



HAL
open science

Archéo-biogéochimie isotopique, reconstitutions des régimes alimentaires et des schémas de mobilité, et interactions bioculturelles. Les sépultures plurielles de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin (Rome, Ier-IIIe s. ap. J.-C.): Les sépultures plurielles de la région X de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin (Rome, Ier-IIIe s. ap. J.-C.)

Kevin Salesse

► **To cite this version:**

Kevin Salesse. Archéo-biogéochimie isotopique, reconstitutions des régimes alimentaires et des schémas de mobilité, et interactions bioculturelles. Les sépultures plurielles de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin (Rome, Ier-IIIe s. ap. J.-C.): Les sépultures plurielles de la région X de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin (Rome, Ier-IIIe s. ap. J.-C.). Archéologie et Préhistoire. Université de Bordeaux, 2015. Français. NNT : 2015BORD0412 . tel-01756388v1

HAL Id: tel-01756388

<https://theses.hal.science/tel-01756388v1>

Submitted on 2 Apr 2018 (v1), last revised 3 Apr 2018 (v2)

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 Kevin SALESSE

**ARCHÉO-BIOGÉOCHIMIE ISOTOPIQUE, RECONSTITUTIONS DES
RÉGIMES ALIMENTAIRES ET DES SCHÉMAS DE MOBILITÉ,
ET INTERACTIONS BIO-CULTURELLES**

**LES SÉPULTURES PLURIELLES DE LA RÉGION X DE LA CATACOMBE
DES SAINTS PIERRE-ET-MARCELLIN (ROME, I^{ER}-III^E S. AP. J.-C.)**

Sous la direction de : Dominique CASTEX
et la codirection de : Élise DUFOUR

Soutenance le 17/12/2015

Membres du jury :

M. Oliver CRAIG, Maître de Conférences, University of York, York, Royaume-Uni	Rapporteur
Mme Eugénia CUNHA, Professeur, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal	Rapporteur
Mme Dominique CASTEX, Directrice de Recherche, CNRS, Bordeaux	Directrice
Mme Élise DUFOUR, Maître de Conférences, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris	Co-Directrice
M. Jaroslav BRUZEK, Directeur de Recherche émérite, CNRS, Bordeaux	Président
Mme Raffaella GIULIANI, Inspectrice, Pontificia Commissione di Archeologia Sacra, Rome, Italie	Examinatrice
Mme Estelle HERRSCHER, Chargée de Recherche, Aix-Marseille Université, Aix-en-Provence	Examinatrice

*À tous ceux qui m'ont soutenu dans
cette épreuve et qui ont cru en moi.*

Vladimir. – Ne perdons pas notre temps en vains discours. (*Un temps. Avec véhémence*) Faisons quelque chose, pendant que l’occasion se présente ! Ce n’est pas tous les jours qu’on a besoin de nous. Non pas à vrai dire qu’on ait précisément besoin de nous. D’autres feraient aussi bien l’affaire, sinon mieux. L’appel que nous venons d’entendre, c’est plutôt à l’humanité toute entière qu’il s’adresse. Mais à cet endroit, en ce moment, l’humanité c’est nous, que ça nous plaise ou non. Profitons-en, avant qu’il soit trop tard. Représentons dignement pour une fois l’engeance où le malheur nous a fourrés. Qu’en dis-tu ? (*Estragon n’en dit rien.*) [...] Mais la question n’est pas là. Que faisons-nous ici, voilà ce qu’il faut se demander. Nous avons la chance de le savoir. Oui, dans cette immense confusion, une seule chose est claire : nous attendons que Godot vienne.

Estragon. – C’est vrai.

Beckett S., *En attendant Godot*, Acte II, Editions de Minuit.

REMERCIEMENTS

Ma thèse fut un drame, au sens premier du terme. Une véritable pièce de théâtre traitant de la vie et de la mort de ses acteurs et figurants. Une réelle aventure humaine aussi avec ses moments difficiles et ses moments plus agréables. Tantôt dramaturge itinérant, tantôt saltimbanque, la condition de doctorant est souvent celle d'un artiste aux nombreux travers dus pour partie sans doute à son jeune âge. Ces cinq années en doctorat – car oui, ma thèse fut faite en cinq années ! – ont été vécues avec passion et parfois désamour. Une chose est sûre, l'exercice d'une thèse transforme un homme et l'on ne ressort pas indemne de cet exercice.

Peu enclin au pathos et relativement pudique sur mes ressentiments, mes mercis seront donc assez concis. Ma reconnaissance et mes remerciements vont à tous ceux qui m'ont permis de parvenir à mettre un point final à cette œuvre, aussi imparfaite soit-elle, mais aussi à tous ceux qui m'ont permis de la voir se jouer sous mes yeux, dans ma tête et dans mon cœur. Auteur et interprète de cette œuvre, la représentation qui s'offre à vous ce jour dans les pages qui suivent n'aurait pu être telle quelle sans la précieuse aide de toutes les personnes de la Compagnie.

Mes premiers remerciements sont adressés aux critiques dramatiques, Eugénia Cunha et Oliver Craig, ayant accepté tous deux de rapporter cette œuvre, mais aussi à Raffaella Giuliani, Estelle Herrscher, Jaroslav Bruzek, Dominique Castex et Élise Dufour, ayant accepté d'examiner ce travail. À tous, et en particulier aux non-francophones, je vous suis très reconnaissant d'avoir pris le temps pour juger ce manuscrit malgré toutes vos obligations. Merci des efforts assurément fournis pour comprendre ma prose pouvant parfois être baroque. Votre présence le jour de ma soutenance me ravit et j'espère que de riches discussions auront lieu. Merci de vous être déplacés de loin voire de très loin pour ce grand oral.

Mes remerciements suivants s'adressent tout particulièrement à mes encadrants de thèse officiels, Dominique Castex et Élise Dufour, et officieux, Jaroslav Bruzek, formant ensemble un trio de metteurs en scène hors du commun pour cet *opus* théâtral. À Dominique tout d'abord, j'aimerais te remercier de ton soutien sans faille, de tes encouragements continus, des riches discussions d'ordre archéo-anthropologique que nous avons eu et d'avoir pris à bras le corps tous les écueils administratifs et financiers que j'ai pu rencontrer au cours de ce travail. À Élise ensuite, j'aimerais t'exprimer toute ma gratitude pour m'avoir également aidé dans cette étape de la vie d'un – je l'espère – futur chercheur, de t'être autant impliquée dans ce travail, de m'avoir formé à appréhender les tenants et les

aboutissants des analyses isotopiques, de m'avoir appris à interpréter des résultats isotopiques. À Jaro enfin, merci d'avoir été là durant toutes ces années pendant les étapes clés de ce travail, d'avoir cru en moi pour ce travail, de m'avoir fait confiance pour la thèse mais aussi pour différents aspects extra-thèse. À vous tous, merci d'avoir joué entièrement ce rôle et ce malgré les quelques différends que nous avons pu avoir durant ces cinq ans. Vous avez veillé comme tout metteur en scène accompli à votre interprétation du texte et à sa transposition scénique. La cohérence artistique de ce spectacle qui s'offre à vous ce jour est en grande partie de votre fait. Merci.

Je tiens également à remercier les accessoiristes Mgr Giovanni Carrù ainsi que Raffaella Giuliani et bien sûr Dominique Castex pour m'avoir offert la collection des sépultures plurielles de la région X de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin. Merci à vous, aux *fossore*s, et d'une façon générale à la *Commissione Pontificia di Archeologia Sacra* de m'avoir permis d'échantillonner et d'étudier cette merveilleuse collection et de m'avoir offert les conditions favorables pour cette étude lors de mes différentes missions à Rome. Je souhaite aussi remercier les accessoiristes Petr Velemínský et Jaroslav Bruzek pour m'avoir donné accès une fois encore à la collection du cimetière Saint-Benoît à Prague que j'avais déjà par le passé étudié dans le cadre de mon Master. Je voulais enfin remercier l'accessoiriste Matthieu Lebon pour l'utilisation de ses os de faune frais.

J'exprimerais de même toute ma gratitude aux directeurs techniques, Vincent Balter, Antoine Zazzo et Matthieu Lebon pour m'avoir appris à maîtriser de nouveaux outils et savoir-faire. Merci à vous du temps que vous m'avez consacré pour m'aider à comprendre et interpréter les résultats Sr, ¹⁴C et FTIR. Vous avez toujours été disponibles à mes sollicitations et je vous remercie pour cela. Sans votre contribution, ce travail de thèse aurait été bien différent.

Je voudrais également remercier les ingénieurs son et lumières pour m'avoir permis d'acquérir un certain nombre de résultats. Merci Chris Wurster d'avoir analysé à l'autre bout de la terre, là-bas en Australie, mes échantillons de collagène et de kératine. Merci Joël Ughetto-Manfrin pour avoir passé mes échantillons d'apatite au spectromètre du muséum. Merci tout particulièrement Olivier Tombret pour m'avoir apporté un coup de pouce à maintes reprises pour diverses manipes et analyses et notamment pour les analyses de FTIR. Olivier, je te suis vraiment reconnaissant. Merci enfin Karyne Debue et Maryelle Bessou pour l'espace que vous m'avez alloué dans les espaces techniques dont vous avez la charge le temps de réaliser des observations et diverses manipulations de mon matériel.

Mes sincères remerciements au guichetier de la Compagnie, Frédéric Santos, qui tient les comptes et manie les chiffres comme personne. Merci à toi d'avoir toujours été disponible pour

répondre à mes nombreuses questions statistiques de façon aussi sympathique et pointue. Merci de ton aide et des nombreuses heures de travail que tu as passé sur certaines de mes données.

Un grand merci à mon attaché presse et aussi comparse sur les planches, Isabelle Esqurial, alias « Lisa M ». Merci pour ton aide, merci pour tous les PEB que tu m'as commandé, merci pour ton entrain et ta bonne humeur. Merci pour ce moment avignonnais. Et sinon, j'attends toujours la dédicace de ton premier roman !

Mes remerciements s'adressent ensuite aux machinistes et concepteurs web, Xavier de Rochefort, Romain Leguay, Nicolas Filippi mais aussi à Mi Wu, Arwa Kharobi, Antony Colombo, Maïté Rivollat, pour votre très précieuse aide dans la création du site internet IsoArch (*Isotopic data for Archaeological samples*) dans sa version beta (<http://isoarch.eu/>). Sans vos savoir-faire et vos connaissances jamais je n'aurais pu arriver à un tel résultat. Et tout cela bénévolement ! Alors merci, tout simplement !

J'aimerais dire merci également à tous les souffleurs qui m'ont conseillé depuis leurs boîtes tout au long de la construction de mon rôle d'acteur. Merci Oliver Craig, Ricardo Fernandes, Andrew W. Froehle, Jelmer W. Eerkens pour les discussions nourries que nous avons eu par téléphone et e-mails. Ces échanges m'ont assurément donné les billes pour mieux comprendre les modèles interprétatifs utilisés dans le cadre de ce travail. Merci aussi Philippe Blanchard, Raffaella Giuliani, Sacha Kacki, Géraldine Sachau-Carcel et Hélène Réveillat, Eline Schotsmans pour les discussions toujours fortes intéressantes que nous avons eues de vive-voix ou par e-mails au sujet du décor et des figurants, à savoir le secteur central de la catacombe et ses défunts. Merci de votre générosité et disponibilité. Sans vous ma compréhension du site aurait été sans doute différente.

Mes remerciements vont aussi aux conseillers en dicton, Vanessa Urzel, Géraldine Sachau-Carcel, Sébastien Villotte, Jérôme Ros, Antony Colombo, Arwa Kharobi, Maïté Rivollat, Sacha Kacki, Olivier Tombret, qui m'ont relu, corrigé et parfois conseillé sur la forme comme sur le fond à différentes étapes de ce travail. Merci à tous du temps que vous m'avez consacré à vos heures perdues. Une dédicace particulière à Arwa Kharobi, Antony Colombo et Maïté Rivollat qui ont été plus que présents à mes côtés au cours des derniers mètres précédant la ligne d'arrivée. La dernière ligne droite est longue, très longue et vous savoir près de moi a été très réconfortant.

Merci à l'ensemble des régisseurs des plateformes que j'ai été amené à côtoyer. Merci en particulier à Marie Balasse pour m'avoir offert la possibilité de manipuler au sein du laboratoire de

chimie des isotopes de l'UMR 7209. Merci Marie pour ta bienveillance et ta disponibilité lors de mes différentes sollicitations.

Mes remerciements s'adressent également aux équipes directoriales des théâtres qui m'ont permis de répéter. En premier lieu, je remerciais mon laboratoire d'accueil, l'UMR 5199, son directeur, Bruno Maureille, et la chef d'équipe A3P, Dominique Castex, pour les excellentes conditions de travail que vous m'avez fournies. En second lieu, je souhaiterais remercier l'UMR 7209 ainsi que ses directeurs passé et actuel, Jean-Denis Vigne et Margareta Tengberg, pour l'accueil que vous m'avez réservé. Merci aussi aux staffs administratifs de ces deux équipes qui m'ont souvent aidé dans les diverses démarches que j'ai eu à faire au cours de ces dernières années. Merci tout particulièrement Régine Wortmann, Jean-François Caro et Catherine Morel-Chevillet.

Je souhaiterais également remercier les producteurs de cette thèse sans qui toute cette recherche n'aurait pu se faire. Merci au Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche ainsi qu'à l'Université de Bordeaux pour le financement de mes trois premières années de thèse. Merci ensuite à Dominique Castex, la Région Aquitaine et la MSHA, de même qu'à Élise Dufour, le Muséum National d'Histoire Naturelle et l'Action Thématique Muséum « Biominéralisation » pour le financement de la plupart des analyses et des missions d'étude réalisées au cours de cette thèse. Merci également à l'UMR 5199 pour la prise en charge d'un certain nombre de déplacements en France comme à l'étranger pour notamment participer à divers colloques. Un très grand merci enfin à Archéosphère, et plus particulièrement à François Lacrampe-Cuyaubère et Cédric Beauval, et à l'association *Archéologies* pour avoir financé les analyses ¹⁴C, d'avoir joué ce rôle de mécène, et surtout d'avoir cru en moi.

Merci aux comédiens de la troupe, doctorants et néo-docteurs, pour l'ambiance, les calembours et autres mauvaises blagues. Merci de votre soutien et du bon temps que nous avons passé ensemble. Merci à Antony Colombo, Vanessa Urzel, Arwa Kharobi, Mona Le Luyer, Caroline Lafortest, Maïté Rivollat, Valentine Meyer, Léonie Rey, Nada Elias, Sacha Kacki, Thi Thui Nga Nguyen, Mathilde Samsel, Aurélie André, Mathilde Cervel, Fanny Mendisco, Pierre Guyomarc'h, Luca Sitzia, Nicolas Antunes, Vincent Delvigne de l'UMR 5199. Merci à Jérôme Ros, Colin Duval, Andréa Pares, Caroline Borgès, Noémie Tomadini, Elizabeth Kerr, Juliette Knockaert, Aurélie Manin, Noémie Nocus, Roz Gillis, Delphine Frémondeau, Allowen Evin, Marisol Garcia de l'UMR 7209.

Un très très grand merci à mon agent artistique et mentor, Arwa Kharobi, à qui je dois beaucoup. Sans toi cette thèse aurait été encore plus dure à vivre. Merci d'avoir été avec moi tout ce

temps, de m'avoir supporté et d'avoir eu confiance en moi. Merci de m'avoir permis de traverser cette épreuve en ta compagnie. Ta présence a compté et compte toujours énormément.

Et enfin il y a tous ceux qui n'appartiennent pas directement au monde du spectacle mais qui contribuent tout autant en notre réussite et nous permettent de nous dépasser. Peut-être feront-ils partie du public de ce jour. Merci à ma mère, mon père, ma grand-mère, ma sœur et mon beau-frère pour leur confiance et leur inconditionnel soutien, quels qu'ont été mes choix professionnels et personnels. Merci aussi aux amis, François, Bénédicte, Aurore, Grégory, Céline, Jocelyn, Xavier, Émilie, Anthony, Mi, Aurélie A., Aurélie L., Camille, Gaëlle, Cindy, Flore, Jacques, Marine, Manon, Mickael, Lucie pour ne citer qu'eux.

On frappe les trois coups. Le rideau frissonne et commence à se lever. À ce moment un cri éclate dans la salle [...] :

Pas encor !

Le rideau retombe. Le Directeur (ndlr du Théâtre) se tourne vers le public. Et comme il s'est appuyé un instant à la boîte du souffleur, il se met à parler en vers.

Le rideau, c'est un mur qui s'envole !

*Et quand un mur va s'envoler, qu'on en est sûr,
On ne saurait avoir d'impatience folle ;
Et c'est charmant d'attendre en regardant ce mur !
C'est charmant d'être assis devant un grand mur rouge
Qui frissonne au-dessous d'un masque et d'un bandeau !
Ah ! Le meilleur moment, c'est quand le rideau bouge
Et qu'on entend du bruit derrière le rideau !
Or, ce bruit, nous voulons que, ce soir, on l'écoute,
Et, pour se mettre un peu, déjà, dans le décor,
Qu'on rêve, en l'écoutant.*

Rostand E., *Chanteclerc*, Prélude, Livre de poche.

RIDEAU

TABLE DES MATIERES

Remerciements -----	7
Liste des Tableaux -----	19
Liste des Figures -----	21
Liste des Annexes -----	25
INTRODUCTION -----	27
CHAPITRE I. La catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin : État des recherches archéo-anthropologiques et problématisation -----	31
1. Le territoire « aux deux lauriers »-----	31
1.1. À travers le temps et l'espace-----	31
1.2. Installations funéraires en surface-----	33
1.3. Exploitation du sous-sol-----	36
1.4. État des lieux précatacombale-----	37
2. Le cimetière souterrain-----	39
2.1. Genèse-----	39
2.1. Extension-----	41
2.2. Déclin-----	41
3. Le secteur central de la région X : nouveaux intérêts archéologiques et anthropologiques.-----	42
3.1. (Re-)Découverte d'un secteur jusqu'alors inexploré-----	42
3.2. Premières investigations dans un contexte archéologique inédit-----	45
3.3. Les interventions archéo-anthropologiques-----	46
3.4. Nature des dépôts osseux et gestions des corps-----	48
3.5. Mise en évidence d'un appareil funéraire sophistiqué-----	50
3.6. Données biologiques des individus-----	51
3.6.1. Âge et sexe-----	51
3.6.2. Données paléopathologiques-----	53
3.7. Synthèse biologique et discussion sur la nature de la crise de mortalité-----	54
3.8. Antériorité des sépultures dans le réseau catacombale-----	55
3.9. Synthèse-----	56
4. Objectifs et hypothèses de travail-----	57
4.1. Problématique et objectifs-----	57
4.2. Hypothèses de travail-----	58
CHAPITRE II. Archéo-biogéochimie isotopique : État de l'art et principes généraux pour l'étude des régimes alimentaires et des schémas de mobilité à Rome -----	61
1. Isotopes stables et radioactifs : définitions et principales propriétés-----	61
2. Biochimie humaine et nutritionnelle : implications pour les reconstructions des régimes alimentaires et des schémas de mobilité des populations anciennes à partir des analyses isotopiques-----	64
2.1. Principes de biochimie de la nutrition humaine : digestion, absorption et distribution dans l'organisme des aliments ingérés-----	64
2.2. Fractions biochimiques des tissus d'intérêt : organisations architecturales et compositions chimiques-----	67
2.2.1. La phase collagénique de l'os-----	67
2.2.2. Les phases carbonatées de l'os et de l'émail-----	69
2.2.3. La phase kératinique du cheveu-----	70
2.3. Rythmes d'intégration du signal isotopique dans l'organisme-----	70

2.3.1.	Intégration du signal isotopique au cours des processus de modelage et de remodelage de l'os	71
2.3.2.	Intégration du signal isotopique au cours des processus de minéralisation de l'émail dentaire	74
2.3.3.	Intégration du signal isotopique au cours des processus de croissance du cheveu	75
3.	Interprétation des signaux alimentaires mesurés sur les fractions protéiques et apatitiques	77
3.1.	Les compositions isotopiques en carbone	77
3.1.1.	Le $\delta^{13}\text{C}$ des phases collagénique et kératinique	77
a.	Origine du carbone incorporé par le collagène et la kératine	77
a.1.	Le modèle de mélange linéaire	78
a.2.	Le modèle de routage des AA	78
a.3.	Un modèle mixte	79
a.4.	Modélisations de Craig et al. 2013	80
b.	Fractionnements isotopiques du ^{13}C	81
b.1.	Enrichissement des fractions protéiques par rapport à l'alimentation	81
b.2.	Enrichissement entre les fractions protéiques de différents maillons de la chaîne alimentaire	82
c.	Processus physiologiques affectant le signal isotopique	82
3.1.2.	Le $\delta^{13}\text{C}$ des phases carbonatées apatitiques	83
a.	Origine du carbone assimilé par les phases carbonatées	83
b.	Fractionnements isotopiques du ^{13}C	83
3.1.3.	Sources de variation des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$	85
a.	Les réseaux trophiques	85
a.1.	Les végétaux	85
a.2.	Les animaux	86
b.	Les faits culturels	87
c.	L'effet Suess	87
3.1.4.	Approches interprétatives des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$	88
a.	Le $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$	88
b.	Le modèle de Froehle et al. (2010)	89
3.2.	Les compositions isotopiques en azote	90
3.2.1.	Origine de l'azote assimilé par le collagène et la kératine	90
3.2.2.	Fractionnements isotopiques du ^{15}N	90
3.2.3.	Processus physiologiques influençant le signal isotopique	93
3.2.4.	Sources de variation des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$	94
a.	Les réseaux trophiques	94
a.1.	Les végétaux	94
a.2.	Les animaux	95
b.	Les faits culturels	96
3.2.5.	Approches interprétatives des valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et multi-proxys	96
a.	Diagramme de double projection ($\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$)	96
b.	Le modèle de Froehle et al. (2012) ($\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$)	98
b.1.	Description	98
b.2.	Quid d'une alimentation mixte C ₃ /marine ?	99
c.	L'approche bayésienne FRUITS de Fernandes et al. (2014)	100
3.3.	Le référentiel isotopique alimentaire	101
3.3.1.	Les céréales C ₃ et C ₄	101
3.3.2.	Les herbivores terrestres C ₃	103
3.3.3.	Les poissons marins de Méditerranée	105
3.3.4.	Le <i>garum</i>	107
3.3.5.	Les carnivores domestiques	107
4.	Interprétation des signaux migratoires mesurés sur les fractions apatitiques	109
4.1.	Les compositions isotopiques en oxygène	109

4.1.1.	Origine de l'oxygène assimilé par les phases apatitiques -----	109
4.1.2.	Fractionnements isotopiques du ^{18}O -----	110
4.1.3.	Sources de variation des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ -----	111
a.	Variations des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux environnementales-----	111
b.	Les faits culturels modifiant les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux ingérées-----	113
4.1.4.	Approche interprétative des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ -----	114
4.2.	Les compositions isotopiques en strontium -----	115
4.2.1.	Origine du strontium assimilé par les phases apatitiques -----	115
4.2.2.	Fractionnement isotopique insignifiant du strontium-----	116
4.2.3.	Sources de variation des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -----	116
a.	Variations des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ du substrat géologique -----	116
a.1.	Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des roches et des sols-----	116
a.2.	Altérations des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des sols -----	117
b.	Variations des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ au sein des réseaux trophiques -----	118
b.1.	Les végétaux-----	118
b.2.	Les animaux -----	119
4.2.4.	Approche interprétative des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ -----	119
4.3.	Le référentiel géographique -----	119
4.3.1.	Le référentiel hydrique-----	120
a.	Le référentiel romain-----	120
a.1.	L'approvisionnement en eau de la cité-----	120
a.2.	Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux des aqueducs -----	123
a.3.	Des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ humaines modernes de référence ? -----	125
b.	Le référentiel extra-romain-----	127
4.3.2.	Le référentiel géologique-----	129
a.	Le référentiel romain-----	129
a.1.	Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques -----	129
a.2.	Quid des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des restes fauniques ? -----	131
a.3.	Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des eaux de Rome comme référence ? -----	131
b.	Le référentiel extra-romain-----	132
b.1.	Italie -----	132
b.2.	Afrique et péninsules ibérique et arabique -----	133
4.4.	Diagenèse des phases organiques de l'os et du cheveu-----	136
4.4.1.	Processus diagénétiques altérant le collagène osseux et la kératine de l'os-----	136
a.	Le collagène osseux-----	136
b.	La kératine du cheveu-----	136
4.4.2.	Critères de conservation des compositions chimiques et isotopiques du collagène osseux et de la kératine du cheveu -----	137
4.5.	Diagenèse des phases minérales de l'os et de l'émail -----	139
4.5.1.	Processus diagénétiques altérant les phases apatitiques carbonatées de l'os et de l'émail 139	
4.5.2.	Indicateurs de l'état d'altération des phases carbonatées de l'os et de l'émail-----	140
a.	Indicateurs empiriques en routine -----	140
b.	Caractérisation des altérations diagénétiques de la phase carbonatée de l'os par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier -----	141
c.	Validation du signal isotopique de la phase carbonatée osseuse par datation ^{14}C sur couple collagène-apatite -----	143

CHAPITRE III. Matériels et méthodes ----- 145

1.	Matériels -----	145
1.1.	Le matériel de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin -----	145
1.1.1.	Vestiges humains -----	145
a.	Choix d'échantillonnage-----	145

b.	Campagnes d'échantillonnage et études post-échantillonnage	146
c.	Corpus d'étude	147
1.1.2.	Sédiments	148
1.2.	Le matériel de comparaison de Saint-Benoît de Prague	148
1.3.	Le référentiel faunique moderne	148
2.	Méthodes analytiques	149
2.1.	Prélèvements en laboratoire	149
2.1.1.	Prélèvements des échantillons d'os	149
2.1.2.	Prélèvements des cheveux	150
2.1.3.	Prélèvements des échantillons d'émail	150
2.1.4.	Prélèvements des sédiments	151
2.2.	Prétraitements chimiques	151
2.2.1.	Les phases organiques de l'os et du cheveu	151
a.	Extraction du collagène	151
a.1.	Prétraitements par acide chlorhydrique	151
a.2.	Prétraitements par EDTA disodique	152
b.	Extraction et purification du CO ₂ du collagène	153
c.	Purification de la kératine	154
2.2.2.	Les phases minérales de l'os et de l'émail	155
a.	Purification des carbonates et test de la méthode appliquée	155
a.1.	Purification des carbonates en vue d'acquérir les $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$	155
a.2.	Purification des carbonates en vue d'acquérir les âges $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$	155
a.3.	Protocole de validation de la méthode de purification des carbonates ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$)	156
b.	Extraction et purification du CO ₂ de la phase carbonatée de l'os	158
c.	Extraction du strontium	159
c.1.	Lessivage des échantillons	159
c.2.	Séparation du strontium	160
c.3.	Dissolution préalable aux mesures élémentaires	161
c.4.	Dissolution préalable aux mesures des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	161
2.2.3.	Les sédiments	162
a.	Lessivage des échantillons	162
b.	Séparation du strontium et dilutions	162
2.3.	Analyses spectrométriques	162
2.3.1.	Analyses IRTF-RTA	162
2.3.2.	Datations ^{14}C	162
2.3.3.	Analyses RMN	163
2.3.4.	Analyses élémentaires	163
2.3.5.	Analyses IRMS	164
a.	Mesure des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ des phases organiques	164
b.	Mesure des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des phases carbonatées	164
c.	Mesure des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	165
CHAPITRE IV. Résultats		167
1.	Test de validation du protocole de purification des carbonates de l'os utilisé	167
1.1.	Résultats RMN	167
1.2.	Résultats isotopiques	170
2.	Préservation des signaux isotopiques biogéniques sur la base de critères conventionnels mesurés en routine et variabilité	172
2.1.	Le collagène de l'os et les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$	172
2.1.1.	Conservation et variabilité à l'échelle du site	172
2.1.2.	Conservation et variabilité par chambre	174
2.1.3.	Conservation et variabilité par niveau de dépôts	177
2.1.4.	Conservation et variabilité par catégorie d'os	177

2.1.5.	Conservation et variabilité en fonction de l'apparence macroscopique des os -----	178
2.2.	La phase carbonatée de l'os et les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ -----	178
2.2.1.	Conservation et variabilité à l'échelle du site -----	178
2.2.2.	Conservation et variabilité par chambre -----	179
2.2.3.	Conservation et variabilité par niveau de dépôts -----	181
2.2.4.	Conservation et variabilité par catégorie d'os -----	181
2.2.5.	Conservation et variabilité en fonction de l'apparence macroscopique des os -----	181
2.3.	La phase carbonatée de l'émail et les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ -----	182
2.3.1.	Conservation et variabilité à l'échelle du site -----	182
2.3.2.	Conservation et variabilité par chambre -----	182
2.3.3.	Conservation et variabilité par niveau de dépôts -----	183
2.3.4.	Conservation et variabilité par type de dents -----	183
2.4.	Les phases apatitiques de l'os et de l'émail, les sédiments et leurs rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -----	183
2.5.	La kératine du cheveu et les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$ -----	184
3.	Caractérisation des altérations diagénétiques de la phase carbonatée de l'os par spectroscopie IRTF	185
3.1.1.	Avant purification la phase minérale de l'os -----	185
3.1.2.	Après purification de la phase minérale de l'os -----	186
4.	Datations ^{14}C sur couples collagène-carbonate -----	188
CHAPITRE V. Discussion -----		195
1.	Validité du protocole de purification des carbonates de l'os utilisé -----	195
1.1.	Efficacité des prétraitements -----	195
1.1.1.	Effets à T0 -----	195
1.1.2.	Effets à T1 -----	195
1.1.3.	Effets à T2 et T2Bis -----	196
1.2.	Influence des prétraitements sur les teneurs isotopiques -----	197
1.3.	Synthèse -----	199
2.	Préservation des signaux isotopiques biogéniques -----	201
2.1.	Trajectoire diagénétique -----	201
2.2.	Hétérogénéité spatiale au sein de la catacombe de la conservation de l'os et de l'émail dentaire	202
2.3.	Validation du signal isotopique biogénique de la phase carbonatée de l'os par la comparaison de datation ^{14}C sur couples collagène-carbonate -----	205
2.4.	Variabilité de la conservation de l'os à l'échelle régionale et globale : les catacombes <i>versus</i> les sites de plein-air -----	209
2.5.	Conclusion -----	212
3.	Reconstructions des régimes alimentaires -----	213
3.1.	L'alimentation durant l'enfance -----	213
3.2.	L'alimentation à l'âge adulte -----	214
3.2.1.	Les ressources terrestres C_3 comme base alimentaire -----	214
3.2.2.	Les poissons marins comme ressources subsidiaires -----	219
3.2.3.	Un régime alimentaire <i>type</i> : la triade Céréale C_3 /Viande C_3 /Poisson marin -----	220
3.2.4.	Le millet et les poissons dulcicoles rarement consommés -----	223
3.2.5.	Quid de la consommation de blé africain et du <i>garum</i> ? -----	224
3.3.	Une certaine immuabilité du régime alimentaire au cours de la vie ? -----	226
3.4.	Singularité de l'alimentation des individus de la région X à Rome -----	229
3.5.	Conclusion -----	231
3.5.1.	Quid des hypothèses historico-archéologiques ? -----	231
3.5.2.	De l'intérêt de recourir à différentes approches interprétatives -----	232
4.	Étude de la mobilité -----	232
4.1.	Identification des migrants et résidents romains -----	232
4.1.1.	Identification des migrants et résidents durant l'enfance -----	232

a.	<i>Identification des individus allochtones</i> -----	232
b.	<i>Identification des sujets locaux</i> -----	234
4.1.2.	Identification des migrants et résidents durant l'âge adulte -----	235
a.	<i>Identification des individus allochtones</i> -----	235
b.	<i>Identification des sujets locaux</i> -----	236
4.1.3.	Une identification des migrants et résidents romains sur la base de leur alimentation ?	236
4.2.	Trajectoire de vie et origines géographiques des migrants -----	238
4.2.1.	Schéma de mobilité I : migrations des sujets vers Rome après l'enfance -----	239
a.	L'Ibérie/l'Afrique du Nord/l'Arabie pour origine -----	239
b.	L'Europe/l'Afrique du Nord/l'Arabie pour origine -----	240
c.	L'Europe/l'Afrique du Nord/l'Asie mineure pour origine -----	241
d.	L'Europe/l'Asie mineure pour origine -----	242
e.	L'Afrique de l'Est/l'extrême sud de l'Arabie pour origine -----	242
f.	Un schéma de mobilité commun en dépit d'origines diverses -----	244
4.2.2.	Schéma de mobilité II : migrations des sujets vers Rome avant leur mort-----	244
a.	<i>L'Afrique du Nord/l'Arabie voire l'Ibérie pour origine</i> -----	244
b.	<i>L'Europe/l'Afrique du Nord/l'Arabie pour origine</i> -----	245
c.	<i>L'Europe/l'Afrique du Nord/l'Asie mineure pour origine</i> -----	245
d.	<i>Un schéma de mobilité commun en dépit d'origines diverses</i> -----	245
4.2.3.	Schéma de mobilité III : migrations temporaires de résidents romains -----	246
a.	<i>L'Ibérie/l'Afrique du Nord/l'Arabie comme résidence temporaire</i> -----	246
b.	<i>L'Europe/l'Afrique du Nord/l'Arabie comme résidence temporaire</i> -----	246
c.	<i>Un schéma de mobilité commun</i> -----	246
4.3.	Une singularité toute relative de la population SSPM -----	247
4.3.1.	Un taux de migrants ordinaire pour une population de Rome ? -----	247
4.3.2.	Une singularité des origines géographiques des migrants ?-----	249
4.4.	Conclusion -----	249
5.	Essai d'une identification des défunts -----	250
5.1.	Statut social des défunts au prisme de leurs alimentations-----	250
5.2.	Exogénéité des pratiques funéraires ou allochtonie des individus ?-----	255
5.3.	Réexamen de la chronologie des ensembles sépulcraux -----	257
5.3.1.	Réexamen d'après les datations ¹⁴ C-----	257
5.3.2.	Des éléments architecturaux comme indicateurs chronologiques -----	259
5.4.	Des chrétiens ? Une hypothèse plausible -----	260
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES -----	263
	Bibliographie -----	267
	Annexes -----	307
	Résumé en français -----	351
	Résumé en anglais -----	351
	Résumé en italien -----	352

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Âges ^{14}C conventionnels (BP) et calibrés à 2σ (cal BC/AD) obtenus sur des textiles et des ossements humains (collagène) issus des chambres X78/T15, X80/T16, X82/T18 et X83	55
Tableau 2. Abondances naturelles, standards et demi-vie des principaux isotopes des éléments chimiques étudiés	63
Tableau 3. Quantités relatives des principaux AA observés dans le collagène osseux et la kératine du cheveu	68
Tableau 4. Synthèse des principaux travaux ayant étudié le taux de remodelage osseux chez l'adulte	72
Tableau 5. Taux de remodelage osseux en fonction des classes d'âge établies par la Commission Internationale de Protection Radiologique.....	73
Tableau 6. Compilation des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-alim}}$ et de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)-alim}}$ mesurées expérimentalement sur des porcs ayant une alimentation contrôlée	85
Tableau 7. Compilation des valeurs de $\Delta^{15}\text{N}_{\text{kér-alim}}$ mesurées expérimentalement sur différents substituts animaux dont l'alimentation a été contrôlée.....	91
Tableau 8. Synthèse des valeurs de $\Delta^{15}\text{N}_{\text{kér-alim}}$ mesurées expérimentalement sur des hommes dont l'alimentation a été contrôlée de façon plus ou moins fiable.....	92
Tableau 9. Valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ et concentrations moyennes en carbone des macronutriments composant les ressources alimentaires de référence.....	102
Tableau 10. Synthèse des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{bulk-glucides}}$ et de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{bulk-protéines}}$ des céréales.....	103
Tableau 11. Synthèse de la composition nutritionnelle et de la concentration (moyenne) en carbone des céréales.....	103
Tableau 12. Synthèse des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-protéines (muscle)}}$, de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-lipides}}$ et $\Delta^{15}\text{N}_{\text{col protéines (muscle)}}$ des herbivores/omnivores/carnivores d'Europe.....	104
Tableau 13. Synthèse bibliographique de la composition nutritionnelle et de la concentration (moyenne) en carbone des carcasses des animaux herbivores/omnivores terrestres	104
Tableau 14. Synthèse des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-protéines (muscle)}}$, de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-lipides}}$ et $\Delta^{15}\text{N}_{\text{col protéines (muscle)}}$ des poissons marins.....	105
Tableau 15. Synthèse de la composition nutritionnelle et de la concentration (moyenne) en carbone des poissons marins	106
Tableau 16. Caractéristiques propres aux différents aqueducs de Rome	121
Tableau 17. Synthèse des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques de la région de Rome	131
Tableau 18. Synthèse des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques d'Italie	133
Tableau 19. Synthèse des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques (tous confondus) par pays en Afrique, en Europe et en Arabie.....	135
Tableau 20. Synthèse des indicateurs et de leurs gammes de valeurs permettant d'évaluer la bonne conservation du collagène osseux.....	138
Tableau 21. Présentation des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ des échantillons des collections SSPM et Saint-Benoît mesurées à T0, T1, T2 et T2Bis.....	171
Tableau 22. Synthèse à l'échelle du site des critères de conservation du collagène et valeurs isotopiques ($\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$) des échantillons composant le corpus total d'une part et des échantillons dont le collagène est bien préservé d'autre part.....	173
Tableau 23. Tableau synthétique présentant à l'échelle du site les indicateurs de contrôle mesurés durant l'analyse isotopique de la phase carbonatée et les valeurs isotopiques ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$) du corpus total d'une part et des échantillons dont le collagène est bien préservé d'autre part.	179

Tableau 24. Tableau synthétique présentant à l'échelle du site les indicateurs de contrôle mesurés durant l'analyse isotopique de la phase carbonatée de l'émail et les valeurs isotopiques $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$ et $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ du corpus total.....	182
Tableau 25. Synthèse à l'échelle du site des [Sr] et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des phases apatitiques de l'os et de l'émail ainsi que des lixiviats des sédiments prélevés <i>in situ</i>	184
Tableau 26. Synthèse à l'échelle du site des critères de conservation de la kératine et des valeurs isotopiques ($\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$ et $\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$) des échantillons composant le corpus total d'une part et des échantillons dont le collagène est bien préservé d'autre part.....	185
Tableau 27. Résultats des analyses IRTF réalisées sur la phase carbonatée de 4 os d'animaux modernes	185
Tableau 28. Résultats des analyses IRTF réalisées sur la phase carbonatée d'un sous-échantillon de 30 sujets issus de 4 chambres différentes	188
Tableau 29. Présentation des âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ et $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ conventionnels (BP) et calibrés (cal BC/AD), des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$, ainsi que des différences d'âges $^{14}\text{C}_{\text{col-carb (os)}}$ de 5 individus issus des chambres X80/T16, X82/T18 et X83	190
Tableau 30. Estimation quantitative de la contamination en carbone de la phase carbonatée des échantillons osseux de quatre individus pour lesquels des âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ et $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ ont été obtenus....	208
Tableau 31. Estimations par FRUITS de la part relative des ressources alimentaires consommées et de la quantité de protéines et de glucides/lipides ingérés par les individus étudiés (n = 99)	221
Tableau 32. Listes des individus ayant consommés des ressources terrestres C ₄ ou dulcicoles d'après le modèle de Froehle <i>et al.</i> (2010) et les valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$	224
Tableau 33. Présentation des valeurs isotopiques et des schémas de mobilité des migrants	240
Tableau 34. Présentation des taux de migrants estimés selon différentes approches utilisant de concert les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ et les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	248
Tableau 35. Présentation des taux de migrants estimés selon différents référentiels et en recourant à un seul proxy isotopique	248
Tableau 36. Correction des âges ^{14}C cal BC/AD.....	259

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation de la catacombe SSPM	33
Figure 2. Installations préexistant à la catacombe sur le domaine « aux deux lauriers »	38
Figure 3. Plan de la catacombe SSPM	40
Figure 4. Plan du secteur central de la région X de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin (Rome)	44
Figure 5. Maçonnerie de la galerie X53 portant la fresque (à gauche) et restitution hypothétique des différents tableaux de cette dernière (à droite)	45
Figure 6. Vue d'ensemble des dépôts osseux de la chambre X84	48
Figure 7. Vue zénitale des 5 premiers individus inhumés dans la chambre X80/T16	49
Figure 8. Restitution du volume des corps des individus déposés dans la chambre X80/T16	50
Figure 9. Répartition par âge des individus au sein des différentes chambres	52
Figure 10. Répartition par sexe des individus au sein des différentes chambres	53
Figure 11. Prévalence des principales pathologies osseuses au sein des chambres X80/T16, X82/T18, X83 et X84.....	54
Figure 12. Modélisations de Craig <i>et al.</i> (2013).....	80
Figure 13. Modèle de Froehle <i>et al.</i> (2010) adapté par Eerkens <i>et al.</i> (2013)	89
Figure 14. Répartition théorique des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ des différents maillons de quatre chaînes alimentaires théoriques prenant place dans quatre écosystèmes distincts.....	97
Figure 15. Projection des résultats des analyses factorielles discriminantes obtenus pour trois variantes théoriques d'un régime alimentaire mixte C_3 /marine (Cluster 6) sur les clusters définis par Froehle <i>et al.</i> (2012).	100
Figure 16. Projection des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ des ressources alimentaires possiblement consommées par les sujets inhumés dans la catacombe SSPM.	108
Figure 17. Bilan des flux d'eau entrants et sortant chez l'homme.....	110
Figure 18. Distribution spatiale des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{ppt}}$ annuelles actuelle	113
Figure 19. Carte du Latium présentant les 11 aqueducs de Rome	122
Figure 20. Carte isoplèthe synthétisant la distribution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux météoriques en Europe, au Proche-Orient et en Afrique.	128
Figure 21. Distribution des valeurs de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques de la marge tyrrhénienne du Latium.....	130
Figure 22. Conservation différentielle des tissus étudiés à l'échelle des temps géologiques	140
Figure 23. Spectre typique d'un os dont les phases collagénique et apatitique sont bien préservées acquis en spectrométrie IRTF et présentant le mode de calcul de différents indices (IRSF, rapport CO_3/PO_4 et rapport Amidel/ PO_4).....	142
Figure 24. Photographies présentant les différents stades de classification des échantillons osseux à partir de leur apparence macroscopique.....	150
Figure 25. Colonne de filtration utilisée durant le protocole d'extraction du collagène.....	152
Figure 26. Schéma de la ligne d'extraction et de purification du CO_2 sous vide utilisée pour les échantillons de collagène osseux.....	154
Figure 27. Spectre RMN ^{13}C caractéristique d'un os moderne non lyophilisé avec attribution des pics de résonance des acides aminés du collagène et des carbonates de l'apatite.....	157
Figure 28. Spectre RMN ^1H caractéristique d'un os moderne non lyophilisé avec attribution des pics de résonance de l'eau, des lipides et du groupe hydroxyle de l'apatite.....	158

Figure 29. Schéma de la ligne d'extraction et de purification du CO ₂ sous vide utilisée pour les échantillons de bioapatite osseuse	159
Figure 30. Séparation du strontium sur colonnes chromatographiques échangeuses d'ions	161
Figure 31. Superposition des spectres RMN ¹³ C obtenus à T0, T1, T2 et T2Bis pour les échantillons de la collection SSPM	168
Figure 32. Superposition des spectres RMN ¹³ C obtenus à T0, T1, T2 et T2Bis pour les échantillons de la collection Saint-Benoît	168
Figure 33. Superposition des spectres RMN ¹ H obtenus à T0, T1, T2 et T2Bis pour les échantillons de la collection SSPM	170
Figure 34. Superposition des spectres RMN ¹ H obtenus à T0, T1, T2 et T2Bis pour les échantillons de la collection Saint-Benoît	170
Figure 35. Diagrammes en barre présentant les valeurs de δ ¹³ C _{carb (os)} et de δ ¹⁸ O _{carb (os)} des échantillons des collections SSPM et Saint-Benoît mesurées à T0, T1, T2 et T2Bis.	172
Figure 36. Projection des %C _{col} et des %N _{col}	173
Figure 37. Répartition des échantillons prélevés en fonction des chambres	175
Figure 38. Variabilité des valeurs de δ ¹³ C _{col} , de δ ¹⁵ N _{col} , de δ ¹³ C _{carb (os)} et de δ ¹³ C _{carb (émail)} des échantillons.	176
Figure 39. Variabilité des valeurs de δ ¹⁸ O _{carb (os)} et de δ ¹⁸ O _{carb (émail)} ainsi que des rapports ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr _{os} et ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr _{émail}	180
Figure 40. Relations entre les valeurs IRSF et les rapports CO ₃ /PO ₄ (A), entre les rapports CO ₃ /PO ₄ et Amidel/PO ₄ (B) et entre les valeurs IRSF et les rapports Amidel/PO ₄ (C) des échantillons issus de 4 chambres (n = 30).....	187
Figure 41. Séquence stratigraphique de la chambre X80/T16 avec seulement les squelettes échantillonnés en vue d'analyses isotopiques (vue Ouest) et projection des âges ¹⁴ C _{col} et ¹⁴ C _{carb (os)} calibrés (cal BC/AD).	191
Figure 42. Séquence stratigraphique de la chambre X82/T18 avec seulement les squelettes échantillonnés en vue d'analyses isotopiques (vue Ouest) et projection des âges ¹⁴ C _{col} et ¹⁴ C _{carb (os)} calibrés (cal BC/AD).	192
Figure 43. Séquence stratigraphique de la chambre X83 avec seulement les squelettes échantillonnés en vue d'analyses isotopiques (vue Sud) et projection des âges ¹⁴ C _{col} et ¹⁴ C _{carb (os)} calibrés (cal BC/AD).	193
Figure 44. Effets isotopiques enregistrés à T1, T2 et T2Bis normalisés par rapport à T0 pour les échantillons des collections SSPM (A) et Saint-Benoît (B)	200
Figure 45. Comparaison inter-site des rendements de collagène mesurés sur les ossements humains provenant du Latium (Italie).....	211
Figure 46. Comparaison inter-site des valeurs IRSF calculées sur les ossements humains provenant de différentes régions de l'Empire romain	212
Figure 47. Projection des valeurs de δ ¹³ C _{col} et de δ ¹³ C _{carb (os)} des sujets sur le modèle de Kellner et Schoeninger (2007) adapté par Froehle <i>et al.</i> (2010) puis par Eerkens <i>et al.</i> (2013).	215
Figure 48. Pourcentages de protéines ingérées d'une part et de glucides/lipides ingérés d'autres part estimés via le modèle développé par Kellner et Schoeninger (2007) modifié par Froehle <i>et al.</i> (2010) et adapté par Eerkens <i>et al.</i> (2013)	216
Figure 49. Projections des résultats des analyses factorielles discriminantes obtenus pour les individus étudiés sur les clusters définis par Froehle <i>et al.</i> (2012) correspondant à cinq types de régimes alimentaires différents.	217
Figure 50. Projection des valeurs de δ ¹³ C et de δ ¹⁵ N des individus inhumés dans la région X de la catacombe SSPM (phase collagénique) et de celles des ressources alimentaires ayant potentiellement été consommées par les sujets étudiés (mesures <i>bulk</i> pour les céréales et le <i>garum</i> , mesures réalisées	

sur le collagène osseux pour les animaux). Les boîtes représentent les limites inférieures et supérieures de chaque variable projetée ici et constituent les clusters de ressources alimentaires. 218

Figure 51. Estimations obtenues en sortie des simulations stochastiques réalisées par FRUITS pour le scénario 1 *sans* hiérarchisation des ressources alimentaires et faites pour la population SSPM totale (n =99). À gauche : distribution et densité associée des probabilités des ressources alimentaires consommées. À droite : intervalle de crédibilité associé à chacune des ressources alimentaires consommées. 222

