallées, avec un code couleur selon la géologie sous-jacente de chaque site respectif. Les lignes pointillées grises indiquent la gamme des écarts types par rapport aux moyennes des données de la faune terrestre de chaque vallée. C. Tableau montrant l'âge des quatre principaux types de substrat rocheux concernés. .... 380

**Figure C5. 4 :** Dispersion des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) du collagène osseux des humains et animaux des sites du micro-territoire analysés dans ce travail (ronds) et des sites « Cerny autres » (triangles) récemment publiés par C. Cheung et collaborateurs (2021). .... 381

**Figure C5. 5 :** Dispersion des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) du collagène osseux des humains des différents sites du micro-territoire analysés dans ce travail (ronds) et des sites « Cerny autres » (triangles) récemment publiés par C. Cheung et collaborateurs (2021). BLR = Balloy « Les Réaudins », VPB = « Vignely « La Porte aux bergers », VNF = Vignely « La Noue Fénard », OLF = Orville « Les Fiefs », PR = Passy « Richebourg », GLS = Gron « Les Sablons », PLS = Passy « La Sablonnière ». .... 384

**Figure C8. 1 :** Exemple de nettoyage du profil de l'échantillon d'émail GLN 210 : la partie de gauche montre l'ensemble des valeurs non nettoyées, celle de droite l'ensemble des valeurs retenues après le nettoyage. a) Tests de corrélation entre les rapports Sr/Ca et Ba/Ca biogéniques et les rapports Mn/Ca, U/Ca et Mg/Ca diagénétiques (cf. Annexe N10). Les cercles rouges sur les nuages de points montrent les parties corrélées correspondant aux valeurs supprimées à droite. Les matrices de corrélation indiquent les coefficients de corrélation de Pearson. b) Courbes des valeurs de TE et Sr isotopique avant (à gauche) et après nettoyage (à droite) par élimination des sections altérées (cf. Annexe N9). Pour les éléments traces, les pics « biogéniques » et « diagénétiques » synchrones indiqués par des flèches correspondent aux valeurs corrélées (entourées en rouge dans a) qui sont supprimées dans les profils nettoyés (à droite). Pour le Sr isotopique, la ligne pointillée indique le seuil de  $^{88}\text{Sr}$  de 0,4V en dessous duquel les valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  sont éliminées. Les sections de données supprimées par le nettoyage sont représentées par les traits horizontaux à droite. .... 439

**Figure C8. 2 :** Exemple de profils tracés dans une dent d'herbivore (échantillon BMT F35) coupée en deux. Trois profils sont tracés pour couvrir différentes périodes de formation de la dent : un au niveau du collet, un au milieu, un à l'extrémité occlusale. .... 439

**Figure C8. 3 :** Exemple des profils des échantillons d'émail GLN 237A (a) et 221B (b) pour lesquels les données de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  conservées (profils de droite « cleaned » pour chaque échantillon, entourées en rouge) correspondent aux sections diagénétiques d'après les éléments traces et devraient être supprimées lors d'un nettoyage additionnel. .... 440

**Figure C8. 4 :** Distribution des valeurs moyennes individuelles nettoyées de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  pour chaque site et par espèce, dans l'émail (en haut) et dans l'os (en bas). Les zones grisées correspondent à la gamme de valeurs  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans l'os pour chaque site considéré et montrent que la majorité des valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de l'émail est supérieure aux valeurs dans l'os. .... 442

**Figure C8. 5 :** Graphique de comparaison des valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  mesurées dans ce travail (previous values) et des nouvelles valeurs récemment acquise (new values) pour sept échantillons. F = femmes (female) et M = hommes (male). .... 444

**Figure C8. 6 :** Analyses en composantes principales de l'ensemble des données nettoyées dans l'émail (A) et dans l'os (B) puis pour chaque site individuellement dans l'émail (C) et dans l'os (D). .... 447

<b>Figure C8. 7 :</b> Courbes de valeurs mesurées par ablation laser pour le profil dans l'émail de l'échantillon CHI-ED 5 avant (à gauche) et après nettoyage (à droite) illustrant le peu de données restantes après le nettoyage. ....	448
<b>Figure C8. 8 :</b> Exemple de corrélation dans l'émail entre, d'une part, des ratios élevés de Sr/Ca et Ba/Ca (en rouges) ainsi que U/Ca (bleu clair) chez les animaux de GLN (en particulier les herbivores ; en haut) et, d'autre part, des ratios faibles de Sr/Ca, Ba/Ca et U/Ca chez les humains du même site (en bas). Les ratios Sr/Ca et Ba/Ca s'expliquent par la position trophique des animaux et des humains, alors que la raison des différences en U/Ca sont inconnues, peut-être dues aux conditions d'inhumations.....	449
<b>Figure C8. 9 :</b> Distribution des ratios Mn/Ca dans l'émail en fonction de Sr/Ca et Ba/Ca à Monéteau « Macherin » pour chaque groupe archéologique. La corrélation (faible) mise en évidence par l'ACP (Fig. 4_PCA clean) est due à la variabilité de Sr/Ca et Ba/Ca entre les groupes et au bruit de Mn/Ca : les valeurs négatives excluent l'apport de Mn diagénétique.....	450
<b>Figure C8. 10 :</b> Exemple de profils d'herbivores (émail) pour lesquels les ratios biogéniques (Sr/Ca et Ba/Ca) ou diagénétiques (U/Ca et Mn/Ca) varient (indifféremment et de façon non corrélée) entre différents profils au sein d'une même dent. Les lignes pointillées indiquent la séparation entre les différents profils, successifs mais non jointifs. ....	451
<b>Figure C8. 11 :</b> Distribution des ratios U/Ca et Mn/Ca dans l'émail en fonction de Sr/Ca et Ba/Ca à Beaumont «Le Crot aux Moines» pour chaque catégorie d'espèce. ....	452
<b>Figure C8. 12 :</b> Distribution des ratios U/Ca et Mn/Ca dans l'émail en fonction des ratios Sr/Ca et Ba/Ca par site. Ces graphiques montrent que les corrélations observées à GLN et à BMT sont dues à des différences entre les humains (ronds) et la faune (carrés) d'une part, et d'autre part que les corrélations observées à Mon relèvent d'un biais analytique puisque les ratios Mn/Ca induisant la corrélation sont négatifs et n'impliquent donc pas de diagénèse. ....	453
<b>Figure C8. 13 :</b> Analyses en composantes principales de l'ensemble des données dans l'os, avant (A) et après (B) nettoyage, puis pour chaque site individuellement avant (A) et après (B) nettoyage.....	454
<b>Figure C8. 14 :</b> Distribution des ratios U/Ca et Mn/Ca dans l'os en fonction des ratios Sr/Ca et Ba/Ca par site et pour les humains et la faune séparément. On observe surtout une corrélation entre les ratios biogéniques et diagénétiques pour le site de BMT (violet).....	455
<b>Figure C8. 15 :</b> Distribution des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca des os humains et animaux par site. ....	463
<b>Figure C8. 16 :</b> Distribution de l'ensemble des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca des os humains et animaux de ce corpus (a) et représentation des différents niveaux trophiques dans les écosystèmes de référence pour comparaison, d'après la synthèse de Balter <i>et al</i> , 2001. Les droites de régression de référence sont représentées sur chacun des graphiques à partir des données de Gilbert <i>et al</i> , 1994 (A, en vert), Elias <i>et al</i> , 1982 (B, en rouge) et Burton <i>et al</i> , 1999 (C, en violet). Sont également représentées sur le graphique de gauche : une estimation de la gamme des plantes consommées par les herbivores de GLN (1) et BMT (2) ainsi qu'une estimation de la gamme de valeurs de carnivores ayant consommé les animaux domestiques de GLN (1) et de BMT (2).....	464
<b>Figure C8. 17 :</b> Distribution des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca de l'émail dentaire des humains et des animaux par site.....	468
<b>Figure C8. 18 :</b> Représentation graphique du log(Sr/Ba) dans l'émail de chaque espèce, tous sites confondus. ....	469

<b>Figure C8. 19 :</b> Graphiques montrant la dispersion des ratios élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) des humains au regard des autres espèces dans l'apatite de l'émail dentaire (a) et dans l'apatite de l'os (b) et des ratios isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ , $\delta^{15}\text{N}$ , $\delta^{34}\text{S}$ ) dans le collagène osseux (c, d). .....	470
<b>Figure C8. 20 :</b> Distribution des valeurs de sr/Ca et Ba/Ca de différents tissus de mammifères, dont les excréments, enrichis en Sr et Ba en raison de leur élimination préférentielle, au regard de la gamme de valeurs des plantes de différents écosystèmes, d'après les données d'Elias <i>et al</i> , 1982, Burton <i>et al</i> , 1999 et Gilbert <i>et al</i> , 1994. Modifié d'après Balter 2004.....	473
<b>Figure C8. 21 :</b> Distribution des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca de l'émail dentaire des humains par site et par sexe.....	476
<b>Figure C8. 22 :</b> Distribution des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca de l'émail dentaire des humains de Monéteau « Macherin » en fonction des groupes archéologiques.....	478
<b>Figure C8. 23 :</b> Distribution des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca de l'émail dentaire des humains de tous les sites mettant en évidence les individus « atypiques ». .....	479
<b>Figure C8. 24 :</b> Distribution des ratios élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) de l'apatite de l'émail au regard des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ , $\delta^{15}\text{N}$ , $\delta^{34}\text{S}$ ) du collagène dentinaire montrant que ces indicateurs ne sont pas corrélés entre eux. ....	480
<b>Figure C8. 25 :</b> Différences de variabilité intra-profil entre des dents de bovinés (A), de caprinés (B), de suidés (C) et d'humains (D). Les lignes pointillées indiquent la séparation entre les différents profils d'une même dent, successifs mais non jointifs. Les profils d'herbivores pâtureurs (A) sont relativement « plats », hormis quelques variations entre les profils pouvant témoigner de mobilité ou différences de pâturages. Les profils de caprinés (B) peuvent être plats ou plus variables, témoignant peut-être de la différence entre chèvres et moutons, respectivement brouteurs et pâtureurs. Les profils des cochons (C), à l'image de ceux des humains (D) présentent de nettes variations en Sr/Ca et/ou Ba/Ca, de différentes formes et rythmicité, révélant de probables modifications alimentaires et/ou de mobilité.....	484
<b>Figure C8. 26 :</b> Différence de variabilité intra-profil chez les caprinés (A) pouvant témoigner de possibles différences de régime alimentaire entre des moutons, pâtureurs et consommateurs d'herbes, et des chèvres, herbivores brouteurs à la consommation plus variée d'herbacées, feuilles et écorces d'arbres. La ligne pointillée indique la séparation entre plusieurs profils d'une même dent, non jointifs. Un profil est considéré « plat » s'il ne présente pas de pic net de variation ; il peut néanmoins légèrement varier dans le temps de façon continue. (B) Différences entre les moyennes individuelles des deux groupes identifiés précédemment sur la base de la variabilité intra-profil, au regard des valeurs moyennes de bovins, pâtureurs. ....	485
<b>Figure C8. 27 :</b> Courbes de Sr/Ca et Ba/Ca (A) correspondant aux profils d'ablation (B) réalisés à différentes hauteurs d'une première molaire inférieure (M1inf) de capriné (BMT F18) et vue de la dent coupée (C) incluse dans la mandibule (la cire visible sur la photo a permis de maintenir l'échantillon fixe au cours de la découpe). La M1inf des caprinés commence généralement sa formation <i>in utero</i> et la termine autour de 9 mois. Celle-ci n'étant pas coupée à la base du collet mais plus haut (éruption dentaire en cours), le début du profil ne correspond pas au début du collet. D'autre part, les profils ont été réalisés dans la direction opposée du sens de croissance dentaire et les flèches sous les courbes (A) indiquent l'évolution dans le temps en âge approximatif. Les plus fortes valeurs de Ba/Ca (profil de gauche) indiquent possiblement le signal de l'allaitement.....	487
<b>Figure C8. 28 :</b> Courbes de Sr/Ca et Ba/Ca correspondant aux profils d'ablation dans l'émail de différentes dents de bovinés domestiques (A à D) et âge probable (approximatif) correspondant. Les	

lignes pointillées indiquent la séparation entre les différents profils d'une même dent, successifs mais non jointifs, tracés depuis le collet (col) jusqu'à l'extrémité occlusale (ocl ; les profils sont donc à considérer en sens inverse), incluant parfois un profil intermédiaire (m). Le type de dent est indiqué dans l'encadré gris : M1, M2 ou M3 pour première, deuxième ou troisième molaire permanente. Le biberon indique le possible signal de lactation et le point d'interrogation la non compatibilité avec un signal d'allaitement. .... 488