Figure 52. Estimations obtenues en sortie des simulations stochastiques réalisées par FRUITS pour le scénario 1 *avec* hiérarchisation des ressources alimentaires et faites pour la population SSPM totale (n =99). À gauche : distribution et densité associée des probabilités des ressources alimentaires consommées. À droite : intervalle de crédibilité associé à chacune des ressources alimentaires consommées. 222

Figure 53. Estimations obtenues en sortie des simulations stochastiques réalisées par FRUITS pour le scénario 2 *avec* hiérarchisation des ressources alimentaires et faites pour la population SSPM totale (n =99). À gauche : distribution et densité associée des probabilités des ressources alimentaires consommées. À droite : intervalle de crédibilité associé à chacune des ressources alimentaires consommées. 224

Figure 54. Estimations obtenues en sortie des simulations stochastiques réalisées par FRUITS pour le scénario 3 *avec* hiérarchisation des ressources alimentaires et faites pour la population SSPM totale (n =99). À gauche : distribution et densité associée des probabilités des ressources alimentaires consommées. À droite : intervalle de crédibilité associé à chacune des ressources alimentaires consommées. 226

Figure 55. Diagramme présentant les valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}(\text{émail-os})$ de l'ensemble des sujets (n = 123). 228

Figure 56. Représentation des composantes 1 et 2 de l'ACP 1 générée à partir des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ des populations de la région X et I de la catacombe SSPM (Cette étude et Nitsch 2012), de la région Libérienne de la catacombe de Saint Calixte (Rutgers *et al.* 2009), et des nécropoles de Casal Bertone et de Castellaccio Europarco (Killgrove 2010 ; Killgrove et Tykot 2013). 230

Figure 57. Représentation des composantes 1 et 2 de l'ACP 2 générée à partir des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}(\text{os})$ des populations de la région X de la catacombe SSPM (Cette étude) et des nécropoles de Casal Bertone et de Castellaccio Europarco (Killgrove 2010 ; Killgrove et Tykot 2013). 231

Figure 58. Projections des résultats des analyses factorielles discriminantes obtenus pour les migrants et les résidents romains sur le modèle de Froehle *et al.* (2012). 238

Figure 59. Carte présentant les possibles régions où le sujet US215 Mand1 aurait vécu à l'âge de 3-8 ans dans la corne de l'Afrique sur la base à la fois de sa valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ estimée à partir de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}(\text{émail})$ et de son rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ considérés de concert. 243

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Captures d'écran du logiciel FRUITS développé par R. Fernandes et al. (2014) et utilisé dans le cadre de ce travail-ci pour réaliser nos approches bayésiennes. De A à G : Exemples de la procédure suivie et des paramètres utilisés pour tester le scénario 1 avec hiérarchisation en amont des ressources alimentaires entre elles.....	310
Annexe 2. Distribution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations annuelles modernes en Europe d'après Bowen et Revenaugh (2003) et Bowen <i>et al.</i> (2005).	311
Annexe 3. Distribution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations annuelles modernes au Moyen-Orient d'après Bowen et Revenaugh (2003) et Bowen <i>et al.</i> (2005).	312
Annexe 4. Distribution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations annuelles modernes en Afrique d'après Bowen et Revenaugh (2003) et Bowen <i>et al.</i> (2005).	313
Annexe 5. Présentation des vestiges humains prélevés ainsi que des données bioarchéologiques associées.....	314
Annexe 6. Présentation des différences de valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ à T0, T1, T2 et T2/Bis mesurées sur 5 échantillons de la catacombe SSPM et 5 autres du cimetière Saint-Benoît.....	320
Annexe 7. Résultats des analyses isotopiques réalisées sur le collagène de l'os, la phase carbonatée de l'os et celle de l'émail	321
Annexe 8. %Col à l'échelle du site ainsi qu'en fonction des chambres funéraires, des catégories d'os prélevés et des apparences macroscopiques des os	326
Annexe 9. %C _{col} à l'échelle du site ainsi qu'en fonction des chambres funéraires, des catégories d'os prélevés et des apparences macroscopiques des os	326
Annexe 10. %N _{col} à l'échelle du site ainsi qu'en fonction des chambres funéraires, des catégories d'os prélevés et des apparences macroscopiques des os	327
Annexe 11. Rapports C/N à l'échelle du site ainsi qu'en fonction des chambres funéraires, des catégories d'os prélevés et des apparences macroscopiques des os	327
Annexe 12. Rapports PCO ₂ /Masse des échantillons d'os à l'échelle du site ainsi qu'en fonction des chambres funéraires, des catégories d'os prélevés et des apparences macroscopiques des os	328
Annexe 13. Résultats des analyses isotopiques réalisées sur la phase kératinique des cheveux.....	328
Annexe 14. Présentation des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$ des individus (n = 99)	329
Annexe 15. Projection des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ des échantillons de collagène bien préservé (n = 99).	330
Annexe 16. Estimations de la part relative que représente chaque ressource alimentaire consommée dans le régime alimentaire et de la quantité de protéines et de glucides/lipides ingérés par les individus de la catacombe SSPM.	332
Annexe 17. Estimations de la part relative que représente chaque ressource alimentaire consommée dans le régime alimentaire et de la quantité de protéines et de glucides/lipides ingérés par les individus de la catacombe SSPM.	334
Annexe 18. Estimations de la part relative que représente chaque ressource alimentaire consommée dans le régime alimentaire et de la quantité de protéines et de glucides/lipides ingérés par les individus de la catacombe SSPM.	336
Annexe 19. Estimations de la part relative que représente chaque ressource alimentaire consommée dans le régime alimentaire et de la quantité de protéines et de glucides/lipides ingérés par les individus de la catacombe SSPM.	338
Annexe 20. Régions extra-romaines d'où seraient originaires les 8 sujets ayant eu un schéma de mobilité de type I ou I-Bis présentés dans la Section V, 4.2.1, a.....	339

Annexe 21. Régions extra-romaines d'où seraient originaires les 6 sujets ayant eu un schéma de mobilité de type I ou I-Bis présentés dans la Section V, 4.2.1, b.	340
Annexe 22. Régions extra-romaines d'où seraient originaires les 3 sujets ayant eu un schéma de mobilité de type I ou I-Bis présentés dans la Section V, 4.2.1, c.	341
Annexe 23. Régions extra-romaines d'où seraient originaires les 4 sujets ayant eu un schéma de mobilité de type I ou I-Bis présentés dans la Section V, 4.2.1, d.	342
Annexe 24. Régions extra-romaines où auraient vécu les 2 sujets ayant eu un schéma de mobilité de type II ou II-Bis présentés dans la Section V, 4.2.2, a.	343
Annexe 25. Régions extra-romaines où aurait vécu le sujet ayant eu un schéma de mobilité de type II ou II-Bis présenté dans la Section V, 4.2.2, b.	344
Annexe 26. Régions extra-romaines où auraient vécu les 2 sujets ayant eu un schéma de mobilité de type II ou II-Bis présentés dans la Section V, 4.2.2, c.	345
Annexe 27. Régions extra-romaines où aurait vécu temporairement le sujet ayant eu un schéma de mobilité de type III ou III-Bis présenté dans la Section V, 4.2.3, a.	346
Annexe 28. Régions extra-romaines où auraient vécu temporairement les 2 sujets ayant eu un schéma de mobilité de type III ou III-Bis présentés dans la Section V, 4.2.3, b.	347

INTRODUCTION

La catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin (III^e-IV^e s. ap. J.-C.), située au sud-est de Rome, est l'une des plus grandes catacombes de la ville. Il y a un peu plus de dix ans, de nouvelles salles ont été découvertes dans la région X du secteur central, mettant au jour des ensembles sépulcraux inédits. Les différentes investigations archéo-anthropologiques ont pu mettre en évidence qu'il s'agissait de dépôts pluriels complexes de centaines de corps rassemblés dans des chambres funéraires, à même le sol, faisant référence à une ou plusieurs crises de mortalité. L'indigence des vestiges squelettiques à l'état macroscopique a limité les possibilités d'identifier biologiquement cette population. Les profils démographiques classiques de mortalité étant rendus difficiles à établir en raison d'une caractérisation générale du sexe limitée, il a été également difficile de caractériser cette crise de mortalité. Les pratiques funéraires de ces nouvelles salles étant inédites pour cette période à Rome, l'hypothèse de l'origine exogène de ces individus a vite été proposée. Les investigations archéo-anthropologiques classiques n'ayant pas permis de répondre directement à ces questions de caractérisation de la population concernée, d'autres moyens d'investigation ont été envisagés.

Les analyses isotopiques de notre travail se proposent ainsi d'accéder à de nouvelles informations sur la mobilité de ces individus, tant dans leur enfance que dans les dernières années de leur vie, mais également sur leur alimentation. Il s'agit d'un outil précieux dans le cadre de l'analyse de restes archéologiques permettant d'approcher au plus près des histoires de vie et de répondre à de nombreuses questions tant d'ordre biologique qu'archéologique. Les individus de la région X de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin offrent la possibilité de retracer à travers une fenêtre étroite un évènement bien spécifique par leurs déplacements éventuels et leur alimentation et à des moments précis de leur vie. Outre l'analyse à l'échelle individuelle, cette étude devrait également permettre de confronter plus précisément nos données aux connaissances sur l'alimentation et les modalités de mobilité des populations de la cité éternelle au début de notre ère.

Nous avons ainsi procédé à l'analyse des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$, de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb(os)}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ (émail), sur un échantillon de 130 individus (129 dents, 128 fragments osseux et 11 mèches de cheveux) provenant de six différentes chambres funéraires de la région X, secteur central de la catacombe. Parmi ces individus, 38 ont également fait l'objet d'analyse des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ (38 fragments osseux, 5 dents).

Nous avons dans un premier temps vérifié la conservation biochimique des tissus nécessaire à l'obtention des données isotopiques. Cette analyse préalable est nécessaire pour valider nos résultats et les interprétations que l'on a pu en faire. Nous avons ensuite recouru à des référentiels de valeurs isotopiques d'aliments potentiellement consommés par les individus échantillonnés. Nous avons enfin analysé et comparé les modèles interprétatifs fournis par la littérature. L'objectif était de déterminer parmi eux les modèles les plus précis et de les utiliser ensuite de façon complémentaire pour établir les reconstructions paléalimentaires les plus proches de la réalité. Nous avons ainsi pu quantifier la part respective des différentes ressources consommées et appréhender avec une plus grande sensibilité la variabilité intra-populationnelle des régimes alimentaires de nos sujets d'étude.

Pour appréhender les schémas de mobilité, nous avons effectué d'une part une étude descriptive intra-individuelle puis intra-populationnelle de ces données. D'autre part, nous avons mis en place une approche comparative de ces dernières aux référentiels régionaux dont nous disposons ou que nous avons construits d'après de nombreuses données sur le substrat, les pratiques alimentaires ou encore les infrastructures hydrauliques de l'Empire romain afin d'avoir la mesure la plus proche possible de la réalité antique. Cette démarche a été appliquée indépendamment d'abord aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ et ensuite aux rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$. Une comparaison finale des différents proxys isotopiques a enfin été systématiquement entreprise afin d'appréhender si la population inhumée dans la région X de la catacombe des Saints Pierre et Marcellin se singularise par rapport aux données sur les autres populations (sub-)contemporaines de Rome ou si au contraire les données se superposent parfaitement.

Finalement, nos résultats ont été mis en perspective avec les données archéo-anthropologiques de façon à apporter des éléments de réponse à des questionnements archéologiques plus larges sur le fonctionnement même du site catacombal et l'identification de la population inhumée. En effet, ceci est la première étude isotopique sur un dépôt pluriel de ce type à Rome pour l'Antiquité, qui s'attache non seulement à analyser les histoires de vie des individus, mais également à apporter des éléments de compréhension par le prisme de la population sur le site lui-même.

Ce travail est divisé en cinq chapitres. Le premier chapitre porte sur la contextualisation archéologique où le milieu physique, le cadre chronologique et culturel, ainsi que la problématique et les objectifs sont définis. Le second chapitre explore les concepts théoriques de l'approche archéo-biogéochimique pour étudier les régimes alimentaires et les schémas de mobilité des sujets. Il s'attache également à faire une présentation des référentiels isotopiques et des modèles interprétatifs qui seront utilisés dans ce travail. Le troisième chapitre débute par une synthèse des différentes données relatives à la composition du corpus d'étude. La méthodologie y est ensuite présentée avec la description du prélèvement en laboratoire, du prétraitement chimique et de l'analyse

spectrométrie. Le quatrième chapitre expose les résultats obtenus concernant la résonance magnétique nucléaire (RMN), ceux relatifs à la préservation des vestiges squelettiques, puis les résultats obtenus par spectroscopie IRTF. Le cinquième et dernier chapitre discute des résultats obtenus en reprenant les objectifs de notre étude posés initialement ; la validité du protocole est tout d'abord exposée, suivie d'une discussion sur la préservation des signaux isotopiques biogéniques. Les questions d'alimentation et de mobilité posées initialement à ce travail sont enfin discutées, et permettent également de proposer des éléments de réponse quant à l'identification des défunts inhumés dans la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin.

CHAPITRE I.

LA CATACOMBE DES SAINTS PIERRE-ET-MARCELLIN : ÉTAT DES RECHERCHES ARCHEO-ANTHROPOLOGIQUES ET PROBLEMATISATION

Les sépultures plurielles ont pendant longtemps fait l'objet de peu d'investigations en contexte archéologique, et depuis une vingtaine d'années, de nouvelles découvertes viennent étoffer le corpus et surtout les discussions scientifiques qui l'entourent (Castex et Cartron 2007). La catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin (SSPM) s'inscrit dans le cadre de cette dynamique de recherche avec un ensemble de sépultures multiples hors du commun dans les chambres de la région X, tant dans le contexte catacombal romain que de façon générale en archéologie funéraire. Ce site revêt donc un intérêt majeur pour approfondir la connaissance des crises de mortalité du passé à large échelle. Un état des lieux préalable nous paraît important pour replacer le lecteur dans le contexte de la mise en place de ces ensembles sépulcraux inédits. Celui-ci sera dressé en s'appuyant sur les travaux de J. Guyon, et plus précisément sur sa thèse publiée en 1987, un ouvrage incontournable pour qui s'intéresse à la catacombe SSPM.

1. LE TERRITOIRE « AUX DEUX LAURIERS »

1.1. À travers le temps et l'espace

Au troisième milliaire de l'antique *Via Labicana* dont des tronçons ont été mis au jour successivement en 1687 par G. Ciampini, en 1948 par B.-M. Felletti Maj et en 1977 par J. Guyon lors de sondages ou de fouilles archéologiques (Ciampini 1693 ; Felletti Maj 1948 ; Guyon 1987) sied la catacombe *ad (ou inter) duas lauros*, littéralement la catacombe « aux deux lauriers », reconnue plus fréquemment sous une autre appellation, à savoir la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin (SSPM) (Figure 1). Pour appréhender le cadre topographique dans lequel celle-ci s'inscrit aux premiers siècles de notre ère et mesurer empiriquement la densité d'occupation du territoire avant la naissance même de la nécropole susdite, nous présenterons ici un état précatacombal des lieux.

C'est donc situé à 4,5 km au sud-est de la cité dite Éternelle, dans un paysage que les historiens modernes tendent à identifier comme caractéristique des faubourgs de la Rome impériale et à éloigner

des images d'Épinal de la campagne romaine façonnées par les historiens romantiques du XVIII^e s., que notre terrain d'étude s'établit (Figure 1). Le toponyme *ad duas lauros* qui caractérise ce terrain ne lui est point propre mais qualifie dans les faits un territoire bien plus vaste délimité au nord et au sud par les *Viae Praenestina* et *Latina* et à l'ouest par la porte Sessorienne appelée aussi porte Majeure (Figure 1). Le côté est, quant à lui, est plus incertain et sujet à débat. Nous n'entrerons pas ici dans les détails de la controverse d'ordre sémantique à laquelle notre connaissance limitée du latin n'apporterait rien de bien nouveau, mais il nous paraît intéressant de mentionner qu'à l'origine de celle-ci se trouve un ouvrage, le *Liber Pontificalis*, daté du V^e s. ap. J.-C., plaçant au *mons Gabus* le terme oriental dudit territoire. Cette localité tombée dans l'oubli a été rapprochée par les copistes médiévaux et modernes du Mont Cavo dans les Monts Albains. Les latinistes contemporains, plus circonspects, ont, pour leur part, eu une autre lecture et ont parfois rapproché ce *mons* du tumulus de l'empereur Alexandre Sévère également connu sous le nom de *Monte del Grano* (Figure 1). Selon ces bornes, le territoire *ad duas lauros* s'étirerait *a minima* sur 1000 ha. Avec une superficie d'environ 4,5 ha, notre terrain d'étude ne représenterait donc *in fine* qu'une infime parcelle de cet immense domaine (Figure 1). C'est probablement entre le II^e et le IV^e s. ap. J.-C. que l'empereur rentre en possession de ce domaine. Ce dernier se pare alors d'un nouveau toponyme, le *fundus laurentum*, concurrent dans les sources textuelles antiques et médiévales du précédent. Ni l'*Apologeticum* de Tertullien écrit à la toute fin du II^e s. ap. J.-C., ni le *Liber Pontificalis* sus-évoqué dont nous savons peu de choses au sujet de son chroniqueur, ne nous renseignent cependant sur l'état des lieux avant l'établissement de la catacombe des Saints Pierre et Marcellin. Un recours aux données archéologiques publiées pour prendre la mesure de l'occupation du site durant les tous premiers siècles de notre ère s'avère donc indispensable.

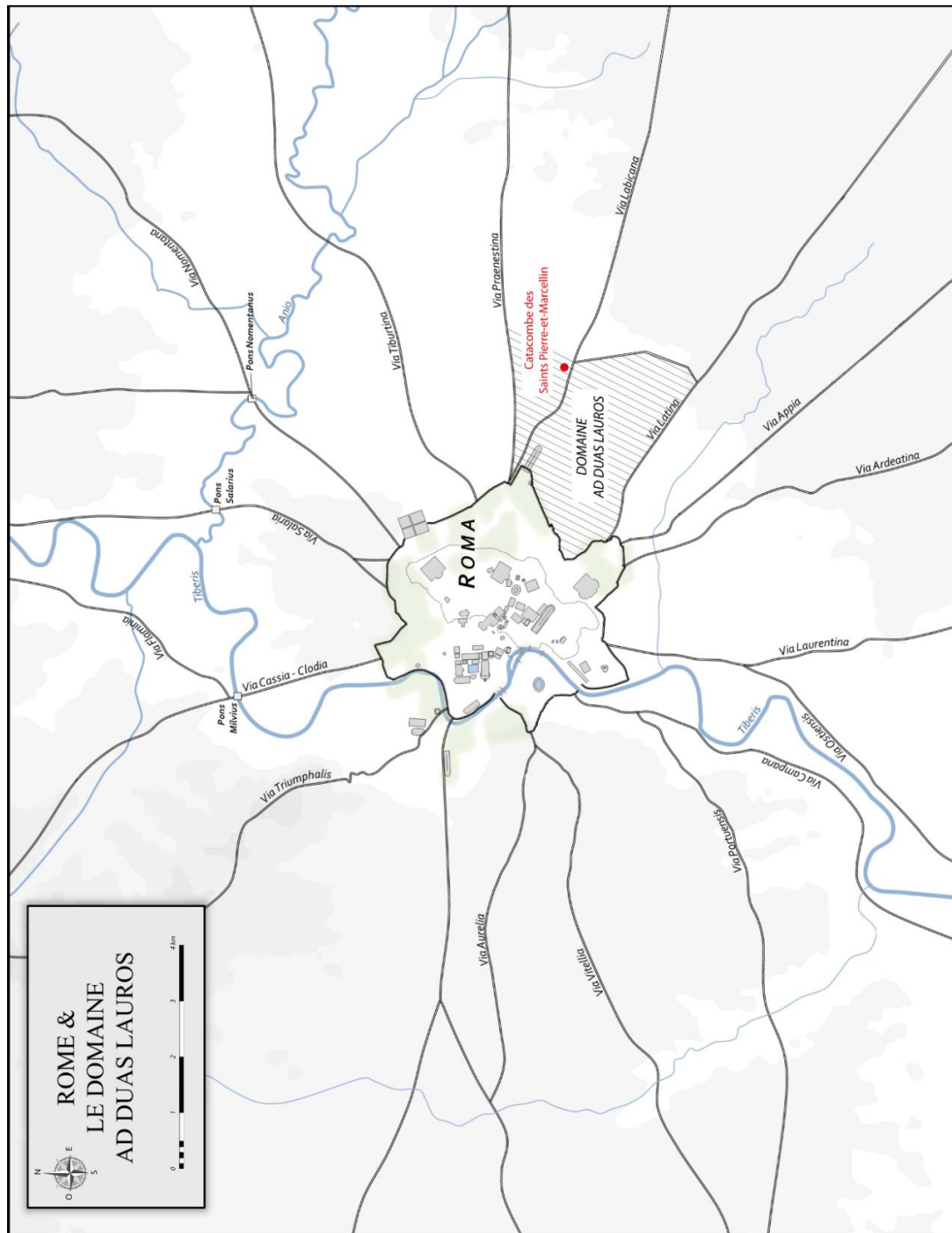


Figure 1. Localisation de la catacombe SSPM
Modifié d'après Guyon (1987)

1.2. Installations funéraires en surface

Les fouilles archéologiques entreprises en 1948 par B.-M. Felletti Maj et en 1977 par J. Guyon ont révélé l'existence de part et d'autre de cette antique voie diverses installations funéraires (Felletti Maj 1948 ; Guyon 1987). Deux lotissements funéraires composés chacun de trois mausolées arasés jusqu'au niveau de leurs fondations ont ainsi été mis au jour aux abords immédiats de ladite voie

(Carrés I9 et I10, Figure 2). Ces édifices de taille vraisemblablement modeste auraient fonctionné de façon contemporaine au regard de leurs factures relativement standardisées. L'appareil, ou *opus*, utilisé pour construire ces monuments funéraires permettrait en outre de dater ces derniers de la fin de la République ou du début de l'Empire. Aucun dépôt osseux ne semble avoir eu lieu en ces mausolées. Il en a été déduit que ces installations avaient été bâties dans le but de recevoir des urnes emplies des restes passés par le feu de défunts (Felletti Maj 1948 ; Guyon 1987). Entourant de tous côtés les sépulcres localisés au nord de la voie, une nécropole à incinération a par ailleurs été mise en évidence (Carré I9, Figure 2). Au total, 13 urnes cinéraires ont été découvertes aux environs des mausolées. L'uniformité des urnes utilisées et des modes de dépôts de celles-ci sembleraient plaider en faveur d'une même période d'utilisation, relativement limitée dans le temps, de la nécropole. Les relations stratigraphiques existantes entre les fondations des mausolées et les urnes, de même que leurs agencements, viendraient appuyer l'hypothèse d'un fonctionnement plus ou moins synchrone des lotissements funéraires susdits et de la nécropole à incinération. La découverte en contexte stratigraphique de tessons de céramiques arétines et d'une pièce de monnaie de l'an 7 av. J.-C. permettrait enfin de placer ces dépôts autour du début de notre ère. L'emprise relativement limitée des fouilles menées dans ce secteur n'a certainement pas permis de révéler l'ensemble des installations funéraires bordant la *Via Labicana* mais il peut être aisément extrapolé que tout du long de cette voie se répartissaient des structures similaires.

Plus au nord, sur le plateau surplombant la *Via Labicana* et les précédentes installations ont été reconnues d'autres constructions à vocation funéraire lors d'explorations et de fouilles archéologiques engagées au lendemain de la seconde Guerre Mondiale par J. Rodenbeck et P. Ferrua et de 1980 à 1982 par J. Guyon (Ferrua 1949 ; Rodenbeck 1950 ; Guyon 1987). Le monument le plus imposant identifié en ce lieu est un mausolée construit sur deux niveaux (Carré F7, Figure 2). S'il ne reste rien de l'étage, le sous-sol, lui, s'est avéré correctement conservé sur une hauteur de 1,4 à 2 m. Localisé à l'écart de la Labicane, à environ une trentaine de mètres, le mausolée se distingue des précédents par son orientation quelque peu atypique. En effet, sa façade principale tournée vers l'ouest et non vers la *Via Labicana* suggérerait qu'un chemin dont on a perdu la trace desservait originellement l'édifice par l'ouest. L'ornementation (peintures et mosaïques) ainsi que l'appareil en brique de la crypte permettrait de dater cette construction de la fin du II^e s. ap. J.-C. ou du premier tiers du III^e s. ap. J.-C. Trois sépultures ont été identifiées au sein de ce mausolée et une quatrième a été reconnue à l'extérieur du monument le long de l'escalier d'accès (Guyon 1987). Un second édifice identifié comme étant un *columbarium* de taille réduite a également pu être localisé sur le plateau à une centaine de mètres de la voie romaine (Carré C4, Figure 2). Aujourd'hui détruit, peu de choses nous sont connues sur ce dernier. Il semblerait toutefois probable que celui-ci soit d'une époque antérieure à la création du réseau catacombal. Enfin, de nombreux matériaux de remploi découverts

dans les fondations de monuments datant du IV^e s. ap. J.-C. proviendraient de constructions funéraires plus anciennes de mêmes types que toutes celles évoquées précédemment. L'ensemble de ces éléments laisserait ainsi à penser qu'une nécropole païenne était implantée sur le plateau surplombant la *Via Labicana* entre la fin du I^{er} s. av. J.-C. et la fin du III^e s. ap. J.-C.

Par ailleurs, probablement en lieu et place, ou peut-être un peu plus à l'est, de ce qui sera plus tard un vaste complexe monumental fondé à l'initiative de Constantin I^{er} se trouvait une seconde nécropole, celle des *equites singulares augusti*, des cavaliers d'élite dévoués à la protection exclusive de l'empereur (Figure 2). Cependant, aucune découverte archéologique ne témoigne de l'enclos funéraire, ou même des sépultures de cette nécropole. Seuls des fragments de stèles funéraires dédicacées découverts en nombre dans les fondations des monuments postérieurs où ils servirent comme blocage attesteraient de leur existence. L'étude épigraphique et stylistique des stèles funéraires ainsi que l'étude onomastique des gentilices portés par les *equites singulares* permettraient de faire remonter au début du II^e s. ap. J.-C. la création de la nécropole et d'envisager un terme à son utilisation à la fin du III^e s. ap. J.-C. voire possiblement au début du IV^e s. ap. J.-C. Selon Guyon (1987), l'abandon, ou plutôt la destruction, de la nécropole serait à mettre en parallèle avec l'annihilation par Constantin I^{er} au début du IV^e s. ap. J.-C. des casernements au Latran de cette même unité d'élite. En effet, pour avoir choisi le mauvais camp dans la lutte opposant Maxence à Constantin, l'unité aurait été dissoute et aurait vu ses installations réduites à néant sur ordre du triomphateur.

De plus, différents vestiges – pour l'essentiel des fondations – d'anciens bâtiments ou enclos probablement funéraires, mais aussi possiblement agricoles ou industriels, pris dans les soubassements des constructions postérieures ou visibles depuis le cimetière souterrain ont pu être mis au jour par J. Guyon au cours des campagnes de fouilles qu'il a menées ou de l'exploration du réseau catacombal à laquelle il a procédé durant les années 1970 et 1980 (Carrés C2-3, F3 et G7, Figure 2). Une partie de ces vestiges se localisait au sommet du talus surplombant la *Via Labicana*. D'autres se situaient bien plus au nord. D'une façon générale, ces reliquats de monuments seraient antérieurs au développement de la catacombe puisque celle-ci semble prendre soin de les éviter ou de les contourner sans jamais les rencontrer.

Ainsi, entre la fin du I^{er} s. av. J.-C. et la fin du III^e s. ap. J.-C., la parcelle du domaine « aux deux lauriers » où s'établira et se déploiera *a posteriori* la catacombe SSPM s'avère densément occupée par diverses installations funéraires regroupées en trois nécropoles distinctes mais dont les limites restent floues (Figure 2).

1.3. Exploitation du sous-sol

Outre les sépulcres, tombes et dépôts installés en bordure de route ou sur le plateau, le sous-sol du territoire *ad duas lauros* a fait l'objet de par ses caractéristiques géologiques d'une intense exploration et exploitation, à l'instar de la zone appio-ardéatine voisine. Vestige de cette activité industrielle, l'immense arénaire – *i.e.* carrière souterraine – dont était extraite la pouzzolane, cette roche que les bâtisseurs romains utilisèrent pour confectionner leurs mortiers, est situé plus profondément que le niveau où rayonnent les galeries de la catacombe, là où il ne rencontre qu'inopinément le réseau cémétériel (Carrés A4, A6, F5 et E8, Figure 2). Ces complexes souterrains étant l'un l'autre quasiment autonomes, il s'avère, de fait, très délicat d'établir qui des deux s'est développé en premier en ce lieu. Quelques indices toutefois ont permis à Guyon (1987) d'envisager l'antériorité de certaines ramifications de l'arénaire. Deux salles appartenant à l'arénaire semblent notamment avoir limité l'extension du réseau cémétériel vers l'ouest (carrés A4 et A6, Figure 2), indiquant potentiellement la préexistence de ces substructures. De même, une large salle presque entièrement remblayée appartenant également à l'arénaire aurait restreint le prolongement d'un certain nombre de galeries de la catacombe vers le sud (carré E8, Figure 2), suggérant une fois de plus que la carrière de pouzzolane aurait préexisté à la catacombe. En outre, un ensemble de petites salles enchevêtrées les unes aux autres et localisées au cœur du réseau cémétériel semblerait avoir été un obstacle au développement de la catacombe dans ce secteur (carré F5, Figure 2). Ceci pourrait indiquer la possible antériorité de ces creusements quelque peu anarchiques pouvant faire partie de l'arénaire sous-jacent.

Enfin, ce recensement des installations préexistantes au réseau catacombal serait incomplet si nous n'évoquions pas les ouvrages hydrauliques excavés sur cette parcelle de terre. Ces ouvrages relativement nombreux et répartis principalement dans la moitié sud de ladite parcelle traduisent la présence sur le domaine *ad duas lauros* d'une ou plusieurs propriétés agricoles (Figure 2). Contrairement à l'arénaire, ces ouvrages se positionnent à la même cote que les galeries du réseau cémétériel. Nombre d'entre eux ont d'ailleurs été réaménagés par les *fossores*, ouvriers en charge du creusement et de l'entretien des galeries de la catacombe, pour être utilisés à des fins funéraires. Aussi, l'antériorité de ces ouvrages par rapport au réseau catacombal ne fait aucun doute. D'une façon générale, deux types d'ouvrages ont été reconnus sur le site, à savoir d'une part des citernes pouvant prendre des formes et des dimensions très diverses, et d'autre part des tunnels appelées *cuniculi* reliant généralement ces citernes entre elles. Ces aménagements découverts çà et là dans le réseau cémétériel auraient pu selon Guyon (1987) être jadis interconnectés de façon à former un vaste système hydraulique (Figure 2). Ce système, ou à défaut ces différents ouvrages, aurait été abandonné

préalablement à l'établissement en ce lieu du réseau cémétériel souterrain, c'est-à-dire au plus tard dans la seconde moitié du III^e s. ap. J.-C.

1.4. État des lieux précatacombale

En somme, le territoire « aux deux lauriers » se révèle être densément occupé entre la fin du I^{er} s. av. J.-C. et la fin du III^e s. ap. J.-C. Se côtoyaient en ce lieu des nécropoles, des infrastructures agricoles et des exploitations industrielles. Bien que la stricte contemporanéité de toutes ces installations ne puisse être prouvée, il est certain que celles-ci ont profondément et durablement marqué le paysage et le sous-sol du site. Au regard des différents éléments que nous venons d'exposer, se dévoile l'image d'une multitude de *villae* et d'exploitations agricoles bordant la *Via Labicana* et composant au mieux avec les activités industrielles tirant profit de la pouzzolane extirpée du sous-sol et avec les nombreuses servitudes liées aux installations funéraires.

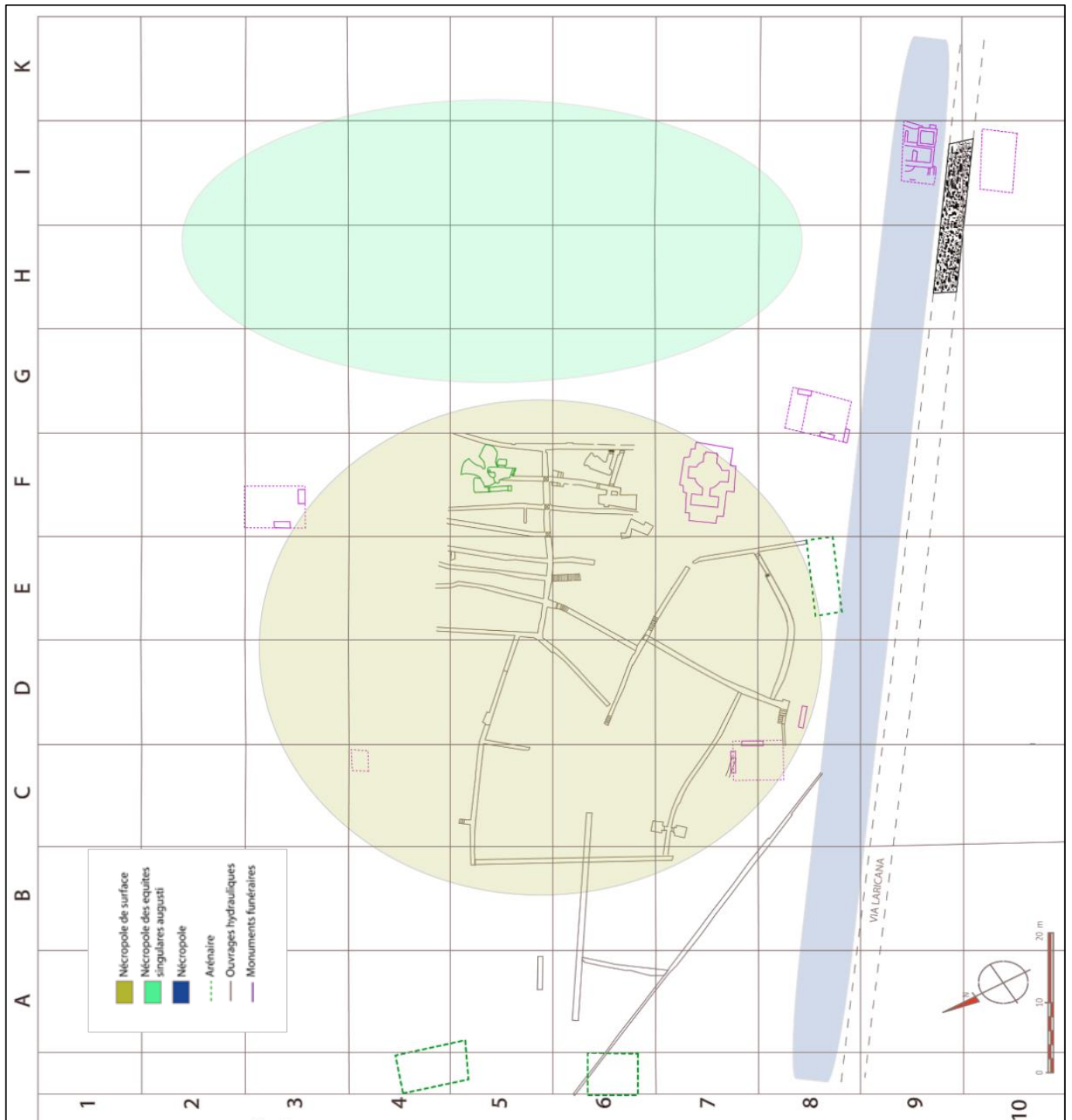


Figure 2. Installations préexistant à la catacombe sur le domaine « aux deux lauriers »
Modifié d'après Guyon (1987)

2. LE CIMETIERE SOUTERRAIN

2.1. Genèse

La naissance du cimetière souterrain chrétien sur le domaine *ad duas lauros* remonterait au début de la période connue sous le nom de « Petite Paix de l'Église », soit vers 260/270 ap. J.-C. Les régions les plus anciennes du cimetière seraient les régions X, Y, I, Z et B (Figure 3). Originellement autonomes, ces régions se seraient progressivement développées de façon isolée jusqu'à s'interconnecter pour former le noyau primitif du réseau catacombal. Malgré le peu d'indices archéologiques, Guyon (1987) émet l'hypothèse que les régions X, Y, I et Z purent s'établir et s'étendre à partir d'anciens ouvrages hydrauliques voire occasionnellement d'anciennes salles de l'arénaire tombées alors en désuétude (Figures 2 et 3). Cette réutilisation d'installations préexistantes n'aurait rien eu d'exceptionnelle. D'autres catacombes, à l'instar de celle de Priscille (Tolotti, 1978), auraient connu en effet une telle genèse. Le réseau cémétériel primitif du domaine *ad duas lauros* ressembla peu ou prou aux autres catacombes créées par ailleurs. Il s'organisa en effet en galeries (*i.e. ambulacra*) dans les parois desquelles furent aménagées des niches funéraires sommaires (*i.e. loculi*) ou plus élaborées (*i.e. arcosolia*). Le long des galeries s'ouvrirent ici et là des chambres funéraires (*i.e. cubicula*) dont les murs étaient lotis des mêmes niches qu'il était possible de rencontrer dans les galeries (Guyon 1987 ; Fiocchi Nicolai *et al.* 1999 ; Rutgers 2000 ; Giuliani 2008). À l'orée du IV^e s. ap. J.-C., le réseau cémétériel conta probablement déjà près de 2 km de galeries et une trentaine de chambres funéraires. Avec un total estimé d'environ 11 000 sépultures, cette nécropole est certainement au tout début du IV^e s. ap. J.-C. l'un des plus grands cimetières de la communauté chrétienne romaine. Outre le commun des mortels, il accueillit à la fin du III^e s. ap. J.-C. et durant les deux premières décades du IV^e s. ap. J.-C. ses premiers martyrs, à savoir les Saints éponymes Pierre et Marcellin, respectivement un vieil exorciste et un jeune prêtre, ainsi que ceux dénommés les Quatre Couronnés. Les premiers furent inhumés dans la région probablement la plus ancienne du cimetière, c'est-à-dire la région X. Les seconds furent déposés dans la région Y (Guyon 1987).

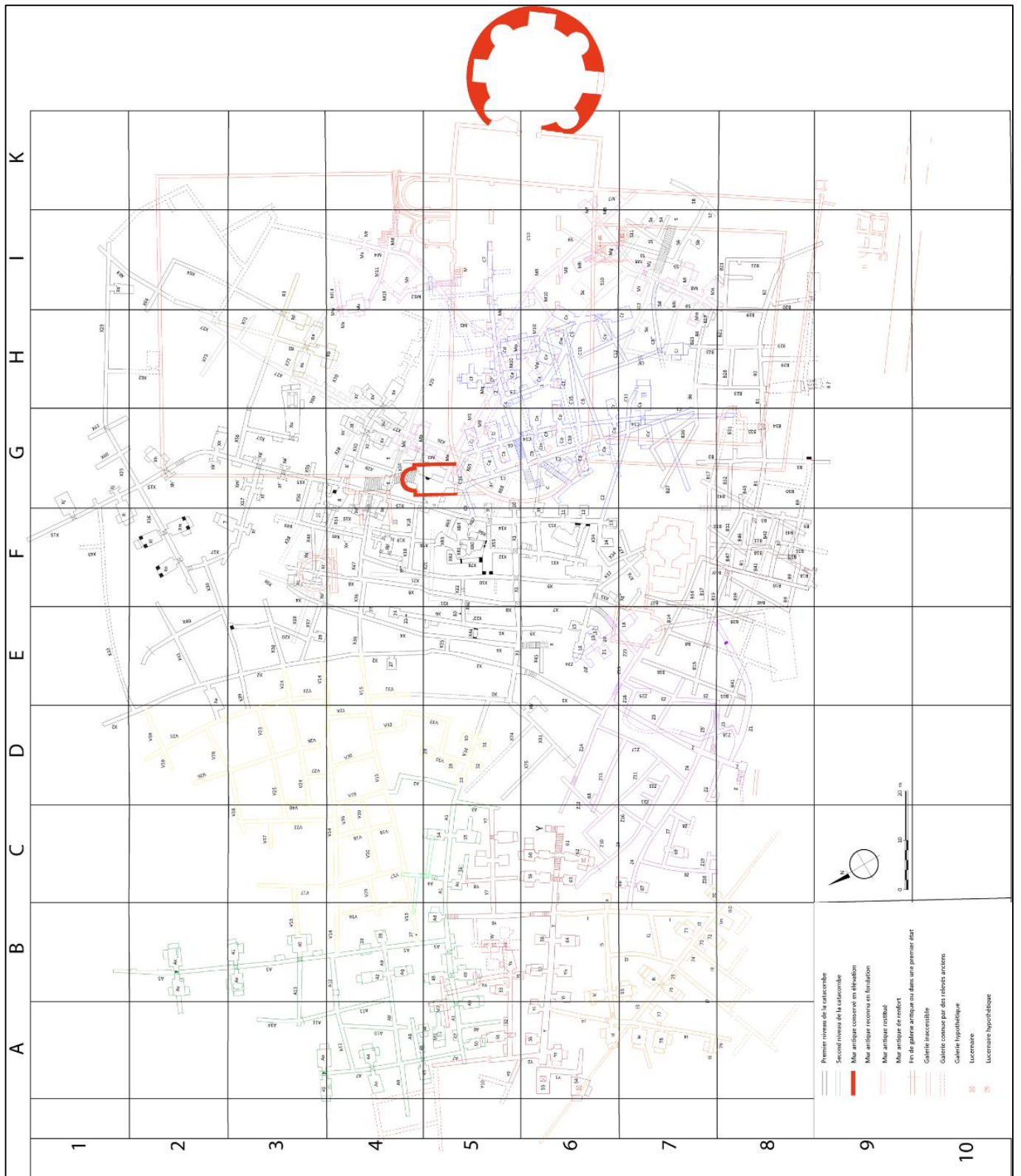


Figure 3. Plan de la catacombe SSPM
Modifié d'après Guyon (1987). Chaque couleur représente une région différente de la catacombe

2.1. Extension

Dans les années 320, l'arrivée au pouvoir de Constantin I^{er} changea véritablement la physionomie du site avec l'installation de nouveaux éléments architecturaux funéraires et religieux. Cette implantation monumentale comprit, en premier lieu, une grande basilique (*cruciforme*) entourée de deux enclos, au nord et au sud, puis d'espaces funéraires (Figure 3). De plus, plusieurs mausolées furent construits, dont un à l'est d'une importance particulière, de plan circulaire et encore conservé à ce jour (*i.e. Tor Pignattara*) (Figure 3). Il semblerait avoir été initialement construit pour Constantin I^{er} mais aurait finalement abrité la dépouille de sa mère, Hélène. Cet ensemble architectural fut accompagné de diverses donations et relié au monde funéraire souterrain par plusieurs escaliers (Figure 3) (Guyon 1987).

Parallèlement, le réseau cémétériel souterrain s'étendit et de nouvelles régions virent le jour, telles que les régions M, C et S (Figure 3). Les strates les plus profondes furent par ailleurs exploitées de façon à créer un second niveau au réseau (Figure 3). Les galeries y furent creusées selon une organisation bien plus rationnelle que celle des galeries du premier étage. En sus des tombes d'illustres anonymes, les sépultures de nouveaux martyrs, à l'instar de Saint Tiburce et Saint Gorgonius, prirent place dans ces secteurs récemment excavés. L'extension de la catacombe au cours des décennies suivantes eut lieu de manière concomitante avec le cimetière en surface, et ce jusque vers 380 ap. J.-C. Les pratiques funéraires de cette période ne changèrent guère par rapport à celles antérieures. Toutefois, quelques nouvelles installations rituelles tendirent à se répandre à l'image des tables d'offrandes (*i.e. mensae*) dans les chambres les plus luxueuses (Guyon 1987).

Le IV^e s. ap. J.-C. a vu l'émergence d'une dévotion aux martyrs et un développement des pèlerinages. De nombreuses inhumations dite *ad sanctos* eurent lieu près des tombes attribuées aux saints ou le cas échéant, lorsque la place venait à manquer, sur les chemins y conduisant. Le culte des martyrs fut particulièrement encouragé sous le pontificat de Damase I^{er} (366-384 ap. J.-C.) et d'importantes transformations furent réalisées alentour des sépulcres des saints (Guyon 1987).

2.2. Déclin

Le cimetière souterrain perdit sa fonction funéraire pour être définitivement érigé en lieu de pèlerinage à la fin du IV^e s. ap. J.-C. Les fêtes des saints amenèrent régulièrement des groupes de dévots. Pour les accueillir, divers travaux, souvent d'envergure, changeant parfois radicalement l'organisation des cryptes martyriales et leurs abords, furent entrepris entre le V^e et VII^e s. ap. J.-C. C'est notamment à cette période que fut entièrement remaniée la crypte des saints éponymes. Une basilique *ad corpus* se substitua à cette dernière, laquelle prit ainsi place à l'ombre des fondations

constantiniennes dont le prestige et la commodité des installations suscitèrent l'intérêt des nouveaux bâtisseurs et des pèlerins (Figure 3). À partir du VIII^e s. ap. J.-C. et durant le IX^e s. ap. J.-C., un important trafic des reliques se mit en place. La première translation fut celle des reliques de Gorgonius, puis s'ensuivirent celles des Saints Pierre et Marcellin, celles d'Hélène et enfin celles des Quatre Couronnés. Progressivement, la catacombe se retrouva dépouillée de ses martyrs et devint un lieu vide de sens pour le quidam. L'essentiel des pèlerins cessèrent alors d'affluer sur le site. À cette période, la catacombe s'étendait sur approximativement 3 ha, se composa d'environ 4,5 km de galeries et accueillit entre 20 000 et 25 000 tombes en son sein (Guyon 1987). Le réseau cémétériel souterrain tomba ensuite dans l'oubli et ce n'est qu'en 1594 qu'Antonio Bosio le redécouvrit (Bosio 1632 ; Guyon 1987).

3. LE SECTEUR CENTRAL DE LA REGION X : NOUVEAUX INTERETS ARCHEOLOGIQUES ET ANTHROPOLOGIQUES.

3.1. (Re-)Découverte d'un secteur jusqu'alors inexploré

C'est à l'été 2003, à proximité de la closerie de l'*Istituto delle Suore della Sacra Famiglia*, située au 631 via Casilina, qu'a eu lieu la découverte d'un nouveau secteur dans la région X de la catacombe SSPM (carré F5, Figure 3). L'apparition d'un *fontis* – i.e. un effondrement du sol en surface –, conséquence de l'effondrement d'une partie de la catacombe SSPM sous-jacente, mit au jour une partie du réseau souterrain resté, du fait d'importants remblais l'obstruant, très largement inexplorée (Giuliani *et al.* 2007). Dépêchée sur place par la *Pontifica Commissione di Archeologia Sacra* (PCAS) afin de constater les dommages et de sécuriser le site, Raffaella Giuliani, inspectrice des catacombes de Rome, aidée de *fossore*s, ouvriers de la PCAS en charge de l'entretien des réseaux souterrains, identifia rapidement l'origine de l'incident. Des infiltrations d'eau excessives dues à la rupture d'une conduite du réseau de distribution d'eau publique sur ladite propriété avaient en effet fragilisé jusqu'au rompage la voûte de cette partie de la catacombe. Une fois la canalisation réparée, la décision fut prise, préalablement à la réfection de la voûte, d'évacuer les blocs éboulés dans la catacombe mais aussi les remblais antérieurs se trouvant en ce lieu. Déjà reconnu au XVII^e s. par G. Berti et F. Contini comme un « lieu [...] rempli de pierres », puis par J. Guyon comme un possible ouvrage hydraulique ou arénaire (Guyon 1987), celui-ci ne fut jamais déblayé au cours des siècles suivants pour des raisons sans doute de stabilité du site et des bâtiments édifiés juste au-dessus en surface (Giuliani *et al.* 2007).

À l'aplomb de cette anfractuosité se développait la portion occidentale de la galerie X53 et, orthogonalement   celle-ci en direction du sud, l'extrémité septentrionale de la galerie X12, premiers

espaces à avoir été entièrement dégagés (Figure 4). Quinze tombes de type *forma*, creusées à même le sol, closes de dalles de marbre dont les fragments retrouvés étaient pour certains très travaillés, furent découvertes dans ces deux galeries (Figure 4). Un pavement, de même que de nombreux fragments de lampes en verre, ont également été mis en évidence. Sur les flancs des galeries, d'habituels *loculi*, niches funéraires creusées dans la paroi typiques des catacombes romaines, furent par ailleurs mis au jour (Giuliani *et al.* 2007). En outre, deux maçonneries condamnant l'accès depuis la galerie X53 à des salles plus septentrionales furent dégagées. Sur l'une d'elles, située la plus à l'ouest, un décor à fresque se décomposant en trois tableaux distincts fut découvert (Figure 5) (Giuliani *et al.* 2007 ; Giuliani 2012). Le premier tableau, figuratif mais assez mal préservé, révélait probablement une scène de *traditio* (*i.e.* acte de remettre) ou d'*ostensio* (*i.e.* acte de montrer) où les saints éponymes de la catacombe étaient représentés en train d'accepter un nouveau culte martyrial, celui des Trente ou Quarante martyrs figurés par un groupe homogène d'individus masculins en arrière-plan (Figure 5). Sur la base d'observations d'ordre stylistique, iconographique et paléographique, Raffaella Giuliani data cette fresque des VI^e-VII^e s. ap. J.-C. Le second et le troisième tableaux, figuratifs également, semblent avoir été peints dans un but purement décoratif (Figure 5). Derrière le second toutefois avait été percée une petite niche dans laquelle fut peut-être placé un reliquaire contenant les restes desdits martyrs (Figure 5). Cette maçonnerie peinte fut surmontée d'une *claustra*, ou transenne, en marbre servant à délimiter un espace sacré d'un espace non-sacré. Aux abords de cette maçonnerie s'éleva de plus une *mensa oleorum*, ou table d'offrandes, semi-cylindrique. Enfin fut découvert un lucerne permettant l'éclairage de ces deux galeries. L'ensemble de ces éléments permit à Raffaella Giuliani d'identifier avec certitude en ce lieu un pôle cultuel dont l'existence sur un plan archéologique était restée jusqu'alors insoupçonnée (Giuliani *et al.* 2007 ; Giuliani 2008 ; Giuliani 2012). De par son emplacement à proximité de la crypte des saints Pierre et Marcellin les plus vénérés de la catacombe, mais aussi de par son positionnement dans l'*itinera* (ou *iter*) *ad sanctos*, c'est-à-dire le parcours aménagé pour les pèlerins dans le réseau souterrain pour accéder aux sépulcres des martyrs les plus importants, ce pôle dut jouir en outre d'une grande notoriété (Giuliani 2008 ; Giuliani 2012).

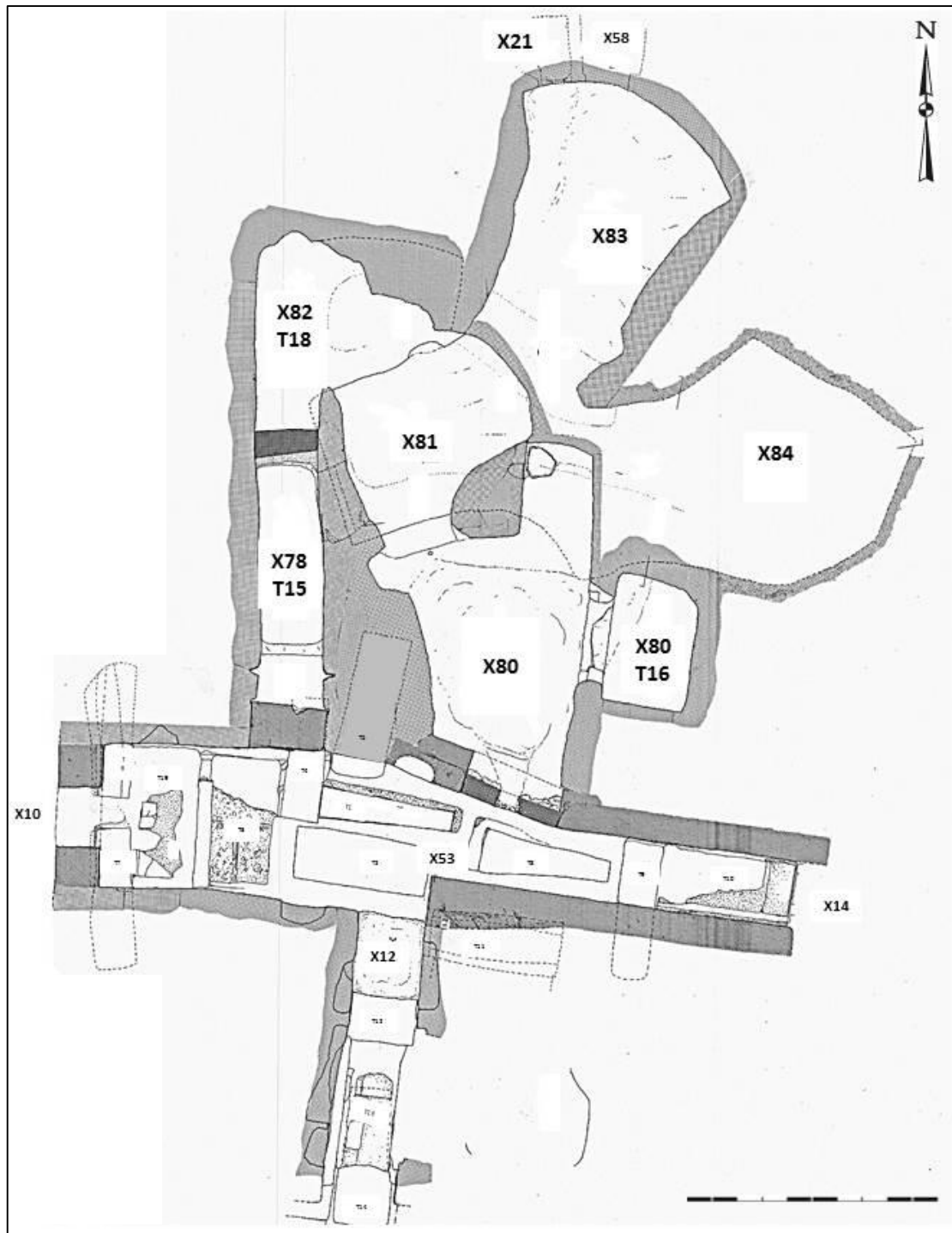


Figure 4. Plan du secteur central de la région X de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin (Rome)
D'après M. Ricciardi



Figure 5. Maçonnerie de la galerie X53 portant la fresque (à gauche) et restitution hypothétique des différents tableaux de cette dernière (à droite)
(Cl. de la PCAS et reconstitution de P. Ventura dans Giuliani et Castex (2007) et Giuliani (2012))

Derrière les maçonneries de la galerie X53 fut découvert un ensemble de sept chambres (X78/T15, X80, X80/T16, X1, X82/T18, X83 et X84) de tailles (2 à 9 m²), de profondeurs (5 à 7,5 m) et de hauteurs sous plafond (1 à 4 m²) variables, mais toutes interconnectées (Blanchard *et al.* 2007 ; Castex *et al.* 2007 ; Giuliani *et al.* 2007 ; Castex *et al.* 2009 ; Blanchard *et al.* 2015). D'une manière générale, les chambres les plus petites étaient également les moins profondes (X78/T15, X80/T16, X82/T18). Leur niveau de sol était approximativement équivalent à celui de la galerie X53. À l'inverse, les chambres les plus grandes étaient aussi les plus profondes (X81, X83 et X84). Leur niveau de sol était à peu près équivalent à celui de la galerie X21' du niveau inférieur du réseau catacombal (Blanchard *et al.* 2007 ; Castex *et al.* 2007 ; Giuliani *et al.* 2007 ; Castex *et al.* 2009). Ces chambres ne présentaient aucune niche funéraire sur leurs flancs. Dans chacune de ces chambres sur environ un tiers de leur hauteur, il fut en revanche mis en évidence des dépôts vraisemblablement non perturbés d'ossements humains.

3.2. Premières investigations dans un contexte archéologique inédit

Jamais jusqu'alors de tels assemblages osseux n'avaient été mis au jour dans la catacombe SSPM. La singularité de ces chambres et de leur contenu ainsi que la proximité de ces dernières avec

le pôle cultuel de la galerie adjacente décrit précédemment permit à Raffaella Giuliani d'émettre l'hypothèse de l'existence d'un lieu hors du commun, peut-être la dernière demeure de martyrs, telle celle des Trente ou Quarante identifiés sur la fresque (Blanchard *et al.* 2007 ; Castex *et al.* 2007 ; Giuliani *et al.* 2007 ; Castex *et al.* 2009 ; Giuliani 2011 ; Giuliani 2012).

La PCAS fit alors appel en septembre 2004 à deux anthropologues de l'Université de Pise, Giuliana Pagni et Leonia Burdassi, afin de caractériser la nature de ces dépôts osseux. Une fouille fut alors programmée dans la chambre la plus petite mais aussi la plus proche de la maçonnerie décorée, cœur du pôle cultuel, à savoir la chambre X78/T15 (Giuliani *et al.* 2007).

L'intervention révéla que ce dépôt appartenait à une sépulture plurielle (c'est-à-dire plusieurs individus inhumés dans une même tombe) sans qu'il pût être toutefois déterminé si cette dernière était multiple (à savoir des inhumations simultanées à un instant t ou quasi simultanées) ou collective (caractérisées par des inhumations successives, espacées dans le temps) (Pagni et Burdassi 2004 ; Castex *et al.* 2007 ; Blanchard *et al.* 2010).

L'indigence du matériel osseux ainsi que le temps imparti à la fouille ne permit cependant pas de déterminer avec certitude le nombre d'individus inhumés dans ce lieu (Castex *et al.* 2007). Il fut néanmoins démontré que les sujets étaient d'âges et de sexes différents et que certains d'entre eux étaient inhumés dans une gangue plus ou moins indurée, de couleur blanchâtre voire parfois grisâtre, supposée être de la chaux (Pagni et Burdassi 2004 ; Castex *et al.* 2007 ; Blanchard *et al.* 2010).

3.3. Les interventions archéo-anthropologiques

Face au besoin d'entreprendre des travaux de sécurisation du site qui allaient inévitablement impacter les plus grandes salles, mais aussi face à la nécessité de contenir l'engagement financier de la PCAS sur ces opérations, Raffaella Giuliani, au nom de la PCAS, prit contact avec Michel Gras (alors Directeur de l'École Française de Rome (EFR)), dans le but d'établir un partenariat institutionnel pour mener les opérations archéologiques dans ce secteur de la catacombe (Giuliani *et al.* 2007 ; Blanchard *et al.* 2010). Elle sollicita également la participation de Dominique Castex (CNRS, UMR 5199, Université Bordeaux 1), et, en raison des travaux de cette dernière sur les crises de mortalité, une collaboration a été mise en place. Dominique Castex s'est adjoint les compétences de Philippe Blanchard (Ingénieur CR, Institut National de Recherches Archéologiques Préventives), avec qui elle avait déjà travaillé. Ils ont dirigé ensemble les opérations archéologiques dans la catacombe. Un accord fut trouvé entre les différentes institutions et tutelles des protagonistes en 2005 et une première mission de reconnaissance fut entreprise au mois de juin de cette même année (Giuliani *et al.* 2007 ; Blanchard *et al.* 2010).

Quatre campagnes de fouilles furent menées de 2005 à 2010. Les deux premières se déroulèrent de septembre à octobre 2005 et de mars à avril 2006 et se focalisèrent sur les plus petites chambres X80/T16 et X82/T18 (Blanchard *et al.* 2007 ; Castex *et al.* 2007 ; Giuliani *et al.* 2007). Quatre objectifs principaux furent alors définis. Les trois premiers relevaient d'une démarche purement archéologique. Il s'agissait d'identifier le mode de fonctionnement de ces sépultures plurielles (multiples et/ou collectives), d'appréhender les pratiques funéraires mises en œuvre et de cerner chronologiquement l'utilisation de ces différentes sépultures. Le quatrième objectif releva d'une démarche plus anthropologique. Il s'agissait en effet de caractériser d'un point de vue biologique la population inhumée (âge au décès, sexe, état sanitaire, *etc.*) pour tenter d'interpréter la nature des décès (massacre, épidémie, *etc.*) (Blanchard *et al.* 2007 ; Castex *et al.* 2007 ; Castex et Blanchard 2011). Les deux campagnes suivantes eurent lieu en 2008 et 2010 durant les mois de septembre et octobre et se concentrèrent sur les chambres les plus imposantes X83 et X84. La fouille des grandes salles visait à confirmer les premiers résultats archéologiques et anthropologiques obtenus et misait sur le fait que les os étaient mieux préservés. (Castex *et al.* 2009 ; Blanchard *et al.* 2010 ; Castex et Blanchard 2011 ; Castex *et al.* 2011).

L'ensemble des opérations archéologiques réalisées de 2004 à 2010 permirent d'exhumer 662 individus (Figure 6). Respectivement 46, 76, 75, 78, 194 et 193 individus furent mis au jour dans les chambres X78/T15, X80/T16, X81, X82/T18, X83 et X84 (Castex *et al.* 2007 ; Castex *et al.* 2011 ; Blanchard *et al.* 2015 ; Dominique Castex, communication personnelle). La chambre X81 ayant été juste sondée et les chambres X83 et X84 n'ayant pas été totalement fouillées, il s'agit d'un effectif préliminaire. Au total, entre 1500 et 2500 individus pourraient avoir été inhumés dans les différentes chambres de ce secteur de la catacombe (Blanchard *et al.* 2015 ; Dominique Castex et Philippe Blanchard, communications personnelles). D'un point de vue macroscopique, les vestiges humains des chambres X81, X83 et X84 parurent lors de la fouille mieux préservés que ceux des chambres X78/T15, X80/T16 et X82/T18 (Pagni et Burdassi 2004 ; Castex *et al.* 2011 ; Blanchard *et al.* 2015).



Figure 6. Vue d'ensemble des dépôts osseux de la chambre X84
(Cl. D. Gliksman/INRAP)

3.4. Nature des dépôts osseux et gestions des corps

La très grande majorité, si ce n'est l'intégralité, des squelettes des sujets mis au jour a montré un maintien de leurs connexions anatomiques, indiquant la conservation de leur position primaire. Par ailleurs, l'essentiel des défunts a été déposé couché sur le dos, fréquemment côte à côte, parfois tête-bêche (Figure 7). Plus rarement, des corps ont été inhumés en position assise ou ventrale. Enfin de façon anecdotique, quelques rares sujets (*e.g.* chambre X80/T16, niveaux 4-5) ont été inhumés dans des positions atypiques (*i.e.* corps déposés sans ménagement comparés aux précédents, voire peut-être même jetés du haut de la fosse). D'une façon générale, les défunts ont été placés selon un axe globalement nord-sud dans les chambres X78/T15, X80/T16, X82/T18 et X84 et selon un axe plutôt est-

ouest dans la chambre X83. Les individus immatures ont préférentiellement été positionnés le long des parois ou entre les corps des adultes. En outre, les individus déposés dans les chambres X78/T15, X80/T16 et X82/T18 l'ont été respectivement en trois, neuf et 12 phases, séparées les unes des autres par de fines strates de sédiments, tandis que ceux déposés dans les chambres X81, X83 et X84 l'ont été vraisemblablement en une seule et même phase (Pagni et Burdassi 2004 ; Castex *et al.* 2007 ; Castex *et al.* 2009 ; Castex *et al.* 2011).



Figure 7. Vue zénitale des 5 premiers individus inhumés dans la chambre X80/T16
Note : Les sujets sont entièrement enduits de plâtres (Cl. Mission archéologique)

À partir d'une réflexion archéo-anthropologique menée sur ces données, l'équipe scientifique mit en évidence un fonctionnement sépulcral relativement complexe de ces chambres. Pour parvenir à ce résultat, elle recourut, d'une part, à des arguments thanatologiques classiques tels que la superposition des corps avec le maintien des connexions anatomiques, la juxtaposition et la gestion rigoureuse des cadavres. D'autre part, des arguments thanatologiques plus originaux furent proposés tels que le rapport entre le volume des chambres et le volume corporel des sujets inhumés à l'intérieur de ces dernières appréhendé à l'aide d'une modélisation tridimensionnelle (Figure 8), l'évolution des strates de cadavres et la répartition spatiale des individus en fonction de leurs âges au décès. L'équipe démontra ainsi que ces espaces furent utilisés selon toute vraisemblance sur un temps relativement

long – n’excédant toutefois pas quelques années voire quelques décennies – durant lequel plusieurs phases d’inhumations simultanées se seraient succédées, sans pour autant exclure que des dépôts individuels pussent occasionnellement avoir eu lieu. Ils définirent ces ensembles comme des dépôts multiples « collectifs » (Castex et Blanchard 2011).

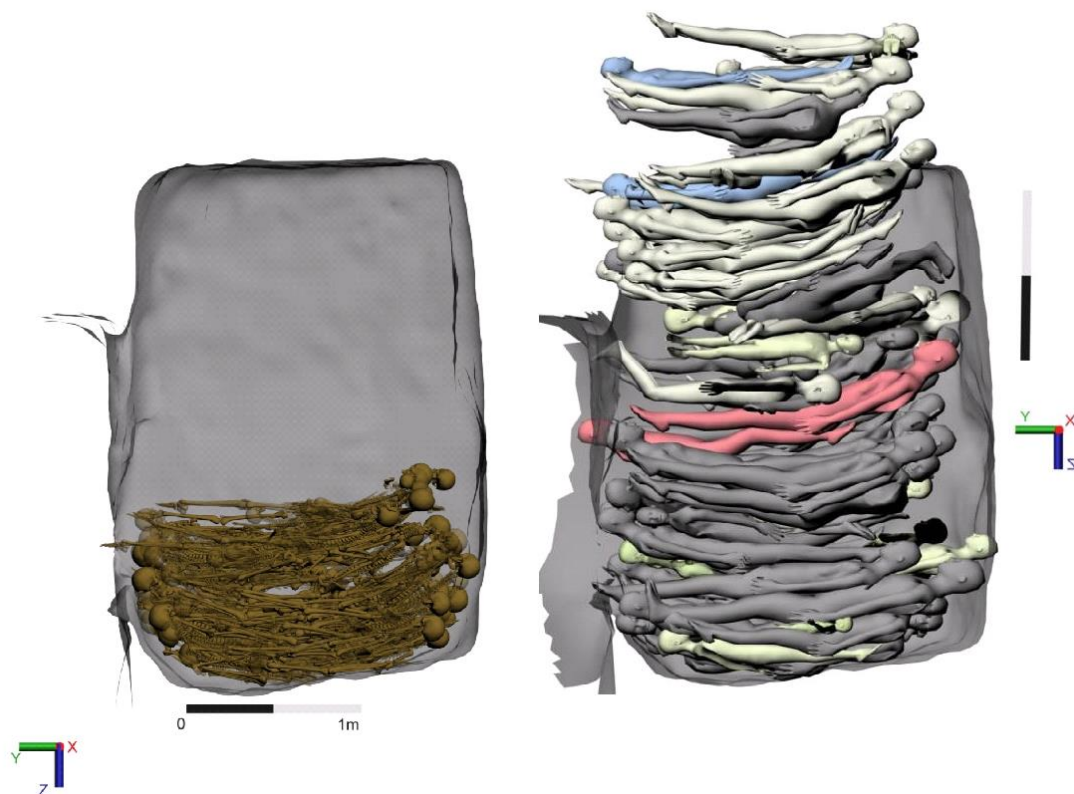


Figure 8. Restitution du volume des corps des individus déposé dans la chambre X80/T16
Source : Sachau-Carcel (2012)

3.5. Mise en évidence d’un appareil funéraire sophistiqué

Différents matériaux ont été découverts associés ou non aux squelettes exhumés. Le matériau le plus fréquemment mis au jour est de loin le plâtre, de couleur blanchâtre ou grisâtre, souvent retrouvé délité, constituant parfois des blocs et plus rarement des gangues (Figure 7). Ce matériau est présent de façon plus importante dans les chambres X80/T16 et X82/T18 que dans les chambres X83 et X84. De plus, des oléorésines ont été mises au jour, à l’instar de l’ambre, de l’encens et de la sandaraque. De couleur rouge, l’ambre a été retrouvé en petits fragments ou fines particules mélangé aux vestiges humains ou incluses dans le plâtre. De couleur brunâtre et d’aspect brillant, l’encens et la sandaraque ont été retrouvés très souvent associés à du plâtre ou à des fragments textiles. L’ambre a

été découvert avec une plus forte occurrence que les deux autres résines végétales. De nombreux éléments de tissu (lin et soie) ou empreintes de ces derniers sur les blocs ou gangues de plâtre ont également été identifiés. Les pièces textiles découvertes revêtent une couleur beige et dans certains cas rouge foncée ou pourpre. Outre ces éléments de tissus, des fils d'or probablement associés à l'origine à des pièces textiles, constitué à 75 % d'or pur, ont également été découverts (Castex *et al.* 2007 ; Castex *et al.* 2009 ; Blanchard *et al.* 2010 ; Castex *et al.* 2011 ; Blanchard *et al.* 2015).

Sur la base de ces éléments, il a pu être mis en évidence l'existence d'un appareil funéraire très élaboré. Il a notamment été démontré que nombre de corps furent enduits de plâtre auquel étaient mêlées différentes résines et essences onéreuses et plus ou moins exotiques (ambre de la Baltique, sandaraque du Maghreb et encens du Yémen) (Devièse 2009 ; Devièse *et al.* 2010). Les corps purent préalablement être vêtus avec parfois de riches pièces d'habillements en soie et cousues d'or. Une fois plâtrés, ces corps furent vraisemblablement enveloppés d'un ou plusieurs draps, possiblement en lin, importé(s) probablement d'Espagne ou d'Égypte. Le caractère inédit de telles pratiques funéraires ainsi que la nature et la qualité des matériaux et substances employés pour le traitement des corps permirent d'émettre l'hypothèse que les sujets inhumés appartenaient probablement à un groupe social particulier aisé. La mise en œuvre d'un tel traitement pouvaient être originaire d'Afrique du Nord, région où des appareils funéraires plus ou similaires ont été découverts à maintes reprises, parfois dans des contextes archéologiques et chronologiques proches du site romain, à l'instar des catacombes d'Hadrumète en Tunisie (Castex et Blanchard 2011 ; Blanchard *et al.* 2015).

3.6. Données biologiques des individus

3.6.1. Âge et sexe

Dans la mesure du possible, l'âge et le sexe ont été déterminés selon les méthodes de Bruzek *et al.* (2005). L'indigence du matériel osseux a limité l'efficacité de cette détermination, de fait l'établissement des courbes classiques de mortalité n'a pas pu être fait. Cependant, le recrutement d'un tel site étant important pour repérer la nature épidémique de la crise de mortalité, nous avons établis de plus larges tranches d'âge. Ainsi, près de 90 % des sujets découverts dans ces chambres (n = 592) se sont vus attribuer un âge au décès plus ou moins précis (taux d'indétermination : 11 %) (Figure 9). Parmi ceux-ci, 33 sont décédés entre l'âge de 0 et 9 ans, 36 entre l'âge de 10 et 19 ans et 312 à plus de 20 ans (Figure 9). De plus, 6 individus sont morts durant leur enfance ou leur adolescence et 205 durant leur adolescence ou leur âge adulte (Figure 9) (Dominique Castex, communications personnelles). La répartition par âge des individus au sein des différentes sépultures est présentée à

la Figure 9. Malheureusement, ces grandes classes d'âge ne permettent pas de cibler d'anomalies susceptibles de nous renseigner sur la nature de l'épidémie ou les causes de mortalité, contrairement à un profil classique (Castex 2008).

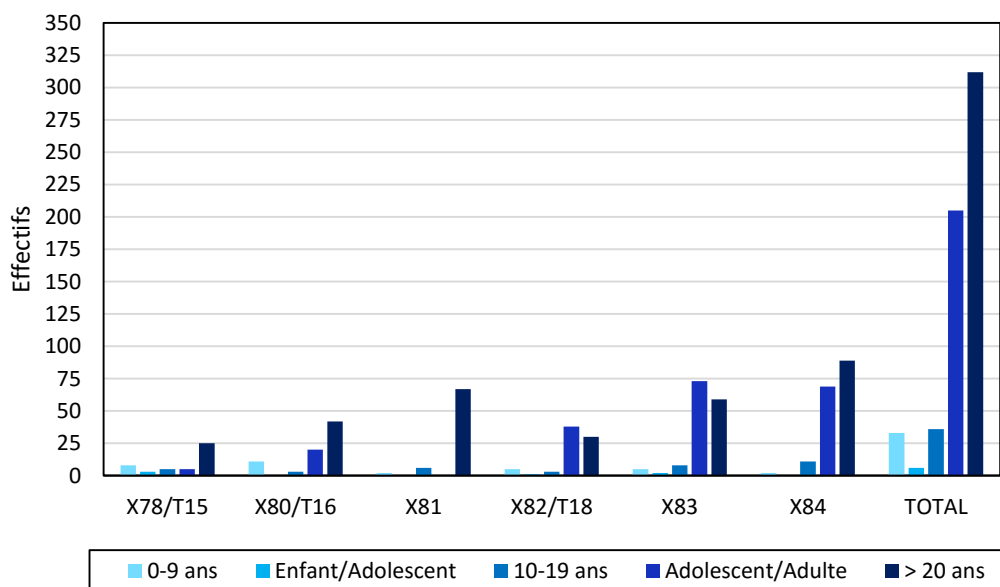


Figure 9. Répartition par âge des individus au sein des différentes chambres
Communications personnelles de Dominique Castex

En revanche, le sexe de seulement 1/8^e des sujets mis au jour dans ce secteur (n = 83) a pu être déterminé de façon fiable (taux d'indétermination : 87 %) (Figure 10). Au total, 20 individus de sexe masculin et 63 individus de sexe féminin ont pu être identifiés (taux de masculinité : 24 %) (Figure 10) (Dominique Castex, communications personnelles). La répartition par sexe des individus au sein des différentes sépultures est présentée à la Figure 10. Le même rapport homme/femme est notable dans les salles qui fournissent une information exploitable, avec une surmortalité féminine importante. Toutefois cette observation ne permet en aucun cas de déterminer la crise de mortalité, et ces fréquences ne peuvent pas être généralisées à l'échelle de l'ensemble du secteur central.

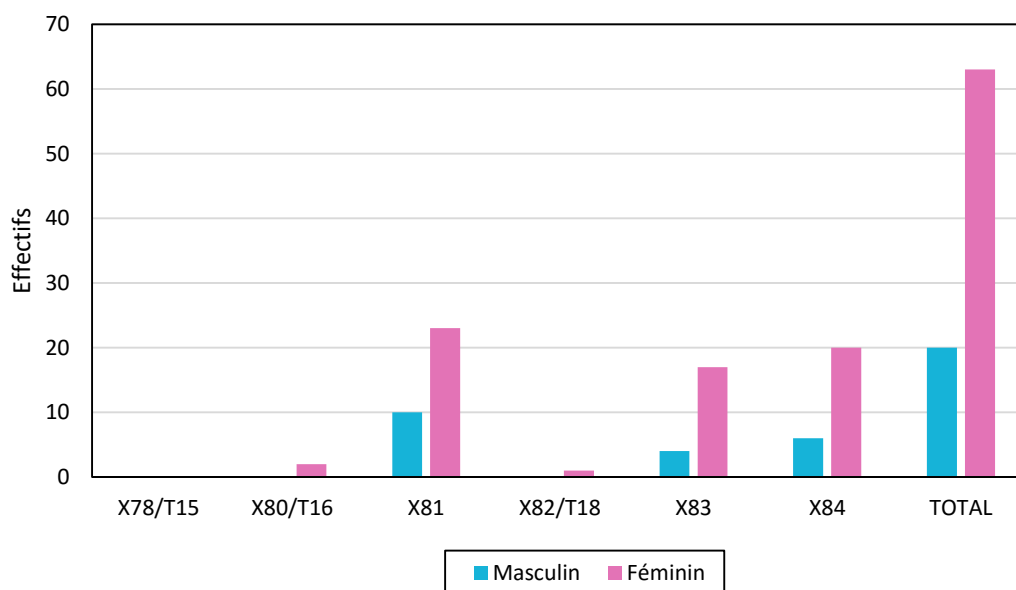


Figure 10. Répartition par sexe des individus au sein des différentes chambres Communications personnelles de Dominique Castex.

3.6.2. Données paléopathologiques

Les données paléopathologiques peuvent permettre de mieux caractériser la nature d'une crise de mortalité (fait de guerre, épidémies, *etc.*). Des informations peuvent ainsi être obtenues sur l'état de santé général d'une population et les histoires de vie individuelles. Environ 14 % des sujets parmi les plus de 15 ans issus des chambres X80/T16, X82/T18, X83 et X84 présentent des changements dégénératifs articulaires (*i.e.* arthrose), principalement au niveau de la hanche et du genou (Figure 11). De même, près de 14 % des sujets de plus 15 ans de ces chambres possèdent des enthésopathies (Figure 11). Environ 3 % des sujets adultes de ces chambres portent sur leurs ossements des lésions évocatrices d'infection, principalement de type réactions périostées, soit une faible proportion (Figure 11). Approximativement 1 % des individus de ces chambres ont des lésions traumatiques osseuses, ce qui reste une très faible fréquence, et toutes sont consolidées, ne pouvant être la cause de la mort de ces individus (Figure 11). Au moins un individu issu de ces chambres présente une spondylarthropathie supposée ayant pu entraîner une invalidité partielle. De surcroît, un sujet de ces chambres semblerait présenter une maladie métabolique, possiblement un cas de rachitisme (Sacha Kacki, communications personnelles). Enfin, de façon anecdotique, un individu de ces chambres montre des cas exceptionnels d'ankyloses (Kacki *et al.* 2013).

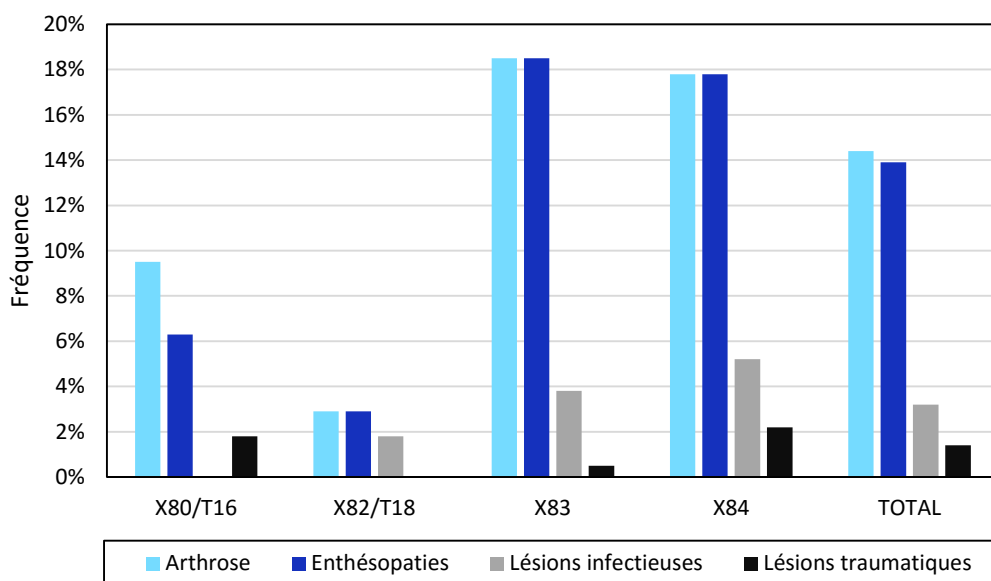


Figure 11. Prévalence des principales pathologies osseuses au sein des chambres X80/T16, X82/T18, X83 et X84
Communications personnelles de Sacha Kacki

3.7. Synthèse biologique et discussion sur la nature de la crise de mortalité

L'aspect très lacunaire des données biologiques enregistrées tient à la très mauvaise préservation macroscopique des vestiges humains, en particulier des restes squelettiques et dentaires. Aussi ces données ne peuvent offrir qu'une vision très incomplète du profil biologique de la population inhumée dans ce secteur. Bien que préliminaires, quelques enseignements peuvent être proposés sur le fait qu'une très forte proportion d'adultes jeunes et qu'un très faible taux de sujets immatures en bas âge furent inhumés dans ces chambres. Un important déséquilibre entre les hommes et les femmes inhumés dans ces sépultures a été mis en évidence, ces dernières étant très largement représentées, mais ceci par secteur à l'échelle populationnelle. Au regard des données issues de l'étude paléopathologique, il a été enregistré un état sanitaire généralement bon pour cette population. La similitude des profils pathologiques mis en évidence entre les différentes chambres laisse suggérer que ces sujets eurent un statut social et un mode de vie sans doute identique. Une des observations les plus importantes est qu'en raison de la faible fréquence des lésions traumatiques osseuses et la totale absence de traumatisme perimortem l'hypothèse de violences interhumaines (massacre, martyre, etc.) comme cause de décès des sujets inhumés en ces lieux devait vraisemblablement être rejetée. La détermination de l'âge et du sexe ne permet pas non plus de valider l'hypothèse de salles réservées à des identités bien précises. Enfin, grâce à ces résultats et à ceux relatifs au fonctionnement des sépultures, a pu être proposée l'hypothèse que les défunts durent trouver la mort lors une crise de mortalité de nature épidémique, telle que par exemple la peste ou la

vérole qui ne laissent pas de traces sur les ossements en raison d'une infection très rapide. Celle-ci aurait pu s'effectuer sur un temps relativement long avec différentes phases de résurgence et de quiétude. Il est également possible que des crises successives de natures différentes aient eu lieu (Castex et Blanchard 2011, Castex *et al.* 2011 ; Blanchard *et al.* 2015).

3.8. Antériorité des sépultures dans le réseau catacombal

Les datations radiocarbone (^{14}C) réalisées à ce jour sont au nombre de 11. Neuf ont été obtenues sur la phase collagénique d'ossements humains issus des chambres X80/T16, X82/T18 et X83 et deux ont été obtenues sur des fragments de textiles issus de la chambre X78/T15 (Tableau 1). À l'échelle du secteur, les âges ^{14}C varient entre 4 et 379 ap. J.-C. (Tableau 1). À l'échelle des chambres, les âges ^{14}C sont compris entre 60 et 252 ap. J.-C. pour X78/T15, entre 4 et 226 ap. J.-C. pour X80/T16, entre 73 et 234 ap. J.-C. pour X82/T18 et enfin entre 76 et 379 ap. J.-C. pour X83 (Tableau 1) (Castex et Blanchard 2011 ; Blanchard *et al.* 2015 ; Dominique Castex et Philippe Blanchard, communications personnelles).

Tableau 1. Âges ^{14}C conventionnels (BP) et calibrés à 2σ (cal BC/AD) obtenus sur des textiles et des ossements humains (collagène) issus des chambres X78/T15, X80/T16, X82/T18 et X83

Salle	Type	Identifiant	# ^{14}C	Âge ^{14}C BP	Âge ^{14}C cal BC/AD
X78/T15	Textile	M&P_A	Utc-13247	1826 ± 26	92-252
	Textile	M&P_B	Utc-13215	1861 ± 41	60-245
X80/T16	Os	017	Beta-346785	1880 ± 30	66-222
	Os	038	Ly-13761	1910 ± 30	21-209
	Os	065	Beta-346786	1870 ± 30	73-226
	Os	073	Lyon-11520(SacA-38315)	1930 ± 30	4-131
X82/T18	Os	074	Beta-346788	1870 ± 30	73-226
	Os	079	Lyon-8814(SacA-27773)	1855 ± 30	82-234
X83	Os	015	Lyon-8813(SacA-27772)	1865 ± 30	76-230
	Os	170	Lyon-8744(GrA)	1855 ± 30	82-234
	Os	Bas de strati.	Beta-278223	1770 ± 40	135-379

Note : La calibration des âges conventionnels a été réalisée avec le logiciel Oxcal v.4.2 (IntCal13) le 26/07/2015. Données d'après Castex *et al.* 2011 et communications personnelles de Dominique Castex

Divers éléments de parures ($n = 3$) découverts en différents lieux de ce secteur de la catacombe ont pu être datés. Une paire de boucle d'oreille en or retrouvée dans la chambre X82/T18 a pu être datée par comparaison entre le I^{er} et le III^e s. ap. J.-C. Une épingle en os ainsi qu'une bague en jais, toutes deux mises au jour dans la chambre X84, ont pu être datées respectivement du II^e-III^e s. ap. J.-C. et du III^e s. ap. J.-C. Quatre pièces de monnaie ont également été découvertes. Une monnaie de Titus (79-81) et une autre de Marc-Aurèle (161-180) issues de la chambre X78/T15 ont pu être identifiées. De même, une monnaie de Faustine (146-161) et une monnaie de Gordien (238) issues de la chambre X83 ont pu être reconnues (Castex *et al.* 2009 ; Blanchard *et al.* 2015).

À partir de tous ces éléments, les sépultures peuvent donc s'inscrire entre le II^e s. ap. J.-C. et la première moitié du III^e s. ap. J.-C. (Castex et Blanchard 2011 ; Blanchard *et al.* 2015). Il est cependant difficile de déterminer une chronologie précise de la mise en place de ces différents ensembles, chacune des salles ayant pu être constituée à des moments distincts. Les sépultures des chambres X80/T16 et X82/T18 pourraient avoir été créées dans un premier temps et les chambres X81, X83 et X84 dans un deuxième temps, sans toutefois pouvoir estimer la durée séparant ces faits. Les sépultures des chambres X78/T15 et X80, en raison de leur positionnement dans le secteur paraissant bloquer l'accès aux sépultures X80/T16 et X82/T18, auraient pu être établies postérieurement à ces dernières (Castex et Blanchard 2011 ; Kacki *et al.* 2014 ; Blanchard *et al.* 2015). Ces espaces funéraires auraient donc pu être utilisés précocement par rapport au reste du réseau catacombal voire même antérieurement aux premiers développements de ce dernier. L'hypothèse d'un fonctionnement en parallèle des nécropoles précatacombales localisées en surface sur le domaine *ad duas lauros* a pu être proposé (Castex et Blanchard 2011 ; Blanchard *et al.* 2015).

3.9. Synthèse

Ces nouvelles salles de la catacombe SSPM fournissent un matériel d'étude remarquable. En raison du mauvais état de conservation macroscopique des ossements, les données biologiques sont impactées, ce qui rendra la tâche d'autant moins aisée pour mettre en place nos analyses isotopiques. Cependant, les hypothèses proposées par le contexte rendent notre démarche d'autant plus intéressante. Pour résumer, les sujets inhumés ($n_{\text{fouillés}} = 662$; $n_{\text{max estimés}} \approx 2500$) dans ce secteur nouvellement exploré de la catacombe SSPM constituent du point de vue des rites funéraires mis en œuvre mais aussi du point de vue de leurs profils biologiques et pathologiques un groupe relativement homogène, au statut social possiblement élevé et entretenant potentiellement des liens culturels ou autres étroits avec des régions éloignées de Rome. Ces individus inhumés dans des dépôts multiples successifs auraient succombé lors d'une ou plusieurs crises de mortalité de nature épidémique. L'épidémie se serait déroulée sur un temps relativement long, de l'ordre de quelques années voire

quelques décennies, et aurait eu un caractère rémittent. Il est également possible qu'il s'agisse de plusieurs épidémies successives de natures différentes. Ces sépultures, probablement installées dans ce qui fut initialement un ouvrage hydraulique ou un arénaire, auraient été mise en place au début de notre ère, lors des premiers développements du réseau cémétériel voire peut-être avant la création même de ce dernier (Castex et Blanchard 2011 ; Blanchard *et al.* 2015).

4. OBJECTIFS ET HYPOTHESES DE TRAVAIL

4.1. Problématique et objectifs

Notre étude s'est mise en place autour du désidérata d'engager une véritable discussion entre l'archéo-anthropologie et l'archéo-biogéochimie de façon à ce qu'ensemble ces deux domaines de l'anthropologie biologique puissent mieux répondre à des problématiques d'ordre archéologique. Notre travail s'est construit autour de trois principaux objectifs.

Notre premier objectif est de caractériser l'alimentation des défunts. Pour ce faire, nous allons 1) reconstruire le ou les régime(s) alimentaire(s) de ces derniers, et, 2) définir si ce ou ces régime(s) alimentaire(s) identifié(s) se singularisai(en)t par rapport à ceux des populations (sub-)contemporaines de Rome.

Notre second objectif est d'étudier la mobilité des défunts. Pour ce faire, nous allons 1) déterminer le nombre de migrants au sein de la population inhumée, 2) définir l'origine géographique de ces derniers, et enfin, 3) établir si cette population se différencie par sa composition en nombre de migrants des autres populations (sub-)contemporaines de Rome.

Notre troisième objectif est de mettre en perspective nos résultats à la lumière des données archéo-anthropologiques pour répondre à des questionnements archéologiques plus larges. Ainsi, nous allons 1) appréhender le statut social des défunts au prisme des types de ressources alimentaires auxquels ils eurent de leur vivant accès, et par là même, discuter du recrutement et de l'homogénéité apparente de cette population, et 2) examiner l'exogénéité supposée des pratiques funéraires au travers des différentes origines géographiques des migrants identifiés dans cette population, et ainsi, discuter de l'homogénéité apparente de cette dernière.

En dernier lieu – et ceci constitue un objectif annexe – nous allons développer une approche méthodologique pour valider le protocole de purification des carbonates de la phase apatitique de l'os mise en œuvre au cours de ce travail et afin de s'assurer de la fiabilité des données isotopiques ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$) mesurées sur ces derniers.

Outre notre apport à la compréhension du fonctionnement du site, notre étude permettra de mieux appréhender sur un plan archéo-biogéochimique l'alimentation et les schémas de mobilité des populations de la cité éternelle au début de notre ère.

4.2. Hypothèses de travail

Différentes hypothèses de travail formulées à partir des données historiques et archéologiques seront testées au cours de cette étude. Celles-ci sont au nombre de six pour l'alimentation et se présentent ainsi :

Hypothèse 1. L'alimentation des Romains était essentiellement végétale. Les céréales et plus particulièrement le blé représentaient les aliments de base de tout un chacun. La littérature historique à ce sujet est pléthorique, e.g. Rickman (1980), Garnsey et Saller (1987), Garnsey (1993), Virlouvét (1995a), Garnsey (1999), Mattingly et Aldrete (2000), Donahue (2004), Garnsey (2004), André (2009) et Erdkamp (2009). Les études archéobotaniques semblent également conforter cette hypothèse pour la Rome des époques pré-impériales et impériale, e.g. Braun (1995), Motta (2002) et Murphy *et al.* (2013).

Hypothèse 2. Le blé consommé à Rome durant l'époque impériale était principalement importé des provinces frumentaires d'Afrique. Nombreuses sont les sources historiques faisant état de la production céréalières des provinces africaines – souvent considérées comme étant les greniers de Rome (e.g. Leveau 1978) – et du ravitaillement en grains de Rome, deux réalités indissociables à l'époque impériale, e.g. Cébeillac-Gervasoni (1994), Christol (1994), Geraci (1994), Virlouvét (1995a), Virlouvét (1995b), Burkhalter (1997), André (2009) et Erdkamp (2009).

Hypothèse 3. Le millet était au menu des Romains et était la seule céréale C₄ consommée en quantité significative durant le 1^{er}-3^e s. ap. J.-C. Différents récits historiques ont évoqué ce point tels que Evans (1980), Spurr (1983), Spurr (1986), Nenci (1999) et André (2009). De même, différents travaux archéobotaniques ont pu mettre en évidence la présence de millet en différents lieux et sites archéologiques d'Italie à l'exemple de Bosi *et al.* (2011), Rottoli et Castiglioni (2011) et Murphy *et al.* (2013).

Hypothèse 4. Corollaire de l'hypothèse 1, les aliments carnés occupaient une place mineure dans le régime alimentaire des Romains. La viande de porc était la plus consommée. Les sources historiques sont à ce sujet prolixes, e.g. Corbier (1989), Garnsey et Saller (1987), Garnsey (1993), King (1999), Donahue (2004), Garnsey (2004), André (2009) et Schirmer (2014).

Hypothèse 5. La plupart des Romains avaient accès aux ressources aquatiques, notamment marines. Les données historiques et archéologiques sont relativement nombreuses pour étayer cette

hypothèse, e.g. Higginbotham (1997), Garnsey (1999), De Grossi Mazzorin (2000), Desse-Berset et Desse (2000), André (2009) et Schirmer (2014).

Hypothèse 6. L'usage du garum par les Romains était général (entrées, plats, sauces, desserts, etc.). La même littérature que celle exposée pour l'hypothèse précédente formule également cette assertion-ci.

Quant à la mobilité, l'hypothèse de travail à tester sera l'origine nord-africaine des individus inhumés dans les sépultures plurielles de la région X de la catacombe SSPM. En effet, il a été mis en évidence l'existence d'un appareil funéraire sophistiqué inédit pour Rome mais possédant de possibles similitudes avec les traitements funéraires observés pour cette période en Afrique du Nord notamment.

CHAPITRE II.

ARCHEO-BIOGEOCHIMIE ISOTOPIQUE :

ÉTAT DE L'ART ET PRINCIPES GÉNÉRAUX POUR L'ÉTUDE DES RÉGIMES ALIMENTAIRES ET DES SCHEMAS DE MOBILITÉ À ROME

Le célèbre adage « Dis-moi ce que tu manges, je te dirai qui tu es » formulé par le gastronome Brillat-Savarin dans les prolégomènes de son ouvrage *la physiologie du goût ou méditations de gastronomie transcendante* (1826, page VIII), translittéré sous la forme « You are what you eat » par le nutritionniste Lindlahr dans un article paru dans *The Bridgeport Telegraph* en 1923, est devenu un aphorisme fort usuel dans une toute autre sphère, à savoir *l'archéo-biogéochimie isotopique*, discipline pouvant se définir comme étant la biogéochimie isotopique appliquée aux restes biologiques découverts en contextes archéologiques.

DeNiro et Epstein furent les premiers à recourir à cette expression qu'ils travestirent quelque peu sous la forme « You are what you eat (plus a few ‰) », à l'occasion d'une communication présentée au colloque annuel de *The Geological Society of America* en 1976. Par cette transformation de l'adage original, les auteurs voulurent résumer en quelques mots percutants que le signal isotopique biogénique enregistré dans les tissus des animaux et des hommes est directement dépendant des compositions isotopiques des aliments et de l'eau qu'ils consomment, à un facteur de fractionnement près, ce dernier pouvant varier selon la phase biochimique ou l'élément chimique considéré.

1. ISOTOPES STABLES ET RADIOACTIFS : DÉFINITIONS ET PRINCIPALES PROPRIÉTÉS

Un atome est composé d'un noyau et d'un cortège électronique. Le noyau est lui-même constitué de particules élémentaires, appelées nucléons, qui sont soit chargées positivement, les protons, soit électriquement neutres, les neutrons. Autour du noyau gravitent un ensemble d'électrons formant le cortège électronique. Un atome contient autant de protons que d'électrons. La charge électrique du proton est identique à celle de l'électron en valeur absolue, assurant, de fait, une neutralité à l'atome. En outre, chaque particule élémentaire possède une masse qui lui est propre. Le noyau concentre l'essentiel de la masse atomique d'un atome (Albarède 2001).

Un nucléide est un atome dont le nombre de protons et de neutrons est spécifié quel que soit l'état du cortège électronique. Par convention, un nucléide est représenté symboliquement sous la forme suivante :



où X exprime l'élément chimique, A indique le nombre de masse (nombre de nucléons) et Z, le numéro atomique (nombre de protons). Ce dernier est généralement éliminé de l'expression car redondant avec le symbole de l'élément chimique (Albarède 2001).