**Figure C8. 29 :** Courbes de Sr/Ca et Ba/Ca (à gauche) correspondant aux profils d'ablation dans l'émail d'une première molaire permanente (M1, à droite) du cochon BMT F44 et âge approximatif correspondant. La dent étant usée jusqu'à la dentine (cf. photographie à droite), l'âge correspondant au début du profil est postérieur à l'âge théorique du début de formation de la couronne. La ligne pointillée (à gauche) indique la séparation entre les deux profils de la même dent, successifs mais non jointifs, tracés depuis l'extrémité occlusale (ocl) au collet (col). La position de la ligne néonatale par rapport à ce profil n'est pas connue. Le biberon indique le possible signal de lactation au début du profil et la diminution de Ba/Ca laisse envisager la période de sevrage. .... 489

**Figure C8. 30 :** Exemples de différents types de variations de Sr/Ca et Ba/Ca dans quelques profils d'émail humain. A : profils « plats » et B : profils « variables ». .... 490

**Figure C8. 31 :** Courbes de variations de Sr/Ca et Ba/Ca dans les profils des humains discutés dans la section II.5.e en fonction de l'âge approximatif correspondant. La mention « dent usée » indique que la présence d'un ilot dentinaire révèle la perte d'émail au niveau de l'apex (photographie à l'appui) : il manque donc le signal du début de la formation de la couronne. Le type de dent concerné est indiqué dans l'encadré gris : M1 ou M2 pour première ou deuxième molaire permanente. .... 491

**Figure C8. 32 :** (A) Courbes de variations du Ba/Ca (valeurs en logarithmes et inversées) et moyenne mobile de période 10 dans les profils des humains. Les échelles ne sont pas identiques pour tous les profils afin d'accentuer les variations observées. (B) Différence moyenne en Ba/Ca entre les quarante premiers et les quarante derniers points du profil des individus représentés à gauche (A) pour lesquels une variation significative a été enregistrée au cours du temps – relativement aux valeurs moyennes de l'ensemble des individus (points gris). Les flèches rouges indiquent le sens de la variation entre le début et la fin du profil illustrant la diminution du Ba/Ca (valeurs inversées sur le graphique) correspondant au possible sevrage de ces individus. .... 492

**Figure C8. 33 :** (A) Micrographie ( $\times 10$ ) de la canine inférieure permanente de l'Australopithèque StS 51B. (B) Cartographie élémentaire associée de  ${}^7\text{Li}/{}^{43}\text{Ca}$  et (C)  ${}^{138}\text{Ba}/{}^{43}\text{Ca}$ . Les canines permanentes commencent leur développement seulement quelques mois après la naissance et la formation de la couronne s'achève entre 3 et 4 ans. (D) Comparaison de la périodicité temporelle de Ba/Ca (ligne noire et losanges) et Li/Ca (ligne rouge et Xs) accentuée des lignes 1, 2, 3 et 4, le long du transect (A). La récurrence Li/Ca montre un léger décalage temporel par rapport à la périodicité Ba/Ca. D'après Joannes-Boyau *et al*, 2019. .... 492

**Figure C9. 1 :** Réalisation d'une empreinte de la surface occlusale d'une seconde molaire permanente avec un élastomère polyvinyle Coltène©. Photographie L. Rey. .... 494

**Figure C9. 2 :** Identification des facettes d'usure. D'après Fiorenza *et al*, 2011. .... 495

**Figure C9. 3 :** Surfaces hypothétiques schématiques de micro-usure montrant une texture a. anisotrope, b. complexe, c. hétérogène et d. homogène. D'après Scott *et al*, 2005, 2006. .... 497

**Figure C9. 4 :** Diagramme de Schmidt et collaborateurs (2019) représentant les valeurs moyennes de complexité (A ; Asfc) et d'anisotropie (B ; epLsar) pour différentes populations de chasseurs-cueilleurs (gris), d'agriculteurs (blanc) et d'éleveurs (beige). La plupart des groupes de chasseurs-

cueilleurs ont des valeurs de complexité élevées et des valeurs d'anisotropie faibles, alors que les agriculteurs et les éleveurs ont des valeurs de complexité plus faibles et d'anisotropie plus élevées. Certains groupes d'agriculteurs ont toutefois des valeurs de complexité élevées..... 498

**Figure C9. 5 :** Répartition des valeurs moyennes de complexité et d'anisotropie entre les populations de chasseurs-cueilleurs, d'agriculteurs et d'éleveurs d'après les données répertoriées par Schmidt *et al*, 2019 (table 2). Les barres d'erreurs représentent l'écart-type autour de la moyenne. Si des tendances sont observables, il est clair que les données se recourent. .... 498

**Figure C9. 6 :** (A) Représentation graphique des données d'anisotropie (epLsar) et de complexité (Asfc) des micro-usures dentaires mesurées à partir des empreintes occlusales des dents analysées dans ce travail. (B) Représentation par microscopie confocale d'une surface plus anisotrope relativement à (C) une surface plus complexe. Ces deux types d'usures sont caractérisées par deux groupes distincts sur le graphique A. .... 501

**Figure C9. 7 :** (a) Boîtes à moustaches représentant la médiane et la dispersion (premier et troisième quartile ; minimum et maximum) des valeurs de complexité (Asfc) et d'anisotropie (epLsar) des hommes et des femmes tous sites confondus et (b) répartition des valeurs de complexité et d'anisotropie entre les sexes pour chaque site. La valeur p du test de Kruskal-Wallis donnée sous les boîtes à moustaches indique qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les sexes (a). .... 505

**Figure C9. 8 :** Comparaison des résultats de la DMTA des sujets de la vallée de l'Yonne (microrégion) avec les individus Cerny des sites de Balloy « Les Réaudins » (BAL), Vignely « La Noue Fénard » (VNF) et Vignely « La Porte aux Bergers » (VPB). Les croix représentent trois individus de comparaison post-Cerny (VPB-PC). Données Cerny issues du mémoire de Master 2 de P. Syrikova (2020). .... 506

**Figure C9. 9 :** Déroulé des haches retrouvées dans les sépultures GLN 302 (A) et GLN 257 (B) de la nécropole de Gurgy « Les Noisats ». Photographie et DAO : L. Rey. .... 509

**Figure C9. 10 :** Résultats de la spectroscopie Raman des haches retrouvées dans les sépultures GLN 302 (A) et GLN 257 (B) de la nécropole de Gurgy « Les Noisats ». Analyses A. Queffelec. .... 510

**Figure C9. 11 :** Comparaison des valeurs isotopiques et élémentaires des individus inhumés avec des haches relativement à l'ensemble de la population de Gurgy « Les Noisats » (A à C) et de Monéteau « Macherin » (D). .... 513

**Figure C9. 12 :** Vase de la sépulture GLN 249. Photographie L. Rey. .... 516

**Figure C9. 13 :** Position relative de la signature isotopique de l'individu GLN 249 inhumé avec le vase par rapport à l'ensemble de la population de Gurgy « Les Noisats ». .... 520

**Figure C10. 1 :** Récapitulatif de la distribution des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  du collagène global ; a et b ; et  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$  ; c) et élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca ; d et e) dans l'os (a, b, c, e) et dans l'émail dentaire (d) des individus humains et animaux de Gurgy « Les Noisats » (en noir) par rapport à l'ensemble du corpus analysé (en gris). Les lignes pointillées (c) indiquent les niveaux trophiques terrestres (gris foncé, du bas vers le haut :  $\text{TP}_{\text{ter}} = 1, 2$  et 3) et aquatiques (gris clair, du bas vers le haut :  $\text{TP}_{\text{aqua}} = 1$  et 2) théoriques. f) Distribution des valeurs d'anisotropie et de complexité texturale de la micro-usure dentaire des humains de Gurgy (en noir) par rapport aux autres sites (en gris). Sur cette figure ne sont pas représentées les données isotopiques de la dentine. .... 524