Deux nucléides ayant le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différents sont des **isotopes**. Les isotopes d'un élément chimique possèdent le même cortège électronique et demeurent électriquement neutre. Ils partagent des propriétés chimiques quasiment identiques mais présentent des propriétés physiques différentes (viscosité, volume molaire, températures de changements de phases, constante d'équilibre, cinétique réactionnelle) en raison d'une différence de **masse atomique** et de symétrie. Pour un élément chimique donné, on distingue un **isotope léger** d'un **isotope lourd** en fonction de leur nombre de masse respectif (Hoefs 2009).

Un même élément chimique peut posséder des **isotopes stables** et **instables**. Les isotopes stables se caractérisent par une absence de radioactivité décelable et un noyau conservant au cours du temps le même nombre de protons et de neutrons. Les isotopes instables ou radioactifs sont caractérisés par une radioactivité résultant de désintégrations spontanées de leur noyau. Cette désintégration est accompagnée de l'émission d'une particule α , β^- , β^+ , 1_0n ou l'émission d'un rayonnement électromagnétique γ . Cette désintégration nucléaire change la structure de l'isotope radioactif en un autre isotope stable ou instable du même élément chimique ou entraîne une transmutation de l'isotope radioactif en un isotope stable ou instable d'un autre élément chimique. Ces isotopes nouvellement formés sont qualifiés de **radiogénique** (Mook 2001).

Les abondances naturelles des principaux isotopes des **éléments chimiques légers** et **lourds** étudiés dans ce manuscrit sont reportées dans le Tableau 2.

Les **rapports d'abondance** isotopique, noté R, sont définis par l'expression suivante :

$$R = \frac{{}^bX}{{}^aX} \text{ ou } {}^bX/{}^aX$$

où aX indique la quantité molaire de l'isotope majoritaire pour un élément chimique donné et bX indique la quantité molaire de l'isotope rare pour un même élément chimique.

Tableau 2. Abondances naturelles, standards et demi-vie des principaux isotopes des éléments chimiques étudiés

Élément chimique	Isotope	Z	A	Abondance (%)	Standard	Demi-vie (années)
Carbone	¹² C	6	12	98,90	VPDB	-
	¹³ C	6	13	1,10		-
	¹⁴ C	6	14	> 0,01		5,73 x 10 ³
Azote	¹⁴ N	7	14	99,63	AIR	-
	¹⁵ N	7	15	0,37		-
Oxygène	¹⁶ O	8	16	99,76	VSMOW/VPDB	-
	¹⁷ O	8	17	0,04		-
	¹⁸ O	8	18	0,20		-
Strontium	⁸⁴ Sr	38	46	0,56	Eau de mer	-
	⁸⁶ Sr	38	48	9,87		-
	⁸⁷ Sr	38	49	7,04		-
	⁸⁸ Sr	38	50	82,53		-

Note : Données issues de Capo *et al.* (1998) et Criss (1999).

Le rapport d'abondance isotopique d'un échantillon étant généralement très faible, celui-ci est le plus souvent rapporté au rapport d'abondance isotopique d'un matériel de référence, appelé **standard**. Cet écart relatif est défini par l'équation suivante :

$$\delta^bX = \frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{standard}}} - 1$$

Par convention, cette valeur δ est multipliée par mille de façon à manipuler des chiffres significatifs. Elle est donc exprimée en pour mille (‰) (Coplen 2011). Si $R_{\text{échantillon}}$ est identique à R_{standard} , alors $\delta = 0$ ‰. En revanche, si $R_{\text{échantillon}}$ est plus petit que R_{standard} , alors δ est négatif, indiquant ainsi que l'échantillon contient moins d'isotope lourd que le matériel de référence (Mook 2001).

Le standard utilisé pour calculer le $\delta^{13}\text{C}$ ou le $\delta^{18}\text{O}$ est *Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)*. Il s'agit d'une roche sédimentaire à bélemnites (carbonate de calcium) de la formation Pee Bee (Crétacée) localisée en Caroline du Sud (États-Unis) (Craig 1957 ; Coplen 1996). Le $\delta^{18}\text{O}$ peut également être mesuré en utilisant la composition moyenne de l'eau de mer comme standard. Ce dernier est dénommé *Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)* (Baertschi 1976 ; Coplen 1996). Le standard utilisé pour mesurer le $\delta^{15}\text{N}$ est le *Ambient Inhalable Reservoir (AIR)*. Il s'agit, comme son nom l'indique, de la composition isotopique moyenne de l'air atmosphérique (Junk et Svec 1958 ; Coplen 1996). Les rapports d'abondance du strontium sont, en règle générale, exprimés comme tel, sans être rapportés à un standard, *i.e.* $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Toutefois, ces derniers peuvent aussi être calculés en utilisant comme standard l'eau de mer, *i.e.* $\delta^{87}\text{Sr}$ (Criss 1999). En pratique, les laboratoires possèdent des

standards internes, principalement pour une question de coût, qui sont normalisés aux standards internationaux (Hoefs 2009) (Tableau 2).

Le **fractionnement isotopique** est un phénomène physico-chimique responsable d'une différence de rapport isotopique d'un élément chimique entre deux phases ou deux substances. Les processus physiques et chimiques à l'origine de ces redistributions des composés isotopiques entre différentes phases ou composants dépassent le cadre de cette thèse. Nous retiendrons simplement qu'il existe : 1) un fractionnement isotopique s'effectuant à l'équilibre thermodynamique dépendant des liaisons entre atomes et de la masse des composés isotopiques (les molécules les plus lourdes occupant préférentiellement les phases les plus denses), et, 2) des fractionnements isotopiques cinétiques dépendant de la vitesse de réaction des composés isotopiques lors de processus incomplets et unidirectionnels (Criss 1999 ; Hoefs 2009). Le fractionnement isotopique entre deux phases ou substances A et B est exprimé selon l'expression suivante :

$$\Delta^aX_{A-B} = \delta^aX_A - \delta^aX_B$$

Il résulte de ces différents processus un **enrichissement** ou un **appauvrissement isotopique** d'un composé ou d'une phase par rapport à un ou une autre (Hoefs 2009).

2. BIOCHIMIE HUMAINE ET NUTRITIONNELLE : IMPLICATIONS POUR LES RECONSTRUCTIONS DES REGIMES ALIMENTAIRES ET DES SCHEMAS DE MOBILITE DES POPULATIONS ANCIENNES A PARTIR DES ANALYSES ISOTOPIQUES

2.1. Principes de biochimie de la nutrition humaine : digestion, absorption et distribution dans l'organisme des aliments ingérés

Durant la digestion, les aliments ingérés sont décomposés en leurs unités structurales, appelées macronutriments et micronutriments. Les **macronutriments** regroupent en plus de l'eau les nutriments énergétiques, à savoir les **protéines**, les **glucides** et les **lipides**. Les micronutriments rassemblent, quant à eux, les nutriments sans valeur énergétique, bien que vitaux, à savoir principalement les vitamines et les sels minéraux. La plupart de ces nutriments ont soit une **origine animale**, soit une **origine végétale** selon le régime alimentaire de l'individu considéré. L'eau et les sels minéraux peuvent aussi avoir une origine minérale (Sherwood 2006 ; Tortora et Derrickson 2007 ; Leclaire 2008).

La digestion fait intervenir un certain nombre d'enzymes (salivaires, gastriques, pancréatiques, biliaires et intestinales) permettant de dégrader les macronutriments à l'exception de l'eau en différents produits finaux. Ainsi, les protéines sont clivées en **acides aminés (AA)**, les glucides en monosaccharides et oligosaccharides, et enfin les lipides en acides gras, en glycérol et en cholestérol. Après dégradation, les produits finaux de la digestion sont absorbés par l'organisme, principalement au niveau de l'intestin grêle, selon deux voies. Les produits hydrosolubles tels que les acides aminés, les monosaccharides, les oligosaccharides et les acides gras à courtes chaînes intègrent la circulation sanguine via le système porte tandis que les produits liposolubles comme les acides gras à longues chaînes, le glycérol et le cholestérol rejoignent la circulation lymphatique sous forme de chylomicrons avant de gagner la circulation sanguine via la veine sous-clavière. L'eau et les micronutriments sont pour leur part incorporés sans subir de modification chimique préalable selon les deux voies que nous venons de décrire, et ce en fonction de leur nature. L'ensemble de ces produits sont ensuite distribués dans l'organisme (Lecleire 2008).

Les AA absorbés et excrétés dans le sang sont acheminés vers le foie, lequel les libère pour l'essentiel en l'état dans la circulation sanguine générale afin qu'ils puissent rejoindre l'ensemble des cellules de l'organisme et participer aux synthèses protéiques. Les AA captés par le foie sont, quant à eux, utilisés comme source d'énergie et servent également à la synthèse des protéines fabriquées *in situ*. D'une façon générale, le métabolisme des acides aminés répond à deux objectifs, à savoir 1) le maintien du pool des acides aminés dans l'organisme, et, 2) le renouvellement des protéines de l'organisme (Ravary et Figarella 1993 ; Tomé 1995 ; Sherwood 2006). Il existe 21 AA protéinogènes chez l'Homme. Les AA retrouvés dans les protéines sont tous formés d'un **squelette carboné** montrant un groupe carboxyle COOH et un **groupe amine** NH₂ ainsi qu'un atome d'hydrogène et une chaîne latérale portés par un même atome de carbone, appelé **carbone α**. La nature du groupement latéral différencie les AA entre eux. Les AA représentent l'**unique source d'azote** de l'organisme et se distinguent en trois classes, à savoir les **AA essentiels (AAe)**, ceux **non-essentiels (AAne)** et ceux semi-essentiels (AAse). Un AA est dit essentiel lorsqu'il **ne peut être synthétisé de novo** ou à une vitesse suffisante pour satisfaire les besoins de l'organisme, et doit donc de ce fait être apporté via l'alimentation. En raison de leur masse moléculaire relativement importante, les AAe ne subissent que très **peu de fractionnement isotopique** au cours de leur transfert au sein du réseau trophique. Aussi, les compositions isotopiques des AAe assimilés sont similaires à celles des AAe des aliments ingérés et digérés desquels ils sont issus (Garrett et Grisham 2000 ; Schwarcz 2000 ; Sherwood 2006). Par opposition, un AA est dit non-essentiel quand celui-ci **peut être synthétisé** par l'organisme à partir d'une ou plusieurs voies métaboliques, chacune d'elle étant spécifique à l'AAne en question et recourant à un substrat particulier. À titre d'exemple, la glycine peut être formée à partir de la sérine, un AAne jouant ici un rôle de précurseur, ou bien, être synthétisée à partir de la triade CO₂, 5,10-

méthylènetétrahydrofolate et ammoniac. Les **compositions isotopiques** des AAne sont donc **déterminées** par celles des **substrats** à partir desquels ils sont synthétisés. Néanmoins, bien que pouvant être synthétisés *de novo* par l'organisme, les AAne ne le sont pas nécessairement. À l'instar des AAe, les AAne issus de l'alimentation **peuvent être directement métabolisés** par les cellules des différents tissus du corps pour former de nouvelles protéines. Dès lors, les **compositions isotopiques** de ces AAne réutilisés en l'état dans l'organisme **reflètent** celles des AAne des **aliments ingérés** et digérés dont ils proviennent initialement (Garrett et Grisham 2000 ; Schwarcz 2000 ; Sherwood 2006). Enfin, dans certaines circonstances, un AAne peut devenir conditionnellement essentiel à une période de la vie donnée, il est dit alors semi-essentiel (Garrett et Grisham 2000 ; Sherwood 2006). Les AA ne peuvent être stockés, de telle sorte que s'ils ne sont pas rapidement utilisés, ceux-ci sont dégradés par transamination ou oxydation pour donner un ion ammonium et un squelette de carbone. L'ion ammonium est éliminé de l'organisme sous forme d'urée via l'urine ou recyclé pour la synthèse d'un autre AA. Quant au squelette de carbone, celui-ci est réutilisé comme substrat ou précurseur biochimique à d'autres molécules ou AA (Ravary et Figarella 1993 ; Tomé 1995 ; Sherwood 2006).

Les monosaccharides et oligosaccharides – composés caractérisés par la présence de **chaînon carbonés** porteurs de groupements hydroxyle OH et de fonctions aldéhydes ou cétoniques – absorbés et passés dans le sang sont transportés jusqu'au foie. Ce dernier convertit le fructose et le galactose en **glucose**. Le glucose converti *in situ* et celui provenant des nutriments dégradés sont pour une large part mis en réserve sous la forme de glycogène dans les hépatocytes. Les capacités de stockage hépatique étant toutefois limitées, le glucose en excès est transformé en glycérol et en acides gras lesquels sont à leur tour convertis en triglycérides. La majorité de ces triglycérides est agrégée à des protéines spécifiques avant d'être libérée dans le sang et captée par le tissu adipeux. Une faible part des triglycérides synthétisés dans le foie sont emmagasinés sur place. Selon les besoins, le foie libère dans le sang le glycogène stocké sous forme de glucose, lequel est distribué aux différentes cellules de l'organisme et sert à la production d'adénosine-5'-triphosphate (ATP), molécule fournissant l'énergie nécessaire aux réactions chimiques du métabolisme. Ce glucose libéré peut également être mis en réserve sous forme de glycogène dans le tissu musculaire (Ravary et Figarella 1993 ; Tomé 1995 ; Garrett et Grisham 2000 ; Sherwood 2006). Les **compositions isotopiques** du glucose utilisé dans l'organisme sont donc **liées** à celles des **glucides ingérés** (Schwarcz 2000).

Les **acides gras** et le **glycérol** – composés complexes majoritairement constitués d'atomes de **carbone**, d'hydrogène et d'oxygène – présents dans le sang sous forme de triglycérides sont soit stockés dans le tissu adipeux soit utilisés comme source d'énergie sous forme d'ATP dans le tissu adipeux, les muscles squelettiques et le foie. Le **cholestérol** – structure bien plus complexe que celles des acides gras et des glycérols – est, quant à lui, métabolisé et stocké en partie par le foie. Les triglycérides ainsi mis en réserve peuvent être mobilisés en cas d'une diminution critique du glucose

dans le sang pour produire l'ATP nécessaire dans les différentes cellules du corps (Ravary et Figarella 1993 ; Tomé 1995 ; Sherwood 2006). Les **compositions isotopiques** des acides gras, du glycérol et du cholestérol sont donc **dépendantes** de celles des **lipides ingérés** (Tomé 1995).

L'**eau** – composée notamment d'atomes d'**oxygène** – absorbée (entre 75 et 90 % de l'eau corporelle totale) et celle résultant du métabolisme (entre 25 et 10 % de l'eau corporelle totale) sont réparties dans les différents compartiments liquidiens du corps, à savoir le compartiment intracellulaire et celui extracellulaire. L'eau remplit de multiples fonctions que nous ne détaillerons pas ici car dépassant très largement le cadre de ce travail. Nous retiendrons simplement que les **flux d'eau entrants** sont **régulés** par **ceux sortants** afin de maintenir un **équilibre hydrique** (Sherwood 2006 ; Tortora et Derrickson 2007). Les **compositions isotopiques** de l'eau corporelle totale sont donc étroitement **liées** à celles de **l'eau ingérée** sous forme de **fluides** ou via les **aliments** (Luz *et al.* 1984 ; Bryant et Froelich 1995).

Les minéraux absorbés sont véhiculés par le sang jusqu'aux différents tissus. Ceux-ci peuvent se diviser en deux classes, d'une part les éléments majeurs (> 1 mg/kg) et d'autre part les oligo-éléments (< 1 mg/kg). Les éléments minéraux majeurs sont le calcium, le fer, le magnésium, le phosphore, le potassium, le sodium et le soufre. Les principaux oligo-éléments sont l'iode, le cuivre, le fluor, le chlore, le zinc, le cobalt, le sélénium, le **strontium** et le manganèse. Le **stockage** des minéraux se fait principalement dans le foie et les **os**. Les minéraux remplissent de nombreuses fonctions, très différentes les unes des autres, que nous ne pourrions nous permettre de décrire ici (Sherwood 2006 ; Tortora et Derrickson 2007). Nous retiendrons cependant que les **compositions isotopiques** de ces éléments **reflètent**, à l'instar des autres nutriments, celles des **sels minéraux** et des **oligo-éléments** constituant les aliments ou les fluides ingérés (Balter 2001).

In fine, les compositions isotopiques des différentes fractions biochimiques sont fortement influencées par celles des aliments et de l'eau consommés.

2.2. Fractions biochimiques des tissus d'intérêt : organisations architecturales et compositions chimiques

2.2.1. La phase collagénique de l'os

La phase organique constitue, en termes de masse, entre 20 et 30 % de la matrice extracellulaire osseuse (LeGeros 1991 ; Beniash 2011). Cette trame protéique se compose entre 80 et 90 % de fibres de collagène (Termine 1993 ; Viguet-Carrin *et al.* 2006). Le collagène de type I est prédominant et représente à lui seul près de 95 % du collagène osseux (Melkko *et al.* 1990 ; Niyibizi et Eyre 1994). D'autres types de collagène, tels que les types III et V sont, dans une bien moindre mesure,

également présents dans l'os (Niyibizi et Eyre 1989 ; Niyibizi et Eyre 1994). Les différents types de collagène se présentent sous la forme d'un ensemble de faisceaux de fibres non élastiques.

Tableau 3. Quantités relatives des principaux AA observés dans le collagène osseux et la kératine du cheveu

Acide aminé	Type	Formule chimique	Collagène			Kératine		
			Proportion (%)	% C	% N	Proportion (%)	% C	% N
Acide aspartique	AAne	C ₄ H ₇ NO ₄	4,4	4,6	3,7	5,2	4,3	3,7
Acide cystéique	AAne	C ₃ H ₇ NO ₅ S	-	-	-	0,4	0,2	0,3
Acide glutamique	AAne	C ₅ H ₉ O ₄ N	7,4	9,7	6,2	11,3	11,6	8,0
Alanine	AAne	C ₃ H ₇ NO ₂	11,2	8,8	9,4	3,7	2,3	2,6
Arginine	AAse	C ₆ H ₁₄ N ₄ O ₂	5	7,9	16,8	6,7	8,3	19,0
Citrulline	AAne	C ₆ H ₁₃ N ₃ O ₃	-	-	-	0,1	0,1	0,2
Cystéine	AAne	C ₃ H ₇ NO ₂ S	-	-	-	0,6	0,4	0,4
Glycine	AAne	C ₂ H ₅ NO ₂	33,4	17,5	28	6,6	2,7	4,7
Hémi-cystine	AAne	C ₆ H ₁₂ N ₂ O ₄ S ₂	-	-	-	17,1	21,1	24,2
Histidine	AAse	C ₆ H ₉ N ₃ O ₂	0,5	0,8	1,3	0,7	0,9	1,5
Hydroxylysine	AAne	C ₆ H ₁₄ N ₂ O ₃	0,5	0,8	0,8	-	-	-
Hydroxyproline	AAne	C ₅ H ₉ NO ₃	8,9	11,7	7,5	-	-	-
Isoleucine	AAe	C ₆ H ₁₃ NO ₂	0,9	1,4	0,8	4,3	5,3	3,0
Leucine	AAe	C ₆ H ₁₃ NO ₂	2,3	3,6	1,9	5,8	7,2	4,1
Lysine	AAe	C ₆ H ₁₄ N ₂ O ₂	2,7	4,3	4,5	2	2,5	2,8
Méthionine	AAe	C ₅ H ₁₁ NO ₂ S	0,5	0,7	0,4	0,7	0,7	0,5
Phénylalanine	AAe	C ₉ H ₁₁ NO ₂	1,2	2,8	1	2,2	4,1	1,6
Proline	AAne	C ₅ H ₉ NO ₂	13	17,1	10,9	6,3	6,5	4,5
Sérine	AAne	C ₃ H ₇ NO ₃	3,6	2,8	3	10,7	6,6	7,6
Thréonine	AAe	C ₄ H ₉ NO ₃	1,7	1,8	1,4	7,7	6,3	5,5
Tryptophane	AAe	C ₁₁ H ₁₂ N ₂ O ₂	-	-	-	0,5	1,1	0,7
Tyrosine	AAne	C ₆ H ₁₁ NO ₃	0,3	0,5	0,3	1,7	2,1	1,2
Valine	AAe	C ₅ H ₁₁ NO ₂	2,5	3,3	2,1	5,6	5,8	4,0

Note : Données issues de Ambrose (1993b), Turban-Just et Schramm (1998) et Voet et Voet (2005) pour le collagène et de Clay et al. (1940), Ward et Lundgren (1954), Brandbury (1966), Robbins (2012a) et Voet et Voet (2005) pour la kératine.

AAe : acides aminés essentiels ; AAne : acides aminés non-essentiels ; AAse : acides aminés semi-essentiels.

Chacune de ces fibres est composée de fibrilles, elles-mêmes formées d'agrégats de molécules de tropocollagène (Gartner et Hiatt 2012). Ces dernières sont constituées de trois chaînes polypeptidiques, porteuses de glucides, disposées en triple hélices (Rossert et De Grombrughe 1996 ; Dalglish 1997). Ces chaînes sont formées d'AA et sont particulièrement riches en glycine, proline, alanine, hydroxyproline et acide glutamique, lesquels contribuent majoritairement au pool de carbone et d'azote du collagène (Tableau 3) (Bolboacă et Jäntschi 2007). De grandes différences entre les

compositions isotopiques ont pu être mises en évidence entre les différents AA, quels qu'ils soient, constituant le collagène (Tableau 3) (Ambrose 1993b ; Turban-Just et Schramm 1998).

2.2.2. Les phases carbonatées de l'os et de l'émail

La phase inorganique compose, en termes de masse, entre 60 et 70 % de la matrice osseuse (LeGeros 1991 ; Beniash 2011) et entre 95 et 97 % de la matrice amélaire (LeGeros 1991 ; Robinson 1995). Le constituant minéral de ces phases est un phosphate de calcium pauvrement cristallisé (Mann 2001 ; Dorozhkin et Epple 2002) qui s'apparente à une apatite phosphocalcique, non stœchiométrique, lacunaire et poly-substituée. Ces apatites sont généralement comparées à une hydroxyapatite de formule chimique générale $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (Legros *et al.* 1986 ; Boskey 2006 ; Errassifi 2011). Ces biominéralisations sont communément dénommées apatites biogènes ou bioapatites (Smith *et al.* 1983 ; Zazzo 2001 ; Dalconi *et al.* 2003).

Les cristaux d'apatite de l'os mesurent 20 à 50 nm de longueur et 12 à 20 nm de largeur (Glimcher 2006) tandis que ceux de l'émail sont environ 10 fois plus longs et larges (Kirkham *et al.* 1998). L'émail est donc une phase mieux cristallisée que l'os (Boskey 2006).

Les structures apatitiques de l'os et de l'émail comportent des tunnels et des surfaces actives qui permettent de multiples substitutions ioniques ainsi que la mise en place de lacunes (Elliott *et al.* 2002 ; El Hammari 2007). Ces permutations et défauts ponctuels du minéral sont observables sur les différents sites cristallographiques que présentent ces apatites (Elliott *et al.* 1985 ; Rey *et al.* 2009). Ainsi, les ions Ca^{2+} peuvent être remplacés par des lacunes ou des ions Sr^{2+} , Ba^{2+} , Pb^{2+} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Mn^{2+} , *etc.* Les ions PO_4^{3-} ont tendance à être substitués par des ions CO_3^{2-} , HPO_4^{2-} , SiO_4^{4-} , *etc.* Enfin les ions OH^- peuvent être échangés par des lacunes ou ions CO_3^{2-} , O^{2-} , S^{2-} , *etc.* (LeGeros 1981 ; Elliott 1994). Les substitutions des groupements PO_4^{3-} par les ions CO_3^{2-} et des ions Ca^{2+} par les cations divalents Sr^{2+} sont celles qui retiendront le plus notre attention dans ce travail.

Les teneurs ioniques des différents éléments ou composés substitués sont très variables au sein des réseaux apatitiques. Certains ions substitués sont présents à l'état de trace, tels que les ions Sr^{2+} , tandis que d'autres sont présents en de plus fortes proportions, tels que les ions CO_3^{2-} (LeGeros 1991). Les concentrations en ions Sr^{2+} sont, d'une manière générale, plus élevées dans la phase minérale de l'os que dans celle de l'émail dentaire. Ces concentrations varient dans les tissus squelettiques et dentaires typiquement entre 40 et 400 ppm (Underwood 1977 ; Hancock *et al.* 1989 ; Elliott et Grime 1993 ; Schweissing et Grupe 2003), bien que des concentrations supérieures à 1000 ppm aient parfois été enregistrées dans certains restes humains et fauniques découverts en contextes archéologiques (Radosevich 1993). Les ions CO_3^{2-} sont, quant à eux, les ions les plus fréquemment substitués à la surface ou au sein des réseaux cristallins de l'os et de l'émail (Posner 1987 ; Zazzo 2001).

Les ions CO_3^{2-} constituent chez l'Homme, en termes de masse, entre 2 et 8 % de l'os (Driessens 1983 ; Bigi *et al.* 1997 ; Landi *et al.* 2003 ; Kourkoumelis et Tzaphlidou 2010), avec une valeur moyenne d'environ 6 % (Posner 1987 ; LeGeros 1991) et entre 1 et 4 % de l'émail dentaire mature (Robinson 1995), avec une valeur moyenne d'environ 3 % (LeGeros 1991 ; Elliott *et al.* 2002).

Ces substitutions et lacunes confèrent aux structures apatitiques de l'os et de l'émail des propriétés physico-chimiques différentes de celles que présente une hydroxyapatite pure (El Hammari 2007). En effet, l'incorporation d'ions CO_3^{2-} dans le réseau cristallin a, d'une façon générale, tendance à déstabiliser la structure cristalline en question. Les conséquences de cette incorporation d'ions CO_3^{2-} sont une diminution de la cristallinité ainsi qu'une augmentation de la solubilité et de la porosité du tissu (LeGeros 1981 ; Driessens et Verbeeck 1990 ; Yao *et al.* 2009). Plus une apatite est riche en ions CO_3^{2-} , plus sa structure se trouve déstabilisée.

2.2.3. La phase kératinique du cheveu

Un cheveu est composé entre 65 et 95 % de protéines (Robbins 2012a). Les protéines synthétisées dans le follicule pilo-sébacé sont, pour l'essentiel, la kératine α des filaments intermédiaires mais aussi, et ce dans une bien moindre proportion, diverses protéines associées à la kératine (Robbins 2012a). La kératine α est constituée de deux chaînes polypeptidiques agencées en double hélice formant une spire dimérique. L'association des deux spires donne naissance à un protofilament, lequel se dimérise pour former une protofibrille. Un lot de quatre protofibrilles constitue une microfibrille, également nommé filament intermédiaire. Les microfibrilles sont collées ensemble par une matrice protéique amorphe à forte teneur en soufre et forment des faisceaux, appelés macrofibrilles, composant, à leur tour, les cellules du cheveu (Dunn *et al.* 1998 ; Scott et Untereiner 2004 ; Voet et Voet 2005 ; Robbins 2012b). Parmi les 21 AA connus qui composent les chaînes polypeptidiques de type I et II de cette biomolécule, la cystine, la sérine, l'acide glutamique, la proline, la thréonine, la leucine et l'arginine sont les plus substantiels (Tableau 3) (Clay *et al.* 1940 ; Ward et Lundgren 1954 ; Brandbury 1966 ; Robbins 2012a) et participent majoritairement au pool de carbone et d'azote du cheveu (Petzke *et al.* 2005). Les différents acides aminés possèdent des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ qui leurs sont propres, bien qu'aucunement documentées à ce jour, et contribuent ensemble au signal isotopique global du cheveu (Petzke *et al.* 2005).

2.3. Rythmes d'intégration du signal isotopique dans l'organisme

La description des processus inhérents à l'ostéogénèse, l'amélogénèse et la morphogénèse du cheveu dépassent très largement le cadre de ce travail. Néanmoins, certaines caractéristiques

concernant notamment les dynamiques de ces processus et les rythmes de croissance de l'os, de l'émail et du cheveu doivent être évoquées afin de comprendre les modalités de l'enregistrement des teneurs isotopiques dans ces tissus ou annexes.

2.3.1. Intégration du signal isotopique au cours des processus de modelage et de remodelage de l'os

Tous les éléments du squelette subissent d'importants changements au cours de l'enfance et de l'adolescence, en raison des phénomènes associés au modelage osseux, mais également à l'âge adulte, du fait des processus assimilés au remodelage osseux (Akkus *et al.* 2003). L'os est en cela un tissu en **perpétuel remaniement**.

L'ostéogénèse se réalise selon deux mécanismes, à savoir 1) l'ossification endochondrale responsable de la formation des os longs et des os courts, ou 2) l'ossification membraneuse responsable de la formation des os plats (Gray et Standring 2008). Il existe six phases distinctes de **remodelage osseux**. Il débute par une phase d'activation cellulaire qui permet d'amorcer une phase de résorption osseuse suivie d'une phase de réversion conduisant au recrutement de cellules ostéoprogénitrices. S'ensuit alors une phase d'apposition puis de minéralisation avant qu'une phase de quiescence ne s'installe (Seibel 2005 ; Devulder 2009). Différents phénomènes de nature cellulaire, hormonale, chimique, électrique et mécanique régulent les phases du remodelage osseux (Devulder 2009). Les principales cellules osseuses impliquées dans les processus de remodelage sont les ostéoclastes, les ostéoblastes et les ostéocytes, toutes localisées dans la matrice extracellulaire de l'os (Guérin 2009). Divers protéines, facteurs protéiques, hormones et vitamines jouent également un rôle prépondérant dans la régulation des dynamiques cellulaires ayant cours lors des différentes phases du remodelage (Hill 1998 ; Nanci 1999 ; Hollinger *et al.* 2011). Le remodelage osseux permet donc un **renouvellement** de la matrice osseuse tout au long de la vie en remplaçant un tissu osseux anciennement formé, aux propriétés dégradées, par un nouveau tissu osseux (Hill 1998). Ces processus de remodelage osseux permettent à l'os de continuer à assurer efficacement l'ensemble de ses fonctions, et en particulier celle métabolique responsable de l'équilibre phosphocalcique et de l'homéostasie minérale dans l'organisme, du fait d'une mobilisation et d'une mise en circulation dans le sang des minéraux contenus dans les fractions d'os résorbées (Turner 1991). Le remplacement des unités structurales élémentaires dans les divers compartiments de la matrice osseuse s'effectue selon des rythmes qui diffèrent (Parfitt 1994 ; van Oers *et al.* 2008 ; Perrier 2010).

De nombreuses études s'intéressant à reconstruire les régimes alimentaires et les schémas de mobilité des populations du passé via des mesures isotopiques sur des vestiges anthropologiques ont argué que le signal isotopique mesuré sur les os reflétait les 10 dernières années de la vie des individus

analysés (Dupras et Schwarcz 2001 ; Prowse *et al.* 2005 ; Turner *et al.* 2009). S'il est vrai qu'un certain nombre d'études ont fait état d'un taux de remodelage osseux d'environ 10 % par an chez l'adulte, à l'instar de Manolagas (2000), celui-ci concerne généralement l'os total, sans distinction des compartiments le constituant. Or, il s'avère que l'**os cortical** – compartiment osseux ordinairement préféré en contexte archéologique pour mener des analyses isotopiques (Grupe *et al.* 1997 ; Knudson *et al.* 2007 ; Salesse *et al.* 2013) – se distingue, à ce sujet, très nettement de l'os trabéculaire. D'une façon générale chez l'adulte, l'os cortical se renouvelle de **1,5 à 6 %** par an tandis que l'os trabéculaire se remodèle de 10 à 28 % chaque année (Tableau 4) (Parfitt 1983 ; Mundy 1987 ; Manolagas 2000 ; Valentin 2002 ; Hedges *et al.* 2007 ; Shagina *et al.* 2012).

Tableau 4. Synthèse des principaux travaux ayant étudié le taux de remodelage osseux chez l'adulte

Étude	Taux de remodelage (% par an)		Méthode d'analyse
	Os cortical	Os trabéculaire	
Manolagas (2000)		10	Analyses histomorphométriques
Parfitt (1983), Mundy (1987), Manolagas (2000)	3-4	25-28	Analyses histomorphométriques
Commission Internationale de Protection Radiologique (Valentin 2002)	2-4	10-25	Turnover des radionucléides dans les tissus
Hedges <i>et al.</i> (2007)	1,5-4	-	Turnover des radionucléides dans les tissus (¹⁴ C)
Shaniga <i>et al.</i> (2012)	2,7-6	-	Turnover des radionucléides dans les tissus (⁹⁰ Sr)
Synthèse	1,5-6	10-28	

Les processus du remodelage osseux sont particulièrement **dépendants de l'âge** des sujets étudiés. D'une manière générale, ces processus ralentissent au fur et à mesure qu'un individu vieillit (Frost 1961, 1969). À titre d'exemple, la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) a estimé qu'entre la naissance et la fin de la croissance d'un individu, le taux de remodelage était divisé par un facteur 100 pour l'os cortical et par un facteur 17 pour l'os trabéculaire (Tableau 5). Un ralentissement similaire du rythme de renouvellement de l'os cortical a pu être déterminé par Hedges *et al.* (2007). Par ailleurs, Shagina *et al.* (2012) ont mis en évidence un regain de l'activité des cellules responsables du remodelage osseux chez les hommes âgés de plus de 55 ans et les femmes ménopausées. Ainsi, alors que les hommes âgés de moins de 55 ans et les femmes non-ménopausées détenaient des taux de remodelage similaires pour l'os cortical, de l'ordre de 2,7 % par an, ceux-ci augmentent de près de 50 % pour les hommes passés 55 ans et de plus de 120 % pour les femmes

passées la ménopause. En plus de l'âge, cette étude met en évidence une différenciation des taux de remodelage osseux en **fonction du sexe** des individus, fait également révélé par Hedges *et al.* (2007) en particulier durant l'adolescence.

Tableau 5. Taux de remodelage osseux en fonction des classes d'âge établies par la Commission Internationale de Protection Radiologique

Âge	Taux de remodelage osseux (% par an)	
	Os cortical	Os trabéculaire
Nouveau-nés	300	300
1 an	105	105
5 ans	56	66
10 ans	33	48
15 ans	19	35
Adulte	3	18

Note : Données issues de Valentin (2002).

Par ailleurs, certains **types d'os** se remodelent plus rapidement que d'autres en raison de leurs proportions relatives d'os cortical et d'os trabéculaire les constituant (Parfitt 1994). De surcroît, selon la région anatomique observée, le taux de remodelage différerait, de tel sorte que les métaphyses présenteraient un taux de remodelage osseux plus important que la diaphyse d'un même os (Waters-Rist et Katzenberg 2009). En outre, Hedges *et al.* (2007) ainsi que Tsutaya et Yoneda (2013) ont pu démontrer que le renouvellement de la **phase organique et la phase minérale d'un os** donné se réalise selon un **même rythme**. Enfin, il est à noter qu'un os ne semblerait pas être soumis à ces processus de remodelage osseux chez l'Homme, à savoir, le massif pétreux de l'os temporal chez les individus âgés de plus de 2 ans (Jørkov *et al.* 2009).

En somme, les signaux isotopiques mesurés sur les différents compartiments des os fournissent des informations relatives à l'alimentation ou à la mobilité sur 1) un temps long, de minimum 17 ans pour l'os cortical et 4 ans pour l'os trabéculaire, pour les adultes, vieux comme jeunes, et 2) un temps relativement court voire très court, de l'ordre de quelques mois à quelques années pour les sujets immatures. Les signaux isotopiques mesurés à la fois sur la phase organique et sur la phase minérale d'un même os procurent des informations synchrones. En revanche, les signaux isotopiques mesurés sur différents types d'os peuvent correspondre à des temporalités distinctes bien que toujours relatives aux dernières années ou décennies de la vie d'un individu (> 1 an).

2.3.2. Intégration du signal isotopique au cours des processus de minéralisation de l'émail dentaire

À l'inverse du tissu osseux, l'émail est un tissu inerte sur le plan métabolique et ne subit **aucun remaniement** après sa formation (Fincham *et al.* 1999 ; Lee-Thorp 2001 ; Fuller *et al.* 2003).

La formation de l'émail se décompose en deux phases, histologiquement et chimiquement distinctes, au cours desquelles les modes et taux de minéralisation diffèrent (Wöltgens *et al.* 1980 ; Suga 1983). La première phase correspond à l'**édification** de la structure amélaire (Goldberg 2007). Cette phase se caractérise par la sécrétion d'une matrice organique extracellulaire, riche en protéines et en eau, au statut transitoire, au sein de laquelle prennent place les processus de minéralisation primaire du tissu (Reith et Butcher 1967 ; Fincham *et al.* 1999). L'émail ainsi formé est **hypominéralisé** avec seulement 30 % (en masse) de la structure amélaire qui est calcifiée (Kirkham *et al.* 1988 ; Robinson *et al.* 1995 ; Smith 1998). S'ensuit une phase de **maturation pré- et post-éruptive** de l'émail au cours de laquelle s'effectuent les processus de minéralisation secondaire du tissu (Robinson *et al.* 1997). Cette maturation progressive de l'émail, conduisant à l'élimination de la quasi-totalité des composants matriciels, s'organise selon trois fronts de minéralisation successifs, prenant différentes directions (Suga 1982 ; Balasse 2002). Au terme de ces processus de minéralisation secondaire, l'émail dentaire devient le **tissu le plus minéralisé** de l'organisme, composé à 95 % (en masse) de cristaux d'apatite (Simmer et Fincham 1995 ; Smith 1998).

De nombreux travaux se sont intéressés à estimer le temps de maturation pré- et post-éruptive de l'émail dentaire chez l'Homme, en appliquant diverses approches méthodologiques. Ceux-ci ont pu mettre en évidence que la phase de maturation, notamment post-éruptive, se réalisait sur un **temps long**, généralement de plusieurs années, qui néanmoins n'excédait jamais plus de 3 ans (Aasenden 1975 ; Crabb 1976 ; Wöltgens *et al.* 1981 ; Driessens *et al.* 1985 ; Schulte *et al.* 1999 ; ten Bosch *et al.* 2000), à l'instar des autres mammifères (Balasse 2002 ; Hoppe *et al.* 2004 ; Zazzo *et al.* 2005 ; Tafforeau *et al.* 2007). De nouveaux travaux sont venus nuancer ces résultats en déterminant un temps de maturation post-éruptive de l'émail des molaires chez l'Homme bien plus long, pouvant être supérieur à 5 ans (Stiefel et Binus 1991 ; Kataoka *et al.* 2007), voire à 10 ans (Palti *et al.* 2008 ; Cardoso *et al.* 2009). Les processus de maturation de l'émail seraient donc beaucoup plus longs chez l'Homme que chez les autres mammifères pouvant s'expliquer par un temps de croissance bien plus long chez le premier (Le Moigne 1995). Cependant, les approches développées dans ces différentes études n'étant pas quantitatives, les rythmes de cette maturation post-éruptive de l'émail chez l'Homme restent inconnus.

Le temps de maturation post-éruptive doit toutefois être relativisé en raison des modalités d'**incorporation des ions carbonate (CO_3^{2-}) et des ions strontium (Sr^{2-})** au sein de la matrice

amélaire. En effet, les ions carbonate, dont les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{18}\text{O}$ sont mesurées, seraient, dans une large mesure, intégrés au sein du réseau cristallin **durant la phase de sécrétion** de la structure amélaire (Robinson 1995 ; Robinson *et al.* 1997). Les teneurs en ions carbonate resteraient donc relativement constantes au cours des différentes phases de formation de l'émail dentaire chez l'Homme (Sydney-Zax *et al.* 1991). Néanmoins, rapportée à la masse totale de la fraction minérale de l'émail, il a été observé une diminution de la concentration des ions carbonate dans l'émail en fonction de l'augmentation du taux de minéralisation du tissu (Rey *et al.* 1991 ; Sydney-Zax *et al.* 1991). De même, de récentes études ont proposé que l'incorporation des ions du strontium se réaliserait, pour l'essentiel, **au cours de la phase de sécrétion** de la structure amélaire (Humphrey *et al.* 2007 ; Humphrey *et al.* 2008).

En somme, malgré une maturation pré- et post-éruptive de l'émail relativement longue, l'essentiel des ions carbonate et strontium serait intégré à la matrice amélaire au cours de la phase d'édification. Cette phase s'effectue, selon les dents considérées, à différents moments de la vie. Ainsi, à titre d'exemple, la couronne de la première molaire permanente (M1) se forme vers l'âge de 0-3 ans, la deuxième molaire permanente vers l'âge de 3-8 ans et la troisième molaire permanente (M3) vers l'âge de 7-15 ans (Moorrees *et al.* 1963). Les signaux isotopiques mesurés sur l'émail fournissent des informations relatives à l'alimentation ou à la mobilité sur un temps considérablement plus court que ceux mesurés sur l'os cortical, du moins pour des sujets adultes. Pris de concert, les signaux mesurés sur l'émail et l'os permettent de mener une **approche diachronique** à l'échelle d'un individu de l'alimentation et/ou de la mobilité.

2.3.3. Intégration du signal isotopique au cours des processus de croissance du cheveu

Le cheveu se compose d'un bulbe et d'une tige pileaire (Rogers et Hynd 2001 ; Bernard 2006 ; Kierszenbaum 2006). Ces deux régions anatomiques se distinguent principalement sur un plan métabolique. En effet, siège d'une intense activité cellulaire et donc en constant remaniement, le bulbe constitue la portion terminale du follicule pilo-sébacé responsable du développement de la tige pileaire. À l'inverse, la **tige pileaire** est inactive d'un point de vue métabolique et n'est donc soumise à **aucun remaniement** après sa formation (O'Connell et Hedges 1999b ; Araújo *et al.* 2011 ; Williams *et al.* 2011).

Le follicule pilo-sébacé se renouvelle selon une séquence itérative divisée en 3 phases consécutives, à savoir 1) une **phase anagène** correspondant à une phase de croissance de la tige pileaire, 2) une **phase catagène** équivalant à une phase d'involution du follicule pilo-sébacé, et, 3) une **phase télogène** se rapportant à une phase de repos aboutissant à la chute du cheveu (Paus et

Cotsarelis 1999 ; Stenn et Paus 2001 ; Bernard 2006). La phase télogène peut, à son tour, être subdivisée en 3 sous-phases, à savoir 1) une phase où le cheveu est maintenu dans le follicule pilo-sébacé, 2) une phase exogène où le cheveu est éliminé de façon active (Stenn et Paus 2001 ; Higgins *et al.* 2011), et, 3) une phase kénogène où le follicule pilo-sébacé est vide (Rebora et Guarrera 2002 ; Rebora et Guarrera 2004). À l'issue des phases catagène et télogène, la plupart des compartiments épithéliaux et pigmentaires localisés dans la partie sous-isthmique du follicule pilo-sébacé est résorbé, à l'exception notable de la papille dermique. S'ensuit alors un processus de néo-morphogénèse *in situ* grâce à un réservoir de cellules souches pluripotentes par lequel le follicule pilo-sébacé est entièrement régénéré. Un nouveau cycle pileux peut alors prendre place permettant le développement d'un nouveau cheveu. Bernard (2012) a proposé une nouvelle approche du cycle pileux en considérant le follicule pilo-sébacé comme un organe « bi-stable ». Ce dernier transiterait, selon un modèle stochastique (Halloy *et al.* 2000), d'un état stable actif (phase anagène) à un état stable dormant (phase télogène), alternant avec de courtes périodes de remodelage correspondant à une phase d'involution (phase catagène) et une phase de néo-morphogénèse (phase néogène) (Baker et Murray 2012 ; Bernard 2012 ; Westgate *et al.* 2013).

Chaque phase du cycle pileux se caractérise par une **périodicité** qui lui est propre. La phase anagène s'étend sur plusieurs années tandis les phases catagène, télogène et néogène s'effectuent durant un laps de temps plus court de l'ordre de quelques semaines voire quelques mois (Al-Nuaimi *et al.* 2012). Certains auteurs ont mis en évidence que la durée de ces phases fluctuait d'un individu à l'autre. De plus, pour un même follicule pilo-sébacé, il a pu être déterminé que la durée des différentes phases variait de façon aléatoire d'un cycle à l'autre (Courtois *et al.* 1994 ; Courtois *et al.* 1995). Ainsi, à tout instant, la chevelure d'un individu sain contient entre 58 et 98 % de follicules pilo-sébacés en phase active de croissance, avec une gamme de valeurs moyennes se situant entre 80 et 90 % ; les follicules pilo-sébacés restants se trouvant dans des états de stabilité ou de latence (Van Scott *et al.* 1957 ; Kligman 1959 ; Pecoraro *et al.* 1964 ; Saitoh *et al.* 1970 ; Courtois *et al.* 1995 ; Dawber et Van Neste 2004 ; Tajima *et al.* 2007 ; Randall et Botchkareva 2009).

La durée moyenne d'un **cycle pileux** a pu être estimée à environ **2-7 ans** (Friedenthal 1908 ; Pinkus 1947 ; Kligman 1959 ; Saitoh *et al.* 1970 ; Courtois *et al.* 1995). Robbins et Robbins (2003) ont mis en évidence que le cycle pileux pouvait être plus long, avec une durée maximale d'environ 12-14 ans. De surcroît, de nombreuses études ont pu estimer une vitesse de **croissance** de la tige pileux d'un cheveu comprise en moyenne entre 0,3 et 0,4 mm par jour, soit environ **1 cm par mois** (Myers et Hamilton 1951 ; Pecoraro *et al.* 1964 ; Barman *et al.* 1965 ; Barth 1986 ; Hayashi *et al.* 1991 ; Loussouarn 2001 ; Van Neste 2004 ; Van Neste 2006 ; Tajima *et al.* 2007). Ces moyennes masquent toutefois une grande variabilité interindividuelle avec des vitesses de croissance de la tige pileux pouvant fluctuer de 0,6 à 3,6 cm par mois (Harkey 1993 ; Sachs 1996). Enfin, il a pu être déterminé qu'un cheveu mettait

approximativement 3 semaines pour atteindre la surface du cuir chevelu d'un individu (Saitoh *et al.* 1970). Notons pour conclure qu'un certain nombre de facteurs peuvent venir moduler la croissance d'un cheveu tels que l'âge, le sexe, la région où il se localise sur le cuir chevelu, des déterminants génétiques et enfin l'état de santé d'un individu (Araújo *et al.* 2011).

En somme, les valeurs isotopiques obtenues sur des cheveux procurent des informations d'ordre alimentaire relatives aux derniers mois, voire aux dernières années, de la vie d'un individu, et ce, en fonction de la longueur des cheveux analysés. Les signaux isotopiques mesurés sur différents cheveux d'un même individu peuvent refléter des moments différents de la vie d'un individu, en particulier lorsque ceux-ci sont dans des phases différentes du cycle pilaire. Ce décalage temporel pourrait varier de 0 à 4 mois selon les cheveux considérés (O'Connell et Hedges 1999b ; Williams 2008 ; Williams *et al.* 2011). En sus de l'os et de l'émail, le cheveu offre donc une troisième fenêtre de temps pour étudier l'alimentation d'un individu donné, et de fait mieux appréhender la variabilité de cette dernière au cours de la vie.