- Figure C10. 2 :** Distribution des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) du collagène osseux des sujets de Gurgy « Les Noisats » en fonction du sexe anatomique et génétique. « >15 » indique les sujets de plus de 15 ans ; « imm » les sujets immatures de moins de 15 ans ; « n » l'effectif de chaque catégorie. . 529
- Figure C10. 3 :** Répartition des valeurs isotopiques du carbone et de l'azote dans l'os (et dans la dentine, encadrés gris) selon plusieurs paramètres funéraires comme le type de structure, la position et l'orientation des défunts et le mobilier associé. Certaines positions atypiques du corps semblent associées à des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  spécifiques, comme la position fléchie sur le côté droit ou sur le ventre (faible  $\delta^{15}\text{N}$ ) ou les membres supérieurs étendus et les membres inférieurs légèrement fléchis ( $\delta^{15}\text{N}$  élevé). Toutefois, le faible effectif et le résultat statistique (suite page suivante)..... 533
- Figure C10. 4 :** Distribution des valeurs isotopiques du carbone et de l'azote dans l'os des individus inhumés avec du mobilier « remarquable » par sa provenance, sa quantité ou son aspect inédit dans la nécropole. F : sujets féminins de plus de 15 ans, M : sujets masculins de plus de 15 ans, Fi : sujets féminins immatures (<15 ans). ..... 536
- Figure C10. 5 :** Plan de répartition spatiale des sépultures en fonction des valeurs isotopiques de l'azote et selon l'âge, le sexe et le type de tombe des sujets de Gurgy « Les Noisats ». Les ellipses représentent les clusters identifiés sur la base des regroupements de tombes et de la proximité en  $\delta^{15}\text{N}$  nommés de A à K. .... 538
- Figure C10. 6 :** Plan de répartition spatiale des sépultures en fonction des valeurs isotopiques du carbone, selon l'âge, le sexe et le type de tombe des sujets de Gurgy « Les Noisats ». Les ellipses représentent les clusters identifiés précédemment (Figure C10. 5) sur la base des regroupements de tombes et de la proximité en  $\delta^{15}\text{N}$  nommés de A à K..... 540
- Figure C10. 7 :** Plan de répartition spatiale des sépultures en fonction des valeurs isotopiques du soufre, selon l'âge, le sexe et le type de tombe des sujets de Gurgy « Les Noisats ». Les ellipses représentent les clusters identifiés précédemment (Figure C10. 5) sur la base des regroupements de tombes et de la proximité en  $\delta^{15}\text{N}$  nommés de A à K..... 541
- Figure C10. 8 :** Dendrogramme illustrant les rapprochements proposés sur la base de la microstructure dentaire (issu d'une analyse de groupe basée sur les proportions de tissus dentaires en 3D ; les valeurs Bootstrap sont indiquées sur les nœuds ; d'après Le Luyer *et al*, 2016) et dégradés de couleurs illustrant la variabilité des valeurs biochimiques correspondantes. Les couleurs les plus foncées correspondent aux valeurs les plus élevées pour les rapports isotopiques et inversement pour les éléments traces. Les sujets de moins de 15 ans sont marqués d'une étoile bleue. .... 543
- Figure C10. 9 :** Plan de répartition spatiale des sépultures des individus partageant des proportions similaires de leurs tissus dentaires (d'après Le Luyer *et al*, 2016) et des valeurs isotopiques ( $\delta^{15}\text{N}$ ) proches. Les ellipses pointillées rouges caractérisent les deux ensembles identifiés, correspondant également aux deux familles génétiques (Rivollat *et al*, 2021a). ..... 544
- Figure C10. 10 :** Récapitulatif de la distribution des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  du collagène osseux global ; a et b), des valeurs d'anisotropie et de complexité texturale de la micro-usure dentaire (c) et des valeurs élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) dans l'émail dentaire (d) et dans l'os (e) des individus humains de Monéteau « Macherin », pour chaque groupe de sépultures, par rapport à l'ensemble du corpus analysé (en gris). ..... 547
- Figure C10. 11 :** Distribution des valeurs isotopiques du carbone, de l'azote et du soufre du collagène osseux des individus du groupe B de Monéteau « Macherin » par classe biologique (sexe et âge au décès)..... 549

**Figure C10. 12 :** Distribution des valeurs isotopiques du carbone, de l'azote et du soufre du collagène osseux des individus de Monéteau « Macherin » en fonction de l'âge au décès des immatures (moins de 15 ans) et des jeunes adultes (15-19 ans) comparativement aux adultes (plus de 15 ans)..... 550

**Figure C10. 13 :** Distribution des valeurs isotopiques du carbone, de l'azote et du soufre du collagène osseux des individus de Monéteau (groupes A et C) en fonction du sexe. F, M et Indet : sexe féminin, masculin et indéterminé, respectivement, des sujets de plus de 15 ans ; imm : sujets immatures de moins de 15 ans ; \* sujets pour lesquels l'état de conservation du squelette n'a pas permis de déterminer le sexe à plus de 95% de probabilité. .... 551

**Figure C10. 14 :** Répartition des valeurs isotopiques de l'os et des valeurs élémentaires de l'émail des humains de Monéteau « Macherin » par groupe en fonction de la datation..... 553

**Figure C10. 15 :** Répartition des valeurs isotopiques du carbone et de l'azote dans l'os des humains de Monéteau « Macherin », pour chaque groupe, en fonction de plusieurs paramètres funéraires comme le type de structure (et en particulier les probables coffres par rapport au reste des dispositifs, comptant peut-être d'autres coffres non identifiés), la position et l'orientation des défunts et le mobilier associé, à savoir ici le mobilier « remarquable » par sa composition (quantité d'objets, parure, outil spécifique) ou sa provenance (coquille marine, roche alpine). D : droite, G : gauche, SE : sud-est, S : sud, E : est, SO : sud-ouest, O : ouest. .... 555

**Figure C10. 16 :** Plan de répartition spatial des sépultures de Monéteau « Macherin » en fonction des valeurs isotopiques du carbone (a), de l'azote (b) et du soufre (c) dans l'os et selon le groupe, l'âge, le sexe et le type de tombe des sujets. d) Histogrammes de calibration des dates indiquant (en rouge) les individus en coffre (sauf 99-521 ?) partageant des valeurs isotopiques proches (réalisé avec le logiciel libre Oxcal 4.0.5© Bronk Ramsey, 2007). Modifié d'après Augereau et Chambon, 2011..... 560

**Figure C10. 17 :** Plan de répartition spatial des sépultures de Monéteau « Macherin » en fonction des valeurs isotopiques du carbone (a), de l'azote (b) et des variations anatomiques, selon le groupe, l'âge, le sexe et le type de tombe des sujets. Pastilles bleu clair « IP » : incisives « en pelle », pastilles vertes « tC » : tubercule de Carabelli, pastilles roses « sm » : suture métopique, pastilles violettes « PoP » : perforations olécrâniennes et patellas *emarginata*. .... 563

**Figure C10. 18 :** Plan de répartition spatial des sépultures du groupe C de Monéteau « Macherin » en fonction des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  osseux) et des rapprochements par typologie funéraire. .... 567

**Figure C10. 19 :** (a) Distribution des valeurs isotopiques du collagène osseux ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) des sujets de Chichery « Sur les Pâturaux ». (b) Distribution des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) du collagène dentinaire (ronds) au regard du collagène osseux (carrés) des sujets de Chichery « Sur les Pâturaux » indiquant la diminution du  $\delta^{15}\text{N}$  avec l'âge et la variation en  $\delta^{34}\text{S}$  entre l'enfance et l'âge adulte de l'individu féminin. (c) Distribution des valeurs élémentaires (Ba/Ca et Sr/Ca) dans l'apatite de l'émail (ronds) et de l'os (carré) des individus de Chichery « Sur les Pâturaux » au regard de la variabilité globale du corpus de l'Yonne représentée par les ellipses de confiance à 95% (grisées) pour l'émail et l'os respectivement. Les valeurs de l'émail et de l'os ne sont pas directement comparables et la différence n'est pas représentative des éventuelles modifications au cours de la vie. (d) Distribution des données d'anisotropie (epLsar) et de complexité (Asfc) des micro-usures dentaires des individus de Chi-Pat (en vert) relativement à la variabilité des autres sites de la microrégion et à la variabilité des autres sites Cerny du Bassin parisien (en gris, d'après les données de P. Syrikova 2020). .... 572

**Figure C10. 20 :** Courbe de variation des ratios Sr/Ca et Ba/Ca le long du profil d'ablation laser dans l'émail de la deuxième molaire supérieure gauche de l'individu CHI-Pat 4. Le pic de Sr/Ca pourrait

correspondre à un épisode de stress identifié par une hypoplasie de l'émail dans le tiers moyen de la couronne observée sur plusieurs M2. .... 573

**Figure C10. 21** : Plan de répartition des sépultures de Chichery « Sur les Pâtureaux » en fonction de la signature isotopique ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) du collagène osseux et des principales caractéristiques biologiques (âge-au-décès, sexe, variations anatomiques rares et partagées entre quelques individus) et funéraires (dépôt mobilier). .... 575

**Figure C10. 22** : (a) Distribution des valeurs moyennes de Sr/Ca et Ba/Ca de l'émail dentaire des différentes espèces de Beaumont « Le Crot aux Moines » au regard de la variabilité des autres sites de la microrégion (en gris) et (b) courbes de variations des ratios Sr/Ca et Ba/Ca dans les profils de l'émail des humains. .... 589

**Figure C10. 23** : Récapitulatif de la distribution des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  du collagène osseux global ; a et b) et des valeurs élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) dans l'émail dentaire (d) et dans l'os (e) des échantillons humains et animaux de Gurgy « Le Nouzeau » par rapport à l'ensemble du corpus analysé (en gris). .... 612

**Figure C10. 24** : Courbe de variation des ratios Sr/Ca et Ba/Ca dans les profils d'ablation laser de l'émail de la deuxième molaire (M2) des humains de Gurgy « Le Nouzeau » en fonction de l'âge. . 613

**Figure C11. 1** : Synthèse sélective des principaux résultats permettant d'aborder la question de l'alimentation des humains de l'ensemble du corpus : graphiques de dispersion des valeurs isotopiques de  $\delta^{13}\text{C}$  vs  $\delta^{15}\text{N}$  (a) et  $\delta^{34}\text{S}$  vs  $\delta^{15}\text{N}$  (b) du collagène osseux global, de  $\delta^{15}\text{N}$  des acides aminés Glu et Phe du collagène osseux (c) et des ratios élémentaires Sr/Ca et Ba/Ca de l'os (d) et de l'émail dentaire (e) des humains et de la faune associée de tous les sites étudiés dans ce travail. Les estimations des valeurs de plantes et de poisson proposées sont réalisées à partir des données de la littérature (cf. encadré). Les valeurs des humains du site mésolithique de Noyen-sur-Seine (Seine-et-Marne) ayant consommé du poisson sont indiqués à titre comparatif (c ; Naito *et al.* 2013a). Les ellipses grises représentent la dispersion des valeurs des humains et la dispersion théorique relative de leur alimentation moyenne, un niveau trophique en-dessous. Cette information n'est pas disponible pour les éléments traces dans l'émail (e) puisque l'OR n'est pas connu (cf. Chap2.VI.1). Les résultats présentés ici (e) montrent néanmoins l'écart enregistré entre les différentes ressources de niveau trophique croissant des herbivores aux humains en passant par le porc, de niveau intermédiaire. .... 615