3. INTERPRÉTATION DES SIGNAUX ALIMENTAIRES MESURES SUR LES FRACTIONS PROTEIQUES ET APATITIQUES

3.1. Les compositions isotopiques en carbone

3.1.1. Le $\delta^{13}\text{C}$ des phases collagénique et kératinique

a. Origine du carbone incorporé par le collagène et la kératine

L'interprétation du signal alimentaire obtenu via l'analyse du $\delta^{13}\text{C}$ du collagène ($\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$) et de la kératine ($\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$) a suscité de nombreux débats dont certains sont encore d'actualité tel que celui sur l'**origine** des atomes de carbone constitutifs des fractions protéiques (DeNiro et Epstein 1978 ; van der Merwe 1982 ; Krueger et Sullivan 1984 ; Chisholm 1989 ; Lee-Thorp *et al.* 1989 ; Schwarcz 1991 ; Hedges 2003 ; Codron *et al.* 2011 ; Craig *et al.* 2013). Deux principaux modèles se sont par le passé confrontés sur ce point, à savoir, d'une part, le **modèle de mélange linéaire** proposé par Schwarcz (1991) théorisant ainsi l'hypothèse dite « des œufs brouillés » (*scrambled egg hypothesis*) originellement développée par van der Merwe (1982), et, d'autre part, le **modèle de routage des AA** conjecturé par Krueger et Sullivan (1984) et formalisé par Ambrose et Norr (1993) ainsi que Tieszen et Fagre (1993). Un **modèle mixte** à mi-chemin entre les deux précédents s'est vu proposé par Prowse (2001) et formalisé en partie en premier par Phillips et Koch (2002) et plus récemment par

Craig *et al.* (2013). Ces modèles ont pour vocation d'expliquer **quels sont les macronutriments influençant les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$** des fractions protéiques chez un consommateur tel que l'Homme mais aussi d'appréhender, pour un sujet donné, si son **alimentation est équilibrée ou non**.

a.1. Le modèle de mélange linéaire

Le modèle de mélange linéaire fait l'hypothèse que l'ensemble des nutriments énergétiques absorbés sont dissociés en leurs composants élémentaires, lesquels alimentent des pools, à l'exemple de celui du carbone total, servant à la synthèse des AAne réalisée *in vivo*. À ces différents pools, contribueraient également, mais dans une bien moindre mesure, les composants élémentaires de certains produits recyclés issus du catabolisme. Ce modèle propose aussi que les AAe, ne pouvant être fabriqués par l'organisme, soient, après leur absorption, directement acheminés vers les sites de synthèses protéiques pour y être réutilisés tels quels. Le carbone des AAne contribuant très majoritairement au carbone total du collagène ($\approx 80\%$) et de la kératine ($\approx 70\%$), les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$ **reflèteraient** donc essentiellement celles du pool du carbone total, et donc par extension, celles de **l'ensemble des macronutriments** incorporés, à un facteur de fractionnement près (van der Merwe 1982 ; Schwarcz 1991 ; Schwarcz 2000). Surtout employé durant la première décennie ayant suivi l'avènement de l'archéo-biogéochimie isotopique (Vogel et van der Merwe 1977 ; Tauber 1981 ; Chisholm *et al.* 1982 ; Schoeninger et DeNiro 1984 ; Schwarcz *et al.* 1985 ; Keegan et DeNiro 1988), ce modèle s'est avéré partiellement erroné et a laissé place au nouveau modèle décrit ci-dessous (Schwarcz 2000).

a.2. Le modèle de routage des AA

Le modèle de routage des AA conçoit que les AAne d'origine alimentaire sont, en dépit du fait qu'ils puissent être synthétisés *de novo* par l'organisme, préférentiellement réutilisés en l'état dans les différentes cellules du corps lors des synthèses protéiques. Ce mécanisme répondrait à un simple argument énergétique supputant que le recours à des AAne préformés serait plus avantageux en termes de coût énergétique que de les créer *de novo*. Ce routage direct des AAne ne pourrait toutefois avoir lieu qu'à la condition que ceux-ci soient présents dans les fluides extracellulaires à des concentrations suffisamment élevées. Une forte concentration des AAne dans ces fluides inhiberait 1) l'action des différentes enzymes contrôlant l'amorçage des synthèses des AAne, ou, 2) la synthèse des différentes enzymes responsables de l'amorçage des synthèses des AAne. En cas de faibles concentrations des AAne dans ces fluides, leurs synthèses s'effectueraient à partir d'un pool de carbone constitué principalement de celui des AAne déstructurés et du glucose. Les niveaux de

concentration des AAne dans les fluides extracellulaires seraient régulés par le taux de ressources d'origine animale consommées. Plus ce taux serait élevé, plus le routage spécifique des AAne serait assuré. En revanche, les atomes de carbone dérivant des triglycérides ne participeraient qu'en des quantités très faibles aux synthèses du collagène et de la kératine. En effet, de par leur structure chimique, les triglycérides ne pourraient entrer dans les principales voies métaboliques à partir desquelles les synthèses des AAne tirent leurs atomes de carbone. Parallèlement, les AAe provenant de l'alimentation seraient acheminés, comme dans le précédent modèle, directement aux sites des synthèses protéiques. Ainsi, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$ seraient, à un facteur de fractionnement près, principalement **influencées** par celles des AA, qu'ils soient essentiels ou non, composants les **protéines alimentaires** ingérées (Schwarcz 2000 ; Fernandes *et al.* 2012). Validé par différentes expérimentations animales (Hare *et al.* 1991 ; Ambrose et Norr 1993 ; Tieszen et Fagre 1993 ; Howland *et al.* 2003 ; Jim *et al.* 2004 ; Jim *et al.* 2006 ; Warinner et Tuross 2009), ce modèle est apparu comme le plus approprié durant les années 1990 et 2000 pour interpréter le signal alimentaire obtenu via l'analyse du $\delta^{13}\text{C}$ des fractions protéiques.

a.3. Un modèle mixte

Le modèle de routage des AA a souvent été schématisé par une simple relation linéaire entre d'une part les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des phases protéiques d'intérêt et d'autre part les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des protéines alimentaires (e.g. Lubell *et al.* 1994 ; Richards et Hedges 1999). Or, dans les faits, ce lien linéaire entre les deux variables susdites ne ferait sens que pour des individus consommant majoritairement – voire exclusivement – des ressources d'origine animale, lesquelles sont très riches en protéines. Cette relation linéaire se complexifierait en effet pour des individus ayant un régime alimentaire où la part des protéines d'origine animale serait de plus faible importance. Le degré de routage des AAne alimentaires étant dépendant de leurs niveaux de concentrations dans les fluides extracellulaires, moins ceux-ci seraient présents dans les aliments consommés, plus les synthèses *de novo* des AAne seraient effectives (Schwarcz 2000 ; Hedges 2004 ; Craig *et al.* 2013). Toutefois, dans tous les cas de figure, il semblerait **indispensable qu'au minimum 50 % du carbone** utilisé lors des synthèses protéiques proviennent des AA exogènes et endogènes (Ambrose et Norr 1993 ; Schwarcz 2000 ; Jim *et al.* 2006 ; Froehle *et al.* 2010 ; Fernandes *et al.* 2012). Dès lors, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$ seraient **influencées principalement** par celles des **protéines alimentaires** mais aussi **substantiellement** par celles des **glucides alimentaires**, voire dans une bien moindre mesure par celles des lipides alimentaires (Schwarcz 2000 ; Hedges 2004 ; Jim *et al.* 2006 ; Fernandes *et al.* 2012 ; Craig *et al.* 2013). Ainsi, une relation non-linéaire, à mi-chemin entre le modèle de mélange linéaire et celui de routage spécifique des AA, a été invoquée par différents auteurs depuis le début des années 2000

pour interpréter le signal alimentaire obtenu via l'analyse du $\delta^{13}\text{C}$ des phases protéiques (Garvie-Lok 2001 ; Prowse 2001 ; Phillips et Koch 2002 ; Jim *et al.* 2004 ; Keenleyside *et al.* 2006 ; Codron *et al.* 2011 ; Craig *et al.* 2013).

a.4. Modélisations de Craig *et al.* 2013

Pour appréhender le degré de routage des atomes de carbone des macronutriments ingérés, en particulier des protéines et des glucides, vers les fractions protéiques d'un individu donné mais aussi pour discuter le caractère équilibré ou non de l'alimentation de ce dernier et la part relative que tient dans celle-ci les ressources animales et végétales, marines ou terrestres, Craig *et al.* (2013) ont modélisé mathématiquement les trois précédents modèles (Figure 12). Ces modélisations permettent de tester différents scénarios alimentaires et nécessitent pour être utilisées, outre les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$, les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ mesurées sur les mêmes phases afin d'estimer la part des protéines animales terrestres de celle des protéines marines dans le pool total de protéines incorporées. Pour de plus amples détails concernant les règles, les équations et les hypothèses de travail formulées par les auteurs pour créer ces modélisations il conviendra de se référer à l'article *princeps*.

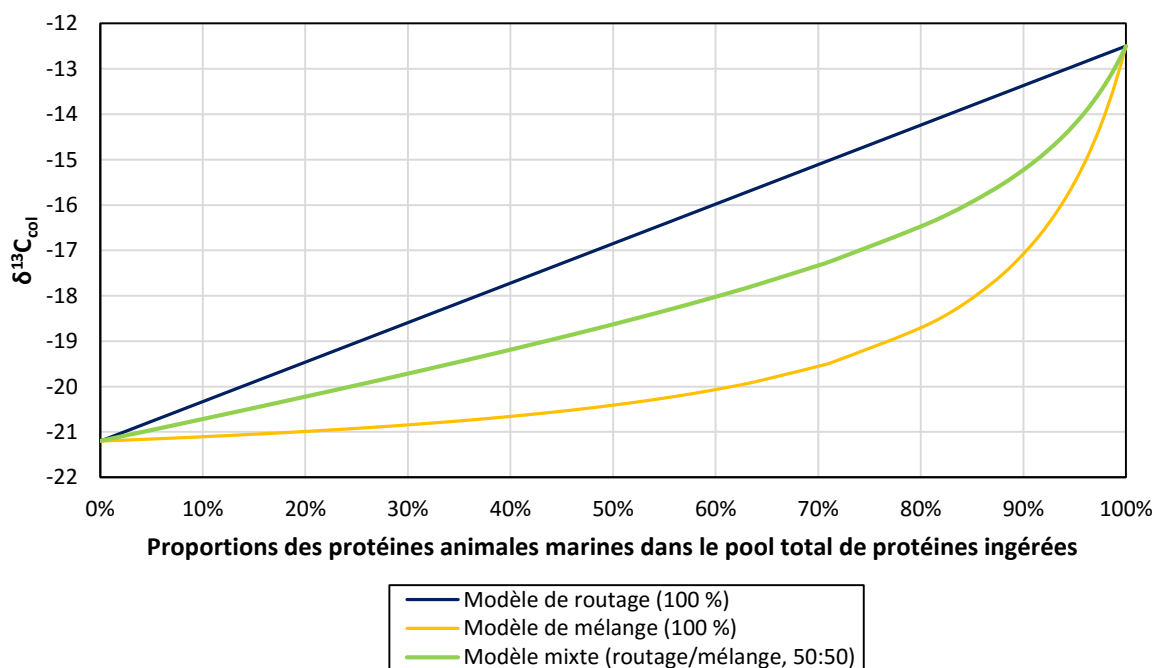


Figure 12. Modélisations de Craig *et al.* (2013)

b. Fractionnements isotopiques du ^{13}C

Les **fractionnements isotopiques** existant, d'une part, entre l'**alimentation** et les **fractions protéiques**, et, d'autre part, entre les fractions protéiques d'une **proie** et celles de son **consommateur** sont indispensables à connaître pour déterminer, à partir des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$, **quelles ressources alimentaires** ont été consommées par un individu. Ces fractionnements isotopiques s'opèrent au cours de la digestion, de l'absorption et de l'assimilation des nutriments et induisent *in fine* des enrichissements systématiques en ^{13}C des fractions protéiques par rapport aux ressources alimentaires consommées (Hedges 2003 ; Caut *et al.* 2009).

La **bioéthique** restreignant très fortement l'expérimentation et les opérations chirurgicales invasives sur l'être humain, les processus de fractionnements et les niveaux d'**enrichissement en ^{13}C** des fractions protéiques vis-à-vis de l'alimentation sont **peu connus** chez l'**Homme** (Waters-Rist et Katzenberg 2010 ; O'Connell *et al.* 2012 ; Touzeau *et al.* 2014). L'essentiel des données dont nous disposons à ce jour sur ces phénomènes est fondé sur l'expérimentation animale (*e.g.* Ambrose et Norr 1993 ; Howland *et al.* 2003 ; Warinner et Tuross 2009) ou sur des estimation empiriques (*cf. e.g.* Ambrose et Krigbaum 2003 ; Hedges 2003 ; Lee-Thorp 2008). Ces **données** sont relativement nombreuses et **différent** parfois **considérablement d'une étude à l'autre**. Aussi, présenterons-nous ci-après les facteurs de fractionnements que nous jugeons les **plus pertinents** pour notre étude.

b.1. Enrichissement des fractions protéiques par rapport à l'alimentation

Les travaux menés sur différents animaux utilisés comme **substituts expérimentaux** à l'Homme et dont l'**alimentation** était **contrôlée** – essentiellement des rongeurs (Muridés : souris et rats) et des cétartiodactyles (Suinés : porcs) – ont permis de mettre en évidence une importante **variabilité** de l'**enrichissement** en ^{13}C de la **phase collagénique** par rapport à l'ensemble des **aliments** consommés, cette variabilité étant comprise entre +0,5 et +10 ‰ (DeNiro et Epstein 1978 ; DeNiro et Epstein 1981 ; Chisholm 1986 ; Kennedy 1988 ; Tieszen et Boutton 1989 ; Hare *et al.* 1991 ; Ambrose et Norr 1993 ; Tieszen et Fagre 1993 ; Howland *et al.* 2003 ; Jim *et al.* 2004 ; Warinner et Tuross 2009). Récemment, Froehle *et al.* (2010) ont pu démontrer que cette forte **variabilité n'était pas** tant le **fruit d'une différence taxinomique** – notamment entre les Muridés et les Suinés, réfutant par là même l'argumentaire développé par Warinner et Tuross (2009) – que le résultat d'une différence de la qualité de l'alimentation, et en particulier de la **quantité** et de la **provenance** (*i.e.* le type d'écosystème) des **protéines consommées**. Fort de ce constat, Fernandes *et al.* (2012) ont établi à partir d'une compilation de certaines des données expérimentales présentées ci-devant (Ambrose et Norr 1993 ; Tieszen et

Fagre 1993 ; Howland *et al.* 2003 ; Jim *et al.* 2004 ; Warinner et Tuross 2009), via un modèle de régression linéaire multiple, un facteur de fractionnement pour le ^{13}C , dans l'hypothèse d'une alimentation mono-isotopique (*i.e.* issue entièrement d'un environnement C_3 ou C_4), entre la phase collagénique et l'alimentation, de **+4,8 ‰** ($\pm 0,2 \text{ ‰}$; 1σ). Cette valeur d'enrichissement paraît à ce jour la plus ***pertinente et consensuelle pour l'Homme***, et ce pour deux raisons, d'une part elle s'appuie sur le plus vaste corpus de données dont la fiabilité ne fait l'objet d'aucune contestation et d'autre part elle se révèle être relativement proche des précédentes estimations couramment utilisées pour l'Homme dans la littérature spécialisée (*cf. e.g.* Ambrose et Krigbaum 2003 ; Hedges 2003 ; Lee-Thorp 2008).

Par ailleurs, il existe à notre connaissance une seule étude expérimentale menée par Huelsemann *et al.* (2009) ayant déterminé pour l'**Homme** un facteur de fractionnement précis du ^{13}C entre la **kératine** du cheveu et l'**alimentation**. Mesuré à partir d'un corpus relativement limité constitué de deux femmes et un homme ayant une alimentation contrôlée, cet enrichissement isotopique est de **+3,7 ‰** ($\pm 0,5 \text{ ‰}$; 1σ). La kératine du cheveu serait donc appauvrie en ^{13}C par rapport au collagène d'environ 1,1 ‰. Cette valeur est relativement proche de celle estimée empiriquement pour l'**Homme** à partir d'échantillons archéologiques par O'Connell et Hedges (1999a) et O'Connell *et al.* (2001).

b.2. Enrichissement entre les fractions protéiques de différents maillons de la chaîne alimentaire

De façon complémentaire à ce que nous venons d'énoncer, Bocherens et Drucker (2003) ont pu définir un **enrichissement trophique** en ^{13}C entre le collagène d'un mammifère carnivore ou omnivore et celui de ses proies variant en moyenne entre **0 et +2 ‰**. Cette gamme de valeur est celle semblant faire à l'heure actuelle le plus grand **consensus** dans la communauté scientifique pour l'**Homme** (*cf. e.g.* Hedges 2003 ; France et Owsley 2013).

c. Processus physiologiques affectant le signal isotopique

Les processus physiologiques altérant les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$ sont relativement peu nombreux et les modifications isotopiques qui en découlent sont négligeables. Olsen *et al.* (2014) ont pu mettre en évidence – contrairement aux travaux de Katzenberg et Lovell (1999) – que certaines **maladies dégénératives** et **infectieuses** ainsi que certaines **fractures osseuses** s'accompagnaient d'une modification des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$ chez l'Homme, et ce en raison d'une **perte** importante de **protéines** par le corps ainsi qu'une perte modérée d'appétit voire d'une anorexie. L'organisme

engagerait des **synthèses de novo** d'**AAne** – lesquelles prendraient part subséquemment aux synthèses protéiques – à partir du **carbone** dérivant des **glucides** voire conditionnellement des lipides ingérés. Ceci influencerait *in fine* sur les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des fractions protéiques nouvellement synthétisées.

3.1.2. Le $\delta^{13}\text{C}$ des phases carbonatées apatitiques

a. Origine du carbone assimilé par les phases carbonatées

Contrairement à l'origine du carbone incorporé par les fractions protéiques, celle du carbone assimilé par les phases carbonatées suscite un consensus assez général (Lee-Thorp et van der Merwe 1987 ; Lee-Thorp *et al.* 1989 ; Schwarcz 1991 ; Bocherens *et al.* 1996a ; Schwarcz 2000 ; Jim *et al.* 2004 ; Passey *et al.* 2005 ; Warinner et Tuross 2009 ; Shin 2011 ; Fernandes *et al.* 2012). Pour appréhender convenablement les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ de la phase carbonatée de l'émail ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$) et de celle de l'os ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$), il est essentiel de comprendre **de quels macronutriments** les atomes de **carbone** constituant ces dernières **dérivent**.

Chez un individu sain, l'intégralité – ou presque (99 %) – des atomes de carbone quitte l'organisme via les poumons sous forme de CO_2 lors de l'expiration. Déchets du métabolisme cellulaire, ces atomes de carbone dérivent initialement des différents produits finaux de la digestion, et plus précisément ceux issus des macronutriments énergétiques. Aussi, puisque le CO_2 expiré est en équilibre isotopique avec le carbone inorganique dissous dans le sang (CO_2 , H_2CO_3^- , HCO_3^- et CO_3^{2-}) et puisque ce carbone inorganique présent dans le sang est également en équilibre isotopique avec les phases carbonatées, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ de ces dernières **reflètent** donc celles de l'**alimentation totale** (*i.e.* **tous les macronutriments** ingérés), à un facteur de fractionnement près (Lee-Thorp *et al.* 1989 ; Schwarcz 1991 ; Schwarcz 2000 ; Jim *et al.* 2004 ; Passey *et al.* 2005 ; Shin 2011).

b. Fractionnements isotopiques du ^{13}C

Comme pour les fractions protéiques, il existe entre l'**alimentation** et les **phases carbonatées** des **fractionnements isotopiques**, lesquels sont essentiels à connaître de façon à identifier, à partir des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ **quelles ressources alimentaires** ont été consommées par un individu donné. Nous présenterons ci-après les **facteurs de fractionnement** que nous jugeons être les plus **pertinents** pour notre étude parmi tous ceux publiés.

Les études expérimentales réalisées sur différents mammifères ont pu démontrer une très forte **variabilité interspécifique** de l'**enrichissement en ^{13}C** des **phases carbonatées** par rapport à l'**alimentation**, **contrairement** à celui des **fractions protéiques** par rapport à l'alimentation (Section II,

3.1.1, b.1). Les facteurs de fractionnement déterminés varient généralement entre +5 et +16 ‰ (Ambrose et Norr 1993 ; Tieszen et Fagre 1993 ; Balasse 2002 ; Howland *et al.* 2003 ; Jim *et al.* 2004 ; Passey *et al.* 2005 ; Zazzo *et al.* 2010). Cette forte variabilité résulterait principalement de **différences de physiologie digestive entre les taxons** étudiés (Metges *et al.* 1990 ; Cerling et Harris 1999 ; Passey *et al.* 2005 ; Kellner et Schoeninger 2007). Néanmoins, cette variabilité pourrait également être le fruit d'un potentiel **effet de taille** des espèces animales considérées (Passey *et al.* 2005 ; Fernandes *et al.* 2012) ce que semble accrédi- ter les récentes données expérimentales obtenues par Warinner et Tuross (2009). Cette relation est toutefois contestée par Kellner et Schoeninger (2007). De ce fait, la **pertinence** de recourir à l'**ensemble des données** expérimentales obtenues sur différents taxons pour **estimer un facteur de fractionnement** moyen entre les phases carbonatées et l'alimentation utilisable pour l'**Homme** doit être **reconsidérée**. En l'absence de données expérimentales disponibles sur les grands singes du fait de fortes restrictions nationales et internationales à l'encontre de l'expérimentation biomédicale sur ces espèces menacées d'extinction (Brooke E. Crowley, communication personnelle), le **porc**, de par sa morphologie, sa physiologie digestive et son métabolisme, apparaît actuellement comme le **substitut animal le plus proche de l'Homme**. Nous disposons de données expérimentales relatives aux niveaux d'enrichissement en ^{13}C des phases carbonatées vis-à-vis de l'alimentation (Miller et Ullrey 1987 ; Warinner et Tuross 2009 ; Fernandes *et al.* 2012). À partir des données publiées par Howland *et al.* (2003) et Warinner et Tuross (2009) nous avons ainsi pu estimer un enrichissement en ^{13}C moyen ($n_{\text{alimentations}} = 8$; $n_{\text{individus}} = 15$) entre la phase carbonatée de l'**os** et l'alimentation de **+10,7 ‰ ($\pm 1,4$ ‰ ; 1σ)** (Tableau 6). De même, à partir des travaux de Passey *et al.* (2005) et Warinner et Tuross (2009) nous avons pu déterminer un enrichissement en ^{13}C moyen ($n_{\text{alimentations}} = 4$; $n_{\text{individus}} = 11$) entre la phase carbonatée de l'**émail** et l'alimentation de **+13,4 ‰ ($\pm 1,0$ ‰ ; 1σ)** (Tableau 6). La phase carbonatée de l'**os** est donc **appauvrie** en ^{13}C par rapport à la phase carbonatée de l'**émail** d'environ **+2,7 ‰ ($\pm 1,7$ ‰ ; 1σ)**. Les raisons de cette différence d'enrichissement isotopique entre ces deux phases carbonatées sont pour l'heure mal cernées. Des variations du système tampon régulant localement le pH de même que des différences d'ordre organisationnel et chimique des phases apatitiques d'intérêt pourraient être à l'origine de cette différence de magnitude des facteurs de fractionnement du ^{13}C entre l'os et l'émail par rapport à l'alimentation globale (Pasteris *et al.* 2004 ; Smith *et al.* 2005 ; Warinner et Tuross 2009 ; Touzeau *et al.* 2014).

Tableau 6. Compilation des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-alim}}$ et de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)-alim}}$ mesurées expérimentalement sur des porcs ayant une alimentation contrôlée

Taxon	n	Composition de l'alimentation ^a		$\delta^{13}\text{C}_{\text{alim}}$ (‰ VPDB)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ (‰ VPDB)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$ (‰ VPDB)	$\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os) - alim}}$ (‰ VPDB)	$\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail) - alim}}$ (‰ VPDB)
		Protéines	Glucides/Lipides					
Porc	1 ^b	100 % C ₃	100 % C ₃	-25,7	-13,6	-	12,1	-
	1 ^b	± 95 % C ₃ , ± 5 % C ₄	90 % C ₃ , 10 % C ₄	-24,7	-14,2	-	10,5	-
	1 ^b	± 85 % C ₃ , ± 15 % C ₄	70 % C ₃ , 30 % C ₄	-20,5	-11,8	-	8,7	-
	1 ^b	± 75 % C ₃ , ± 25 % C ₄	50 % C ₃ , 50 % C ₄	-18	-9	-	9	-
	1 ^b	± 65 % C ₃ , ± 35 % C ₄	30 % C ₃ , 70 % C ₄	-15,9	-6,3	-	9,6	-
	1 ^b	± 35 % C ₃ , ± 65 % marine	98 % C ₄ / marine	-15,5	-4,3	-	11,2	-
	5 ^c	± 82 % C ₃ , ± 18 % C ₄	77 % C ₃ , 23 % C ₄	-23	-10,8	-8,7*	12,2	14,3*
	4 ^c	± 77 % C ₃ , ± 23 % C ₄	71 % C ₃ , 29 % C ₄	-22,2	-10,2	-8,1	12	14,1
	2 ^d	100 % C ₃	100 % C ₃	-23,6	-	-10,6	-	13
	2 ^d	± 45 % C ₃ , ± 65 % C ₄	± 45 % C ₃ , ± 65 % C ₄	-17,1	-	-4,9	-	12,2
Total	15	8 alimentations		-	-	-	10,7 (± 1,4)	-
	11	4 alimentations		-	-	-	-	13,4 (± 1,0)

Note : ^a Froehle et al. (2010) ; ^b Howland et al. (2003) ; ^c Warinner et Tuross (2009) ; ^d Passey et al. (2005).

*Données manquantes pour 2 individus.

3.1.3. Sources de variation des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$

a. Les réseaux trophiques

a.1. Les végétaux

Premier maillon de la plupart des chaînes trophodynamiques, les **plantes** sont les initiatrices des variations des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ au sein des différents réseaux trophiques. Ces variations résultent principalement des processus photosynthétiques pour la synthèse de la matière organique (essentiellement des **glucides**) (Dawson *et al.* 2002). Ces processus impliquent de façon systématique des phénomènes de **fractionnement** isotopique du carbone qui ont pour effet un appauvrissement en ^{13}C de la matière organique produite par les plantes par rapport au CO_2 atmosphérique absorbé (O'Leary 1981 ; Farquhar *et al.* 1989). Il existe **3 voies photosynthétiques** distinctes permettant aux plantes de fixer le carbone, à savoir 1) **C₃**, d'après la molécule à 3 atomes de carbone catalysée par l'enzyme RubisCO, 2) **C₄**, d'après le composé à 4 atomes de carbone catalysé par l'enzyme PEP carboxylase, et, 3) CAM, pour *Crassulacean Acid Metabolism* (Morot-Gaudry 2009).

La photosynthèse C₃ caractérise la majorité des plantes ligneuses ainsi que la plupart des herbacées des régions tempérées (*blé, orge, avoine, etc.*) (Raven *et al.* 2007). Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des **plantes terrestres en C₃** actuelles sont principalement comprises entre -38 et -22 ‰ avec une moyenne de **-27 ‰** (Tieszen 1991). La photosynthèse C₄ caractérise, quant à elle, les plantes herbacées des régions tropicales et subtropicales (*maïs, millet, canne à sucre, etc.*) (Raven *et al.* 2007 ; Morot-Gaudry 2009). Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ de **plantes terrestres en C₄** actuelles sont essentiellement comprises entre -21 et -9 ‰, avec une moyenne de **-13 ‰** (Tieszen 1991). Enfin, la photosynthèse CAM définit les plantes succulentes adaptées aux régions désertiques, arides ou salées (*manioc, ananas, figues de barbaries, etc.*) (O'Leary 1981 ; Raven *et al.* 2007). Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des plantes CAM terrestres actuelles présentent une grande variabilité et couvrent l'intégralité des gammes de valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des plantes en C₃ et C₄ actuelles (Deines 1980 ; O'Leary 1981). Les **végétaux aquatiques** actuels possèdent des métabolismes photosynthétiques C₃, C₄, CAM ou intermédiaires (Keeley 1998 ; Touchette et Burkholder 2000) et présentent des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ qui s'étendent essentiellement entre -24 et -3 ‰ (McMillan *et al.* 1980), avec une valeur moyenne de **-11‰** (Hemminga et Mateo 1996).

Les différences de teneurs isotopiques en carbone observées entre les plantes aquatiques et les plantes terrestres sont principalement liées au fait que la principale source de carbone dans les milieux aquatiques est le carbone inorganique dissous plus enrichi en ¹³C que le CO₂ atmosphérique. Le **carbone inorganique dissous** a une valeur de $\delta^{13}\text{C}$ proche de **0 ‰** (Anderson et Arthur 1983) tandis que le carbone du **CO₂ atmosphérique** a une valeur avoisinant **-8 ‰** (Levin *et al.* 1987 ; Marino et McElroy 1991 ; Longinelli *et al.* 2005 ; Longinelli *et al.* 2012). Dans une moindre mesure, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des plantes peuvent également varier selon un certain nombre de facteurs environnementaux telles que l'humidité du sol (Stewart *et al.* 1995), l'hygrométrie (Panek et Waring 1997), la salinité (Poss *et al.* 2000), la disponibilité des éléments nutritifs (Condon *et al.* 1992), la luminosité (Zimmerman et Ehleringer 1990), la température (Welker *et al.* 1993), la concentration du CO₂ atmosphérique (Williams *et al.* 2001) et l'altitude (Hultine et Marshall 2000). Les valeurs de **$\delta^{13}\text{C}$ des végétaux** nous informent donc *in fine* tant sur la **nature des plantes** elles-mêmes que sur l'**environnement** dans lequel ils évoluent.

a.2. Les animaux

Les **animaux**, à l'instar de l'**Homme**, sont régis par un même principe – décrit en préambule de ce chapitre II –, à savoir « *You are what you eat (plus a few ‰)* ». Les valeurs de **$\delta^{13}\text{C}$ des phases organiques et minérales** des **animaux reflètent** donc celles des **aliments** qu'ils **consomment**, à un facteur de fractionnement près (DeNiro et Epstein 1976 ; DeNiro et Epstein 1978). Ainsi, chaque maillon d'une chaîne alimentaire présente des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ supérieures à celles du maillon subalterne dont il se nourrit. Aussi, de façon schématique, un herbivore détiendra systématiquement

des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ plus élevées que celles des végétaux qu'il paîtra ; de même qu'un carnivore présentera systématiquement des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ supérieures à celles des tissus des herbivores qu'il mangera. Un organisme omnivore possédera, quant à lui, des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ intermédiaires vis-à-vis des animaux herbivores et carnivores, et ce en raison de la très forte variabilité des aliments qu'il sera amené à consommer, pouvant tout aussi bien être d'origine végétale qu'animale. Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des maillons supérieurs d'une chaîne alimentaire s'avèrent donc toutes lourdement influencées par les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ du premier maillon de cette chaîne, à savoir les végétaux (DeNiro et Epstein 1978 ; Schoeninger et DeNiro 1984 ; Chisholm 1986 ; Lee-Thorp 2008 ; Schwarcz et Schoeninger 2011).

En raison d'une certaine **prédictibilité** et constance des sauts trophiques d'un maillon à l'autre pour une chaîne alimentaire donnée (Section II, 3.1.1, b.2), il est possible, à partir des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ mesurées pour les fractions protéiques ou les phases carbonatées, de déterminer le **type de ressources végétales** consommées par un animal herbivore ou omnivore et de caractériser l'**écosystème** dans lequel ce dernier ainsi que les carnivores ont prélevé leur nourriture (Vogel et van der Merwe 1977 ; van der Merwe 1982 ; Schwarcz *et al.* 1985 ; Katzenberg *et al.* 1995 ; Ambrose *et al.* 1997 ; Herrscher 2003 ; Prowse *et al.* 2004 ; Craig *et al.* 2006).

b. Les faits culturels

Au signal alimentaire et environnemental peut se surimprimer un signal culturel bien que généralement difficilement discernable. Les modes de préparation et de confection des aliments affectent en effet parfois significativement leurs valeurs de $\delta^{13}\text{C}$. Ce facteur culturel pouvant représenter un sérieux biais interprétatif nécessite d'être discuté au moment de l'interprétation des résultats isotopiques obtenus pour une population donnée (DeNiro *et al.* 1985 ; Ambrose *et al.* 1997 ; Katzenberg *et al.* 2000 ; Warinner et Tuross 2009).

c. L'effet Suess

Depuis le début de l'ère industrielle, les sociétés humaines ont eu recours aux hydrocarbures naturels (pétrole, gaz et charbon) comme sources d'énergie. Leurs combustions ont occasionné une augmentation des émissions de CO_2 appauvries en ^{13}C dans l'atmosphère (Dassié *et al.* 2013). Ce phénomène, appelé « effet Suess » (Keeling 1979), est à l'origine d'une diminution d'environ 1,5 ‰ de la valeur de $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 atmosphérique, laquelle se répercute sur l'ensemble des écosystèmes terrestres et marins par l'intermédiaire des végétaux (Francey *et al.* 1999). Entreprendre une comparaison des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ de matériels

archéologiques antérieurs au XIX^{ème} s. ap. J.-C. avec celles de référentiels de plantes actuelles nécessite donc en amont une correction des données isotopiques par ce facteur.

3.1.4. Approches interprétatives des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$

a. Le $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$

La différence entre les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ ($\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$) permet théoriquement de déterminer si un individu a eu une **alimentation mono-isotopique ou mixte**, i.e. si celui-ci a consommé des ressources issues d'un ou plusieurs écosystème(s) (C_3 , C_4 , marin ou dulcicole).

Considérant un enrichissement en ^{13}C entre l'alimentation et la phase carbonatée de 10,7 ‰ et entre l'alimentation et la phase collagénique de 4,8 ‰, il nous est possible de conjecturer qu'un individu ayant une **alimentation mono-isotopique** devrait présenter une valeur de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$ de **5,9 ‰**. Cette valeur, dépendante des facteurs de fractionnements moyens retenus entre l'alimentation et les différentes phases de l'os (Ambrose *et al.* 2003 ; Harrison et Katzenberg 2003 ; Grupe *et al.* 2009 ; Tykot *et al.* 2009), ne fait l'objet d'aucun consensus. Aussi, celle-ci peut être amenée à fluctuer d'une étude à l'autre (Tykot *et al.* 2009), certains auteurs préconisant ou choisissant d'utiliser une valeur de 4,4 ‰ (Ambrose *et al.* 1997 ; Harrison et Katzenberg 2003), d'autres préférant utiliser une valeur plus élevée (Killgrove 2010 ; Salesse *et al.* 2013). La **valeur-seuil** de 5,9 ‰ est toutefois celle qui nous paraît en l'état actuel de nos connaissances **la plus satisfaisante**.

À l'inverse, un individu ayant une **alimentation mixte** devrait présenter une valeur de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$ **s'écartant de la valeur-seuil** susmentionnée. Ainsi, un individu consommant des protéines animales marines – aux valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ relativement élevées – et des glucides et lipides dérivant de plantes terrestres C_3 – aux valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ relativement faibles – devrait posséder une valeur de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$ inférieure à 5,9 ‰ (Ambrose *et al.* 2003 ; Harrison et Katzenberg 2003 ; Grupe *et al.* 2009 ; Tykot *et al.* 2009). En revanche, un individu consommant des protéines animales terrestres C_3 – aux valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ relativement basses – et des glucides et lipides dérivant de plantes terrestres C_4 – aux valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ relativement hautes – devrait détenir une valeur de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$ supérieure à 5,9 ‰ (Ambrose *et al.* 2003 ; Harrison et Katzenberg 2003 ; Grupe *et al.* 2009 ; Tykot *et al.* 2009).

b. Le modèle de Froehle et al. (2010)

Le modèle de Froehle et al. (2010) modifié par Eerkens et al. (2013) (Figure 13) permet de déterminer **de quel environnement** proviennent les **fractions protéique et non-protéique** de l'alimentation d'un individu mais aussi de **quantifier** empiriquement les **apports en protéines, glucides et lipides** C₃, C₄ ou marins dans l'alimentation de ce dernier. Il est toutefois relativement difficile de distinguer si les protéines consommées sont issues d'un environnement terrestre C₄ ou d'un environnement marin C₃.

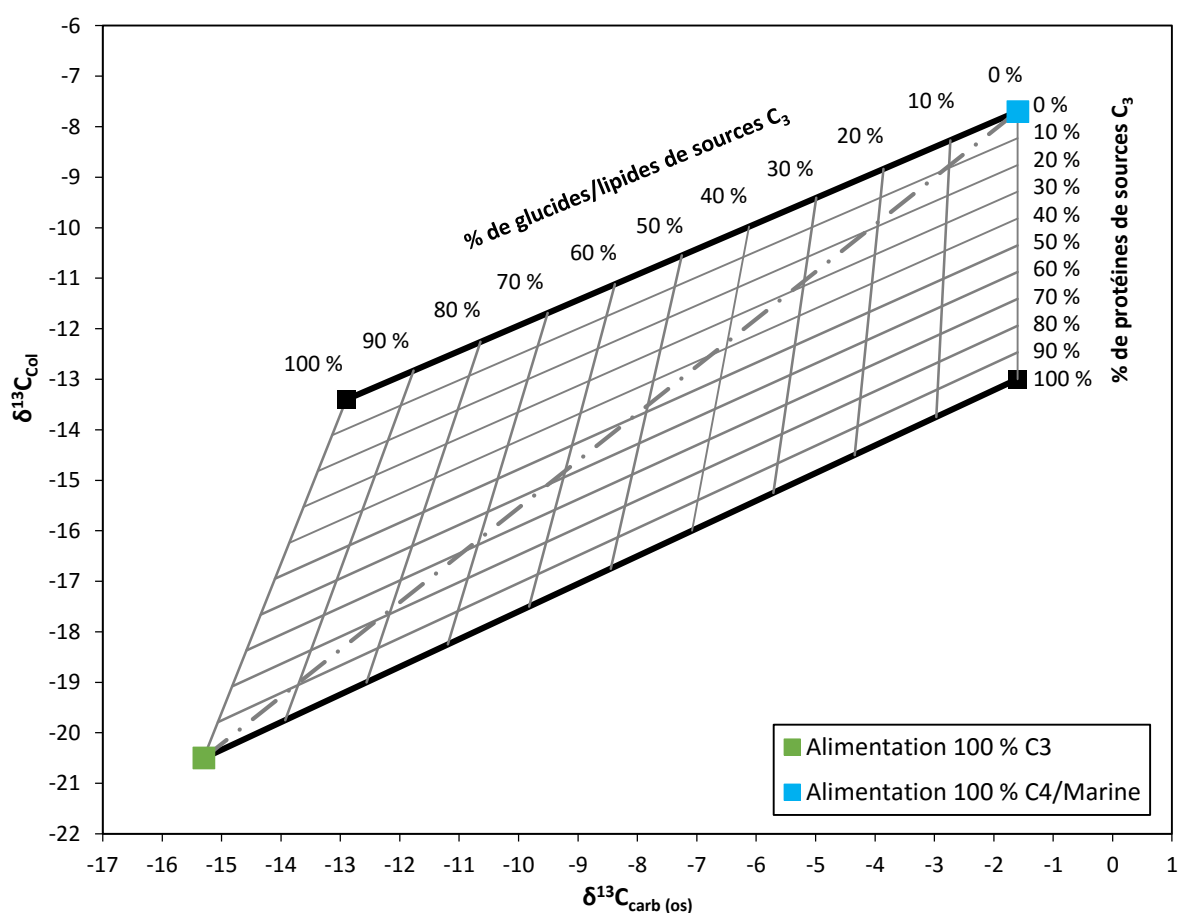


Figure 13. Modèle de Froehle et al. (2010) adapté par Eerkens et al. (2013)

Dans le détail, le modèle de Froehle et al. (2010) est adapté de celui de Kellner et Schoeninger (2007) et s'appuie sur les proxys $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$. Il consiste en un plan affine fini délimité par deux droites de régression parallèles, établies à partir de données expérimentales animales, et caractérisant, pour l'une, une alimentation comprenant **exclusivement des protéines C₃**, et pour l'autre, une alimentation comprenant **exclusivement des protéines C₄ ou marines**. À ce modèle,

Eerkens *et al.* (2013) ont interpolé entre les deux droites susmentionnées un ensemble d'isobares pour procéder à une quantification des différents macronutriments consommés. Eerkens *et al.* (2013) ont par ailleurs adapté le modèle pour que ce dernier tienne compte de l'**effet Suess** et que les populations archéologiques puissent être directement projetées sur celui-ci.

3.2. Les compositions isotopiques en azote

3.2.1. Origine de l'azote assimilé par le collagène et la kératine

L'origine de l'azote assimilé par les fractions protéiques fait à ce jour consensus (Ambrose *et al.* 2003 ; Hedges et Reynard 2007 ; Craig *et al.* 2013 ; Tsutaya et Yoneda 2013). Pour appréhender correctement les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ du collagène ($\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$) et celles de la kératine ($\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$), il est ici encore important de comprendre **de quels macronutriments** les atomes d'**azote** composant ces fractions organiques **sont issus**.

La totalité – ou presque – de l'azote biodisponible pour un consommateur primaire ou secondaire dérive des protéines animales ingérées et suppose qu'une fois absorbés, les AA constitutifs de ces protéines sont désagrégés en leurs unités élémentaires, lesquels prennent part à différents pools dans les fluides extracellulaires, à l'image de celui de l'azote total dans le sang, servant aux biosynthèses *de novo* des AAne. De plus, les composants élémentaires constitutifs de certains déchets métaboliques recyclés peuvent également participer, bien qu'en de plus faibles proportions, à ces différents pools. En parallèle, les AAe ne pouvant être synthétisés par l'organisme seraient, quant à eux, dirigés directement après leur absorption aux différents sites des synthèses protéiques. Ainsi, les valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$ **reflètent celles** des différents **AA** constituant les **protéines alimentaires** ingérées, à un facteur de fractionnement près (Ambrose 2000 ; Hedges et van Klinken 2000).

3.2.2. Fractionnements isotopiques du ^{15}N

Les **processus de fractionnements** isotopiques ayant cours lors de l'**absorption** et de l'**assimilation** des AA ainsi qu'au moment de l'**excrétion** des composés azotés issus du catabolisme conduisent de façon systématique à des enrichissements en ^{15}N des fractions protéiques vis-à-vis de l'alimentation (Steele et Daniel 1978 ; Ambrose et DeNiro 1986a ; Sealy *et al.* 1987 ; Schwarcz *et al.* 1999 ; Fuller *et al.* 2004 ; Vogel *et al.* 2012). Ces processus et la magnitude des enrichissements en ^{15}N restent, pour l'**Homme**, encore très mal connus (Waters-Rist et Katzenberg 2010 ; O'Connell *et al.*

2012). Notre connaissance de ces phénomènes repose ici encore essentiellement sur des travaux expérimentaux réalisés soit sur différents **substituts animaux** (e.g. DeNiro et Epstein 1981 ; Warinner et Tuross 2010), soit sur différents **tissus** ou **composés** présentant de **rapides turnovers** chez l'**Homme** (kératine de l'ongle, protéines du sang, etc.) (e.g. Schoeller et al. 1986 ; O'Connell et al. 2001 ; Kraft et al. 2008 ; Huelsemann et al. 2009 ; O'Connell et al. 2012).

À partir des études menées en laboratoire sur différentes espèces de mammifères, lesquels furent l'objet d'un strict contrôle alimentaire, un **facteur de fractionnement** pour le ^{15}N entre la **phase collagénique** et l'**alimentation** de $+2,8\text{‰}$ ($\pm 0,7\text{‰}$; 1σ) ($n_{\text{individus}} = 85$ (?) ; $n_{\text{alimentation}} = 13$; Tableau 7) a pu être déterminé. Cette valeur fut souvent arrondie à $+3\text{‰}$ et régulièrement reprise dans la littérature spécialisée (DeNiro et Epstein 1981 ; Hare et al. 1991 ; Ambrose 2000 ; Warinner et Tuross 2010). Les études réalisées en milieu naturel sur différents taxons ont pu mettre en évidence une variabilité plus importante de l'enrichissement en ^{15}N du collagène par rapport à l'alimentation, cette variabilité s'étendant de $+1$ à $+6\text{‰}$ (Schoeninger et DeNiro 1984 ; Schoeninger 1985 ; Ambrose et DeNiro 1986a ; Sealy et al. 1987 ; Koch et al. 1991). S'appuyant sur ces constats ainsi que sur leurs propres travaux, Bocherens et Drucker (2003) préconisèrent l'utilisation non plus d'une unique valeur comme facteur de fractionnement mais plutôt d'une **gamme** de valeurs comprise en **$+3$ et $+5\text{‰}$** . Au cours de la décennie qui suivit, cet intervalle apparut comme étant **le plus consensuel** pour estimer les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ des aliments consommés, **autorisant** de surcroît **chaque auteur à choisir n'importe quelle valeur de cette gamme** pour s'adapter aux **besoins de leur étude** (e.g. Craig et al. 2013).

Tableau 7. Compilation des valeurs de $\Delta^{15}\text{N}_{\text{kér-alim}}$ mesurées expérimentalement sur différents substituts animaux dont l'alimentation a été contrôlée

Taxon	n	Type d'alimentation	Protéines ^a	$\delta^{15}\text{N}_{\text{alim}}$ (‰ AIR)	$\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ (‰ AIR)	$\Delta^{15}\text{N}_{\text{col-alim}}$ (‰ AIR)
Souris	11 (?) ^b	Purina Lab Chow	-	5,8	7,2 (?)	1,4
	11 (?) ^b	Wayne Lab-Blox F6	-	5,1	7,6 (?)	2,5
	11 (?) ^b	JAX 911A	-	4,6	8,0 (?)	3,4
Rat	4 à 10 ^c	1(A)	100 % C ₃	6,3	9,7	3,4
	4 à 10 ^c	2(B)	100 % C ₃	7,8	11,1	3,3
	4 à 10 ^c	3(C)	100 % C ₃	6,3	9,7	3,4
	4 à 10 ^c	4(D)	100 % C ₃	7,8	11,4	3,6
	4 à 10 ^c	5(E)	100 % C ₃	6,3	9,7	3,4
	4 à 10 ^c	6(F)	100 % C ₃	3,3	6,4	3,1
	4 à 10 ^c	12/13 (G)	100 % C ₃	6,3	9,4	3,1
	10 ^d	C3	100 % C3	3,2	5,5	2,3
	10 ^d	C4	100 % C4	1,8	4	2,2
Porc	4 ^e	Raw	$\pm 77\% \text{ C}_3, \pm 23\% \text{ C}_4$	2,0	3,8	1,8
Total	85 (?)	-	-	-	-	2,8 ($\pm 0,7$)

Note : ^a Froehle et al. (2010) ; ^b DeNiro et Epstein (1981) ; ^c Ambrose (2000) ; ^d Hare et al. (1991), ^e Warinner et Tuross (2010). (?) Données estimées.

Les études expérimentales ayant été menées sur la kératine du cheveu d'hommes et de femmes dont l'alimentation était contrôlée de façon stricte nous ont permis d'évaluer un **enrichissement** en ^{15}N de la **phase kératinique** par rapport à l'**alimentation** de **+4,2 ‰** ($\pm 0,7 \text{ ‰}$; 1σ) ($n_{\text{populations}} = 10$; $n_{\text{individus}} = 206$; Tableau 8) (Minagawa *et al.* 1986 ; Schoeller *et al.* 1986 ; Minagawa 1992 ; Yoshinaga *et al.* 1996 ; Bol et Pflieger 2002 ; Hedges *et al.* 2009 ; Huelsemann *et al.* 2009). O'Connell *et al.* (2001). Elles ont par ailleurs pu estimer sur des hommes modernes que la **phase collagénique** de l'os était enrichie en moyenne de **0,9 ‰** en ^{15}N par rapport à la **phase kératinique** du cheveu. Aussi, à partir de ces précédentes données spécifiques à l'Homme, un enrichissement en ^{15}N du collagène de +5,1 ‰ par rapport à l'alimentation peut être proposé, cette valeur étant très proche de la borne supérieure de la gamme définie par Bocherens et Drucker (2003).

Plus récemment, O'Connell *et al.* (2012) ont pu calculer empiriquement un facteur de fractionnement pour le ^{15}N entre la kératine et l'alimentation de +5,0 à 5,3 ‰ ainsi qu'un autre entre le collagène et l'alimentation d'environ +6 ‰. Ces **valeurs** nous paraissent à ce jour quelque peu **excessives**, et bien que cette étude soit régulièrement citée depuis sa parution, rares sont les travaux recourant à ces facteurs de fractionnement pour interpréter le signal alimentaire obtenu via l'analyse du $\delta^{15}\text{N}$ des phases protéiques des tissus d'intérêt, la communauté scientifique semblant quelque peu réticente à leurs propos (e.g. Naito *et al.* 2013 ; Kinaston *et al.* 2014).

Tableau 8. Synthèse des valeurs de $\Delta^{15}\text{N}_{\text{kér-alim}}$ mesurées expérimentalement sur des hommes dont l'alimentation a été contrôlée de façon plus ou moins fiable

Étude	Population	n	$\delta^{15}\text{N}_{\text{alim}}$ (‰ AIR)	$\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$ (‰ AIR)	$\Delta^{15}\text{N}_{\text{kér-alim}}$ (‰ AIR)
Schoeller <i>et al.</i> (1986)	Nord-américaine	9	5,2	9,6	4,4
	Japonaise	23	6,6	10,4	3,8
Minagawa <i>et al.</i> (1986) ^a	Coréenne	10	5,4	9,7	4,3
	Chinoise	7	4,6	9,2	4,6
	Néerlandaise	5	5,8	10,1	4,3
Minagawa (1992)	Japonaise	42	6,3	10,3	4
Yoshinaga <i>et al.</i> (1996)	Papouasiens	49	9,7	15,4	5,7
Bol et Pflieger (2002)	Anglaise	38	5,2	8,3	3,1
Hedges <i>et al.</i> (2009)	Fidjienne	20	4,7	8,8	4,1
Huelsemann <i>et al.</i> (2009)	Allemande	3	4,7	8,8	4,1
Total	10 populations (n = 206)	-	-	-	4,2 ($\pm 0,7$)

Note : ^a Calculé seulement pour les natifs.

3.2.3. Processus physiologiques influençant le signal isotopique

Divers processus physiologiques peuvent altérer de façon substantielle le bilan azoté de l'organisme humain et par extension les valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$.

Un organisme allaité par du **lait maternel** détient des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ supérieures à celles de la productrice de ce lait (mère biologique, mère de substitution, nourrice, etc.). Cette différence tient au fait que le lait maternel est enrichi en ^{15}N comparativement à l'alimentation de la productrice de lait. Aussi, un **saut trophique** ordinaire entre la **mère**, la nourrice ou autres et l'**enfant** est attendu, et ce jusqu'au moment du sevrage complet du nourrisson (Fogel *et al.* 1989 ; Katzenberg *et al.* 1996 ; Richards *et al.* 2002 ; Herrscher 2003 ; Schurr et Powell 2005 ; Fuller *et al.* 2006 ; Dupras et Tocheri 2007).

De plus, un organisme soumis à un état de **stress nutritionnel** (état catabolique) – *i.e.* un apport nutritionnel insuffisant au regard des dépenses énergétiques pouvant résulter selon sa durée en un phénomène de sous-nutrition grave (période de disette) voire de dénutrition (période de famine) – voit son pool d'azote servant aux synthèses protéiques s'enrichir en ^{15}N , et, par conséquent, connaît une augmentation de ses valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ des phases organiques nouvellement formées par rapport à celles formées antérieurement. Trois phénomènes seraient en cause : 1) une augmentation des processus cataboliques dégradant les protéines du corps, 2) une excrétion toujours préférentielle du ^{14}N vis-à-vis du ^{15}N dans l'urée, et, 3) un recyclage plus important des déchets métaboliques azotés (Fuller *et al.* 2005 ; Mekota *et al.* 2006).

De même, un organisme soumis à un état de **stress hydrique** prolongé excrète par rapport à un organisme non-stressé plus d'urée dans l'urine. Ceci a pour conséquence une rétention plus importante du ^{15}N par rapport au ^{14}N dans l'organisme et résulte en l'élévation des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ des phases organiques (Ambrose et DeNiro 1986b ; Ambrose 1991).

En outre, les **pathologies**, aussi diverses soient-elles, semblent affecter d'une façon similaire, bien qu'à des degrés très différents les unes des autres, les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ des phases organiques, à savoir par un bilan azoté négatif résultant en une élévation des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ (White et Armelagos 1997 ; Katzenberg 1999 ; Olsen 2013 ; Olsen *et al.* 2014). Cet enrichissement isotopique n'est toutefois perceptible en règle générale qu'aux proches abords des lésions pathologiques, lesquels sont d'ordinaire très localisées (Katzenberg 1999 ; Olsen *et al.* 2014).

Par ailleurs, contrairement à ce qui fut un temps supputé (e.g. Fuller *et al.* 2004), la **croissance** ne semble avoir aucun effet notoire sur les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ des phases organiques (Waters-Rist et Katzenberg 2010).

Enfin, un organisme soumis à un **état anabolique** – état de fait pour une grossesse ou lors d'un rétablissement à la suite d'un état de stress nutritionnel – subit un appauvrissement en ^{15}N de son pool

d'azote servant aux synthèses protéiques, et, par suite, connaît une diminution de ses valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ des phases organiques récemment synthétisées vis-à-vis de celles formées antérieurement. Cet appauvrissement isotopique serait imputable à une diminution des processus conduisant à l'excrétion des produits azotés issus du catabolisme (Fuller *et al.* 2004).

3.2.4. Sources de variation des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$

a. Les réseaux trophiques

a.1. Les végétaux

Les plantes sont aussi à l'origine des principales variations des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ au sein des réseaux trophiques. L'absorption et l'assimilation de l'azote par les plantes impliquent des phénomènes de fractionnement isotopique de ce dernier ayant pour conséquence un enrichissement en ^{15}N des organes des plantes par rapport au N_2 atmosphérique absorbé (Evans 2001). Une distinction est généralement faite entre les plantes terrestres capables de fixer le N_2 atmosphérique par l'intermédiaire de microorganismes localisés au niveau des nodosités du système racinaire et les plantes terrestres dépourvues de telles associations symbiotiques (Marshall *et al.* 2008).

Les **végétaux terrestres** actuels **fixateurs** d'azote – pour la plupart des légumineuses, des bryophytes et certaines plantes ligneuses (Franche *et al.* 2009) – présentent des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ comprises essentiellement entre **-1 ‰ et +3 ‰** tandis que les végétaux terrestres actuels **non-fixateurs** d'azote présentent des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ comprises principalement entre **-1 ‰ et +7 ‰** (Schoeninger et DeNiro 1984). Les **végétaux aquatiques**, quant à eux, possèdent pour l'essentiel des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ comprises entre **-2 et +10 ‰** (Schoeninger et DeNiro 1984).

Les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ des plantes sont également déterminées par un ensemble de **facteurs édaphiques et environnementaux** telles que la composition isotopique en azote du sol (Högberg 1997), la forme de l'azote (NH_4^+ , NO_3^- , N_2 atmosphérique, N organique) (Marshall *et al.* 2008), la concentration externe en azote (Hobbie *et al.* 2000), la distribution spatiale et temporelle de l'eau météorique (Ma *et al.* 2012), la profondeur qu'atteignent les racines des plantes (Iversen *et al.* 2011), l'altitude (Liu *et al.* 2010), la température (Hobbie *et al.* 2001), l'aridité (Schulze *et al.* 1991) et la salinité (Pérez-López *et al.* 2013). De plus, les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ des plantes peuvent varier périodiquement dans l'année (Wang et Schjoerring 2012). Enfin, les plantes exposées aux embruns marins peuvent présenter un enrichissement isotopique en ^{15}N significatif (Cloern *et al.* 2002).

a.2. Les animaux

Les valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$ des **animaux** comme des **hommes** reflètent, pour leur part, **celles** des **ressources** qu'ils consomment, à un facteur de fractionnement près (Section II, 3.2.2) (DeNiro et Epstein 1976 ; DeNiro et Epstein 1978). Aussi, les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ d'un herbivore sont plus élevées que celles des plantes dont il se repait, de même que les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ d'un carnivore sont plus positives que celles des tissus des herbivores dont il s'alimente. Les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ d'un omnivore, quant à elles, sont comprises entre celles des animaux exclusivement phytophages et celles des animaux exclusivement carnassiers (Schoeninger et Moore 1992 ; Schwarcz et Schoeninger 2011). Le **niveau trophique** exact qu'occupe un omnivore est **dépendant** de la **quantité** et de la **qualité** des **ressources alimentaires** qu'il ingère. Les ressources carnées étant plus riches en protéines – et de ce fait plus riche en AA et donc en azote – que les ressources végétales, celles-ci participent davantage que les ressources d'origine végétale à la formation des phases organiques chez un omnivore. Aussi, des valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$ **plus élevées** pour un omnivore donné par rapport à un autre sont généralement l'expression d'une **consommation plus importante** de **protéines animales** du premier vis-à-vis du second (Schoeninger et DeNiro 1984 ; O'Connell et Hedges 1999b ; van Klinken *et al.* 2000 ; Hedges et Reynard 2007).

S'il est impossible de différencier pour un omnivore, à partir des valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$, une consommation préférentielle de la viande par rapport à des produits secondaires (lait, œuf, *etc.*) provenant d'un même animal, ou, une consommation préférentielle d'aliments carnés issus d'un taxon animal particulier par rapport à un autre dans la configuration que ceux-ci possèdent le même régime alimentaire, il est en théorie relativement aisé de déterminer une consommation d'aliments carnés issus d'animaux vivant dans différents écosystèmes, et particulièrement entre des ressources provenant de biomes aquatiques et d'autres de biomes terrestres (Minagawa et Wada 1984 ; Schoeninger et DeNiro 1984 ; Schwarcz *et al.* 1985 ; Katzenberg 1999 ; Hedges et Reynard 2007 ; Cummings 2009 ; Bourbou *et al.* 2011 ; Vika et Theodoropoulou 2012). En effet, en raison des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ plus élevées des végétaux aquatiques que celles des végétaux terrestres, ainsi qu'en raison d'un plus grand nombre de positions trophiques dans les chaînes trophodynamiques aquatiques que celles terrestres, les ressources aquatiques, et en particulier les poissons, consommées par un organisme terrestre omnivore – ou carnivore – détiennent des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ plus positives que celles des ressources terrestres (Minagawa et Wada 1984 ; Schoeninger et DeNiro 1984 ; Dufour *et al.* 1999 ; Carlier *et al.* 2007). Aussi, un organisme partiellement – ou exclusivement – **piscivore** présente généralement des valeurs de **$\delta^{15}\text{N}$ plus hautes** que **celles** d'un **carnivore terrestre** (Schoeninger et DeNiro 1984 ; Katzenberg 2008). Cependant, en pratique, une **très forte variabilité** des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ a été constatée pour les **poissons d'eau de mer et d'eau douce** (Ambrose *et al.* 1997 ; Dufour *et al.*

1999 ; Katzenberg 1999). Ainsi, il peut être **délicat** dans certaines situations de démontrer catégoriquement la consommation de poissons sur la base unique des valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$ d'un consommateur (Vika et Theodoropoulou 2012).

Outre les ressources aquatiques, d'autres aliments peuvent **accroître** de façon significative les valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$ des animaux, à l'instar d'une consommation de viande d'**animaux juvéniles non-sevrés** (Jay et Richards 2006 ; Hedges et Reynard 2007 ; Koch 2008), ou d'une consommation de chairs d'**animaux** s'étant **repu** de **végétaux** ayant crû sur des surfaces **fertilisées** (Bogaard *et al.* 2007 ; Fraser *et al.* 2011).

b. Les faits culturels

Les activités anthropiques relatives à l'agriculture ont modifié durablement (pendant plusieurs siècles parfois) la composition isotopique en azote du sol dans certains écosystèmes terrestres et aquatiques (Lefebvre *et al.* 2007 ; Pardo et Nadelhoffer 2010). La **fertilisation des sols** par divers procédés – utilisations de produits fertilisants (fumier, lisier, engrais verts, amendements, compost), agriculture sur brûlis – s'avère être l'effet anthropique impactant le plus le cycle biogéochimique de l'azote et ayant pour principale conséquence une **modification des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ des plantes** (Grogan *et al.* 2000 ; Ramos *et al.* 2001 ; Choi *et al.* 2006 ; Bogaard *et al.* 2007 ; Yun et Ro 2009 ; Fraser *et al.* 2011).

Par ailleurs, le **mode de préparation des aliments** peut **influencer** parfois de façon importante les **valeurs de $\delta^{15}\text{N}$** de ces derniers. Bien que difficilement reconnaissable, ce biais doit être pris en considération lors de l'interprétation des données isotopiques obtenues sur une population donnée (DeNiro *et al.* 1985 ; Ambrose *et al.* 1997 ; Katzenberg *et al.* 2000 ; Warinner et Tuross 2009).

3.2.5. Approches interprétatives des valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et multi-proxys

a. Diagramme de double projection ($\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$)

Le diagramme de double projection – ou « biplot » – présentant sur l'axe x le $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et sur l'axe y le $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ est un mode de représentation des données classique adopté dans la littérature spécialisée. Outre le(s) individu(s) étudié(s) projeté(s) sur ce diagramme, se retrouve généralement également sur celui-ci les ressources susceptibles d'avoir été consommées par ce(s) dernier(s) (Figure 14) (e.g. Schoeninger et Moore 1992 ; Ambrose *et al.* 1997 ; Bocherens et Billiou 1998 ; Bocherens *et al.* 1999 ; Richards et Hedges 1999 ; Polet et Katzenberg 2003 ; Bourbou *et al.* 2011 ; Le Bras-Goude 2011 ; Schwarcz et Schoeninger 2011 ; Stevens *et al.* 2012 ; King *et al.* 2013 ; Tsutaya *et al.* 2013 ; Webb *et al.*

2013 ; Kinaston *et al.* 2014). Ce diagramme permet de **déterminer de quels écosystèmes** (C_3 , C_4 , marin ou dulçaquicole) sont issues les ressources dont s'est (ou se sont) nourri(s) le(s) sujet(s) mais aussi de **repositionner** dans une **chaîne trophique** celui (ou ceux)-ci et par-là même de **définir la nature** (**herbivore, carnivore ou omnivore**) du régime alimentaire de celui (ou ceux)-ci (Figure 14).

Ce diagramme **ne permet** toutefois **pas d'appréhender** toute la **complexité des régimes alimentaires** et **ne peut** nullement **prendre en compte** nombre de **variables biologiques** (degré de routage différent des atomes de carbone et d'azote), de **paramètres alimentaires** (compositions nutritionnelles des différentes ressources) ou d'**incertitudes de mesures** (liées aux facteurs de fractionnement utilisés) que nous avons eu l'occasion de présenter ci-devant et qui sont essentiels pour déterminer de quelles ressources un ou plusieurs individu(s) s'est (ou se sont) sustenté(s). Aussi, a-t-il été construit différents modèles tenant compte en partie de cette complexité pour reconstruire avec une plus grande précision l'alimentation des populations du passé.

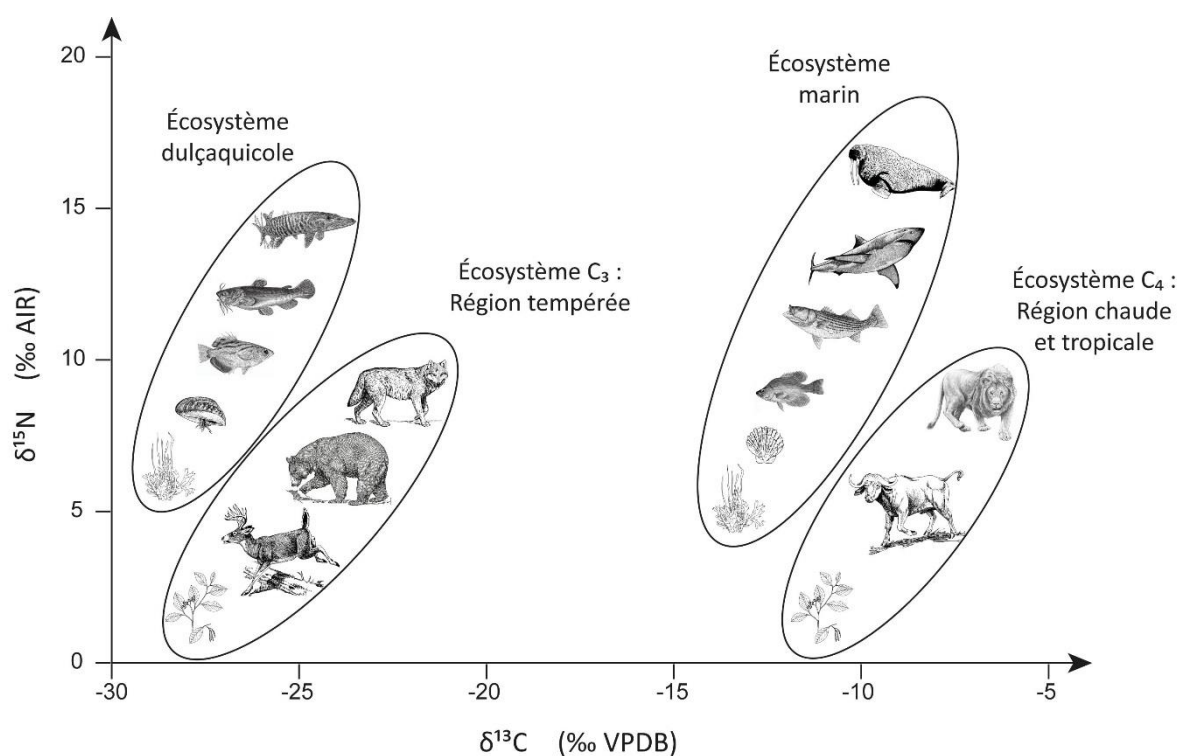


Figure 14. Répartition théorique des valeurs de $\delta^{13}C$ et de $\delta^{15}N$ des différents maillons de quatre chaînes alimentaires théoriques prenant place dans quatre écosystèmes distincts

b. Le modèle de Froehle et al. (2012) ($\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$)

Froelhe *et al.* ont en 2012 amélioré leur modèle de 2010 en ajoutant à ce dernier un proxy supplémentaire, le $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$. Le nouveau modèle permet comparativement au précédent de **mieux discriminer de quels environnements** proviennent les **protéines** consommées (C_3 , C_4 ou marines) et d'appréhender le **niveau trophique** des individus. Il conserve par ailleurs sa faculté de déterminer d'où sont issues les fractions non-protéiques de l'alimentation. À l'inverse du précédent modèle modifié par Eerkens *et al.* (2013), ce nouveau modèle de Froelhe *et al.* n'est pas quantitatif. Il permet cependant d'**appréhender plus aisément le régime alimentaire** des individus via différents clusters correspondant chacun à des alimentations bien spécifiques.

b.1. Description

En recourant d'une part à un algorithme de partitionnement de données et d'autre part à une analyse factorielle discriminante sur six populations archéologiques « tests » à l'alimentation connue, Froehle *et al.* (2012) ont généré deux fonctions réduisant de trois à deux dimensions les données compilées en gardant 98,8 % de la variance et ont établi cinq clusters correspondant à autant de régimes alimentaires distincts, le tout représenté dans un plan affine. La Fonction 1 dite « Carbone », principalement influencée par les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$, projetée sur l'axe des abscisses, est définie ainsi :

$$F1 = (0,322 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}) + (0,727 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{col}}) + (0,219 \times \delta^{15}\text{N}_{\text{col}}) + 9,354$$

tandis que la Fonction 2 dite « Azote », principalement influencée par les valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$, projetée sur l'axe des ordonnées, est définie ainsi :

$$F2 = (-0,393 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}) + (0,133 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{col}}) + (0,622 \times \delta^{15}\text{N}_{\text{col}}) - 8,703.$$

Les cinq clusters sont définis comme suit :

- Cluster 1 : Alimentation 100 % C_3 .
- Cluster 2 : Alimentation 30 % C_3 et 70 % C_4 dont protéines $\text{C}_4 > 50$ %.
- Cluster 3 : Alimentation 50 % C_3 et 50 % C_4 dont protéines 100 % marines.
- Cluster 4 : Alimentation 70 % C_3 et 30 % C_4 dont protéines $\text{C}_3 \geq 65$ %.
- Cluster 5 : Alimentation 30 % C_3 et 70 % C_4 dont protéines $\text{C}_3 \geq 65$ %.

Dès lors, tout individu présentant à la fois des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ pourra se voir attribuer deux scores, l'un à partir de la Fonction 1, l'autre à partir de la Fonction 2 et être comparé aux cinq clusters alimentaires (Figure 15).

b.2. Quid d'une alimentation mixte C₃/marine ?

Le modèle de Froehle *et al.* (2012) ne présente aucun cluster pour une alimentation mixte C₃/marine. Or, une telle alimentation est fréquemment mise en évidence pour les populations méditerranéennes de l'Antiquité (Prowse *et al.* 2005 ; Keenleyside *et al.* 2009 ; Vika et Theodoropoulou 2012 ; Craig *et al.* 2013). Pour vérifier où des individus ayant consommé des ressources C₃ et marines se positionneraient dans le modèle, nous avons recouru à un exemple théorique que nous avons construit à l'image de ce qu'ont réalisé Froehle *et al.* en 2012 pour la population de Saipan (Îles Mariannes, États-Unis).

Dans un premier temps, nous avons conjecturé trois variantes du régime alimentaire à tester, à savoir :

- Une alimentation composée à 70 % de ressources végétales terrestres C₃, à 20 % de ressources animales terrestres C₃ et à 10 % de ressources animales marines ;
- Une alimentation composée à 60 % de ressources végétales terrestres C₃, à 20 % de ressources animales terrestres C₃ et à 20 % de ressources animales marines ;
- Une alimentation composée à 50 % de ressources végétales terrestres C₃, à 20 % de ressources animales terrestres C₃ et à 30 % de ressources animales marines.

Dans un second temps, nous avons estimé une valeur de $\delta^{13}\text{C}_{\text{alim}}$ hypothétique selon l'équation suivante :

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{alim}} = (\% \text{Blé} \times \delta^{13}\text{C}_{\text{Blé}}) + (\% \text{Herbivore C}_3 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{Herbivore C}_3}) + (\% \text{Poissons marins} \times \delta^{13}\text{C}_{\text{Poisson marin}})$$

Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{Blé}}$, de $\delta^{13}\text{C}_{\text{Herbivore C}_3}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{Poisson marin}}$ utilisées ici sont les valeurs moyennes des ressources alimentaires présentées dans la Section II, 3.3.

Dans un troisième temps, nous avons calculé de façon théorique les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ via l'équation de régression suivante définie par Froehle *et al.* (2010) à partir de données expérimentales obtenues sur des animaux s'étant nourris essentiellement de ressources C₃ :

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{col}} = 0,531 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{alim}} - 7,56$$

Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ ont, quant à elles, été évaluées en additionnant aux valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{alim}}$ la valeur moyenne de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-alim}}$ de 10,7 ‰ calculée à partir de porcs dont l'alimentation était contrôlée (Section II, 3.1.2, b). Enfin, une valeur de 11,2 ‰ a été arbitrairement choisie pour le $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$.

Dans un dernier temps, nous avons déterminé à partir des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ hypothétiques deux scores, l'un via la Fonction 1, l'autre via la Fonction 2, pour chacun des individus ayant comme régime alimentaire l'une des variantes décrites ci-avant. Ces derniers ont été projetés sur le modèle et nous constatons qu'ils se positionnent à cheval entre le cluster 1 et 4 (Figure 15). Aussi un sixième cluster pourrait être proposé à l'emplacement de ces individus caractérisant une alimentation 90-70 % C₃ et 10-30 % marine (Figure 15).

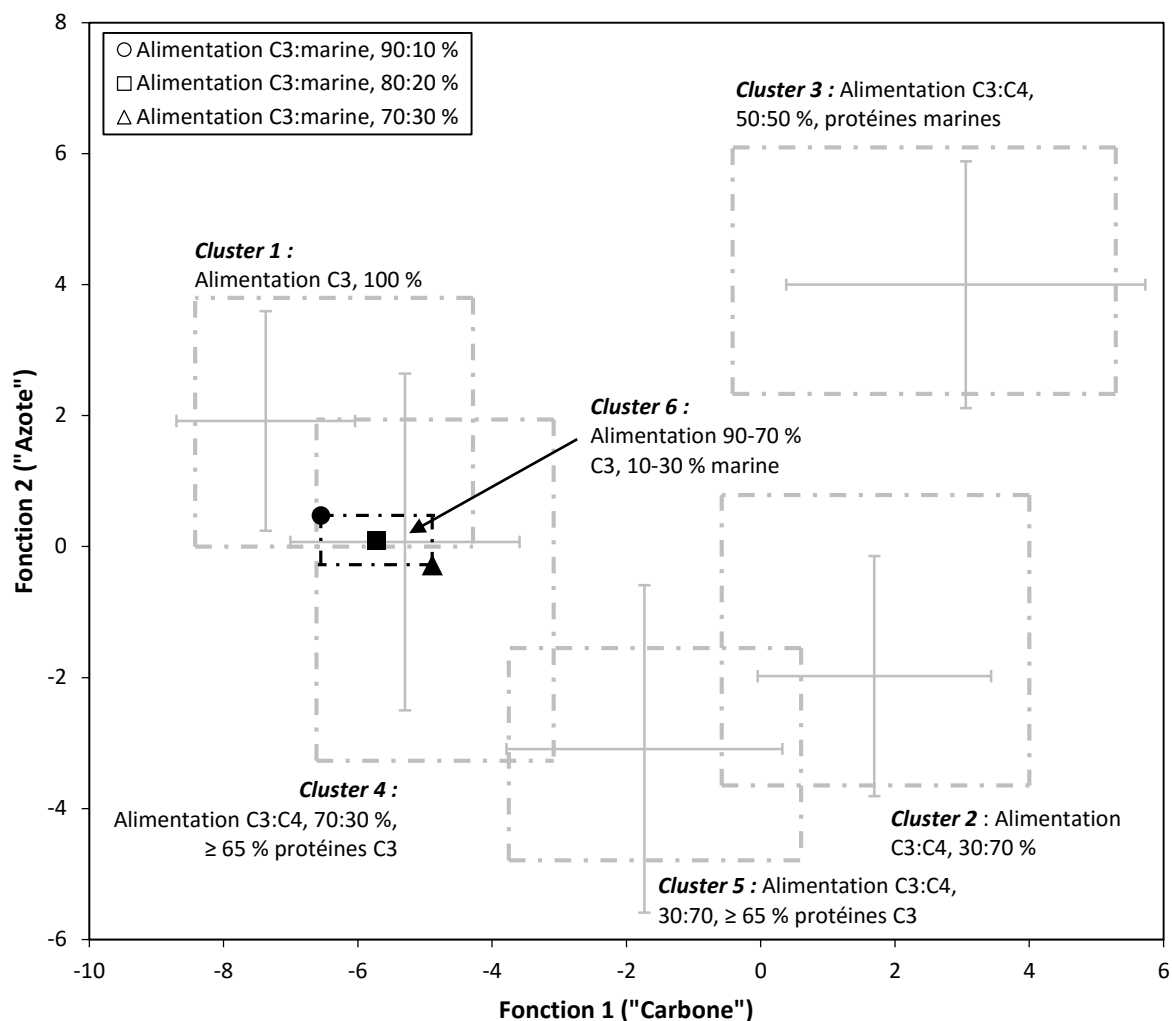


Figure 15. Projection des résultats des analyses factorielles discriminantes obtenus pour trois variantes théoriques d'un régime alimentaire mixte C₃/marine (Cluster 6) sur les clusters définis par Froehle *et al.* (2012).

c. L'approche bayésienne FRUITS de Fernandes *et al.* (2014)

Les approches et modèles présentés ci-devant relèvent tous davantage de la **recherche qualitative que quantitative**. Les résultats chiffrés qu'ils peuvent fournir restent en effet le plus souvent des empirismes à concevoir tels des ordres de grandeurs. Ces approches et modèles sont en outre généralement conçus pour être **utilisés tels quels**. Or ceux-ci peuvent faire appel à des facteurs de fractionnement ou des modalités de routage des atomes différents de ceux que nous avons retenus et présentés plus en amont dans cette section.

Appréhendant concurremment l'ensemble des proxys isotopiques, certaines variables biologiques, divers paramètres alimentaires et enfin les incertitudes de mesures associées à ces données, l'**inférence bayésienne** est à ce jour l'approche **la plus globale** mais aussi **la plus modulable**

pour **reconstruire avec précision** le régime alimentaire d'un individu ou d'une population et pour **véritablement quantifier** en quels proportions les différentes ressources ont été consommées par celui ou celle-ci .

Ces six dernières années, pas moins de cinq modèles bayésiens ont été développés pour étudier l'alimentation des animaux et des hommes (Moore et Semmens 2008 ; Semmens *et al.* 2009 ; Parnell *et al.* 2010 ; Hopkins et Ferguson 2012 ; Fernandes *et al.* 2014). Le **modèle FRUITS** de Fernandes *et al.* (2014) s'avère **le plus adapté** aux **types de données** dont nous disposons. Outre son ergonomie et sa simplicité d'utilisation (Annexe 1), FRUITS présente différents avantages comme la possibilité 1) de tenir compte d'**effets de routage** différents selon les phases biochimiques, 2) de prendre en compte la **composition nutritionnelle** et les **teneurs isotopiques** des principales ressources consommées, 3) de **hiérarchiser** entre elles les différentes ressources consommées et 4) de réaliser une **approche individuelle et populationnelle** des reconstructions alimentaires générées.

Pour plus de détails concernant le modèle FRUITS nous renverrons le lecteur vers l'article de Fernandes *et al.* (2014). Préciserons-nous ici seulement que les simulations stochastiques sont réalisées par procédures MCMC (pour *Markov Chain Monte Carlo*).

3.3. Le référentiel isotopique alimentaire

Il n'existe actuellement **aucun référentiel** de valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ mesurées sur des **restes végétaux et animaux** découverts à **Rome** et datant de l'**époque impériale**. Aussi, pour créer ce référentiel, avons-nous dû faire appel à des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ mesurées sur des restes botaniques ou fauniques issus d'autres **contextes archéologiques**, ou, à défaut, sur du **matériel moderne**. Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ mesurées sur ce dernier et présentées ci-dessous ont toutes été **corrigées de l'effet Suess**. À partir de ces valeurs, ont été estimées les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ des protéines, glucides et/ou lipides ainsi que des parties comestibles considérées dans leur intégralité (*i.e.* valeur « bulk »), lesquels serviront pour le modèle FRUITS.

3.3.1. Les céréales C₃ et C₄

Les grains de blé (n = 20) modernes d'Italie (Pouilles et Sicile) présentent des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ comprises respectivement entre -25,2 et -22,1 ‰ (\bar{x} = -23,6 ‰ ; σ = 0,9 ‰) et entre 0,9 et 7,4 ‰ (\bar{x} = 3,7 ‰ ; σ = 1,6 ‰) (Tableau 9 ; Figure 16) (Brescia *et al.* 2002). Les grains de blé (n = 3) archéologiques (III^e-V^e s. ap. J.-C.) et modernes d'Égypte (Oasis d'Ad-Dakhla et Nubie) ont quant à eux des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ s'étendant respectivement de -28,5 à -21,4 ‰ (\bar{x} = -24,3 ‰ ; σ = 3,7 ‰) et de 6,5 à 16,1 ‰ (\bar{x} = 10,9 ‰ ; σ = 4,9 ‰) (Tableau 9 ; Figure 16) (White et Schwarcz 1994 ; Dupras

1999 ; Dupras et al. 2001). Les grains de millet (n = 4) modernes d'Égypte (Nubie) détiennent des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ qui varient respectivement entre -11,6 et -9,1 ‰ (\bar{x} = -10,2 ‰ ; σ = 1,2 ‰) et entre 1 et 9,4 ‰ (\bar{x} = 4,4 ‰ ; σ = 4,4 ‰) (Tableau 9 ; Figure 16) (White et Schwarcz 1994).

Tableau 9. Valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ et concentrations moyennes en carbone des macronutriments composant les ressources alimentaires de référence

Ressource alimentaire	Compartment	$\delta^{13}\text{C}$	σ	$\delta^{15}\text{N}$	σ	Concentration moyenne en C (%)
Blé (C₃) d'Italie	Bulk	-23,6	0,9	3,7	1,6	-
	Protéines	-25,1	0,9	3,7	1,6	13
	Glucides	-23,1	0,9	-	-	87
Blé (C₃) d'Égypte	Bulk	-24,3	3,7	10,9	4,9	-
	Protéines	-25,8	3,7	10,9	4,9	13
	Glucides	-23,8	3,7	-	-	87
Millet (C₄) d'Égypte	Bulk	-10,2	1,2	4,4	4,4	-
	Protéines	-11,7	1,2	4,4	4,4	13
	Glucides	-9,7	1,2	-	-	87
Herbivores (C₃) d'Italie	Collagène	-21	0,8	4,4	1,7	-
	Bulk	-27	0,8	-	1,7	-
	Protéines	-22,1	0,8	4,2	1,7	32
	Lipides	-28,9	0,8	-	1,7	68
Poissons de Méditerranée	Collagène	-13,3	1,5	8,3	1,9	-
	Bulk	-17,4	1,5	-	1,9	-
	Protéines	-15,8	1,5	9	1,9	74
	Lipides	-21,8	1,5	-	1,9	26

Les céréales ont en moyenne des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{bulk-glucides}}$ de -1,5 ‰ et de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{bulk-protéines}}$ de 0,5 ‰ (Tableau 10) (cf. références dans Tableau 10). Aussi, pouvons-nous estimer que les grains de blé modernes d'Italie ont en moyenne des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{protéines}}$ de -25,1 ‰ (σ = 0,9 ‰) et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{glucides}}$ de -23,1 ‰ (σ = 0,9 ‰). De même, les grains de blé archéologiques et modernes d'Égypte ont en moyenne des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{protéines}}$ de -25,8 ‰ (σ = 3,7 ‰) et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{glucides}}$ de -23,8 ‰ (σ = 3,7 ‰). Les grains de millet modernes d'Égypte ont, pour leur part, en moyenne des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{protéines}}$ de -11,7 ‰ (σ = 1,2 ‰) et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{glucides}}$ de -9,7 ‰ (σ = 1,2 ‰). Les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ mesurées sur les céréales correspondent en réalité aux valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{protéines}}$. Ne composant qu'au maximum 2 % du

blé et 4 % du millet (FAO 1995), les lipides ont été considérés comme négligeables dans les céréales et la valeur de $\delta^{13}\text{C}$ de ces dernières n'a de ce fait pas été reconstruite.

Tableau 10. Synthèse des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{bulk-glucides}}$ et de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{bulk-protéines}}$ des céréales

Taxon	n	$\Delta^{13}\text{C}_{\text{bulk-glucides}}$	$\Delta^{13}\text{C}_{\text{bulk-protéines}}$	Référence
Blé	-	-2		Tieszen 1991
Blé	-	-1	0,5	Winkler <i>et al.</i> 1978
Blé	-	-1,4		Nakamura <i>et al.</i> 1982
Moyenne	-	-1,5	0,5	

En moyenne, 87 % du carbone total du blé et du millet se concentrent dans les glucides et 13 % du carbone total de ces céréales se concentrent dans les protéines (Tableau 11) (*cf.* références dans Tableau 11).

Tableau 11. Synthèse de la composition nutritionnelle et de la concentration (moyenne) en carbone des céréales

Taxon	Composition nutritionnelle (%)		Concentration en C (%)		Référence
	Protéines	Glucides	Protéines	Glucides	
Blé	10,3	78,1	5,4	34,7	Barikmo <i>et al.</i> 2004
Millet	8	71,9	4,2	31,9	Barikmo <i>et al.</i> 2004
Moyenne	9,2	75	4,8	33,3	
Concentration moyenne en C rapportée à 100					
		Protéines		Glucides	
		13		87	

Note : Les concentrations en C ont été calculées à partir des valeurs standards (protéine : 52,4 %C ; glucide : 44,4 %C, lipide : 76,9 %C) définies par Morrison *et al.* (2000).

3.3.2. Les herbivores terrestres C_3

Les herbivores terrestres C_3 (n = 32) découverts en contextes archéologiques extra-romains présentent des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ comprises respectivement entre -23 et -19,1 ‰ (\bar{x} = -21 ‰ ; σ = 0,8 ‰) et entre 1,9 et 7,9 ‰ (\bar{x} = 4,4 ‰ ; σ = 1,7 ‰) (Tableau 9 ; Figure 16) (Prowse 2001 ; Prowse *et al.* 2004 ; Craig *et al.* 2009 ; Le Bras-Goude 2011). Ce groupe englobe des *Bovinae*, des *Caprinae*, des *Equidae* et des *Cervidae*. Les *Suinae*, omnivores par nature, ne présentant aucune différence statistique avec les herbivores C_3 (Tests U de Mann-Whitney ; $p > 0,28$) ont été intégrés à ce groupe. Ces ossements animaux sont issus des sites italiens d'Isola Sacra (Isola Sacra, Latium ; I^{er}-III^e

s. ap. J.-C.) (Prowse 2001 ; Prowse *et al.* 2004), de Lucus Feroniae (Latium ; 1^{er}-3^e s. ap. J.-C.) (Le Bras-Goude 2011) et de Velia (Campanie ; 1^{er}-2^e s. ap. J.-C.) (Craig *et al.* 2009).

Les mammifères terrestres ont en moyenne des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-protéines (muscle)}}$ de 1,1 ‰, de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-lipides}}$ de 7,9 ‰ et de $\Delta^{15}\text{N}_{\text{col-protéines (muscle)}}$ de 0,5 ‰ (Tableau 12) (*cf.* références dans Tableau 12). Aussi, pouvons-nous estimer que les herbivores terrestres C₃ archéologiques d'Italie détiennent en moyenne des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{protéines (muscle)}}$ de -22,1 ‰ ($\sigma = 0,8$ ‰), de $\delta^{13}\text{C}_{\text{glucides (muscle)}}$ de -28,9 ‰ ($\sigma = 0,8$ ‰) et enfin de $\delta^{15}\text{N}_{\text{protéines (muscle)}}$ de 4,2 ‰ ($\sigma = 1,7$ ‰). La viande d'herbivore étant très pauvre en glucides (Schulz *et al.* 2005), ceux-ci ont été considérés comme négligeables et de ce fait les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{glucides}}$ n'ont pas été estimées.

Tableau 12. Synthèse des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-protéines (muscle)}}$, de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-lipides}}$ et $\Delta^{15}\text{N}_{\text{col-protéines (muscle)}}$ des herbivores/omnivores/carnivores d'Europe

Taxon	n	$\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-protéines (muscle)}}$	$\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-lipides}}$	$\Delta^{15}\text{N}_{\text{col-protéines (muscle)}}$	Référence
Porc	10	2,2	-	-	Hare <i>et al.</i> 1991
Porc	10	-0,1	-	-	Hare <i>et al.</i> 1991
Porc	4	1,3	-	-	Warinner et Tuross 2010
-	-	-	7,9	-	Vogel 1978
Divers	-	-	-	0,2	Crowley <i>et al.</i> 2010
Moyenne	24	1,1	7,9	0,2	

En moyenne, 32 % du carbone total sont contenus dans les protéines de la viande d'herbivores et 68 % du carbone total sont contenus dans les lipides de la viande d'herbivores (Tableau 13) (*cf.* références dans Tableau 13). Dès lors, il est possible de reconstruire une valeur de $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ de -26,7 ‰ ($\sigma = 0,8$ ‰) selon l'équation suivante :

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} = (\delta^{13}\text{C}_{\text{protéine}} \times \%C_{\text{protéine}}) + (\delta^{13}\text{C}_{\text{glucide/lipide}} \times \%C_{\text{glucide/lipide}}) \text{ (Fernandes 2015).}$$

Tableau 13. Synthèse bibliographique de la composition nutritionnelle et de la concentration (moyenne) en carbone des carcasses des animaux herbivores/omnivores terrestres

Taxon	Composition nutritionnelle (%)		Concentration en C (%)		Référence
	Protéines	Lipides	Protéines	Lipides	
Mouton	15,8	19,7	8,3	15,1	Moharrery 2007
Bœuf	16,5	28	8,6	21,5	Heinz et Hautzinger 2007
Porc	11,2	47	5,9	36,1	Heinz et Hautzinger 2007
Cerf	21,4	1,3	11,2	1,0	Heinz et Hautzinger 2007
Moyenne	16,2	24,0	8,5	18,4	
Concentration moyenne en C rapportée à 100					
		Protéines		Lipides	
		32		68	

Note : Les concentrations en C ont été calculées à partir des valeurs standards (protéine : 52,4 %C ; glucide : 44,4 %C, lipide : 76,9 %C) définies par Morrison *et al.* (2000).

3.3.3. Les poissons marins de Méditerranée

Les poissons marins (n = 10) découverts en contextes archéologiques extra-romains présentent des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ comprises respectivement entre -15,4 et -10,9 ‰ (\bar{x} = -13,3 ‰ ; σ = 1,5 ‰) et entre 5,7 et 12,1 ‰ (\bar{x} = 8,3 ‰ ; σ = 1,9 ‰) (Tableau 9 ; Figure 16) (Prowse 2001 ; Prowse *et al.* 2004 ; Keenleyside *et al.* 2009 ; Lightfoot *et al.* 2012 ; Craig *et al.* 2013). Ces restes sont pour la plupart ceux de *Sparidae* et de *Scombridae* et proviennent des sites italiens d'Isola Sacra (Prowse 2001 ; Prowse *et al.* 2004) et de Velia (Craig *et al.* 2009) présentés précédemment ainsi que d'Herculanum (Campanie ; 2^e s. ap. J.-C.) (Craig *et al.* 2013) mais aussi du site tunisien de Leptiminus (gouvernorat de Monastir ; 2^e-6^e s. ap. J.-C.) (Keenleyside *et al.* 2009) et du site croate de la cathédrale Sv Stošije (Dalmatie ; 1^{er} s. av. J.-C.-5^e s. ap. J.-C.) (Lightfoot *et al.* 2012).

Tableau 14. Synthèse des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-protéines (muscle)}}$, de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-lipides}}$ et $\Delta^{15}\text{N}_{\text{col-protéines (muscle)}}$ des poissons marins

Taxon	n	$\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-protéines (muscle)}}$	$\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-lipides}}$	$\Delta^{15}\text{N}_{\text{col-protéines (muscle)}}$	Référence
Merlan	1	2,5		-0,6	Fischer <i>et al.</i> 2008
Cabillaud	2	2,7		-0,6	Fischer <i>et al.</i> 2008
Omble à tête plate	1	2,4		-0,7	Fischer <i>et al.</i> 2008
Limande	2	1,9		-0,3	Fischer <i>et al.</i> 2008
"Norway bullhead"	1	1,8		-0,9	Fischer <i>et al.</i> 2008
Anguille	2	2		-0,5	Fischer <i>et al.</i> 2008
"Eelpout"	2	2		-0,3	Fischer <i>et al.</i> 2008
Flet	1	0,7		-0,8	Fischer <i>et al.</i> 2008
Cténolabre	1	1,9		-1	Fischer <i>et al.</i> 2008
Vieille coquette	1	2,5		-1,6	Fischer <i>et al.</i> 2008
Anchois	12	1,1		2,3	Sholto-Douglas <i>et al.</i> 1991
"Round herring"	5	1,6		2,4	Sholto-Douglas <i>et al.</i> 1991
Merlan bleu	6	3,1		0,2	E. Dufour, com. personnelle
Bar commun	3	3,6		-0,9	E. Dufour, com. personnelle
Mulet lippu	1	2,7		-1,7	E. Dufour, com. personnelle
Plie commune	1	2,6		-0,2	E. Dufour, com. personnelle
Sole commune	2	2,7		-1,7	E. Dufour, com. personnelle
Limande sole	3	2,5		-2,8	E. Dufour, com. personnelle
Vieille	1	3,7		-1	E. Dufour, com. personnelle
Orphie	3	2,9		-1,3	E. Dufour, com. personnelle
Maquereau commun	2	3		-0,8	E. Dufour, com. personnelle
Saint-Pierre	1	3,2		-0,9	E. Dufour, com. personnelle
Tacaud commun	7	3,3		-1,4	E. Dufour, com. personnelle
-			6		McConnaughey et McRoy 1979
Moyenne	61	2,5	6,0	-0,7	

Les poissons marins ont en moyenne des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-protéines (muscle)}}$ de 2,5 ‰, de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{col-lipides}}$ de 6 ‰ et de $\Delta^{15}\text{N}_{\text{col-protéines (muscle)}}$ de -0,7 ‰ (Tableau 14) (*cf.* références dans Tableau 14). Aussi, pouvons-nous estimer que les poissons marins archéologiques d'Italie et de Tunisie présentent en

moyenne des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{protéines (muscle)}}$ de $-15,8 \text{ ‰}$ ($\sigma = 1,5 \text{ ‰}$), de $\delta^{13}\text{C}_{\text{glucides (muscle)}}$ de $-21,8 \text{ ‰}$ ($\sigma = 1,5 \text{ ‰}$) et enfin de $\delta^{15}\text{N}_{\text{protéines (muscle)}}$ de 9 ‰ ($\sigma = 1,9 \text{ ‰}$). La chaire de poisson étant très pauvre en glucides (Schulz *et al.* 2005), ceux-ci ont été considérés comme négligeables et de ce fait les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ de ces derniers n'ont pas été estimées.

En moyenne, 74 % du carbone total sont contenus dans les protéines de poissons et 26 % du carbone total sont contenus dans les lipides de poissons (Tableau 15) (cf. références dans Tableau 15). Dès lors, il est possible de reconstruire une valeur de $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ de $-17,4 \text{ ‰}$ ($\sigma = 1,5 \text{ ‰}$).