## Table des tableaux

<b>Tableau C2. 1</b> : Abondances relatives des isotopes naturels des différents éléments utilisés dans ce travail. En grisé les isotopes n'intervenant pas dans notre étude. Les abondances sont données d'après l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC ; Rossman et Taylor, 1998). .....	85
<b>Tableau C2. 2</b> : Taux de remodelage osseux en fonction de l'âge. D'après Valentin 2002.....	92
<b>Tableau C2. 3</b> : Composition en acides aminées du collagène des mammifères. Sur les 21 AA, le collagène ne contient pas de cystéine, sélénocystéine ni tryptophane. (e) = AA essentiel. *l'hydroxyproline et l'hydroxylysine sont les formes hydrolysées de la proline et de la lysine, de même que l'acide glutamique et l'acide aspartique sont les formes hydrolysées de la glutamine (Gln) et de l'asparagine (Asn), non présentées dans ce tableau. D'après Ambrose 1993, Bocherens <i>et al</i> , 2011 et Eastoe 1955. ....	101
<b>Tableau C2. 4</b> : Valeurs d'OR <sub>Sr</sub> entre l'alimentation et l'os de plusieurs mammifères sains juvéniles et adultes d'après les données de Sillen et Kavanagh 1982 et Sillen et Smith 1984. ....	154
<b>Tableau C3. 1</b> : Représentation des classes d'âges (en années) déterminées pour l'étude par groupe des individus. Les cellules grisées correspondent aux classes d'âge non représentées dans cette étude. Dans la classe des [1-9 ans], les sujets de moins de 2 ans ont été exclus. *Les adultes englobent ici les individus de plus de 15 ans d'après un choix arbitraire basé sur l'observation des pratiques funéraires, contrairement à la définition de l'âge biologique (>20 ans ; cf. I.I.c). ....	192
<b>Tableau C3. 2</b> : Méthodes d'estimation de l'âge au décès utilisées dans ce corpus sur la base de différents critères. ....	192
<b>Tableau C3. 3</b> : Liste des individus humains de Gurgy "Les Noisats" sélectionnés dans ce travail et os et dents échantillonnées. *la dent a été scannée. Le sexe est noté M (masculin), F (féminin) et I (indéterminé) pour les adultes, noté "-" pour les immatures de moins de 15 ans, et "?" pour les individus d'âge indéterminé ou à cheval entre l'enfance et l'âge adulte.....	211
<b>Tableau C3. 4</b> : Tableau de synthèse des principales caractéristiques dentaires des échantillons de Gurgy « Les Noisats » analysés dans ce travail. <sup>1</sup> d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Bocquentin 2003 et Brothwell 1965), <sup>2</sup> d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Smith 1984) et M. Le Luyer (2016 ; d'après Molnar 1971 et Smith 1984). ....	213
<b>Tableau C3. 5</b> : Liste des animaux de Gurgy "Les Noisats" sélectionnés dans ce travail et os et dents échantillonnées. ....	215
<b>Tableau C3. 6</b> : Tableau de synthèse de l'échantillonnage des sujets humains et animaux de Gurgy "Les Noisats" par rapport à l'effectif total sur le site. NR = non renseigné.....	216
<b>Tableau C3. 7</b> : Liste des individus de Monéteau "Macherin" sélectionnés dans ce travail et os et dents échantillonnées. Le sexe est noté M (masculin), F (féminin) et I (indéterminé) pour les adultes, noté "-" pour les immatures de moins de 15 ans, et "?" pour les individus d'âge indéterminé ou à cheval entre l'enfance et l'âge adulte. Une * indique les déterminations du sexe ou estimations de l'âge incertaines d'après les critères méthodologiques retenus dans cette thèse (voir Annexe A7). ....	241
<b>Tableau C3. 8</b> : Tableau de synthèse des principales caractéristiques dentaires des échantillons de Monéteau « Macherin » analysés dans ce travail. <sup>1</sup> d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Bocquentin 2003 et Brothwell 1965), <sup>2</sup> d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Smith 1984) et M. Le Luyer (2016 ; d'après Molnar 1971 et Smith 1984). ....	242

## Table des tableaux

---

<b>Tableau C3. 9</b> : Tableau de synthèse de l'échantillonnage des sujets humains de Monéteau "Macherin" par rapport à l'effectif total sur le site et pour chaque groupe séparément. ....	243
<b>Tableau C3. 10</b> : Liste des individus de Chichery "Sur les Pâtureaux" sélectionnés dans ce travail et os et dents échantillonnées. Le sexe est noté M (masculin), F (féminin) et I (indéterminé) pour les adultes, noté "-" pour les immatures de moins de 15 ans, et "?" pour les individus d'âge indéterminé ou à cheval entre l'enfance et l'âge adulte.....	253
<b>Tableau C3. 11</b> : Tableau de synthèse des principales caractéristiques dentaires des échantillons de Chichery « Sur les Pâtureaux » analysés dans ce travail. <sup>1</sup> d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Bocquentin 2003 et Brothwell 1965), <sup>2</sup> d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Smith 1984) et M. Le Luyer (2016 ; d'après Molnar 1971 et Smith 1984)...	253
<b>Tableau C3. 12</b> : Tableau de synthèse de l'échantillonnage des sujets humains de Chichery "Sur les Pâtureaux" par rapport à l'effectif total.....	254
<b>Tableau C3. 13</b> : Nombre d'individus sélectionnés par espèce et par secteur du site de Beaumont "Le Crot aux Moines". ....	266
<b>Tableau C3. 14</b> : Liste des échantillons humains de Beaumont "Le Crot aux Moines" sélectionnés dans ce travail.....	267
<b>Tableau C3. 15</b> : Tableau de synthèse des principales caractéristiques dentaires des échantillons de Beaumont « Le Crot aux Moines » analysés dans ce travail. <sup>1</sup> d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Bocquentin 2003 et Brothwell 1965), <sup>2</sup> d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Smith 1984) et M. Le Luyer (2016 ; d'après Molnar 1971 et Smith 1984)...	268
<b>Tableau C3. 16</b> : Liste des échantillons animaux de Beaumont "Le Crot aux Moines" sélectionnés dans ce travail.....	269
<b>Tableau C3. 17</b> : Tableau de synthèse de l'échantillonnage des sujets humains et animaux de Beaumont "Le Crot aux Moines". Le nombre total d'individus pour l'ensemble des structures est "non renseigné" (NR).....	270
<b>Tableau C3. 18</b> : Liste des individus de Bonnard "Le Poirier" sélectionnés dans ce travail et os et dents échantillonnées.....	278
<b>Tableau C3. 19</b> : Tableau de synthèse des principales caractéristiques dentaires des échantillons de Bonnard « Le Poirier » analysés dans ce travail. <sup>1</sup> d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Bocquentin 2003 et Brothwell 1965), <sup>2</sup> d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Smith 1984) et M. Le Luyer (2016 ; d'après Molnar 1971 et Smith 1984).....	278
<b>Tableau C3. 20</b> : Liste des individus de Chichery "L'Étang-David" sélectionnés dans ce travail et os et dents échantillonnées.....	283
<b>Tableau C3. 21</b> : Tableau de synthèse des principales caractéristiques dentaires des échantillons de Chichery « L'Étang-David » analysés dans ce travail. <sup>1</sup> d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Bocquentin 2003 et Brothwell 1965), <sup>2</sup> d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Smith 1984) et M. Le Luyer (2016 ; d'après Molnar 1971 et Smith 1984). ....	283
<b>Tableau C3. 22</b> : Datations radiocarbone des échantillons des différentes structures de Gurgy « Le Nouveau » (Meunier 2007).....	290
<b>Tableau C3. 23</b> : Échantillons humains de Gurgy "Le Nouveau" sélectionnés dans ce travail. M = sexe masculin. ....	292

<b>Tableau C3. 24 :</b> Tableau de synthèse des principales caractéristiques dentaires des échantillons de Gurgy « Le Nouzeau » analysés dans ce travail. <sup>1</sup> d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Bocquentin 2003 et Brothwell 1965), <sup>2</sup> d'après la méthodologie suivie par A. Thomas (2011 ; d'après Smith 1984) et M. Le Luyer (2016 ; d'après Molnar 1971 et Smith 1984).....	292
<b>Tableau C3. 25 :</b> Liste des échantillons animaux de Gurgy "Le Nouzeau" sélectionnés dans ce travail. chev. oss. = cheville osseuse. NR = non renseigné. ....	293
<b>Tableau C3. 26 :</b> Synthèse des valeurs de <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr des échantillons de sol et de plantes de la région dans un rayon de 100 km autour des sites, par couches géologiques, d'après la base de données iRhum (Willmes et al, 2013). Les altitudes et les distances par rapport aux sites étudiés varient (de 91 à 627m et de c.40 à 110 km respectivement). MC = Massif central, PB = Bassin parisien, SF = Formations superficielles, Pennsylv. = Pennsylvanien, *hors du rayon de 100 km. ....	300
<b>Tableau C4. 1 :</b> Liste des éléments et isotopes relatifs mesurés par LA-Q-ICPMS. Les éléments en gras sont ceux discutés dans ce travail. ....	310
<b>Tableau C4. 2 :</b> Synthèse des analyses réalisées dans ce travail sur les humains et les animaux, par type d'échantillonnage et par indicateur.....	315
<b>Tableau C5. 1 :</b> Informations relatives aux datations radiocarbone réalisées antérieurement dans différents contextes et critères de conservation du collagène obtenus dans cette étude. D'après les publications et rapports d'opération relatifs aux sites archéologiques. Toutes les datations préparées à Lyon sont disponibles sur la base de données accessible en ligne Banadora (BANque NATIONALE de DONnées RADIocarbone pour l'Europe et le Proche Orient).....	373
<b>Tableau C8. 1 :</b> Tableau de comparaison des nouveaux résultats Sr par rapport aux précédentes valeurs mesurée dans le cadre de ce travail pour 7 échantillons d'email humain. ....	438
<b>Tableau C8. 2 :</b> Synthèse par espèce et par site des concentrations élémentaires moyennes ( <sup>43</sup> Ca et <sup>88</sup> Sr) et des ratios Mg/Ca, Mn/Ca et U/Ca mesurés dans l'os. Les valeurs en rouges sont supérieures à la moyenne, celles en bleu sont inférieures à la moyenne. Les ratios biogéniques Sr/Ca et Ba/Ca sont indiqué à titre comparatif. ....	452
<b>Tableau C8. 3 :</b> Synthèse par espèce et par site des concentrations élémentaires moyennes ( <sup>43</sup> Ca et <sup>88</sup> Sr) et des ratios Mg/Ca, Mn/Ca et U/Ca mesurés dans l'email. Les valeurs en rouges sont supérieures à la moyenne, celles en bleu sont inférieures à la moyenne. Les ratios biogéniques Sr/Ca et Ba/Ca sont indiqué à titre comparatif. ....	455
<b>Tableau C8. 4 :</b> Synthèse des résultats élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) moyens par espèce et par site. SD : écart-types, TOT herbiv : total des herbivores domestiques (vaches, moutons, chèvres), TOT dom : total des animaux domestiques (herbivores et cochons). ....	457
<b>Tableau C8. 5 :</b> Synthèse des résultats élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) moyens des humains par site et par catégorie d'âge et de sexe. SD : écart-types, M : sexe masculin, F : sexe féminin, I : sexe indéterminé, indet : âge et sexe indéterminés, TOT = total. Les chiffres entre parenthèses indiquent l'effectif total d'individus analysés pour chaque site. ....	470
<b>Tableau C8. 6 :</b> Matrice de corrélation de Spearman montrant que les valeurs isotopiques du C, N et S de la dentine et les ratios élémentaires Sr/Ca et Ba/Ca de l'email ne sont pas corrélés entre eux. Les corrélations significatives (p<0,05 en rouge) concernent $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ entre eux d'une part et Sr/Ca et Ba/Ca entre eux d'autre part.....	475
<b>Tableau C8. 7 :</b> Récapitulatif des dents analysées et âges approximatifs correspondants à la période de formation de l'email pour chaque individu. ....	477