Tableau 15. Synthèse de la composition nutritionnelle et de la concentration (moyenne) en carbone des poissons marins

Taxon	Composition nutritionnelle (%)		Concentration en C (%)		Référence
	Protéines	Lipides	Protéines	Lipides	
Albacore	23,7	4,6	12,4	3,5	FAO 1989
Cabillaud d'Atlantique	18,1	0,8	9,5	0,6	FAO 1989
Hareng d'Atlantique	17,8	13,8	9,3	10,6	FAO 1989
Chinard d'Atlantique	19,7	5,8	10,3	4,5	FAO 1989
Maquereau d'Atlantique	18,7	11,4	9,8	8,8	FAO 1989
Sébaste d'Atlantique	18,4	2,7	9,6	2,1	FAO 1989
Thon obèse	23,7	4,6	12,4	3,5	FAO 1989
Sprat de la mer Noire	17,1	8,1	9,0	6,2	FAO 1989
Merlan bleu	18,4	0,3	9,6	0,2	FAO 1989
Capelan	14,9	5,9	7,8	4,5	FAO 1989
Anchois d'Europe	18	2,8	9,4	2,2	FAO 1989
Colin d'Europe	17,8	2,5	9,3	1,9	FAO 1989
Sardine d'Europe	20	8,1	10,5	6,2	FAO 1989
Carrelet d'Europe	17,6	1,6	9,2	1,2	FAO 1989
Sprat d'Europe	17,1	8,1	9,0	6,2	FAO 1989
Mulet cabot	19,8	4	10,4	3,1	FAO 1989
Bonitou	23,7	4,6	12,4	3,5	FAO 1989
Flétan du Groenland	13	13,7	6,8	10,5	FAO 1989
Aiglefin	18,6	0,2	9,7	0,2	FAO 1989
"Largehead hairtail"	20,1	3,9	10,5	3,0	FAO 1989
Chinard de Méditerranée	19,7	5,8	10,3	4,5	FAO 1989
Sardinelle ronde	20,2	4,5	10,6	3,5	FAO 1989
Lieu noir	18,3	0,5	9,6	0,4	FAO 1989
Scad	21,3	2,5	11,2	1,9	FAO 1989
Merlu argenté	17,8	2,5	9,3	1,9	FAO 1989
Baliste	18,8	0,7	9,9	0,5	FAO 1989
Merlan	18,2	0,4	9,5	0,3	FAO 1989
Thon jaune	23,7	4,6	12,4	3,5	FAO 1989
Moyenne	19,1	4,6	10,0	3,5	

Concentration moyenne en C rapportée à 100	
Protéines	Lipides
74	26

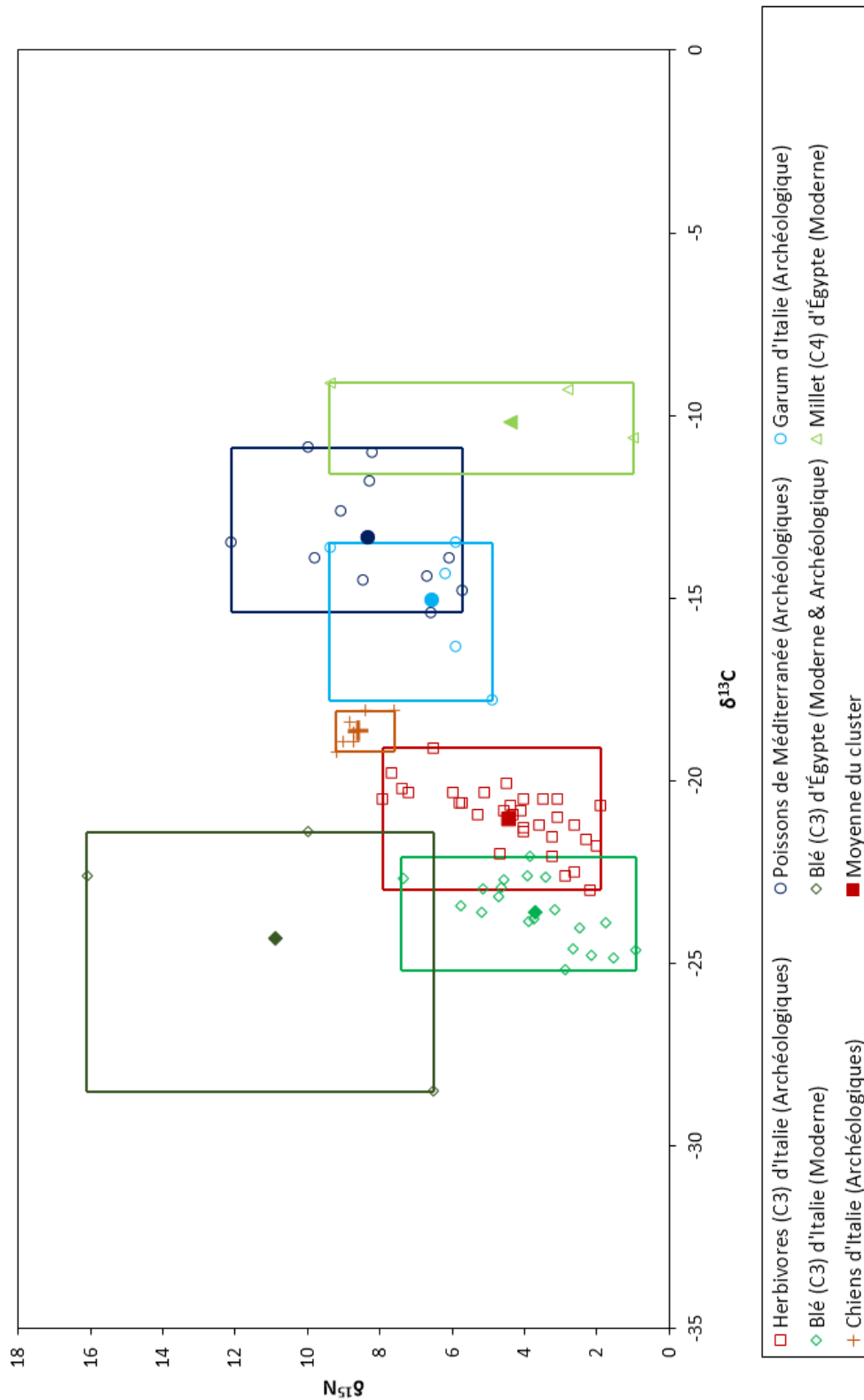
Note : Les concentrations en C ont été calculées à partir des valeurs standards (protéine : 52,4 %C ; glucide : 44,4 %C, lipide : 76,9 %C) définies par Morrison *et al.* (2000).

3.3.4. Le *garum*

Les résidus organiques de *garum* (n = 6) – liqueur de poisson employée comme condiment (André 2009) – découverts en contexte archéologique extra-romain ont des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ qui s'étendent respectivement de -17,8 à -13,5 ‰ (\bar{x} = -15 ‰ ; σ = 1,7 ‰) et de 4,9 à 9,4 ‰ (\bar{x} = 6,5 ‰ ; σ = 1,7 ‰) (Figure 16) (Prowse 2001 ; Prowse *et al.* 2004). Ces résidus ont été retrouvés dans des amphores à Olbia (Sardaigne, 2^e s. ap. J.-C.) et à Grado (Frioul-Vénétie julienne ; 2^e s. ap. J.-C.) en Italie (n = 6) (Prowse 2001 ; Prowse *et al.* 2004). Cependant, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ mesurées sur les échantillons de *garum* pouvant – aux dires mêmes de Prowse (2001) et de Prowse *et al.* (2004) – tout aussi bien refléter celles des phases organiques ou celles des phases minérales dissoutes des poissons marins utilisés, celles-ci s'avèrent de ce fait inexploitable. Seules les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ peuvent donc présenter une certaine utilité.

3.3.5. Les carnivores domestiques

Les carnivores domestiques (n = 7) découverts en contextes archéologiques italiens ont des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ comprises respectivement entre -19,2 et -18,1 ‰ (\bar{x} = -18,6 ‰ ; σ = 0,4 ‰) et entre 7,6 et 9,2 ‰ (\bar{x} = 8,6 ‰ ; σ = 0,5 ‰) (Figure 16) (Prowse 2001 ; Prowse *et al.* 2004 ; Craig *et al.* 2009). Les vestiges sont ceux de chiens issus des sites d'Isola Sacra (Prowse 2001 ; Prowse *et al.* 2004) et de Velia (Craig *et al.* 2009).



4. INTERPRETATION DES SIGNAUX MIGRATOIRES MESURES SUR LES FRACTIONS APATITIQUES

4.1. Les compositions isotopiques en oxygène

4.1.1. Origine de l'oxygène assimilé par les phases apatitiques

L'origine des atomes d'oxygène constitutifs des *ions carbonate* (CO_3^{2-}) et *phosphate* (PO_4^{3-}) des *phases apatitiques* fait actuellement consensus. Ces ions se *précipitent* en *équilibre isotopique* avec l'eau corporelle, il est admis que les atomes d'oxygène de ces ions dérivent de cette eau (Longinelli 1984 ; Luz *et al.* 1984 ; Levinson *et al.* 1987 ; Daux *et al.* 2008 ; Chenery *et al.* 2012). Pour appréhender les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{phos}}$ de l'os et de l'émail, il est nécessaire de saisir le fonctionnement de la *balance hydrique* du corps humain.

Chez l'Homme, comme chez les autres mammifères de plus de 1 kg, l'*homéostasie hydrique* est assurée par un subtil *équilibre* entre les *flux d'eau entrants* et *ceux sortants*. Seuls les flux entrants revêtent pour notre étude un intérêt puisque c'est eux qui *façonnent le signal isotopique*. Ces flux sont 1) l'*eau de boisson*, 2) l'*eau (libre ou liée) contenue dans les aliments*, 3) l'eau métabolique résultant de la dégradation par oxydation des macronutriments incorporés, et 4) la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant inspirée (Figure 17) (Longinelli 1984 ; Luz *et al.* 1984 ; Levinson *et al.* 1987 ; Bryant et Froelich 1995 ; Daux *et al.* 2008 ; Chenery *et al.* 2012). Ces différents fluides contribuent à l'eau totale du corps en des proportions très différentes les uns des autres (Longinelli 1984 ; Luz *et al.* 1984 ; Levinson *et al.* 1987 ; Daux *et al.* 2008 ; Chenery *et al.* 2012). Ainsi, l'eau de boisson et l'eau libre contenue dans les aliments représentent respectivement entre **45 et 67,5 %** et entre **22,5 et 45 %** des *apports totaux* d'eau au corps. L'eau métabolique et la vapeur d'eau comptent, quant à elles, pour moins de 10 % des apports totaux d'eau à l'organisme (FAO 2001).

L'Homme puisant son eau et prélevant ses aliments généralement dans son environnement proche, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ ou de $\delta^{18}\text{O}_{\text{phos}}$ de celui-ci *reflètent* les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des *eaux environnementales locales* (Longinelli 1984 ; Luz *et al.* 1984 ; Levinson *et al.* 1987 ; Daux *et al.* 2008). Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ ou de $\delta^{18}\text{O}_{\text{phos}}$ apparaissent donc comme un *proxy pertinent* pour discuter des *schémas de mobilité* des individus ou des groupes humains (Schwarcz *et al.* 1991 ; White *et al.* 1998 ; Dupras et Schwarcz 2001 ; Bentley et Knipper 2005 ; Knudson *et al.* 2012 ; Laffoon *et al.* 2013 ; Salesse *et al.* 2013 ; Lightfoot *et al.* 2014).

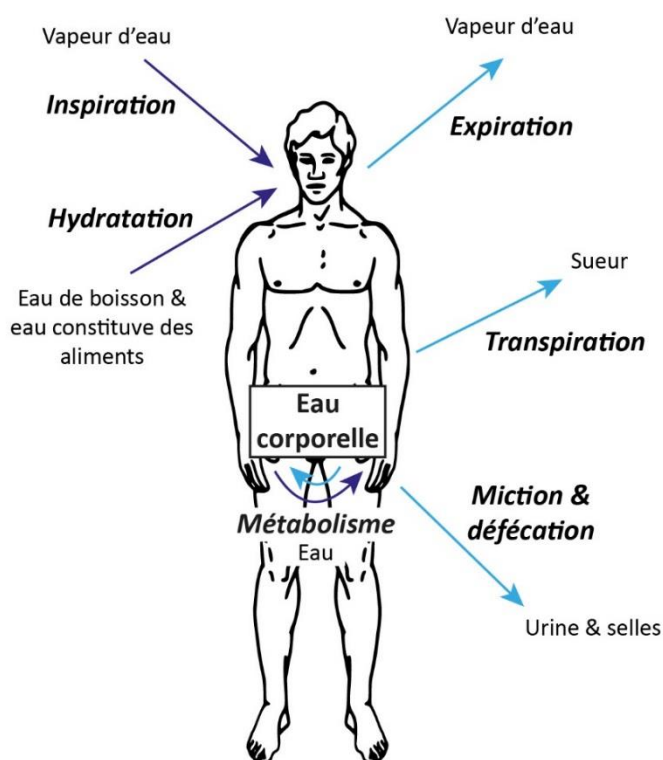


Figure 17. Bilan des flux d'eau entrants et sortants chez l'homme

Note : Réalisé d'après Longinelli (1984), Luz et al. (1984), Levinson et al. (1987) et Bryant et Froelich (1995).

4.1.2. Fractionnements isotopiques du ^{18}O

Les processus de fractionnements isotopiques s'opérant au cours de la formation des ions carbonate et phosphate des phases apatitiques induisent des enrichissements systématiques en ^{18}O de ces dernières par rapport à l'eau ingérée. Pour déterminer ces enrichissements isotopiques, différentes **équations de fractionnement** ont pu être établies, dont certaines spécifiquement pour l'Homme (Longinelli 1984 ; Luz et al. 1984 ; Levinson et al. 1987 ; Daux et al. 2008). Il est important de connaître ces dernières afin de **recouvrer le signal isotopique originel de l'eau ingérée**.

L'**équation** de fractionnement de Daux et al. (2008) modifiée par **Chenery et al.** (2012) apparaît à l'heure actuelle **la plus consensuelle** pour reconstituer à partir des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau ingérée ($\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$) :

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}} [\text{VSMOW}] = 1,59 \times \delta^{18}\text{O}_{\text{carb}} [\text{VSMOW}] - 48,634$$

Chenery et al. (2012) préconisent toutefois de ne recourir à cette équation que pour des **populations vivant** sous des **climats chauds-humides, tempérés ou froids**. Pour des populations occupant des régions aux climats chauds-arides, les auteurs Chenery et al. (2012) conseillent de procéder en deux

étapes, d'une part, convertir les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ en celles de $\delta^{18}\text{O}_{\text{phos}}$ à partir d'une équation spécialement construite à cet effet, et, d'autre part, estimer, à partir des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{phos}}$ les valeurs $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ via l'équation originale de Daux *et al.* (2008) :

$$(1) \delta^{18}\text{O}_{\text{phos [VSMOW]}} = 1,122 \times \delta^{18}\text{O}_{\text{carb [VSMOW]}} - 13,73$$

$$(2) \delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée [VSMOW]}} = 1,54 \times \delta^{18}\text{O}_{\text{phos [VSMOW]}} - 33,72$$

En amont de ces différentes conversions, il peut être nécessaire de normaliser par rapport au standard VSMOW les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ et exprimer par rapport au standard VPDB selon l'équation établie par Coplen (1988) :

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{[VSMOW]}} = 1,03091 \times \delta^{18}\text{O}_{\text{[VPDB]}} + 30,91$$

Récemment, différents auteurs ont souligné le manque de fiabilité des valeurs obtenues en sortie des équations de fractionnement en raison des erreurs statistiques qui leur sont associées (Pollard *et al.* 2011 ; Chenery *et al.* 2012 ; Kendall *et al.* 2013 ; Lightfoot *et al.* 2014). Il a pu être mis en évidence que les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ estimées à partir de l'équation de **Daux *et al.* (2008)** étaient accompagnées d'une **incertitude de mesure de $\pm 2 \text{ ‰}$** (2σ) tandis que celles calculées à partir de l'équation de **Chenery *et al.* (2012)** étaient assorties d'une incertitude de mesure de **$\pm 1 \text{ ‰}$** (2σ) (Pollard *et al.* 2011 ; Chenery *et al.* 2012). De telles erreurs peuvent **fausser** considérablement les **interprétations** faites à partir des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$. Pour contourner cet écueil, Pollard *et al.* (2011) ont recommandé de ne pas utiliser ces équations de fractionnement mais plutôt de comparer les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ d'une population donnée à celles d'une population de référence. Cette approche reste, dans les faits, difficile à appliquer car ces populations de références sont rares. À défaut, nous devons nous satisfaire des équations existantes pour reconstruire à partir des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{phos}}$ de l'os et de l'émail les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ (Gregoricka 2014).

4.1.3. Sources de variation des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$

a. Variations des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux environnementales

Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des phases apatitiques des hommes sont théoriquement corrélées à celles des eaux environnementales, et plus particulièrement à celles des eaux météoriques. Ces dernières, à l'échelle globale – *i.e.* mondiale –, sont dépendantes de processus physiques complexes au cours desquels s'effectuent différents fractionnements isotopiques (Gat 1996 ; Aggarwal *et al.* 2010). Parmi

ces différents phénomènes, quatre revêtent une importance toute particulière dans le cadre de notre étude puisqu'ils contrôlent à eux seuls toute la distribution spatiale des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations ($\delta^{18}\text{O}_{\text{ppt}}$) actuelles à l'échelle planétaire (Figure 18), à savoir :

1. Un effet de continentalité se traduisant par un appauvrissement progressif en ^{18}O des précipitations en fonction de la distance à la côte et des trajectoires dominantes des masses d'air humides (Yurtsever et Gat 1981 ; Rozanski *et al.* 1993).
2. Une influence de la latitude se manifestant par un appauvrissement en ^{18}O des masses d'air humides au cours de leurs déplacements des régions équatoriales et tropicales de faibles et moyennes latitudes vers les régions polaires de hautes latitudes (Yurtsever et Gat 1981 ; Rozanski *et al.* 1993).
3. Un effet orographique se traduisant par un appauvrissement en ^{18}O des précipitations lors du passage des masses d'air humides sur une zone de relief en raison d'une diminution corrélative de la pression atmosphérique et de la température (Yurtsever et Gat 1981 ; Rozanski *et al.* 1993).
4. Un effet de masse s'illustrant par un appauvrissement en ^{18}O des précipitations en raison de mouvement de convections plus intenses portant les masses d'air humides en altitude et provoquant de fortes pluies (Yurtsever et Gat 1981 ; Rozanski *et al.* 1993). Ce phénomène se rencontre notamment au-dessus de l'océan et des régions tropicales et plus occasionnellement au-dessus de régions plus septentrionales où des orages multicellulaires et supercellulaires peuvent avoir lieu (*e.g.* en Europe durant la période estivale) (Atkinson 2000 ; Gat *et al.* 2001).

Par ailleurs, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{ppt}}$ peuvent fluctuer localement en fonction des variations saisonnières des températures (Rozanski *et al.* 1993), des variations de l'humidité de l'air (Sonntag *et al.* 1983) et des variations des quantités d'eau précipitée (Mook *et al.* 1974) ou de variations de vitesse d'évaporation des eaux superficielles (Salati *et al.* 1979 ; Gat et Matsui 1991).

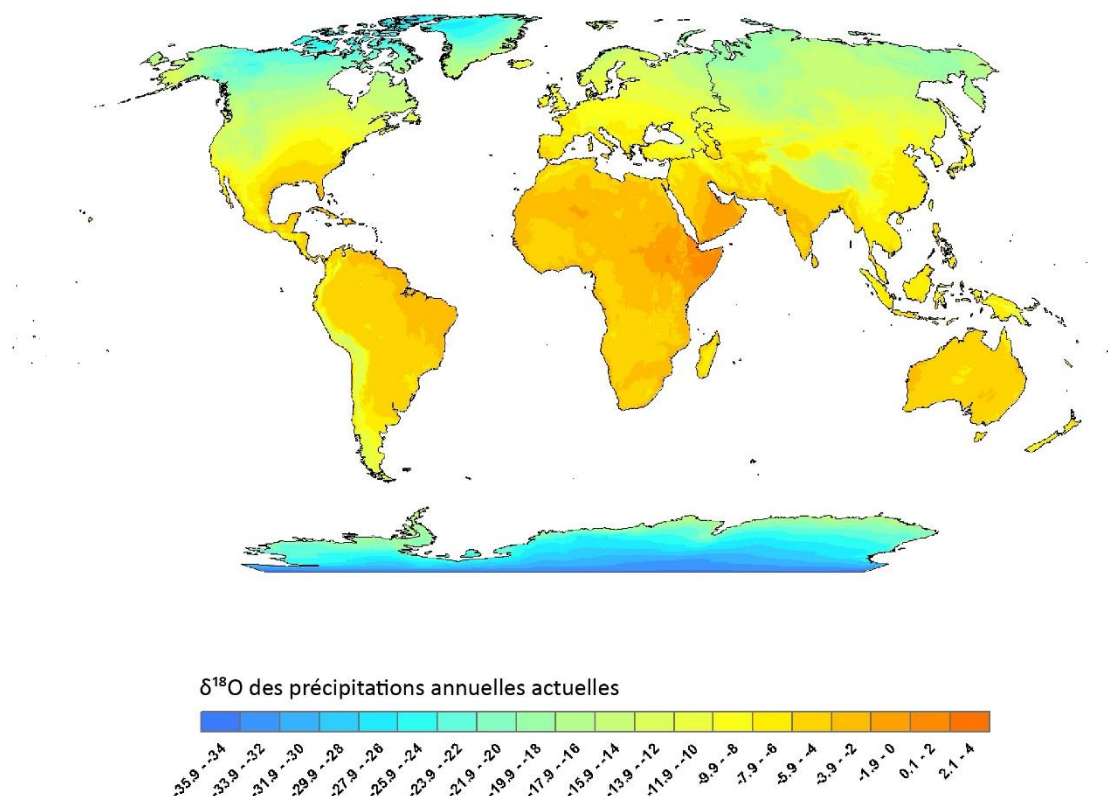


Figure 18. Distribution spatiale des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{ppt}}$ annuelles actuelle
 Note : Waterisotopes.org ; Bowen et Wilkinson (2002), Bowen et Revenaugh (2003) et Bowen et al. (2005a).

b. Les faits culturels modifiant les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux ingérées

L'**adduction** de l'eau potable depuis sa source jusqu'à son ou ses lieu(x) de consommation, en particulier lorsqu'elle a cours sur de **longues distances**, peut **fausser** considérablement le **signal environnemental** extrapolé à partir des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ ou de $\delta^{18}\text{O}_{\text{phos}}$ d'un individu ayant eu accès à cette eau (Prowse *et al.* 2007 ; Keenleyside *et al.* 2011 ; Killgrove 2013 ; Lightfoot *et al.* 2014). Aussi, un individu consommant une eau d'une **source localisée** dans un **environnement lointain et/ou différent de celui dans lequel celui-ci vit** au quotidien présentera des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ ou de $\delta^{18}\text{O}_{\text{phos}}$ corrélées aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau environnementale locale et pourrait être **considéré à tort comme allochtone**.

De plus, les différents **procédés culinaires** (brassage, ébullition, cuisson à l'étouffée, cuisson alcaline, etc.) mis en œuvre pour concocter des plats ou fabriquer des boissons peuvent induire des **modifications significatives** des **valeurs de $\delta^{18}\text{O}$** de l'eau intrinsèque des **aliments** ou de l'eau utilisée pour confectionner ces plats et **boissons** (Daux *et al.* 2008 ; Warinner et Tuross 2009 ; Brettell *et al.* 2012). Nous l'avons vu, l'eau des aliments ainsi que l'eau de boisson représentant les principales sources d'eau pour l'organisme, leurs modifications préalables à leur ingestion affecteront le signal

hydrique et par extension le signal environnemental enregistré dans les phases apatitiques d'un individu donné. Ce dernier pourrait dès lors être **assimilé erronément à un migrant**.

En outre, les **conditions de conservation et de stockage** de l'eau de boisson (citernes, bouteilles, jarres, etc.) peuvent induire des **modifications** des **valeurs de $\delta^{18}\text{O}$** du **breuvage** en question, et ce principalement en raison d'une évaporation de la phase liquide pouvant avoir lieu dans les réservoirs, laquelle s'enrichit alors en ^{18}O (Bowen *et al.* 2005b ; Spangenberg et Vennemann 2008). Un individu ayant accès à une telle boisson se distinguerait, par les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ de ses phases minérales, d'un individu ayant consommé une eau environnementale non altérée et pourrait **faussement** une fois encore être **assimilé à un sujet allochtone**.

Enfin, l'**allaitement maternel**, fait tant culturel que biologique, peut affecter de façon relativement importante les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ ou de $\delta^{18}\text{O}_{\text{phos}}$ d'un nourrisson en raison d'un **enrichissement** systématique **en ^{18}O** observé **entre le lait maternel** – reflétant les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau ingérée par la mère – **et les phases apatitiques des nourrissons** allaités – divergeant des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau environnementale – (Roberts *et al.* 1988 ; Wright et Schwarcz 1998 ; Wright et Schwarcz 1999 ; White *et al.* 2004 ; Williams *et al.* 2005 ; Dupras et Tocheri 2007). Aussi, les phases minérales conservant le signal d'une alimentation lactée – à l'instar des dents du fait que celles-ci se forment durant la période d'allaitement et ne subissent aucun remodelage par la suite durant la vie d'un individu – peuvent s'avérer particulièrement problématique et **biais** les interprétations faites en termes de mobilité à partir de leurs valeurs de $\delta^{18}\text{O}$.

L'ensemble des facteurs comportementaux évoqués ici revêtent une **forte dimension culturelle** (Stuart-Macadam et Dettwyler 1995 ; Wright et Schwarcz 1998 ; Warinner et Tuross 2009 ; Brettell *et al.* 2012). Il sera, de ce fait, important de **replacer dans leur contexte historico-culturel les différentes populations étudiées** de façon à **appréhender aux mieux ces biais** potentiels et d'évaluer leurs possibles effets isotopiques sur les valeurs isotopiques mesurées.

4.1.4. Approche interprétative des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$

Pour déterminer si un individu est autochtone ou allochtone à une région, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ estimées à partir de celles de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ et/ou de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ sont comparées aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ d'un **référentiel hydrique**. Ce référentiel peut être créé à partir des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux de natures différentes (précipitations, fluviales, souterraines, etc.). Un **référentiel local** se constitue des **valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux potentiellement bues** par un individu vivant dans une région donnée. Dans le cadre de cette étude, si un individu dont sa valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ tombera **dans l'intervalle** des valeurs locales alors celui-ci pourra être considéré comme un **habitant de Rome**. Nous ne pourrions toutefois pas exclure que cet individu ait vécu dans une autre région que celle de Rome où les eaux

bues auraient eu une signature isotopique similaire. À l'inverse, si un individu dont sa valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ tombera **en dehors de l'intervalle** des valeurs locales alors celui-ci pourra être considéré comme un **migrant**. L'identification d'un migrant s'avère dans les faits beaucoup plus simple et fiable que celle d'un individu autochtone. Au cours de ce travail nous nous focaliserons donc essentiellement à mettre en exergue les sujets ayant migré au cours de leur vie. De façon à identifier le lieu d'origine d'un migrant, un **référentiel suprarégional** que nous qualifierons ici d'**extra-romain** peut également être construit de manière similaire au référentiel local.

4.2. Les compositions isotopiques en strontium

4.2.1. Origine du strontium assimilé par les phases apatitiques

Le modèle physiologique communément retenu pour expliquer l'absorption, la distribution, le métabolisme et l'excrétion du **strontium** – élément non-nutritif et non-toxique dont **95 % des apports** sont **d'origine alimentaire** – chez l'Homme est sensiblement analogue à celui du calcium et suscite à ce jour un relatif consensus (Schulert *et al.* 1959 ; Dolphin et Eve 1963 ; Lecompte 2001 ; Montgomery 2002 ; Bentley 2006). Pour appréhender correctement les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mesurés sur l'os ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$) ou l'émail ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$), il est important de saisir les **tenants** et les **aboutissants** de ce **modèle**.

Après franchissement de la barrière intestinale, les **atomes de strontium** dérivant des ressources alimentaires intègrent différents pools répartis dans les liquides extracellulaires ainsi qu'au niveau des surfaces d'échanges des os, avant de se **fixer préférentiellement** au sein des **tissus squelettiques** – plus de 99 % de la charge corporelle totale – et dans une bien moindre mesure au sein des tissus musculaires et de certains organes (Schulert *et al.* 1959 ; Dolphin et Eve 1963 ; Schroeder *et al.* 1972 ; Blakely 1989 ; Dahl *et al.* 2001 ; Lecompte 2001). La séquestration du strontium au sein des structures cristallines de l'os, de la dentine et de l'émail s'opère par **substitutions ioniques** passives et d'apparences **benignes** entre les cations divalents Ca^{2+} et ceux Sr^{2+} . *In fine*, les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ **reflètent** donc **ceux des aliments** consommés.

L'Homme prélevant principalement ses **ressources alimentaires** dans son **environnement proche**, les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ **reflètent** en théorie les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des **ressources** végétales ou animales **locales** dont celui-ci se sustente. Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ représentent donc des **proxys intéressants** et **complémentaires** des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ pour discuter de la **mobilité** des individus.

4.2.2. Fractionnement isotopique insignifiant du strontium

Chaque étape de ce modèle physiologique s'accompagne d'une discrimination strontium-calcium à l'avantage de ce dernier. L'**absorption**, la **distribution** interne, de même que l'**excrétion** du strontium donne lieu à divers **processus de fractionnements** de celui-ci (Dolphin et Eve 1963 ; Sillen et Kavanagh 1982 ; Price *et al.* 1985 ; Blakely 1989 ; Balter 2001 ; Montgomery 2010). Toutefois, contrairement à ce que connaissent les éléments légers précédemment décrits, ces fractionnements isotopiques sont considérés pour le strontium comme **négligeables** (Graustein 1989 ; Capo *et al.* 1998 ; Montgomery 2002). En effet, du fait d'une différence de masse bien plus faible entre deux isotopes d'un élément lourd, tels que ^{86}Sr et ^{87}Sr , qu'entre deux isotopes d'un élément léger, tels que ^{16}O et ^{18}O , les propriétés physico-chimiques entre deux isotopes d'un élément lourd sont davantage similaires qu'entre deux isotopes d'un élément léger. Aussi, plus un élément chimique est lourd moins les fractionnements entre ses isotopes sont importants (Montgomery 2002 ; Bentley 2006 ; Hoefs 2009 ; Knudson *et al.* 2010).

4.2.3. Sources de variation des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

a. Variations des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ du substrat géologique

a.1. Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des roches et des sols

Sur l'échelle des temps géologiques, la quantité de ^{87}Sr n'a eu de cesse d'augmenter en raison de la transmutation par radioactivité β du ^{87}Rb en ^{87}Sr . Cette **évolution de la quantité de ^{87}Sr** sur **l'échelle des temps archéologiques** peut néanmoins être considérée comme **insignifiante** en raison du temps de demi-vie extrêmement long – 48,8 milliards d'années – du ^{87}Rb (Faure et Powell 1972 ; Capo *et al.* 1998 ; Montgomery 2002).

L'**âge et l'origine géochimique** d'un **matériel géologique** est **dépendant** du **rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$** mesuré sur le minéral ou la roche. Ce rapport est lui-même **fonction** de trois paramètres, à savoir 1) le **rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ à la fermeture du système isotopique** – *i.e.* au moment de la formation du minéral ou de la roche –, 2) le **rapport $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ à la fermeture du système isotopique**, lequel est dans la plupart des cas directement proportionnel au rapport Rb/Sr initial, et 3) le **temps** écoulé entre la fermeture du système isotopique et le moment de l'analyse isotopique (Faure et Powell 1972 ; Bonhomme 1982 ; Terakado et Nohda 1993 ; Bentley 2006 ; Wawrzenitz *et al.* 2006 ; Silva *et al.* 2012a ; Clauer *et al.* 2014). Par conséquent, deux roches d'âges distincts mais détenant des rapports Rb/Sr initiaux identiques présenteront aujourd'hui des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ différents, la plus vieille ayant le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ le plus élevé et réciproquement la plus jeune ayant le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ le plus faible.

En outre, deux roches d'âges similaires mais de rapports Rb/Sr initiaux distincts présenteront aujourd'hui des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ différents, celle possédant le rapport Rb/Sr le plus élevé ayant le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ le plus haut et inversement celle possédant le rapport Rb/Sr le plus faible ayant le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ le plus bas (Capo *et al.* 1998 ; Bentley 2006). À titre d'exemple, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ du manteau terrestre, originellement à 0,699 (Zindler et Hart 1986 ; Faure et Mensing 2004), est aujourd'hui compris entre 0,702 et 0,705 (White et Hofmann 1982 ; Yanagi 2011). Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ actuels des roches de la croûte terrestre varient généralement entre 0,702 et 0,750 (Graustein 1989 ; Bentley 2006), bien que des valeurs plus élevées puissent parfois avoir été rapportées (e.g. Amato et Wright 1997 ; Sillen *et al.* 1998 ; Silva *et al.* 2012b).

Le **transfert du strontium** des différentes **roches-mères** – *i.e.* de la couche superficielle des roches de la croûte terrestre – aux **sols sus-jacents** s'opère sous l'effet de la **météorisation**. Ce phénomène constitue la principale source de strontium pour les sols (Dasch 1969 ; Åberg *et al.* 1989 ; Capo *et al.* 1998 ; Bentley 2006).

a.2. Altérations des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des sols

Le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ d'un sol est **corrélé à celui de la roche-mère** subjacente. Le degré de corrélation entre ces deux variables est dépendant de la nature même du substratum. Ainsi, un sol sus-jacent d'une roche-mère dite homogène – *i.e.* constituée d'une seule espèce minérale – présentera un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ théorique identique à celui de la roche-mère, et réciproquement, un sol sus-jacent d'une roche dite hétérogène – composée de plusieurs espèces minérales – présentera un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ théorique différent de celui de la roche-mère. En effet, les minéraux inclus dans une roche présente, en plus de rapports Rb/Sr et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ distincts, des potentiels d'altération variables. Ces minéraux réagiront différemment face au processus de météorisation, et par conséquent influenceront inégalement sur le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ du sol sus-jacent (Dasch 1969 ; Capo *et al.* 1998 ; Chadwick *et al.* 1999 ; Price *et al.* 2002 ; Bentley 2006 ; Tütken *et al.* 2011).

Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des sols peuvent également varier localement et de façon relativement importante en raison de **dépôts atmosphériques** présentant des signatures isotopiques très différentes de celle du sol de la région d'étude – *e.g.* des aérosols terrestres terrigènes et biogéniques, des embruns marins, des polluants anthropiques – (Naiman *et al.* 2000 ; Bentley 2006 ; Xu *et al.* 2009). Transportés par le vent ou les eaux météoriques sur de courtes distances, de l'ordre de quelques mètres, ou sur de très longues distances, de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres, ces aérosols et particules peuvent représenter des sources de strontium relativement conséquente pour les sols selon la région considérée (Chadwick *et al.* 1999 ; Bentley 2006).

Les **précipitations** représentent aussi une autre source de strontium pour les sols, bien que celle-ci soit sans commune mesure – en termes d'importance – avec la précédente source (Capo *et al.* 1998 ; Stewart *et al.* 2001 ; Montgomery 2002 ; Bentley 2006). Les eaux météoriques dérivant des eaux océaniques, celles-ci présenteront des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ très similaires à ceux mesurés pour les eaux océaniques, soit 0,7092 (Capo *et al.* 1998 ; Stewart *et al.* 2001 ; Bentley 2006). Les eaux météoriques posséderont toutefois des concentrations de strontium beaucoup plus faibles que celles calculées sur les eaux océaniques – ordinairement inférieures à 1 ppb dans les eaux météoriques contre 7,7 ppm dans les eaux océaniques – (Capo *et al.* 1998 ; Faure et Mensing 2004). Aussi, cet apport de strontium aux sols peut être considéré comme négligeable tant les concentrations en strontium des précipitations sont infimes. Seuls les sols de régions exposées annuellement ou saisonnièrement à de très fortes pluies ou fontes de neige peuvent voir leurs rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ légèrement modifier par un apport de strontium d'origine océanique (Capo *et al.* 1998 ; Montgomery 2002 ; Faure et Mensing 2004).

Enfin, le **ruissellement et l'écoulement des eaux superficielles** peuvent s'avérer à rebours des facteurs d'appauvrissement des sols en strontium et par extension de modifications des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des sols du fait d'importants lessivages (Capo *et al.* 1998 ; Montgomery 2002 ; Bentley 2006).

b. Variations des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ au sein des réseaux trophiques

b.1. Les végétaux

Le **transfert du strontium biodisponible** – *i.e.* non-immobilisé dans les sols – de la lithosphère à la biosphère s'effectue par le biais des **végétaux** (Sillen et Kavanagh 1982 ; Ericson 1985 ; Graustein 1989 ; Price *et al.* 1994 ; Åberg 1995). Bien que le strontium ne soit pas un élément essentiel pour les plantes terrestres, celui-ci est prélevé et accumulé par les végétaux au même titre que le calcium (Elias *et al.* 1982). La distribution du strontium dans les plantes terrestres est toutefois inhomogène, celle-ci variant en fonction de différents paramètres tels que l'âge de la plante étudiée, les parties anatomiques de la plante observées et l'espèce à laquelle appartient la plante considérée. Aucune corrélation nette n'a pu être établie entre les concentrations en strontium des plantes et celles des sols sur lesquels elles évoluent (Elias *et al.* 1982 ; Graustein 1989 ; Capo *et al.* 1998 ; Montgomery 2002). Par ailleurs, les fractionnements isotopiques pouvant s'opérer au cours de l'assimilation du strontium par les végétaux terrestres étant considérés négligeables, les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des tissus des **plantes terrestres** sont plus ou moins **identiques à ceux** des pools de **strontium soluble et mobile** dans les **sols** sur lesquels elles croissent (Capo *et al.* 1998 ; Faure et Mensing 2004 ; Bentley 2006 ; Hoefs 2009).

b.2. Les animaux

Bien que le strontium n'ait aucun rôle métabolique ni aucune valeur nutritionnelle pour les animaux, celui-ci présent dans les aliments se voit comme chez l'Homme incorporé et métabolisé en lieu et place du calcium (Dahl *et al.* 2001 ; Bentley 2006 ; Montgomery 2010). Différents auteurs ont pu mettre en évidence que les concentrations en strontium retrouvées chez les animaux étaient similaires à celles déterminées pour l'Homme (Sillen et Kavanagh 1982 ; Price *et al.* 1985 ; Tuross *et al.* 1989). Des concentrations supérieures à 1000 ppm ont toutefois pu être parfois rapportées pour certains taxons (Radosevich 1993). Enfin, en l'absence de fractionnements isotopiques significatifs du strontium entre un consommateur et son alimentation, les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{email}}$ d'un **animal** seraient parfaitement **identiques à ceux des aliments** consommés (van der Merwe *et al.* 1990 ; Vogel *et al.* 1990 ; Åberg 1995 ; Capó *et al.* 1998 ; Bentley 2006 ; Shaw *et al.* 2009).

4.2.4. Approche interprétative des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{email}}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$

De la même manière que les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ sont comparées aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ d'un référentiel hydrique, les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{email}}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ sont confrontés aux rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ d'un **référentiel géologique** afin d'identifier si un individu est autochtone ou allochtone. Une compilation des **rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des roches environnantes** de Rome a été entreprise de façon à constituer un référentiel local. L'identification d'un individu **local ou non-local** se réalise de façon similaire à celle décrite dans la Section II, 4.1.3, b, pour les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$. L'identification de migrants peut cependant se complexifier en cas d'**importation des ressources** alimentaires. En effet, des sujets locaux consommant des ressources importées de régions dont les substrats géologiques sont différents de ceux de Rome pourront présenter des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{email}}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ tombant en dehors de l'intervalle défini de valeurs locales pour Rome et être qualifiés à tort de migrants. Aussi, il sera intéressant d'utiliser **de concert** les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ mesurés sur l'os et/ou l'email d'un individu de façon à cibler le mieux possible la région d'origine d'un individu et de parer à certaines limites intrinsèques aux approches mono-proxys. Enfin, pour déterminer le lieu d'origine d'un migrant, un **référentiel extra-romain** pourra également être construit de la même manière que le référentiel local.

4.3. Le référentiel géographique

Le référentiel hydrique et celui géologique se subdivisent tous deux en un référentiel romain et en un référentiel extra-romain. En **comparant** les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ ainsi que les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

mesurés sur l'os ou l'émail aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ du référentiel hydrique ou aux rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ du référentiel géologique, il est possible de déterminer 1) ***si un individu a vécu tout ou partie de sa vie à Rome***, et 2) ***d'où un migrant est originaire***.

4.3.1. Le référentiel hydrique

a. Le référentiel romain

a.1. L'approvisionnement en eau de la cité

S'il ne fait nul doute qu'aux premiers temps de la République, Rome ne disposait encore que des eaux du Tibre, des puits et des pluies pour assurer les besoins premiers de ses habitants mais aussi les fastes des jours exceptionnels. ***Aux premiers temps de l'Empire***, la cité n'usa que peu de ces eaux locales dont moult devinrent viciées et impropres à la consommation, préférant alors recourir ***aux eaux*** pures et cristallines lointaines ***captées en tous lieux du Latium par les aqueducs***, ces ouvrages d'art témoins de la puissance et de la permanence de Rome (Hodges 2002 ; Malissard 2002). Pas moins de sept aqueducs alimentaient en eau potable la cité éternelle au tout début de notre ère (De Feo *et al.* 2011). Quatre autres ont été construits entre les I^{er} et III^e siècles ap. J.-C. (De Feo *et al.* 2011) (Tableau 16 ; Figure 19).

Tableau 16. Caractéristiques propres aux différents aqueducs de Rome

Aqueduc	Période de construction	Source				Arrivée à Rome	Débit (m ³ /jour)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{eau}}$ (‰ VSMOW)
		Latitude	Longitude	Altitude (m)	Distance à Rome (km)			
Aqua Appia	-312	41.902	12.6262	36	12 (est)	<i>Circus Maximus</i> (sud-ouest)	73000	-5,9 ± 0,3
Aqua Anio Vetus	-272/-269	42.0106	12.8919	313	47 (est)	<i>Porta Esquilina</i> (sud-est)	176000	-6,5 ± 0,3
Aqua Marcia	-144/-140	42.0176	12.9242	300	58 (est)	<i>Quirinal</i> (nord-est)	188000	-6,4 ± 0,3
Aqua Tepula	-126/-125	41.7969	12.626	150	16 (sud-est)	<i>Porta Collina</i> (nord-est)	18000	-6,1 ± 0,3
Aqua Iulia	-33	41.7794	12.6754	378	19 (sud-est)	<i>Porta Viminalis</i> (nord-est)	48000	-6,5 ± 0,3
Aqua Virgo Aqua Vergine	-22	41.9116	12.6357	29	13 (est)	<i>Campus Martius</i> (nord-ouest)	100000	-5,9 ± 0,3
Aqua Alsietina Aqua Augusta	-2	42.1031	12.3176	267	23 (nord-ouest)	<i>Trans Tiberim</i> (ouest)	16000	-6,4 ± 0,3
Aqua Claudia	38	42.0086	13.0267	334	61 (est)	<i>Porta Praenestina</i> (sud-est)	184000	-6,5 ± 0,3
Aqua Anio Novus Aqua Aniena Nova	38	41.918	13.1045	500	61 (est)	<i>Porta Praenestina</i> (sud-est)	190000	-6,8 ± 0,3
Aqua Traiana	109	42.1601	12.2106	179	21 (nord-ouest)	<i>Janiculum</i> (ouest)	113000	-6,2 ± 0,3
Aqua Alexandrina	226	41.8727	12.7403	81	23 (est)	<i>Campus Martius</i> (nord-ouest)	-	-6 ± 0,3

Note : Les données historiques proviennent de De Feo *et al.* (2011) et de ROMAQ (www.romaq.org). Les données géographiques ont été reconstruites à l'aide de *GoogleEarth* (Google Inc.). Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ ont été estimées via l'OIPC (www.waterisotopes.org).

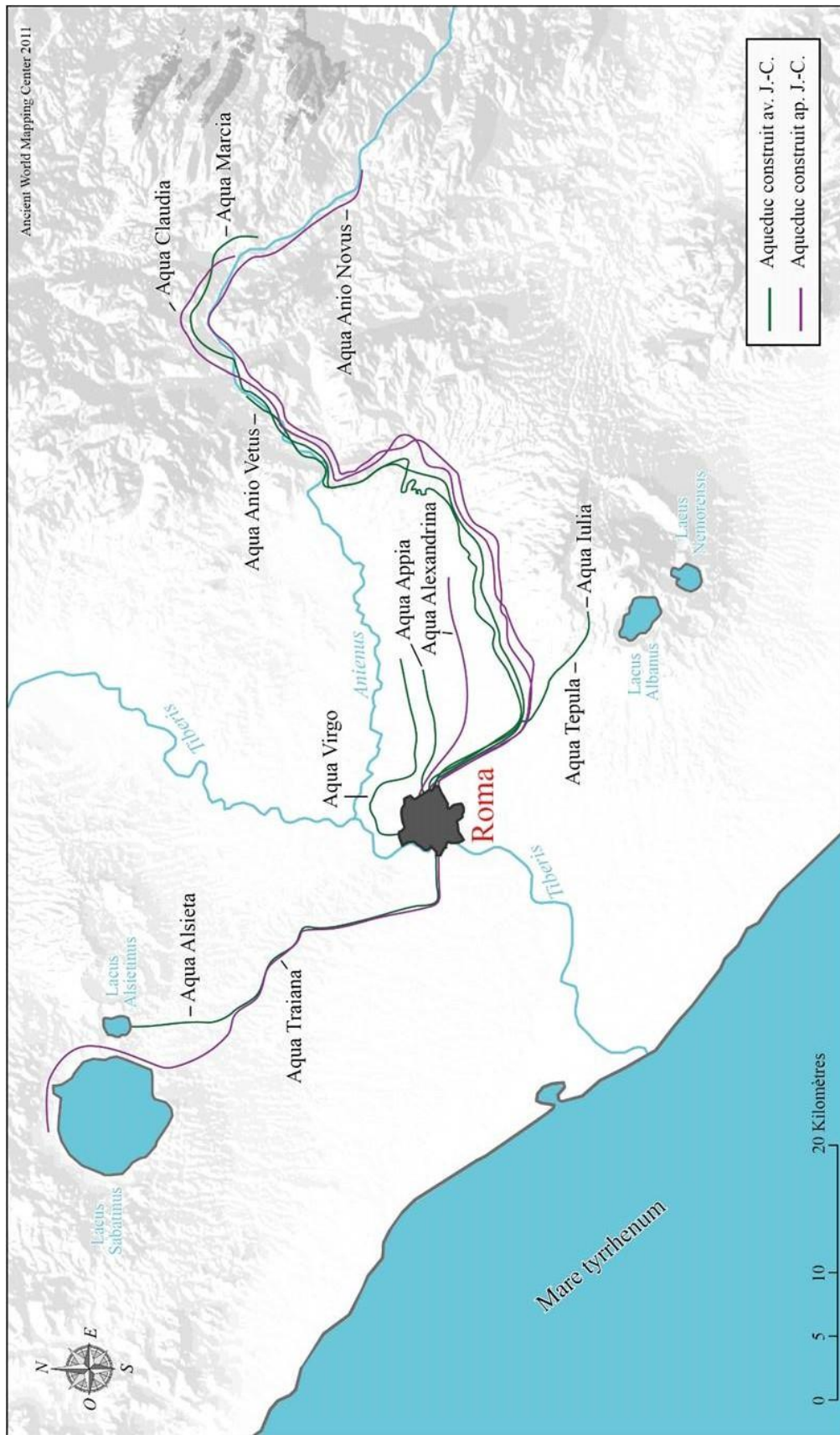


Figure 19. Carte du Latium présentant les 11 aqueducs de Rome

Note : Carte réalisée d'après *The Atlas Project of the ROMan AQUeducts* (ROMAQ, www.romaq.org) dirigé par Passchier et al.

a.2. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux des aqueducs

a.2.1. Reconstructions des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$ modernes

Nous ne disposons à ce jour d'aucune donnée isotopique pour les eaux des sources des aqueducs. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ de ces eaux ($\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$) peuvent toutefois être **reconstituées** mathématiquement via *The Online Isotopes in Precipitations Calculators* (OIPC) construit à partir des données du *Global Network of Isotopes in Precipitation* (GNIP) (Bowen et Revenaugh 2003 ; Bowen *et al.* 2005a). Bien que l'OIPC soit d'ordinaire utilisé pour reconstruire les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{ppt}}$, il peut être employé ici afin d'estimer les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux souterraines en raison de l'étroite corrélation existante entre ces types d'eaux (Section II, 4.1.3). Ainsi, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$ pourraient varier entre -6,8 ‰ et -5,9 ‰ (Tableau 16). Toutefois, une erreur de mesure de $\pm 0,3$ ‰ (2σ) est systématiquement associée aux valeurs générées l'OIPC. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$ devraient donc *in fine* être comprises **entre -7,1 et -5,6 ‰**.

a.2.2. Influence du climat des I^{er}-III^e s. ap. J.-C.

Le climat varie dans le temps et entraîne des modifications des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux météoriques et superficielles (Section II, 4.1.3, a). Si nous disposons actuellement de nombreuses données pour **reconstituer le climat entre le I^{er} et le III^e s. ap. J.-C.** à l'échelle mondiale, celles-ci se raréfient lorsque nous changeons d'échelle et souhaitons connaître les fluctuations du climat dans une région restreinte du globe comme le **centre de l'Italie**. Aussi, seules des **tendances générales** peuvent être proposées (Reale et Dirmeyer 2000 ; Reale et Shukla 2000 ; Büntgen *et al.* 2011 ; Chen *et al.* 2011 ; Wanner *et al.* 2011 ; Dermody *et al.* 2012 ; McCormick *et al.* 2012 ; Bruno *et al.* 2013 ; Cremonini *et al.* 2013).