<b>Tableau C9. 1 :</b> Résultats de l'analyse texturale des micro-usures dentaires menées sur 20 sujets humains en collaboration avec A. Souron et M. Le Luyer. Les paramètres fractals observés (la complexité $Asfc$ et l'anisotropie $epLsar$ ) sont décrits dans le texte. ....	498
<b>Tableau C10. 1 :</b> Table de comparaison statistique de la signature biochimique des défunts en fonction des principales caractéristiques funéraires. Les variables biochimiques sont considérées (dès lorsque l'effectif le permet) indépendamment les unes des autres ( $\delta^{13}C$ , $\delta^{15}N$ , $\delta^{34}S$ , $\delta^{15}N_{AA}$ , Sr/Ca et Ba/Ca dans l'os et la dent). Une différence significative est observée pour $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ dans la dentine pour l'orientation de la tête et la présence ou non de céramique mais relève probablement d'un biais d'échantillonnage. ....	528
<b>Tableau C10. 2 :</b> Tableau de comparaison des sépultures de même typologie entre Monéteau et les sites voisins de Bonnard (en orange) et Chichery « Sur les Pâturaux » (en vert foncé pour les hommes, vert clair pour les immatures). ....	555
<b>Tableau C10. 3 :</b> Résultats isotopiques et élémentaires des individus de Monéteau « Macherin » discutés dans le cadre de l'étude des regroupements sur la base des variations anatomiques (VA). IP : incisives « en pelle », tC : tubercule de Carabelli, PoP : perforations olécrâniennes et patellas <i>emerginata</i> , sm : suture métopique. ....	563
<b>Tableau C10. 4 :</b> Tableau de comparaison des valeurs isotopiques de l'os par paires de sépultures proposées sur la base de la typologie funéraire, d'après Augereau et Chambon, 2011. NO = non observable. ....	565

## Table des annexes

### Annexes A : documents complémentaires au manuscrit

<b>Annexe A1</b> : Tableau récapitulatif des valeurs isotopiques de l'azote dans les AA Glu et Phe de plantes modernes issues d'une revue de la littérature. La dispersion des valeurs est représentée sur la Figure C2. 22.....	716
<b>Annexe A2</b> : Synthèse des données biologiques et archéologiques disponibles pour l'ensemble des individus et structures retrouvées à Gurgy "Les Noisats". .....	720
<b>Annexe A3</b> : Histogramme de calibration des dates radiocarbone des sépultures de Gurgy « Les Noisats » réalisées avec le logiciel libre Oxcal 4.4© Bronk Ramsey, 2021 ( <a href="https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal/">https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal/</a> ) d'après la courbe de calibration IntCal20 (Reimer <i>et al.</i> 2020).....	727
<b>Annexe A4</b> : Cotation des caractères dentaires morphologiques et métriques enregistrés sur les dents prélevées à Gurgy « Les Noisats » pour les analyses biochimiques. ....	728
<b>Annexe A5</b> : Liste des échantillons pour lesquels une empreinte de la surface occlusale a été réalisée et dent concernée. ....	732
<b>Annexe A6</b> : Liste des échantillons de tartre prélevés en prévision d'analyses ultérieures. ....	733
<b>Annexe A7</b> : Synthèse des données biologiques et archéologiques disponibles pour l'ensemble des individus et structures néolithiques retrouvées à Monéteau « Macherin ». ....	734
<b>Annexe A8</b> : Cotation des caractères dentaires morphologiques et métriques enregistrés sur les dents prélevées à Monéteau « Macherin » pour les analyses biochimiques. ....	738
<b>Annexe A9</b> : Synthèse des données biologiques et archéologiques disponibles pour l'ensemble des individus et structures de Chichery "Sur les Pâturaux". ....	740
<b>Annexe A10</b> : Cotation des caractères dentaires morphologiques et métriques enregistrés sur les dents prélevées à Chichery « Sur les Pâturaux » pour les analyses biochimiques. ....	742
<b>Annexe A11</b> : Synthèse des données biologiques et archéologiques disponibles pour l'ensemble des individus humains et animaux de Beaumont « Le Crot aux Moines » sélectionnés dans cette étude (les humains sont tous de sexe indéterminé). ....	744
<b>Annexe A12</b> : Cotation des caractères dentaires morphologiques et métriques enregistrés sur les dents prélevées à Beaumont « Le Crot aux Moines », Bonnard « Le Poirier », Chichery « L'Étang David » et Gurgy « Le Nouzeau » pour les analyses biochimiques.....	746
<b>Annexe A13</b> : Synthèse des données biologiques et archéologiques disponibles pour l'ensemble des individus humains de Bonnard « Le Poirier ». ....	748
<b>Annexe A14</b> : Synthèse des données biologiques et archéologiques disponibles pour l'ensemble des individus humains de Chichery « l'Étang David ». ....	750

<b>Annexe A15</b> : Synthèse des données biologiques et archéologiques disponibles pour l'ensemble des individus humains et animaux de Gurgy « Le Nouzeau » sélectionnés dans cette étude. NR = non renseigné.....	752
<b>Annexe A16</b> : Légende de la carte de France géologique par couches stratigraphiques et âges correspondants. D'après Géoportail.....	753
<b>Annexe A17</b> : Rapport d'analyse du laboratoire IsoAnalytical pour la session d'analyse du 7 mars 2013 : valeurs isotopiques du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) et de l'azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ) du collagène osseux (échantillons calibrés et standards).....	754
<b>Annexe A18</b> : Rapport d'analyse du laboratoire de l'UCT pour la session d'analyse de 2015 : valeurs isotopiques du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) et de l'azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ) du collagène osseux (échantillons non calibrés, calibrés et standards).....	756
<b>Annexe A19</b> : Rapport d'analyse du laboratoire IsoAnalytical pour la session d'analyse du 9 mai 2016 : valeurs isotopiques du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ), de l'azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ) et du soufre ( $\delta^{34}\text{S}$ ) du collagène osseux (échantillons calibrés et standards).....	762
<b>Annexe A20</b> : Rapport d'analyse du laboratoire IsoAnalytical pour la session d'analyse du 19 mai 2016 (1 seul échantillon pour notre corpus : CHI-Pat 1) : valeurs isotopiques du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ), de l'azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ) et du soufre ( $\delta^{34}\text{S}$ ) du collagène osseux (échantillon calibré et standards).....	766
<b>Annexe A21</b> : Rapport d'analyse du laboratoire IsoAnalytical pour la session d'analyse du 13 février 2017 : valeurs isotopiques du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ), de l'azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ) et du soufre ( $\delta^{34}\text{S}$ ) du collagène dentinaire (échantillons calibrés et standards).....	768
<b>Annexe A22</b> : Calcul de l'incertitude analytique effectué à l'aide du calculateur de Szpak <i>et al.</i> 2017 pour chaque session d'analyse et chaque proxy.....	770
<b>Annexe A23</b> : Tracés des profils réalisés sur chaque échantillon humain d'émail et d'os pour l'ablation laser, d'après photographie des moulages. Photographies et DAO : L. Rey. Également disponible en version numérique (Annexe N2_Profiles_pictures).....	783
<b>Annexe A24</b> : Tracés des profils réalisés sur chaque échantillon animal d'émail et d'os pour l'ablation laser, d'après photographie des moulages. Photographies et DAO : L. Rey. Également disponible en version numérique (Annexe N2_Profiles_pictures).....	794
<b>Annexe A25</b> : Résumé de l'ensemble des profils, pour chaque individu, réalisés dans l'os et la dent pour la mesure des isotopes du Sr et des éléments traces.....	800
<b>Annexe A26</b> : Conditions instrumentales pour les mesures de Sr isotopique et d'éléments trace par ablation laser (LA-MC-ICPMS et LA-Q-ICPMS respectivement).....	803
<b>Annexe A27</b> : Scripts (Python) de traitement et correction des données brutes de Sr isotopiques et d'éléments trace réalisé par T. Tacail (comm. pers.). a : application du filtre des valeurs extrêmes, b : traitement des données strontium, c : traitement des éléments traces. Également disponible en version numérique (Annexe N4_script_process).....	804
<b>Annexe A28</b> : Scripts (R) d'extraction des données corrigées de Sr isotopiques (a) et d'éléments traces (b) pour la création de fichiers (.csv) uniques (tous profils regroupés : « fichier_global_Sr_Num » et	

« fichier\_global\_TE\_Num ») contenant les variables d'intérêt uniquement, réalisé par F. Santos (comm. pers.). Également disponible en version numérique (Annexe N4\_script\_extraction)..... 823

**Annexe A29** : Script (R) permettant de générer un seul fichier (.csv) comprenant l'ensemble des valeurs moyennes propres (après nettoyage de la diagénèse) par individu, réalisé par F. Santos (comm. pers.). Également disponible en version numérique (Annexe N4\_script\_gener\_moyIndiv)..... 825

**Annexe A30** : Scripts (R) permettant de tracer les courbes des profils pour chaque variable et chaque individu, réalisé par F. Santos (comm. pers.). Également disponible en version numérique (Annexe N4\_script\_gph\_profils). ..... 827

**Annexe A31** : Script (R) permettant de mesurer les corrélations entre les différentes variables pour chaque profil, réalisé par F. Santos (comm. pers.). Également disponible en version numérique (Annexe N4\_script\_correl)..... 830

**Annexe A32** : Valeurs moyennes (mean), écart-types (SD) et coefficient de variation (coef var.) du Sr isotopique ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) et  $^{88}\text{Sr}$  pour chaque profil de standard SRM1400 utilisé pour la calibration des échantillons dans chaque séquence (SEQ processed)..... 831

**Annexe A33** : Valeurs moyennes (mean), écart-types (SD) et coefficient de variation (coef var.) des rapports élémentaires biogéniques (Sr/Ca, Ba/Ca et Mg/Ca) et diagénétiques (Mn/Ca et U/Ca) et des concentrations en  $^{43}\text{Ca}$  et  $^{88}\text{Sr}$  pour chaque profil de standard SRM1400 utilisé pour la calibration des échantillons dans chaque séquence (SEQ processed)..... 833

**Annexe A34** : Tableau récapitulatif de l'ensemble des résultats retenus dans ce travail pour chaque individu et chaque indicateur/analyse et principales caractéristiques bioarchéologiques. .... 837

**Annexe A35** : Moyennes, écart-types (SD) et coefficients de variation (coef var.) des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca dans l'email pour chaque profil d'échantillon, total (TOT profile) et nettoyé de la diagénèse (clean profile). ..... 844

**Annexe A36** : Moyennes, écart-types (SD) et coefficients de variation (coef var.) des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca dans l'os pour chaque profil d'échantillon, total (TOT profile) et « nettoyé » (en théorie) de la diagénèse (clean profile). ..... 847

**Annexe A37** : Moyennes, écart-types (SD) et coefficients de variation (coef var.) des valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans l'email pour chaque profil d'échantillon, total (TOT profile) et nettoyé de la diagénèse (clean profile). ..... 850

**Annexe A38** : Moyennes, écart-types (SD) et coefficients de variation (coef var.) des valeurs de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans l'os pour chaque profil d'échantillon, total (TOT profile) et « nettoyé » (en théorie) de la diagénèse (clean profile)..... 854

**Annexe A39** : Moyennes, écart-types (SD) et coefficients de variation (coef var.) des valeurs de Sr/Ca, Ba/Ca et  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans l'email et dans l'os pour chaque individu, tous profils (nettoyés) considérés ensembles. .... 857

**Annexe A40** : Courbes de ratios élémentaires et isotopiques mesurés par ablation laser dans l'email, pour chaque individu. Également disponibles en version numérique, par espèce (Annexe N9)..... 859

**Annexe A41** : Dispersion des valeurs isotopiques osseuses ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) et noms des échantillons animaux de l'ensemble de notre corpus. .... 880

**Annexe A42** : Dispersion des valeurs isotopiques osseuses ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) et noms des échantillons humains de Gurgy "Les Noisats" (GLN ; a), Monéteau «Macherin» (Mon ; b), Chichery « Sur les Pâturaux » (CHI-Pat ; c), Beaumont « Le Crot aux Moines » (BMT ; d) et Bonnard « Le Poirier », Chichery « l'Etang-David » et Gurgy « Le Nouzeau » (Bon, CHI-ED et NZ respectivement ; e) par classe biologique (âge et sexe) et par groupe le cas échéant..... 881

**Annexe A43** : Dispersion des valeurs isotopiques osseuses ( $\delta^{34}\text{S}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) et noms des échantillons animaux (a) et humains (b à c) de l'ensemble de notre corpus par site et par groupe le cas échéant.. 885

**Annexe A44** : Dispersion des valeurs isotopiques de la dentine ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) et noms des échantillons humains de Gurgy "Les Noisats" (GLN), Monéteau «Macherin» (Mon) et Chichery « Sur les Pâturaux » (CHI-Pat) par sexe et relativement aux valeurs moyennes de l'os..... 886

**Annexe A45** : Dispersion des valeurs isotopiques des acides aminés spécifiques du collagène osseux ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$  et  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$ ) et noms des échantillons animaux et humains de l'ensemble de notre corpus relativement aux valeurs des sites mésolithiques de Noyen-sur-Seine et Pont d'Ambon pour les ressources aquatiques (Naito *et al.* 2013) et aux estimations de plantes du site néolithique allemand de Vaihingen (Styring *et al.* 2015)..... 887

**Annexe A46** : Dispersion des ratios élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) dans l'os (en haut) et dans l'émail (en bas) des animaux et des humains de l'ensemble de notre corpus et nom des échantillons pour chaque site et par groupe le cas échéant..... 888

**Annexe A47** : Variabilité des valeurs isotopiques du carbone, de l'azote et du soufre du collagène osseux de la population adulte (>15 ans) de Gurgy « Les Noisats » en fonction de l'âge au décès pour chaque sexe..... 890

**Annexe A48** : Répartition des valeurs de Sr/Ca et Ba/Ca de l'émail dentaire des humains du site de Gurgy « Les Noisats » selon plusieurs paramètres funéraires comme le type de structure, la position et l'orientation des défunts et le mobilier associé. S : sud, SO : sud-ouest, O : ouest, G : gauche, D : droite, sup. : supérieurs, inf. : inférieurs..... 892

**Annexe A49** : Répartition des valeurs isotopiques du carbone et de l'azote dans l'os (et dans la dentine, encadrés gris) des femmes (a) et des hommes (b) du site de Gurgy « Les Noisats » selon plusieurs paramètres funéraires comme le type de structure, la position et l'orientation des défunts et le mobilier associé. S : sud, SO : sud-ouest, O : ouest, G : gauche, D : droite, sup. : supérieurs, inf. : inférieurs..... 893

**Annexe A50** : Variabilité des valeurs isotopiques du carbone, de l'azote et du soufre du collagène osseux des humains de Monéteau « Macherin » en fonction de l'âge au décès pour chaque groupe et par sexe pour le groupe C..... 895

**Annexe A51** : Plan de répartition spatial des sépultures de Monéteau « Macherin » en fonction des valeurs isotopiques du soufre et des variations anatomiques, selon le groupe, l'âge, le sexe et le type de tombe des sujets..... 896

**Annexe A52** : Répartition des valeurs isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ) de l'os et de la dentine (a) et des valeurs élémentaires (Sr/Ca et Ba/Ca) de l'os et de l'émail (b) des humains de l'ensemble des sites étudiés dans ce travail en fonction des datations  $^{14}\text{C}$ ..... 897

## Annexes B : Matériel supplémentaire des articles

**Annexe B1 : Matériel supplémentaire de l'article 1 « Comportements alimentaires au Néolithique : nouveaux résultats dans le Bassin parisien à partir de l'étude isotopique ( $\delta^{13}C$ ,  $\delta^{15}N$ ) de la nécropole de Gurgy « Les Noisats » (Yonne, Ve millénaire av. J.-C.) »**  
**Rey et al. (2017), Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris 29(1-2):54-69..... 900**

**Matériel supplémentaire 1** : Cartes de répartition des différentes cultures du Néolithique ancien et moyen en France et position du site de Gurgy « Les Noisats » au sein de ces cultures. Les flèches représentent le sens de diffusion des deux grands courants de néolithisation. Modifié d'après Demoule, 2007, p. 92-94 Demoule 2007 / *Maps of distribution of the Early and Middle Neolithic different cultures in France and position of the Gurgy "The Noisats" necropolis among these cultural areas. Arrows represent the direction of diffusion of the two great currents of Neolithization. Modified after Demoule, 2007, p. 92-94 Demoule 2007..... 906*

**Matériel supplémentaire 2** : Plan de la nécropole. Les étoiles représentent les individus sélectionnés pour l'analyse isotopique / *Map of the necropolis. Stars represent the individuals selected for isotopic analysis ..... 901*

**Matériel supplémentaire 3** : Sélection des échantillons (A) selon différents critères – biologiques (1) et (2) ; funéraires (3) et (4) ; génétique (5) – par rapport à la répartition de ces critères dans la population totale (B). \*les pourcentages correspondent au nombre d'individus possédant un type d'objet par rapport au nombre total d'individus considérés (42 ou 126) et non par rapport au nombre total d'éléments de mobilier ; un même individu peut être associé à plusieurs catégories d'objets. \*\*d'après Rivollat et al., 2015 Rivollat et al. 2015 / *Sample selection (A) based on different parameters – biological (1) and (2); archaeological (3) and (4); genetic (5) – relatively to the distribution of these parameters into the whole population (B). \*the percentages refer to the number of individuals with an object type relatively to the total number of individuals considered (42 or 126) and not relatively to the total number of goods; one individual may be associated with several categories of objects. \*\*after Rivollat et al., 2015 Rivollat et al. 2015..... 902*

**Matériel supplémentaire 4** : Principales caractéristiques du dispositif funéraire (structures, positions, orientations, mobilier), datations<sup>14</sup>C et données génétiques des individus sélectionnés pour l'analyse isotopique. Les cellules grisées correspondent aux deux individus exclus de l'analyse. Sep. = sépulture, indiv = individuelle, sup. = supérieur, inf. = inférieur, Hg = haplogroupe, \*d'après Rivollat et al., 2015 Rivollat et al. 2015, \*\*calibration d'après Reimer et al., 2004 Reimer et al. 2004, \*\*\*d'après Le Roy, 2012 Le Roy 2015 / *Mean funerary parameters (structures, positions, orientations, grave goods), <sup>14</sup>C dating and genetic data of the selected individuals for isotopic analysis. Shaded cells represent both individuals excluded from the analysis. Sep. = burial, indiv = individual, sup. = upper, inf. = lower, Hg = haplogroup, \*after Rivollat et al., 2015 Rivollat et al. 2015, \*\*calibration after Reimer et al., 2004 Reimer et al. 2004, \*\*\*after Le Roy, 2012 Le Roy 2015..... 904*

**Matériel supplémentaire 5** : Sélection des échantillons en fonction de la datation (<sup>14</sup>C cal. BC). \*d'après Rivollat et al., 2015 Rivollat et al. 2015 / *Samples selected for datation (<sup>14</sup>C cal. BC). \*after Rivollat et al., 2015 Rivollat et al. 2015..... 906*

**Matériel supplémentaire 6** : Dispersion des valeurs isotopiques en fonction de la structure funéraire (1) et du mobilier contenu dans les tombes (2 à 4) pour chacun des sexes séparément

(A et B) / *Distribution of isotopic values depending on funerary structures (1) and grave goods (2 to 4) for each sex separately (A and B)*..... 907

**Matériel supplémentaire 7** : Dispersion des valeurs isotopiques en fonction des haplogroupes génétiques (d'après Rivollat et al., 2015 Rivollat *et al.* 2015) / *Isotopic ratios of humans for each haplogroup (after Rivollat et al., 2015 Rivollat et al. 2015)* ..... 908

**Matériel supplémentaire 8** : Tableau de comparaison des différences isotopiques moyennes ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) enregistrées entre les humains et la faune associée dans plusieurs sites français et limitrophes du Néolithique ancien et moyen. mouton/ch. = mouton/chèvre, TOT dom. = total des animaux domestiques, \*chiens exclus, HST-GG = Hinkelstein-Grossgartach / *Comparison table of mean isotopic differences ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ ) recorded between humans and animals associated in several French and neighboring sites of Early and Middle Neolithic. mouton/ch. = sheep/goat, TOT dom. = total domesticated, \*dogs excluded, HST-GG = Hinkelstein-Grossgartach*..... 909

**Matériel supplémentaire 9** : Dispersion des valeurs isotopiques de plusieurs espèces d'eau douce des sites allemands de Herxheim (Néolithique moyen, Dürrwächter *et al.* 2006) et Pestenacker (Néolithique récent, Bösl *et al.* 2006), français de Pont d'Ambon et Noyen-sur-Seine (Paléo- et Mésolithique, Drucker et Bocherens 2004), américains de Moatfield et Grandview (1300AD, van der Merwe *et al.* 2003) et grecs de Dispilio et Toumba (Néolithique et Age du Bronze, Vika et Theodoropoulou 2012), relativement aux valeurs des humains de Gurgy. Les effectifs sont donnés entre parenthèses. L'encadrement montre la dispersion des valeurs néolithiques d'Allemagne et plus particulièrement celles de Herxheim (Néolithique moyen), encerclées. Le cercle plein correspond à la valeur théorique moyenne des consommateurs de 100% de ces dernières ressources / *Distribution of isotopic values for several freshwater species from the German sites of Herxheim (Middle Neolithic, [5]) and Pestenacker (Late Neolithic, [6]), the French sites of Pont d'Ambon and Noyen-sur-Seine (Palaeolithic and Mesolithic, [7]), the American sites of Moatfield and Grandview (1300AD, [8]) and the Greek sites of Dispilio and Toumba (Neolithic and Bronze Age, [9]), relative to Gurgy human values. Sample number is given in brackets. The frame shows dispersion of Neolithic values from Germany, and more particularly those (circled) from Herxheim (Middle Neolithic). The Full circle corresponds to the theoretical average value of consumers of 100% of these resources*..... 914

**Annexe B2 : Matériel supplémentaire de l'article 2 « *A multi-isotope analysis of Neolithic human groups in the Yonne valley, Northern France : insights into dietary patterns and social structure* » Rey et al. (2019), *Archaeol Anthropol Sci* 11(10):5591–5616 ..... 915**

**Online Resource 1**: Chronological distribution of the analyzed samples from the different sites. Sites are differentiated by shades of grey; each box represents the given chronology of one archaeological area and the lines correspond to the samples selected in this study. For each site, the radiocarbon dates are obtained from published reports (see table 1). They concern 97 samples of which 85 are analyzed for isotopic ratios here..... 915

**Online Resource 2a**: Plan and complementary information of the Gurgy «Les Noisats» cemetery ..... 916

**Online Resource 2b**: Plan and complementary information of the Monéteau «Macherin» cemetery (Middle Neolithic). Modified after Augereau and Chambon (2011) p94..... 918

<b>Online Resource 2c:</b> Plan and complementary information of the Chichery "Sur les Pâturaux" cemetery. Modified after Thomas (2011) p408 .....	919
<b>Online Resource 2d:</b> Plan and complementary information of the Beaumont «Le Crot aux Moines» enclosure. Modified after Garmond et al (unpub).....	920
<b>Online Resource 2e:</b> Plan and complementary information of the Bonnard "Le Poirier" site. Upper panel: localisation of the 2 graves. Lower pannel: succession of the 4 burials of the grave 1. Modified after Chambon et al (2009a).....	922
<b>Online Resource 2f:</b> Plan and complementary information of the Chichery "l'Etang-David" cemetery. Modified after Chambon et al (2009a) .....	923
<b>Online Resource 2g:</b> Plan and complementary information of the Gurgy "Le Nouzeau" enclosure. Top: general plan of the site. Bottom left: burial 238. Bottom right: burial 239. Modified after Meunier et al (2007).....	924
<b>Online Resource 3:</b> Summary of archaeological, biological and isotopic data of the human and animal samples analyzed in this study. The archaeological and biological data come from the reference studies given in table 1 for each site. *doubtful domestic status, **precision from toothwear study, ***after Rivollat et al, 2015. IsoA = IsoAnalytical laboratory (UK), UCT = University of Cape Town (South Africa).....	926
<b>Online Resource 4:</b> R script for 'A multi-isotope analysis of Neolithic human groups in the Yonne valley, Northern France: insights into dietary patterns and social structure.' .....	930
<b>Online Resource 5:</b> Csv file containing all the data available for statistical analysis.....	939
<b>Online Resource 6A:</b> Distribution of animal $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values from the various areas of Beaumont "Le Crot aux Moines". (a) area B, Merlange/Bodechon excavation, (b) layer IV, (c) layer 5, Ederlé excavation, (d) circular house.....	940
<b>Online Resource 6B:</b> Distribution of animal $\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values from the various areas of Beaumont "Le Crot aux Moines". (a) area B, Merlange/Bodechon excavation, (b) layer 5, Ederlé excavation, (c) circular House .....	940
<b>Online Resource 6C:</b> Distribution of humans' $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values by area and structure at BMT .....	940
<b>Online Resource 7:</b> Distribution of human (a) $\delta^{15}\text{N}$ , (b) $\delta^{13}\text{C}$ and (c) $\delta^{34}\text{S}$ values relatively to the radiocarbon dates by site. See Table 1 for radiocarbon dating references by site.....	941
<b>Online Resource 8:</b> Details of the published isotopic data (and associated references) of regional samples used for comparison with the results of this article in figure 10. HST-GG = Hinkelstein – Grossgartach .....	942
<b>Online Resource 9:</b> Details of the published isotopic data (and associated references) of aquatic resources used for comparison with the results of this article in figure 11. N. France = Northern France, S. France = Southern France, Danube G. = Danube Gorges, Meso = Mesolithic, Paleo = Paleolithic, Neo = Neolithic, pre-Neo = Pre-Neolithic, Belg = Belgium, N_Fce = Northern France, S_Fce = Southern France, Germ = Germany .....	949
<b>Online Resource 10:</b> Graph (a) and corresponding values (b) of the comparaison of the human trophic levels (given by the $\Delta^{13}\text{C}$ and $\Delta^{15}\text{N}$ values between domestic animals and humans from the same sites) from the Yonne valley relatively to other french and neighbouring neolithic sites on both the danubian and mediterranean routes. Here are only listed the sites containing both animal and human remains, in order to consider only intra-site $\Delta^{15}\text{N}$ animals-humans; except for the Yonne valley, where the humans of each site are compared to the overall	

domestic animals from the Yonne valley. The  $\Delta^{13}\text{C}$  and  $\Delta^{15}\text{N}$  dom-humans values are calculated from published values summarized in Online Resource 8. dom = domestic animals.... 951

**Online Resource 11:** Table comparing the average isotopic differences ( $\Delta^{13}\text{C}$  and  $\Delta^{15}\text{N}$ ) recorded between humans and associated animals of the sites of the Yonne valley relatively to other french and neighbouring neolithic sites on both the danubian and Mediterranean routes. The average isotopic differences between humans and domestic animals are reported on the graph in Online Resource 7. Here are only listed the sites containing both animal and human remains in order to calculate the  $\Delta^{15}\text{N}$  animal-human intra-site; except for the Yonne valley, where the humans of each site are compared to the overall domestic animals from the Yonne valley. LBK = Linear Band Keramic, HST-GG = Hinkelstein - Grossgartach, VBQ = Vases à Bouche Carrée, dom = domestic animals..... 953

**Annexe B3 : Matériel supplémentaire de l'article 3 « *Sex and age-related social organization in the Neolithic: a promising survey from the Paris Basin* » Rey et al. (2021), *Journal of Archaeological Science: Reports* 38:103092..... 957**

**Supporting Information 1:** Brief methodological background and collagen extraction protocol ..... 957

**Supporting Information 2:** Summary table of funerary practices for juveniles for the Middle Neolithic in Northern France depending on the age-at-death and compared to the funerary practices observed for adults, modified after Le Roy et al. (2018). 1: body position; 2: associated grave goods; 3: jewelry; 4: location of burial ..... 959

**Supporting Information 3:** Calibration scheme for the estimated ages of the sections analyzed in this study. The calibration is based on the age estimates given by Czermak et al. (2020) according to the differential growth rate of the anatomical areas of the second permanent molar and their corresponding developmental stage as given by AlQahtani et al. (2010). ..... 960

**Supporting Information 4:** Summary of archaeological and biological data of the samples analyzed in this study. †several dates are doubtful due to inconsistent grave overlaps and the presence of a plateau in the calibration curve during this period, ‡Sex determined by genetic analysis (Rivollat et al. 2020). §Age-at-death redefined through tooth wear study. \*degree of caries after Thomas, 2011, \*\*degree of wear after LeLuyer. 2016, after Molnar et al, 1972... 961

**Supporting Information 5:** R code for statistical analyses allowing the replication of the results presented in this study, and providing several additional figures and results. .... 963

**Supporting Information 6:** Distribution of the isotopic ratios according to dental associated condition (caries or wear) of the samples. (a)  $\delta^{13}\text{C}$  vs.  $\delta^{15}\text{N}$  and (b)  $\delta^{34}\text{S}$  vs.  $\delta^{15}\text{N}$  ..... 976

**Supporting Information 7:** Comparison of the isotopic ratios of males and females in bone (adult signal) and in dentine (childhood signal)..... 977

**Supporting Information 8:** Spearman's correlation matrix of different isotopes and trace elements in bone and dentine, showing that  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{34}\text{S}$  in dentine are correlated with each other. .... 978

**Annexe B4 : Matériel supplémentaire de l'article 4 « *Specifying subsistence strategies of Early farmers: new results from compound specific isotopic analysis of amino acids (CSIA-AA)* » Rey et al. (soumis à International Journal of Osteoarchaeology) ..... 979**

**Fig. A1:** Isotopic variability of terrestrial plants and freshwater fish values available in literature from close contexts: **a)** Distribution of C and N bulk isotopic values of cereal grains and pulse seeds from four Neolithic sites in Germany (Styring et al., 2017) and **b)** location map of the corresponding sites. **c)** Distribution of C and N bulk isotopic values and **e)** N and S isotopic values of freshwater fish samples from various «neighbouring» sites (Bösl et al., 2006; Drucker and Bocherens, 2004; Drucker et al., 2016; Drucker et al., 2018; Dürrwächter et al., 2006; Meadows et al., 2018), Turkish site (Itahashi et al., 2019) and freshwater fish and mussel modern samples (Fernandes et al., 2015) ; **d)** location map of the corresponding sites. **f)** Distribution of N isotopic values of single amino acids of different modern plant samples from various sites (Bol et al., 2002; Itahashi et al., 2019; Kendall et al., 2019; Paolini et al., 2015; Steffan et al., 2013; Styring et al., 2015; Styring et al., 2014; Takizawa et al., 2017; Yoneyama and Tanaka, 1999) and **g)** of freshwater fish samples from the Epipaleolithic site of Pont d'Ambon (Naito et al., 2013) and the Neolithic Turkish site of Hasankeyf Höyük (Itahashi et al., 2019). ..... 979

**Fig. A2:** Distribution of C, N and S isotopic values of the samples analyzed in this study by CSIA-AA relative to all the samples previously analyzed for the corresponding sites (Goude et al., 2019; Goude et al., 2013; Rey et al., 2017; Rey et al., 2019). **a.**  $\delta^{13}\text{C}$  vs  $\delta^{15}\text{N}$  values from the Yonne region, **b.**  $\delta^{13}\text{C}$  vs  $\delta^{15}\text{N}$  values from Le Vigneau, **c.**  $\delta^{13}\text{C}$  vs  $\delta^{15}\text{N}$  values from Pontcharaud, **d.**  $\delta^{34}\text{S}$  vs  $\delta^{15}\text{N}$  values from the Yonne region and Pontcharaud, **e.**  $\delta^{34}\text{S}$  vs  $\delta^{15}\text{N}$  values from Le Vigneau. .... 981

**Table A1-7:** Summary of all the archaeological and isotopic data used as baseline for the models. 8 sheets: 1 baseline for the Yonne region, 1 baseline for Pontcharaud, 1 baseline for Le Vigneau (LV), 1 baseline for freshwater resources (FW), 1 baseline for plants, 1 summary of average plant values, 1 baseline for concentrations of food sources from USDA (Haytowitz et al., 2019). ..... 982

**Appendix B1:** [text] FRUITS models, baseline reference and parameters, results and discussion ..... 1002

**Fig. B1 :** Model estimates of the relative contribution in the diet of GLN and NFN individuals of different food sources considered under specific conditions determined by the input parameters given in SI\_models. Models are based on C, N and S isotope ratios of bulk collagen (A and E); N isotope ratios of Glu and Phe for 3 different sources (B-C and F); all proxies combined C, N and S isotope ratios of bulk collagen and N isotope ratios of Glu and Phe (D and G), for individuals from GLN (A-D) and NFN (E-G). Boxes represent a 68% credible interval (corresponding to the 16th and 84th percentiles) while the whiskers represent a 95% credible interval (corresponding to the 2.5th and 97.5th percentiles). The horizontal continuous line represents the estimated mean while the horizontal discontinuous line represents the estimated median (50th percentile). ..... 1008

**Table B1:** Summary of input parameters for FRUITS models..... 1009

**Annexe B5 : Matériel supplémentaire de l'article 5 « *Disentangling diagenetic and biogenic trace elements and Sr radiogenic isotopes in fossil dental enamel and bone using laser ablation analysis* » Rey et al. (2022), Chemical Geology 587:120608 ..... 1012**

**Table des annexes**

---

**Table S1:** Summary of main archaeological data, sample material, Sr isotope and trace element results of each individual. .... 1012

**Annexes C : Catalogue**

**Catalogue..... 1017**

## Table des annexes numériques

Tous les fichiers annexes numériques sont accessibles en ligne à l'adresse :

<https://doi.org/10.5281/zenodo.5821359>

**Annexe N1\_carte\_geol\_Sr** : Carte de France (Géoportail) permettant un grossissement interactif de la zone d'intérêt, illustrant les principales unités géologiques et la localisation des sites de notre corpus dans la vallée de l'Yonne entourés d'un rayon de 100 km dans lequel sont indiqués les prélèvements Sr de la base de données iRhum (Willmes *et al.*, 2013) utilisés comme valeurs de référence dans ce travail.

**Annexe N2\_Profiles\_pictures** (dossier): Tracés des profils réalisés sur chaque échantillon humain et animal d'email et d'os pour l'ablation laser, d'après photographie des moulages. Photographies et DAO : L. Rey.

**Annexe N3\_Raw\_data\_Sr et TE\_Python** (dossier) : Totalité des fichiers de **résultats bruts** obtenus par ablation laser pour chaque séquence (LR\_X) et (LR\_X\_SEQ) ainsi que les scripts Python-Spyder nécessaires à l'extraction et à la correction des données. Le dossier Sr comprend les données obtenues par LA-MC-ICPMS pour le strontium isotopique (isotopes du Sr, Rb et Kr) et le dossier TE comprend les données obtenues par LA-Q-ICPMS pour les éléments traces (ces fichiers comprennent les mesures de 65 isotopes de 41 éléments dont ceux d'intérêt : Sr, Ba, Ca, Mg, Mn et U).

**Annexe N4\_Scripts** (dossier) : Ensemble des **scripts nécessaires au traitement des données** acquises par ablation laser. 1.script\_process servant au traitement et à la correction des données brutes (sous Python) ; 2.script\_extraction servant à l'extraction des données d'intérêt au format .csv (sous R) ; 3.script\_gener\_moyIndiv servant à la création d'un fichier synthétisant l'ensemble des données moyennes « propres » par individu (sous R) ; 4.script\_gph\_profils servant à la création des courbes de données pour chaque profil et chaque individu (sous R) ; 5.script\_correl servant à la création des matrices et graphiques de corrélation entre proxies biogéniques et diagénétiques pour chaque profil (sous R). Les fichiers sources correspondant sont disponibles en Annexes N3 (Python) et N8 (R, .csv).

**Annexe N5\_Data\_out\_Sr et TE** (dossier) : Totalité des fichiers de **résultats corrigés** (correction semi-automatisée avec le logiciel Python-Spyder 2.7) obtenus par ablation laser pour chaque séquence (LR\_X\_processed). **Le dossier Sr** comprend les données relatives à l'étude du Sr isotopique dont le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  calibré par encadrement des standards « bracketing calibration » et corrigé par rapport au  $^{85}\text{Rb}$  et  $^{83}\text{Kr}$  (nommé « Sr8786\_RbKrcorr\_brack ») et le signal contrôle  $^{88}\text{Sr}$ . **Le dossier TE** comprend les données relatives à l'étude des éléments trace, dont les données sont exprimées relativement à l'abondance naturelle de l'isotope considéré (T\_isotope), relativement au Ca (R\_T\_isotope) et corrigées par encadrement des standards « bracketing calibration » (Corr\_R\_T\_isotope). Ces fichiers comprennent les mesures de 65 isotopes de 41 éléments dont seuls Sr, Ba, Ca, Mg, Mn, U, Rb, Fe, Zn, Pb et Th ont été corrigés. Les tables de calibration relative par rapport à la position de l'échantillon ainsi que l'ordre des échantillons et standards de chaque séquence sont données dans les derniers onglets de chaque fichier.

**Annexe N6\_Global\_File\_Sr et TE** : Fichiers (.csv) comprenant l'ensemble des valeurs corrigées des profils d'échantillons et des valeurs de standards pour  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  et  $^{88}\text{Sr}$  (ce dernier non corrigé) dans l'un (« fichier\_global\_Sr.csv ») et Sr/Ca, Ba/Ca, Mg/Ca, Mn/Ca (non corrigé), U/Ca,  $^{88}\text{Sr}$  (non corrigé) et  $^{43}\text{Ca}$  (non corrigé) dans l'autre (« fichier\_global\_TE.csv »).

**Annexe N7\_TOT\_profiles** : Fichier Excel comprenant 4 onglets pour les éléments traces dans l'émail (TE\_enamel) et dans l'os (TE\_bone) et pour le Sr isotopique dans l'émail (Sr\_enamel) et dans l'os (Sr\_bone) avec **l'ensemble des données pour chaque profil d'échantillon** - les valeurs en rouges sont celles qui sont supprimées lors du nettoyage de la diagenèse - ainsi que les valeurs moyennes, l'écart-types et la quantité de données de chaque profil total (TOT) et nettoyé (select). Il a été démontré par la suite que les valeurs dans l'os et les valeurs  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ne doivent pas être interprétés directement en termes biogéniques.

**Annexe N8\_csv\_source** (dossier) : Fichiers sources au format .csv de l'ensemble des valeurs corrigées pour chaque profil dans l'os (\_bone) et dans l'émail (\_enamel) pour le Sr isotopique (profilesSr) et les éléments traces (profilesTE). Les fichiers « TOT\_ » comprennent les données des profils totaux (avant nettoyage de la diagenèse) et les fichiers « Nett\_ » les données des profils nettoyés de la diagenèse (sans les valeurs en rouge du fichier « TOT\_profiles »). Ces fichiers sont ceux qui peuvent être directement utilisés pour l'analyse statistique des résultats. Attention, il a été démontré par la suite que les valeurs nettoyées dans l'os et les valeurs  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ne doivent pas être interprétés directement en termes biogéniques.

**Annexe N9\_Curves** (dossier) : **Courbes des valeurs** de Sr/Ca, Ba/Ca, Mg/Ca, U/Ca, Mn/Ca et  $^{44}\text{Ca}$  pour l'étude des éléments traces et de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  et  $^{88}\text{Sr}$  pour l'étude du Sr isotopique de **chaque profil** dans l'émail (**a**) et dans l'os (**b**) et pour **chaque individu** dans l'émail (**c** : les profils d'un même individu sont mis bout à bout et séparés par une ligne verticale pointillée – attention les profils ne sont pas nécessairement jointifs et la ligne peut correspondre à une lacune de plusieurs milliers de points ; se référer aux tracés des profils sur photographies de l'Annexe N2\_Profiles\_pictures). Les courbes de droite correspondent aux profils nettoyés de la diagenèse. Les profils TE et Sr sont calés approximativement, en fonction de la longueur totale du profil, en  $\mu\text{m}$  (les profils TE et Sr n'ayant pas le même nombre de points – le nombre de points est converti en  $\mu\text{m}$ ). Les profils commencent de l'extrémité occlusale jusqu'au collet pour les humains et les cochons, ils sont inversés (du collet à l'extrémité occlusale) pour les herbivores (cf. Annexe N2). Il a été démontré par la suite que les valeurs dans l'os et les valeurs  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ne doivent pas être interprétées directement en termes biogéniques.

**Annexe N10\_Correl** (dossier) : Graphiques et matrices de corrélation entre les rapports Sr/Ca et Ba/Ca biogéniques et les rapports Mn/Ca, U/Ca et Mg/Ca diagenétiques pour les profils totaux (TOT) et nettoyés (Nett), dans l'émail (enamel) et dans l'os (bone). Les matrices de corrélation indiquent les coefficients de corrélation de Pearson (les valeurs les plus proches de 0 sont les moins corrélées).



**Comportements alimentaires et mobilité au Néolithique.** Analyses biogéochimiques multi-proxies de restes bioarchéologiques de la vallée de l'Yonne (Ve millénaire av. J.-C., France)

Utilisant l'alimentation comme vecteur de compréhension de l'organisation et des structures sociales des premiers agropasteurs néolithiques, ce travail se concentre sur le sud-est du Bassin parisien dont le contexte archéologique (nombre exceptionnel de sépultures datées du Néolithique, 4800 à 4000 cal BC) est particulièrement riche et bien documenté. Dans ce cadre, 180 humains et 74 animaux ont été analysés par différents marqueurs isotopiques et élémentaires ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  du collagène osseux et dentinaire,  $\delta^{15}\text{N}$  des acides aminés spécifiques du collagène osseux,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , Sr/Ca et Ba/Ca de l'apatite de l'os et de l'émail dentaire par ablation laser) afin de reconstituer les schémas alimentaires et de mobilité en lien avec les paramètres biologiques et funéraires de ces individus. Les résultats montrent, entre autres, une alimentation riche en protéines animales, notamment issues de l'exploitation bovine (viande et produits laitiers) et porcine, sans distinction selon le type de traitement funéraire ou l'attribution culturelle. En revanche, des différences entre les sexes et en fonction de l'âge sont mises en évidence et pourraient être en lien avec la division sexuelle des tâches et une origine exogène des femmes. La combinaison des proxies et le développement de méthodes novatrices, sur un large corpus, permet de discuter des avantages et des limites d'une telle approche, offrant de nouvelles perspectives prometteuses. La mesure par ablation laser du strontium isotopique ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) et des éléments traces (Sr/Ca et Ba/Ca vs Mn/Ca, U/Ca et Mg/Ca) réalisée pour la première fois sur près d'une centaine d'individus permet notamment, par la création d'un nouveau protocole de traitement des données, d'éliminer des zones diagénétiques dans l'émail dentaire et de suivre à une échelle très fine les modifications alimentaires et de mobilité au cours du temps sur une période de vie précise de l'enfance.

**Mots clés :** premiers fermiers, comportements alimentaires, isotopes stables, éléments traces, ablation laser, acides aminés, collagène osseux, dentine, émail, Bassin parisien

---

**Neolithic dietary behaviors and mobility.** Multi-proxy biogeochemical analysis of bioarchaeological remains from the Yonne valley (5th millennium cal BC, Paris Basin, France)

Using food as a vector to understand the organization and social structures of the first Neolithic agropastoralists, this work focuses on the southeast of the Paris Basin whose archaeological context (consisting of an exceptional amount of burials dated to Neolithic, 4800 to 4000 cal BC) is particularly rich and well documented. In this context, 180 humans and 74 animals were analyzed with different isotopic and elemental markers ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  of bone and dentine collagen,  $\delta^{15}\text{N}$  of specific amino acids of bone collagen,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , Sr/Ca and Ba/Ca of bone and tooth enamel apatite with laser ablation) in order to reconstruct dietary and mobility patterns linked to the biological and funerary parameters of these individuals. The results exhibit, among other things, a diet that is rich in animal proteins, notably coming from cattle (meat and dairy products) and pigs, without it being related to differences in terms of funerary treatment or cultural characterization. However, sex and age differences are brought out and might be linked to a sexual division of labor and an exogenous origin of women. The combination of proxies and the development of innovative methods, on a large corpus, allow us to discuss the advantages and limitations of such an approach, thus offering promising new perspectives. Specifically, the measurement by laser ablation of isotopic strontium ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) and trace elements (Sr/Ca and Ba/Ca vs. Mn/Ca, U/Ca and Mg/Ca) carried out for the first time on nearly a hundred individuals allows, through the creation of a new protocol to process data, not only to eliminate diagenetic areas in dental enamel but also to monitor through time and on a very refine scale dietary and mobility changes during a specific childhood phase.

**Keywords:** first farmers, dietary behaviors, stable isotopes, trace elements, laser ablation, amino acids, bone collagen, dentine, enamel, Paris basin

---

**De la Préhistoire à l'Actuel : Culture, Environnement et Anthropologie**

UMR 5199 PACEA, Université de Bordeaux,

Allée Geoffroy Saint Hilaire, CS 50023, 33615 Pessac Cedex, France