Le **climat des I^{er} et II^e s. ap. J.-C** serait **chaud et exceptionnellement stable** dans l'ouest de l'Empire romain au regard des différents proxys climatiques et données archéobotanologiques et archéobotaniques (Brown *et al.* 2001 ; Kenward 2001 ; Chen *et al.* 2011 ; McCormick *et al.* 2012 ; Bruno *et al.* 2013). Cette période est, avec le I^{er} s. av. J.-C., considérée comme un optimum climatique (McCormick *et al.* 2012). Le climat de ces trois siècles aurait **été jusqu'à 1°C plus chaud** que celui que nous connaissons aujourd'hui (Büntgen *et al.* 2011 ; Chen *et al.* 2011 ; Dermody *et al.* 2012 ; McCormick *et al.* 2012 ; Bruno *et al.* 2013). À l'échelle du Latium, les sources historiques viendraient corroborer cette tendance en faisant état de crues plus fréquentes du Tibre durant les I^{er} et II^e s. ap. J.-C. (Aldrete 2007 ; McCormick *et al.* 2012 ; McCormick *et al.* 2015).

Le **climat du III^e s. ap. J.-C.** se caractériserait par un climat **beaucoup moins stable** que celui des siècles précédents à la lecture des proxys climatiques (Grootes *et al.* 1993 ; Mayewski *et al.* 1994 ;

Holzhauser *et al.* 2005 ; Mangini *et al.* 2005 ; Nicolussi *et al.* 2009 ; Rossignol et Durost 2010 ; Büntgen *et al.* 2011 ; McCormick *et al.* 2012). Le climat du III^e s. ap. J.-C. aurait été **jusqu'à 1°C plus froid** que celui que nous connaissons aujourd'hui (Grootes *et al.* 1993 ; Holzhauser *et al.* 2005 ; Mangini *et al.* 2005 ; McCormick *et al.* 2012). Les niveaux de précipitations seraient en outre plus variables notamment dans la seconde moitié du siècle (Büntgen *et al.* 2011 ; McCormick *et al.* 2012).

Rozanski *et al.* (1993) ont pu démontrer une **élévation** moyenne de valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{ppt}}$ de **0,6 ‰** **par degré** supplémentaire de la température moyenne pour les régions tempérées comme l'Italie. Or, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$ estimées par l'OIPC au début de cette section l'ont été à partir de valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{ppt}}$ modernes. Afin de tenir compte à la fois de la hausse des températures d'environ 1°C durant le I^{er} et II^e s. ap. J.-C. mais aussi de la baisse des températures d'environ 1°C durant le III^e s. ap. J.-C. par rapport à celles du XXI^e s., il convient de **minorer la borne inférieure** et **majorer celle supérieure** de l'intervalle des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$ défini ci-devant de **0,6 ‰**.

a.2.3. Influence des pratiques alimentaires des I^{er}-III^e s. ap. J.-C.

Deux pratiques alimentaires propres aux Romains peuvent impacter le signal isotopique hydrique de habitants de la capitale impériale.

Les Romains préféraient **boire une eau tiède** plutôt qu'une eau fraîche dont l'usage selon Malissard (2002) se limitait en général à calmer les excès de table ou à refroidir les boissons trop chaudes. Or, Brettell *et al.* (2012) ont pu démontrer qu'en portant une **eau à ébullition** puis en la laissant se refroidir, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ de celle-ci s'élevait de **0,4 ‰**. Afin de tenir compte à la fois de cette pratique et de la possibilité de s'abreuver uniquement en eau fraîche, il convient de **majorer uniquement la borne supérieure** de l'intervalle des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$ défini ci-devant de **0,4 ‰**.

Si l'eau détient la première place dans le palmarès des boissons les plus consommées, il ne fait aucun doute que le **vin** tient la seconde. Toujours trop épais pour être bu tel quel, devenant avec l'âge sirupeux, rance et amer, le vin était systématiquement **coupé à l'eau** et dont la quantité apportée dépendait de la convenance de chacun (Malissard 2002 ; André 2009). **Importés** à Rome de tout l'Empire, les vins pouvaient détenir des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ **très différentes** les uns des autres mais aussi comparativement à celles des eaux bues dans la capitale. De plus, les signatures isotopiques des vins pouvaient être altérées par un ensemble de processus se déroulant au cours de la vinification (Dunbar 1982a ; Dunbar 1982b ; Ingraham et Caldwell 1999 ; Brettell *et al.* 2012). Néanmoins, aussi diverses que pouvaient être les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des vins en arrivant à Rome, celles-ci devaient **se fondre dans celles des eaux** qui les rallongeaient. Par conséquent, la consommation de vin n'a dû avoir qu'un **effet limité voire non significatif** sur le signal hydrique enregistré par les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ (émail) et $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ (os) des hommes.

a.2.4. *Estimation des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$ des I^{er}-III^e s. ap. J.-C.*

In fine, il convient de minorer la borne inférieure de l'intervalle de valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$ estimées par l'OIPC de 0,6 ‰ en raison de la baisse de la température moyenne au III^e s. ap. J.-C. et de majorer la borne supérieure de ce même intervalle de 1 ‰ en raison de l'élévation de la température moyenne aux I^{er}-II^e s. ap. J.-C. et de la pratique de boire préférentiellement une eau tiède. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$ des I^{er}-III^e s. ap. J.-C. devaient donc varier **entre -7,7 et -4,6 ‰**. Cet intervalle de valeurs relativement large permet de prendre en compte différents cas de figures. Par exemple, l'eau de l'aqueduc *Aqua Anio Novus* fraîche devait avoir au III^e s. ap. J.-C. une valeur de $\delta^{18}\text{O}$ d'environ -7,7 ‰. En revanche, l'eau des aqueducs *Aqua Appia* et *Aqua Virgo* tiédie devait avoir aux I^{er}-II^e s. ap. J.-C. une valeur de -4,6 ‰.

a.3. *Des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ humaines modernes de référence ?*

Prowse et al. (2007) ont constitué un **référentiel « local » de valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ (émail)** mesurés sur 24 dents déciduales (13 i1, 4 i2, 4 m1 et 3 m2) appartenant à 19 individus sains nés à Rome entre 1985 et 1989. Les valeurs obtenues varient entre -7,9 et -3,2 ‰ ($\bar{x} = -5,1$ ‰ ; $\sigma = 1,1$ ‰). Les valeurs les plus négatives ayant été toutes mesurées sur des m1, les auteurs ont pris le parti d'exclure ces dernières de leur corpus. Pour expliquer ces valeurs aberrantes, les auteurs ont avancé l'hypothèse d'une consommation d'eau non-locale (e.g. eau minérale en bouteille) ou d'une alimentation singulière de ces individus au moment de la formation des m1. Après exclusion de ces dents, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ (émail) du corpus varient entre -5,4 et -3,2 ‰. Enfin, de façon empirique, Prowse et al. (2007) ont défini que les sujets dont les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ (émail) étaient comprises **entre -6 et -4 ‰** étaient locaux. Ceux en dehors de cet intervalle étaient en revanche à considérer comme non-locaux. **Killgrove (2010)** a redéfini sur des bases mathématiques – à partir de la moyenne plus ou moins deux écarts types – l'intervalle empirique de Prowse et al. (2007). Elle a ainsi conclu que les sujets dont les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ (émail) étaient comprises **entre -5,8 et -3,7 ‰** étaient locaux et que tout individu présentant une valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ (émail) en dehors de cet intervalle pouvait alors être considéré comme migrant.

Collectées originellement à des fins histologiques – et non pour des études isotopiques – dans le cadre du projet *Fatina* du *National Prehistoric Ethnographic "Luigi Pigorini" Museum*, un certain nombre d'informations relatives aux histoires de vie des sujets analysés et des parents de ces derniers ne nous sont malheureusement pas connus. Ainsi, si le sexe, la date de naissance, le lieu de naissance ou encore la durée du sevrage ont été enregistrés au moment de la collecte des dents, rien au sujet des modalités de l'allaitement, de l'histoire migratoire de la mère durant sa grossesse ou encore du

type d'eau consommée ou utilisée pour la préparation du lait infantile (eau du robinet, eau en bouteille, eau préalablement bouillie, etc.) n'a été enregistré (Prowse *et al.* 2007 ; Zanolli *et al.* 2011). Ces nombreuses inconnues sont pour le genre d'étude que nous menons dommageables.

De plus, en recourant à ce corpus de comparaison, Prowse *et al.* (2007) ainsi que Killgrove (2010) ne tiennent nullement compte des **différents biais** que nous avons **invoqués précédemment**. Les auteurs font le postulat que le climat n'aurait pas changé entre l'époque contemporaine et celle antique. Or, ce postulat aujourd'hui ne tient plus (Section II, 4.3.1, a.2.2).

En outre, les auteurs ne prennent aucunement en considération dans leurs discussions que les eaux consommées actuellement à Rome sont bien différentes de celles consommées jadis. En effet, si deux des cinq aqueducs que compte Rome de nos jours captent encore pour partie les mêmes eaux dont se servaient les Romains aux I^{er}-III^e siècles ap. J.-C., l'essentiel des eaux approvisionnant la cité aujourd'hui proviennent de **zones de captages bien différentes de celles antiques** (Bono et Boni 1996 ; Wentworth Rinne 2015). À titre d'exemple, l'aqueduc moderne de Peschiera-Capore fournissant plus de 60 % de l'eau potable à la ville de Rome (débit moyen de 14 m³.s⁻¹) prend sa source bien plus loin que tous les aqueducs romains dans les Abruzzes (Bono et Boni 1996 ; Minissale et Vaselli 2011).

De surcroît, Prowse *et al.* (2007) et Killgrove (2010) n'ont pas tenu compte des **changements de pratiques alimentaires** entre aujourd'hui et l'époque impériale. Or, il ne fait là encore nul doute que ces pratiques différaient en de nombreux points, à commencer par la consommation d'eau tiède au quotidien (Section II, 4.3.1, a.2.3).

Enfin, la **construction** même de ces intervalles est quelque peu **discutable**. Premièrement, ce corpus détient en son sein des **doublons**, cinq pour être exact. Ceux-ci influencent nécessairement la distribution globale des données. Aussi, il semblerait plus judicieux de ne conserver qu'une seule valeur par individu et par conséquent de moyenniser les doublons. Dès lors, 19 valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ (émail) seraient disponibles pour 19 individus. Si ces dernières oscillent toujours entre les mêmes bornes susmentionnées, la moyenne et l'écart type, eux, changent ($\bar{x} = -5,2 \text{ ‰}$; $\sigma = 1,2 \text{ ‰}$). Deuxièmement, nous sommes également d'avis de supprimer les quatre données obtenues sur les premières molaires déciduales. De simples boîtes à moustaches révèlent en effet le caractère aberrant des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ (émail) de ces dents. Toutefois, la simple présence de ces dents aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ (émail) marginales dans ce corpus de comparaison jette le trouble sur la cohérence et l'intérêt de recourir à ce référentiel. Aussi, pouvons-nous nous **interroger sur la représentativité des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$** (émail) mesurées sur ces sujets pour déterminer celles que devraient avoir les sujets habitants Rome. Troisièmement, il serait utile de recourir à un test de Grubbs afin de vérifier s'il reste au sein de ce corpus de 15 valeurs isotopiques des potentielles **valeurs aberrantes**. Un tel test aurait mis en évidence que le sujet présentant une valeur de $-3,2 \text{ ‰}$ est un sujet marginal ($p = 0,02$). Afin de s'assurer d'avoir une population se composant uniquement de Romains, il aurait été bon d'éliminer ce dernier

du corpus de comparaison. *In fine*, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ de ce corpus ($n = 14$) devraient normalement varier **entre -5,4 et -3,8 ‰** ($\bar{x} = -4,8 \text{ ‰}$; $\sigma = 0,4 \text{ ‰}$). Cet intervalle est relativement proche de ceux proposés par Prowse *et al.* (2007) et Killgrove (2010) mais présente l'avantage d'être construit sur des valeurs réelles mesurées sur les phases apatitiques des hommes.

Pour notre étude, ***nous recourons uniquement à l'intervalle que nous avons établi à partir des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$ plutôt que celui créé à partir des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ modernes***, ces dernières étant sujettes à caution.

b. Le référentiel extra-romain

Le référentiel extra-romain présenté à la Figure 20 s'appuie sur diverses ***modélisations de distributions*** des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{ppt}}$ ***modernes en Europe, au Proche-Orient et en Afrique*** réalisées Bowen et Revenaugh (2003), Bowen *et al.* (2005a), Lykoudis *et al.* (2010) et Roberts *et al.* (2010) (Annexes 2, 3 et 4). Chaque isoligne correspond à une valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{ppt}}$ moderne. Chacune de ces valeurs est minorée de 0,6 ‰ en raison de la baisse de la température moyenne au III^e s. ap. J.-C. mais aussi majorée de 1 ‰ en raison de l'élévation de la température moyenne aux I^{er} et II^e s. ap. J.-C. et de la pratique de boire préférentiellement une eau tiède. Ainsi, un intervalle de valeurs se voit associé à chaque isoligne. Ces intervalles correspondent aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux potentiellement bues par les individus en Europe, au Proche-Orient et en Afrique entre le I^{er} et le III^e s. ap. J.-C.

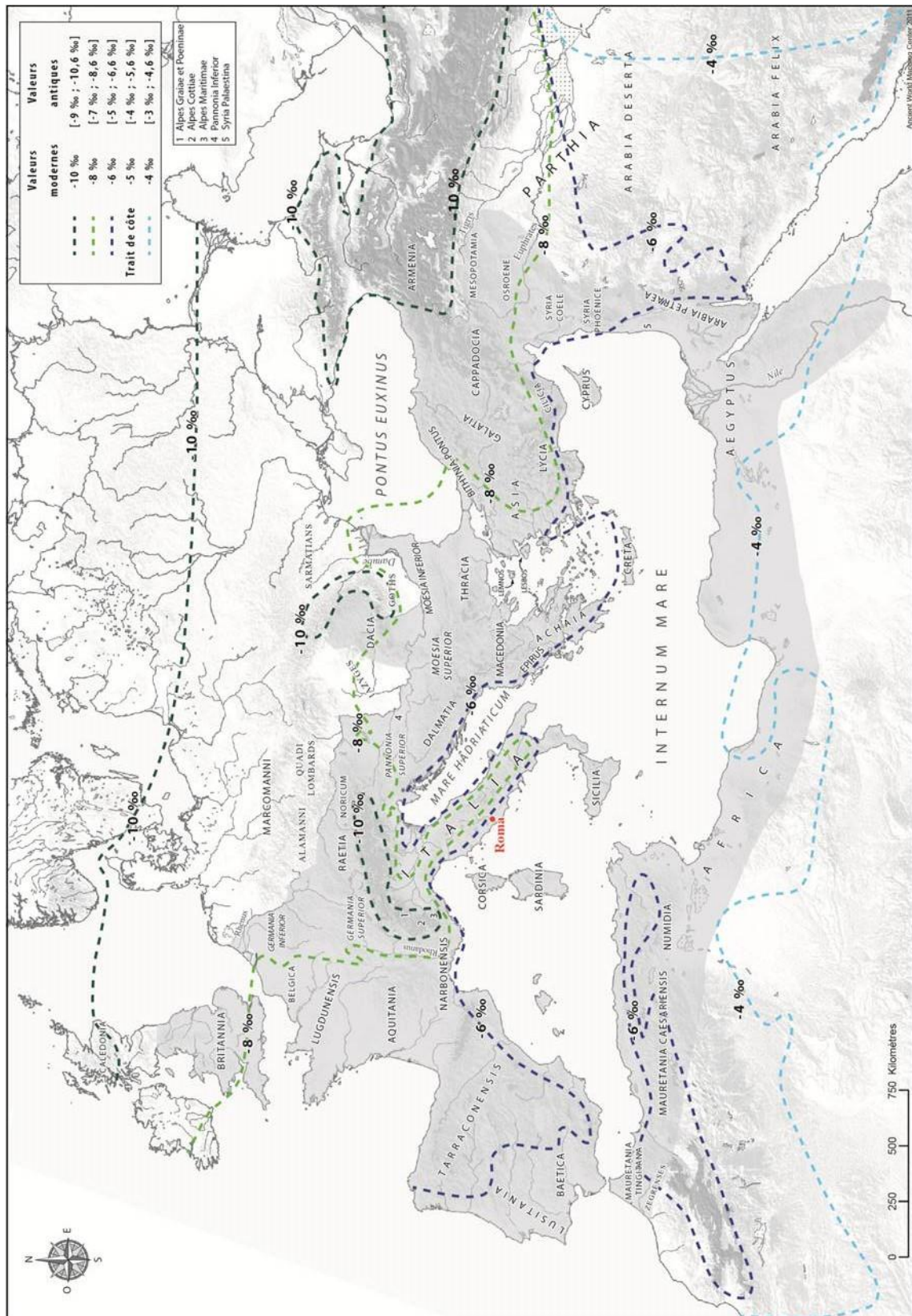


Figure 20. Carte isoplèthe synthétisant la distribution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux météoriques en Europe, au Proche-Orient et en Afrique.

Note : Carte réalisée à partir des travaux de Bowen et Revenaugh (2003), Bowen *et al.* (2005), Lykoudis *et al.* (2010), Roberts *et al.* (2010). En gris apparaît l'expansion maximale de l'empire romain à la suite des campagnes de Marc-Aurèle (161-180 ap. J.-C.) et des empereurs Sévère (193-235 ap. J.-C.).

4.3.2. Le référentiel géologique

a. Le référentiel romain

a.1. Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques

Durant le Miocène, la cinématique des plaques lithosphériques africaine, adriatique et eurasiatique a fait naître des zones de subduction et de collision à l'origine de l'orogénèse des Apennins dont les contreforts se trouve à l'est de la région de Rome. La formation de ce relief d'altitude a engendré des plis, des chevauchements, des failles et des nappes de charriage bouleversant les **roches sédimentaires continentales** datées du Carbonifère au Quaternaire (Figure 21). Ces roches sont à Rome datées essentiellement du Quaternaire et ont des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de l'ordre de **0,7086** (Tableau 17 ; Figure 21). À la fin du Miocène, la plaque adriatique connaît un régime tectonique totalement différent, dit en extension, conduisant à l'ouverture de la mer Tyrrhénienne et à la naissance d'un chapelet de volcan de long de la côte ouest de la péninsule italienne. Dans le Latium, les Monts Sabatins (ou *Monti Sabatini*) et les Monts Albains (ou *Colli Albani*), respectivement au nord-ouest et au sud-est de Rome se forment alors (Figure 21). Les matériaux rejetés par les **Monts Albains** au cours du Quaternaire ont des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variant **entre 0,708508 et 0,7114** tandis que ceux expulsés par les **Monts Sabatins** à la même période présentent des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ compris **entre 0,709189 et 0,7112** (Tableau 17 ; Figure 21). Enfin la tectonique en extension associée à une variation du niveau des mers entre le Miocène et le Pléistocène font apparaître des bassins sédimentaires marins localisés le long de la plaine alluviale du Tibre et de la côte tyrrhénienne (Figure 21). Les **roches sédimentaires marines** du Miocène présenteraient d'après McArthur (2001) des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variant **entre 0,7082 et 0,709** tandis que celles du Plio-Pléistocène ont des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ compris **entre 0,70907 et 0,7091** (Tableau 17 ; Figure 21). **Les substrats géologiques de Rome présentent donc des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ compris entre 0,708508 et 0,7114** (Tableau 17).

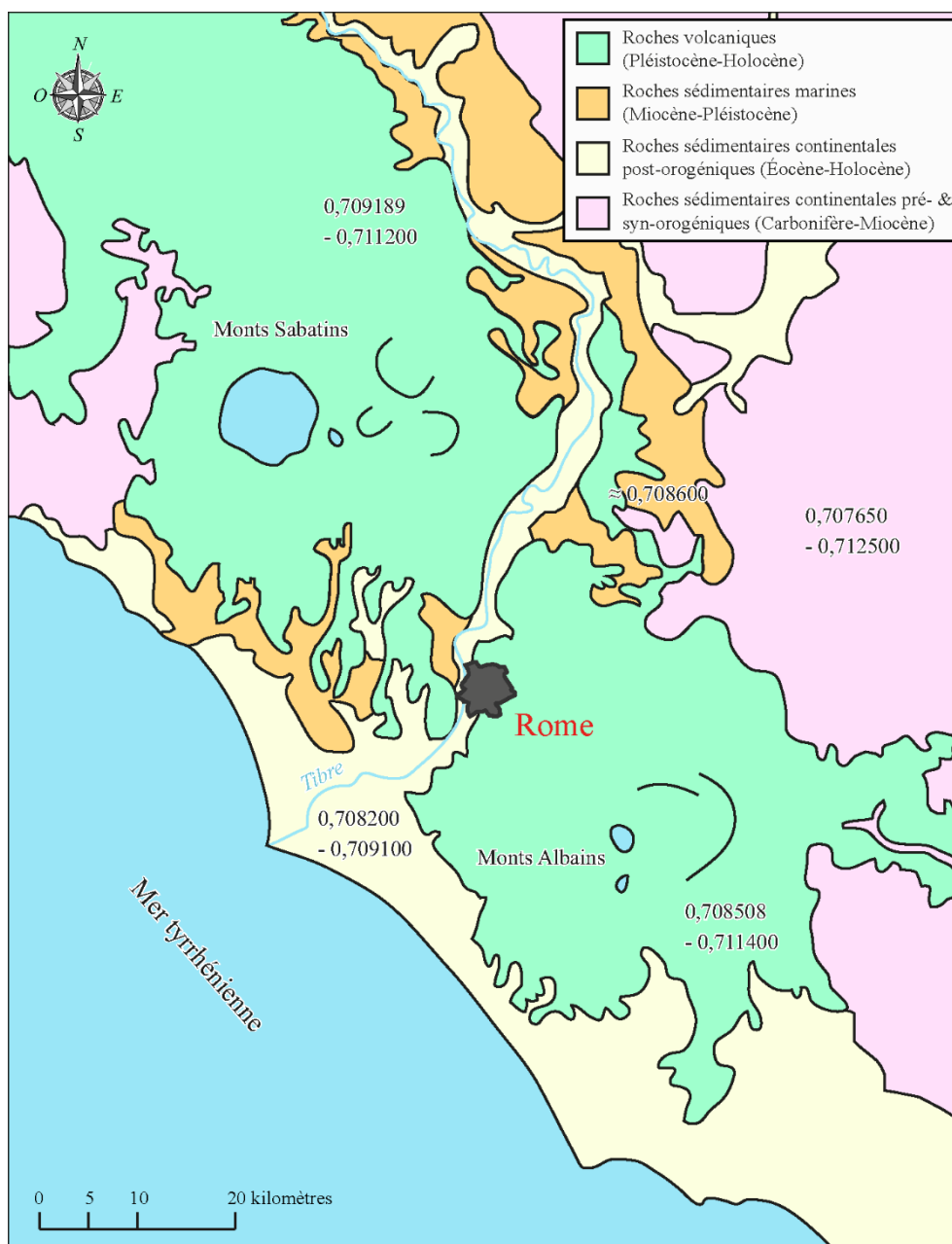


Figure 21. Distribution des valeurs de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques de la marge tyrrhénienne du Latium.
 Note : Carte géologique simplifiée réalisée à partir de la carte géologique d'Italie au 1:1 250 000 de 2005 de l'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici (APAT) et du Dipartimento Difesa del Suolo (Servizio Geologico d'Italia) (www.isprambiente.gov.it).

Tableau 17. Synthèse des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques de la région de Rome

Région	Roche	Âge	n	Min	Max	Md	\bar{x}	σ	Références
Monts Albains	Roches volcaniques	Pléistocène	126	0,708508	0,7114	0,710433	0,710282	0,000526	[1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]
		Holocène							
Monts Sabatins			39	0,709189	0,7112	0,710338	0,710239	0,000511	[2], [9], [12], [13], [14], [15]
Plaine du Tibre	Roches sédimentaires marines	Miocène	-	0,7082	0,709	-	-	-	[16]
		Pliocène Pléistocène	26	0,70907	0,7091	0,70908	0,709084	0,000011	[17]
	Roches sédimentaires continentales	Pléistocène Holocène	-	0,7086	-	-	-	-	[18]

Note : [1] Barbieri *et al.* (1975), [2] Conticelli *et al.* (2002), [3] Ferrara *et al.* (1985), [4] Federico *et al.* (1994), [5] Gaeta *et al.* (2006), [6] Giaccio *et al.* (2007), [7] Giaccio *et al.* (2013), [8] Hawkesworth et Vollmer (1979), [9] Hurley *et al.* (1966), [10] Martelli *et al.* (2004), [11] Radicati di Brozolo *et al.* (1981), [12] Vollmer (1976), [13] Castorina *et al.* (2015), [14] Del Bello *et al.* (2014), [15] Gasperini *et al.* (2002), [16] McArthur (2001), [17] Mancini *et al.* (2007), [18] Barbieri *et al.* (1979).

a.2. Quid des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des restes fauniques ?

Bien que de nombreux auteurs préconisent de recourir à des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ d'animaux évoluant dans un environnement restreint plutôt que de se référer aux rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques d'une région, pour créer ce référentiel romain, nous n'avons pu dans le cadre de cette étude suivre cette recommandation en raison de la faible quantité et qualité des données isotopiques publiées. En effet, seuls quelques rares restes de grands mammifères (*Elephas antiquus*, *Cervus elaphus*, *Equus hydruntinus* et *Sus scrofa*) découverts dans la région de Rome et datant du Quaternaire ont fourni des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ (Palombo *et al.* 2005 ; Pellegrini *et al.* 2008 ; Killgrove 2010). Ces **animaux très mobiles** pouvant s'être déplacés **sur de longues distances** au cours de leur vie ne peuvent être utilisés pour constituer un référentiel local fiable. De même, le **nombre trop restreint** d'animaux étudiés et **de données** isotopiques disponibles ne permet pas d'établir un référentiel local fiable. Aussi, n'avons-nous eu d'autres choix que de nous référer aux rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques rencontrés à Rome et ses environs pour créer ce référentiel romain.

a.3. Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des eaux de Rome comme référence ?

Pour constituer son référentiel local, Killgrove (2010) s'appuie à la fois sur les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques et sur ceux des eaux acheminées jusqu'à Rome par les aqueducs ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{aqueduc}}$). Pour reconstruire les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{aqueduc}}$, Killgrove (2010) a eu recours à un **modèle**

de mélange. Cette approche doit faire face cependant à **trois inconnues** que l'auteur tend à pallier. Si deux d'entre elles peuvent être estimées par actualisme, à savoir les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{aqueduc}}$ et les concentrations en strontium des eaux transitant par les aqueducs, la troisième est aux dires de nombreux historiens impossible à déterminer. En effet, si des estimations nous sont parvenues des Anciens, à l'instar de Frontin, administrateur principal des eaux de Rome sous Nerva au I^{er} s. ap. J.-C., des doutes quant à leurs exactitudes demeurent (Hodges 2002 ; Malissard 2002). Les notions de charge, de vitesse ou de frottement étaient en effet des **composantes mathématiques encore inconnues** des techniciens romains pour calculer les débits moyens des aqueducs. Or, tenir compte de ces variables pour procéder à de telles estimations a depuis été démontré indispensable (Malissard 2002). En outre, s'ajoute à cela des **problèmes de conversions des unités de mesures** en vigueur à l'époque impériale – en l'occurrence ici le *quinariae* – en celles usitées de nos jours – le mètre cube – dans de telles estimations. Un débat sur ce point anime encore la communauté scientifique dont les transpositions varient du simple au double. Aussi, il est préférable de voir en ces chiffres des Anciens un système empirique de comparaison des différents débits moyens des aqueducs (Malissard 2002). En d'autres lieux, les découvertes archéologiques ont par ailleurs pu mettre en évidence que **les canaux et canalisations s'entartaient**, de façon parfois spectaculaire, **réduisant**, après un certain temps d'utilisation qu'il est difficile de quantifier, **de 50 % à 90 % les débits originels** des aqueducs (Malissard 2002). Enfin, les **estimations des archéologues** réalisées à partir des vestiges conservés que partiellement restent bien souvent **approximatives** et permettent surtout d'apprécier d'une façon relative l'importance des adductions les uns par rapports aux autres (Malissard 2002). En somme, nous voyons là toute la **difficulté de recourir à ce type de données** pour procéder en un calcul mathématique à des fins d'estimer les compositions isotopiques moyennes des eaux translattées à Rome par ces ouvrages d'art. Pour toutes ces raisons, **notre référentiel local** ne tiendra pas compte des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{aqueduc}}$ de Killgrove (2010) mais **se basera uniquement sur les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques** présentés ci-devant.

b. Le référentiel extra-romain

b.1. Italie

Les roches des **complexes volcaniques au nord** des Monts Sabatins se situant le long du littoral ouest de la péninsule (Mont Amiata, Monts Cimins, Mont Vico et Monts Vulsins) et celles des volcans monogéniques se localisant dans le centre nord du pays (Cupaello, Orciatico, Polino, Radicofani, Ricetto, Roccastrada, San Venanzo et Torre Alfina) ont des $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ rapports variant **entre 0,708185 et 0,72548** (Tableau 18). Les roches de **régions volcaniques au sud** des Monts Albains se positionnant le

long du bandeau littoral ouest du pays (Volcan Ernici, Champs Phlégréens, Volcan Roccamonfina, Mont Somma et Mont Vésuve) ainsi qu'**au centre** (Mont Vultur) et **à l'est** de la péninsule (Pietre Nere) ont des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ compris **entre 0,70335 et 0,7112** (Tableau 18). L'**arc calabrais** au sud du pays consiste en des **roches métamorphiques et plutoniques** dont les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oscillent **entre 0,709 et 0,7237** (Tableau 18). Les **Alpes** au nord de la péninsule se composent de **roches métamorphiques et sédimentaires** dont les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ varient **entre 0,705872 et 0,929835** (Tableau 18). Les **roches sédimentaires**, essentiellement continentales, dominent **dans le reste du pays** et ont des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ compris **entre 0,70765 et 0,7125** (Moyenne = 0,708552 ; σ = 0,001194 ; n = 14) (Tableau 18). **Tous ces intervalles recoupent celui défini pour la région de Rome**. L'**identification** des sujets **locaux** sur la base des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{email}}$ ou $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ sera donc **difficile voire impossible**. L'**identification** de **migrants** pourra être **plus aisée**, en particulier si les individus présentent 1) des valeurs inférieures à 0,70335, lesquelles sont caractéristiques des régions volcaniques au sud des Monts Albains (Tableau 17), ou 2) des valeurs supérieures à 0,72548, lesquelles sont caractéristiques de la région calabraise (Tableau 17).

 Tableau 18. Synthèse des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques d'Italie

Région	Roche	Âge	n	Min	Max	Md	\bar{x}	σ	Références
Volcans au nord des Mts Sabatins	Roches volcaniques	Pléistocène	80	0,708185	0,72548	0,7108545	0,712276	0,003083	[1], [2], [3], [4], [5], [6]
Volcans au sud des Mts Albains		Holocène							
Arc calabrais	Roches métamorphiques et plutoniques	Pléistocène Holocène	120	0,705872	0,929835	0,7304865	0,743284	0,039523	[7]
Alpes	Roches métamorphiques et sédimentaires	Miocène Holocène	27	0,709	0,7237	0,7133	0,713804	0,003528	[8], [9], [10]
Apennins	Roches sédimentaires continentales	Trias Quaternaire	14	0,70765	0,7125	0,7083	0,708552	0,001194	[11], [12]

Note : [1] Conticelli *et al.* (2002), [2] Gasperini *et al.* (2002), [3] Hawkesworth et Vollmer (1979), [4] Hurley *et al.* (1966), [5] Martelli *et al.* (2004), [6] Vollmer (1976), [7] Rottura *et al.* (1990), [8] Tilton *et al.* (1989), [9] Angiboust *et al.* (2014), [10] de Meyer *et al.* (2014), [11] Barbieri *et al.* (1979), [12] Minissale *et al.* (2002)

b.2. Afrique et péninsules ibérique et arabique

Le Tableau 19 présente les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques du sud-ouest de l'Ibérie, du nord de l'Afrique et du sud/sud-est de la péninsule arabique. D'une façon générale, ces régions ont pour substrats géologiques des roches sédimentaires marines et terrestres d'âges

relativement jeunes, pour l'essentiel post-Jurassique, et de rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ généralement assez **faibles** ($< 0,710$) (Choubert et Faure-Muret 1990 ; Asch 2005) (Tableau 19). Ponctuellement cependant apparaissent aussi dans ces régions des effleurements de roches magmatiques, métamorphiques et détritiques dont les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont parfois **proches** des roches sédimentaires (Choubert et Faure-Muret 1990 ; Asch 2005) (Tableau 19). **Ces substrats présentent des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pour partie similaires à ceux d'Italie.** Il sera donc relativement **difficile** de déterminer si un individu identifié comme migrant sur la base de son ou ses rapport(s) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ et/ou $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ est **originaire d'Italie ou d'ailleurs**. L'identification en revanche de la région la plus proche de Rome dont les valeurs de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques concorderaient avec ceux d'un individu ayant migré à Rome permettra d'estimer la **distance minimale de la migration** de celui-ci.

Tableau 19. Synthèse des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques (tous confondus) par pays en Afrique, en Europe et en Arabie

Continent	Pays	<i>n</i>	Min	Max	Md	\bar{x}	Références
Europe	Espagne	98	0,708422	0,793525	0,70921	0,721196	[1], [2], [3], [4], [5]
	Maroc	176	0,70243	0,752345	0,703842	0,710665	[6], [7], [8] [9], [10], [11] [12], [13], [14]
	Algérie	134	0,7031	0,7485	0,706427	0,709732	[12], [15], [16] [17], [18], [19] [20]
	Tunisie	48	0,7046	0,719787	0,708310	0,709329	[19], [21], [22] [23], [24]
Afrique (nord)	Libye	41	0,70322	0,758	0,71087	0,71319	[12], [25], [26] [27], [28]
	Égypte	69	0,70289	0,73994	0,70909	0,710406	[28], [29], [30], [31]
	Soudan	101	0,702775	0,79508	0,731350	0,72461	[30], [32], [33]
	Djibouti	75	0,70344	0,72173	0,70367	0,704855	[34], [35]
Afrique (est)	Éthiopie	58	0,70311	0,70528	0,703582	0,703679	[36], [37], [38]
	Somalie	46	0,70362	0,75598	0,722845	0,721771	[39], [40]
	Arabie saoudite	133	0,70289	0,79661	0,70472	0,714146	[41], [42], [43] [44], [45], [46] [47]
Péninsule arabique	Yémen	164	0,703163	0,772898	0,703963	0,705119	[48], [49], [50] [51], [52], [53] [54], [55], [56] [57]
	Oman	26	0,703014	0,709653	0,704085	0,705263	[58], [59], [60]

Note : Les valeurs supérieures à 0,800 ont été exclues. [1] Merino Martínez *et al.* (2014), [2] García-Veigas *et al.* (2015), [3] de Jong (2003), [4] Villaseca *et al.* (2014), [5] Wotte *et al.* (2007), [6] Ali *et al.* (2014), [7] Bosch *et al.* (2014b), [8] El Azzouzi *et al.* (1999), [9] El Bakkali *et al.* (1998), [10] Gasquet *et al.* (2005), [11] Hamidi *et al.* (2001), [12] Lustrino et Wilson (2007), [13] Natali *et al.* (2013), [14] Railsback et Hood (2001), [15] Berger *et al.* (2014), [16] Bosch *et al.* (2014a), [17] Coulon *et al.* (2002), [18] Fourcade *et al.* (2001), [19] Maury *et al.* (2000), [20] Nouar *et al.* (2011), [21] Al-Aasm et Abdallah (2006), [22] Decrée *et al.* (2014), [23] Dill *et al.* (2014), [24] Souissi *et al.* (2013), [25] Abate *et al.* (1999), [26] Lustrino *et al.* (2012), [27] Pegram *et al.* (1976), [28] Schaaf et Müller-Sohnius (2002), [29] Baioumy (2011), [30] Harms *et al.* (1990), [31] Schandelman et Darbyshire (1984), [32] Kröner *et al.* (1991), [33] Stern *et al.* (1994), [34] Deniel *et al.* (1994), [35] Vidal *et al.* (1991), [36] Ayalew *et al.* (1999), [37] Betton et Civetta (1984), [38] Stewart et Rogers (1996), [39] Kassim *et al.* (1992), [40] Lenoir *et al.* (1994), [41] Bertrand *et al.* (2014), [42] Bokhari et Kramers (1981), [43] Moufti *et al.* (2012), [44] Moufti *et al.* (2013), [45] Radain *et al.* (1987), [46] Robinson *et al.* (2015), [47] Suayah *et al.* (1991), [48] Baker *et al.* (1997), [49] Bertrand *et al.* (2003), [50] Carter et Norry (1976), [51] Chazot et Bertrand (1993), [52] Chazot et Bertrand (1995), [53] Chiesa *et al.* (1989), [54] Dickinson *et al.* (1969), [55] Menzies et Murthy (1980), [56] Veeningen *et al.* (2015), [57] Volker *et al.* (1997), [58] Nasir *et al.* (2006), [59] Nasir et Stern (2012), [60] Vandeginste *et al.* (2013). Diagenèse des phases organiques et minérales des restes humains

4.4. Diagenèse des phases organiques de l'os et du cheveu

4.4.1. Processus diagénétiques altérant le collagène osseux et la kératine de l'os

a. Le collagène osseux

Les deux principaux mécanismes *post mortem* de dégradation du collagène osseux sont 1) l'**hydrolyse chimique** et 2) l'**hydrolyse enzymatique** (Collins *et al.* 1995 ; Collins *et al.* 2002). L'hydrolyse chimique est favorisée par des températures élevées et un milieu fortement basique. À l'inverse, l'hydrolyse enzymatique est optimisée dans un environnement au pH neutre et à des températures modérées (Collins *et al.* 2002 ; Peretzschner 2006). La dégradation du collagène peut être **accélérée** du fait 1) de la présence de **composés basiques** (hydroxydes de calcium, potassium, magnésium, *etc.*) dans l'environnement sépulcral (Collins *et al.* 2002 ; Hedges 2002), et 2) d'une **dissolution** partielle ou complète **de la phase minérale** facilitant les **attaques bactériennes et fongiques** de la phase organique (Krane 1975 ; Klont *et al.* 1991 ; Child 1995). Au cours de la diagenèse, le collagène peut se voir contaminer par l'agrégation dans sa trame de **protéines d'origine fongique ou bactérienne** ou bien encore **d'acides humiques, d'acides fulviques et d'humines**. Ces contaminants peuvent modifier parfois de façon très significative le signal biogénique du collagène (Koch *et al.* 2001 ; Koch 2008). Enfin, la **dégradation des AA** constituant le collagène peut parfois s'effectuer de manière **non stochastique** ce qui a généralement pour conséquence d'altérer les valeurs biogéniques de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ (Koch *et al.* 2001 ; Koch 2008).

b. La kératine du cheveu

Bien que les propriétés intrinsèques du cheveu en font l'un des éléments non-squelettiques les plus robustes chez l'Homme, la préservation des cheveux en contextes archéologiques reste un phénomène relativement rare (Wilson *et al.* 2007). La décomposition complète d'un cheveu s'effectue ordinairement sur un temps court. La décomposition d'un cheveu peut toutefois se voir ralentie voire arrêtée selon les caractéristiques environnementales du site d'inhumation, les conditions d'enfouissement ou de dépôt du cadavre ou bien encore le recours à des **produits cosmétiques** ou à des **conservateurs** sur le cheveu du vivant de l'individu ou après sa mort (Wilson et Tobin 2010 ; Robbins 2012a). Les principaux mécanismes *post mortem* de dégradations du cheveu sont **identiques** à ceux du collagène. Les attaques fongiques et bactériennes modifient l'intégrité structurelle du cheveu selon une séquence de dégradation spécifique et prédictible au cours de laquelle les différents niveaux cellulaires se délitent et les ponts disulfures se détruisent (Wilson *et al.* 2001 ; Wilson *et al.*

2007 ; Mansilla *et al.* 2011). Au cours de la diagenèse, la kératine du cheveu peut être contaminée de la même façon que le collagène osseux. Ces contaminants peuvent altérer de manière parfois significative le signal isotopique biogénique de la kératine à l'instar du collagène (Koch *et al.* 2001 ; Koch 2008).

4.4.2. Critères de conservation des compositions chimiques et isotopiques du collagène osseux et de la kératine du cheveu

Afin de s'assurer que les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$ n'ont pas été significativement altérées par des processus diagénétiques, il convient préalablement à l'exploitation de ces dernières de vérifier l'intégrité biochimique des phases organiques de l'os et du cheveu. Différents indicateurs mesurés en routine au cours des prétraitements ou de l'analyse isotopique sont classiquement utilisés à ces fins.

Le **rendement d'extraction** permet d'appréhender la quantité de collagène préservé dans un os. Il s'obtient en divisant la masse de collagène extrait par la masse initiale de poudre d'os utilisée pour l'extraction, et s'exprime soit en mg.g^{-1} , soit en pourcentage (% Col). Un rendement d'extraction moyen de $204 \pm 39 \text{ mg.g}^{-1}$, soit de **$20,4 \pm 3,9 \%$** , a été calculé par Bocherens *et al.* (1991) à partir d'os modernes (faune). Les os archéologiques accusent généralement des rendements d'extraction bien inférieurs à ceux mesurés sur des os actuels en raison d'une dégradation plus ou moins accentuée du collagène. Il fait aujourd'hui consensus qu'**en dessous** de 10 mg.g^{-1} , soit **1 %**, de collagène extrait, l'intégrité biochimique du collagène osseux **n'est plus assurée** et que le signal isotopique mesuré ne peut plus être considéré comme fiable (Stafford *et al.* 1991 ; Ambrose 1993a ; van Klinken 1999 ; Dobberstein *et al.* 2009).

Les **teneurs atomiques en carbone (%C) et en azote (%N)** du collagène et de la kératine permettent, quant à elles, d'évaluer la qualité chimique de ces derniers. Ces teneurs atomiques correspondent aux concentrations en carbone et en azote contenues dans un extrait de collagène ou de kératine rapportées à leurs masses respectives. Elles s'expriment en pourcentage et sont mesurées par un analyseur élémentaire. Les teneurs atomiques en carbone et en azote du collagène d'os modernes (faune) varient respectivement **entre 15,3 et 47 %** et **entre 5,5 et 17,3 %** (Ambrose 1990). Il est généralement admis que les échantillons de collagène extraits d'os archéologiques présentant des teneurs atomiques en carbone et en azote **n'excédant pas** respectivement **13 %** et **4,8 %** peuvent être **sévèrement altérés** et doivent, de ce fait, être exclus de tout corpus d'étude (e.g. Iacumin *et al.* 1998 ; Garvie-Lok 2001 ; Reitsema 2012). Quant aux teneurs atomiques en carbone et en azote de la kératine des cheveux modernes (hommes), celles-ci sont respectivement de l'ordre 43 % et de l'ordre de 14 % (Roy *et al.* 2005).

Le **rapport atomique C/N** est un indicateur supplémentaire permettant d'appréhender la qualité chimique du collagène et de la kératine. Il se calcule selon l'équation suivante :

$$\text{Rapport atomique C/N} = (\%C/12)/(\%N/14)$$

et s'exprime sans unité. Les rapports C/N mesurés sur des extraits de collagène d'os modernes (faune) varient **entre 2,9 et 3,6** (DeNiro 1985), avec une moyenne d'environ 3,2-3,3 (Ambrose 1990 ; van Klinken 1999). Les rapports C/N mesurés sur des extraits de kératine de cheveux modernes (hommes) varient, pour leur part, entre 3,0 et 3,8, avec une moyenne d'environ 3,4 (O'Connell 1996 ; O'Connell et Hedges 1999a ; O'Connell *et al.* 2001). Il a été démontré que les échantillons de collagène ou de kératine d'échantillons archéologiques présentant des rapports C/N en dehors de cette gamme de valeurs peuvent être fortement dégradés ou contaminés (DeNiro 1985 ; DeNiro et Weiner 1988 ; Ambrose 1990 ; O'Connell 1996 ; O'Connell et Hedges 1999a ; Grupe *et al.* 2000). Bien que ce critère de conservation soit relativement robuste, certains auteurs ont pu mettre en évidence que des échantillons de collagène ou de kératine présentant des rapports C/N compris dans les intervalles susdits pouvaient être contaminés (DeNiro 1985 ; Ambrose 1990 ; van Klinken et Hedges 1995 ; O'Connell 1996 ; O'Connell et Hedges 1999a). Ces altérations sont toutefois généralement considérées comme négligeables (DeNiro 1985).

L'**utilisation concomitante** de l'ensemble de ces indicateurs a été, à maintes reprises, préconisée afin de maximiser les chances d'identifier les échantillons trop fortement dégradés ou contaminés et pour lesquels les signaux isotopiques pourraient être altérées (DeNiro et Weiner 1988 ; Tuross *et al.* 1988 ; Ambrose 1990 ; van Klinken 1999 ; Garvie-Lok 2001). Ainsi, tout échantillon de collagène présentant au moins un des critères de conservation en deçà ou au-delà des limites définies ci-dessus devrait être systématiquement exclu d'un corpus d'étude (Tableau 20).

Tableau 20. Synthèse des indicateurs et de leurs gammes de valeurs permettant d'évaluer la bonne conservation du collagène osseux

Critères de conservation	Phases organiques bien préservées	
	Collagène	Kératine
%Col	> 10 mg.g ⁻¹ ou 1 %	-
%C	13-47 %	≈ 43 %
%N	4,8-17,3 %	≈ 14 %
C/N	2,9-3,6	3,0-3,8

4.5. Diagenèse des phases minérales de l'os et de l'émail

4.5.1. Processus diagénétiques altérant les phases apatitiques carbonatées de l'os et de l'émail

L'os et l'émail se différencient l'un l'autre par leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques (Zazzo 2001 ; El Hammari 2007). Les phases apatitiques de l'os et de l'émail répondent donc de façon **différentielle** aux altérations diagénétiques (Hedges 2002 ; Zazzo *et al.* 2004b) ; l'émail montrant généralement une **plus grande résistance** aux processus diagénétiques que l'os (Lee-Thorp 2001 ; Shin et Hedges 2012). Les principales altérations diagénétiques des phases carbonatées sont 1) la **précipitation de minéraux** (*e.g.* la calcite, CaCO_3) exogènes, et 2) l'**adsorption d'ions** (CO_3^{2-} , Sr^{2+} , *etc.*) de façon labile. Les minéraux et ions d'origine diagénétique peuvent se déposer à la surface des réseaux cristallins de l'os et de l'émail ou pénétrer au sein de ces derniers. Ces minéraux et ions se révèlent être des **sources de contaminations** importantes des phases apatitiques et peuvent modifier drastiquement le signal isotopique biogénique de celles-ci (Saliège *et al.* 1995 ; Sponheimer et Lee-Thorp 1999 ; Zazzo *et al.* 2004a ; Koch 2008). Ces minéraux et ions peuvent toutefois être **éliminés** par différents traitements chimiques afin de recouvrer le signal isotopique biogénique originel (Koch *et al.* 1997 ; Garvie-Lok *et al.* 2004). Les phases apatitiques peuvent également être altérées plus substantiellement par trois autres processus diagénétiques tels que 1) un **changement de structure minérale**, 2) des **échanges ioniques ou atomiques** entre les structures apatitiques des phases minérales et le milieu d'enfouissement, et 3) des phénomènes de **dissolution, reprécipitation et/ou recristallisation** des matrices minérales (Lee-Thorp 2002 ; Zazzo *et al.* 2004a ; Zazzo *et al.* 2004b ; Koch 2008 ; Kohn 2008 ; Tütken et Vennemann 2011 ; Tütken *et al.* 2011). Ces trois processus se réalisent généralement sur un **temps bien plus long** que les processus de précipitation de minéraux secondaires et d'adsorption ioniques cités ci-dessus (Figure 22). Ces processus peuvent modifier de façon très significative le signal isotopique des phases apatitiques et **aucun traitement** chimique ne permet actuellement de retrouver le signal originel des bioapatites ainsi contaminées.

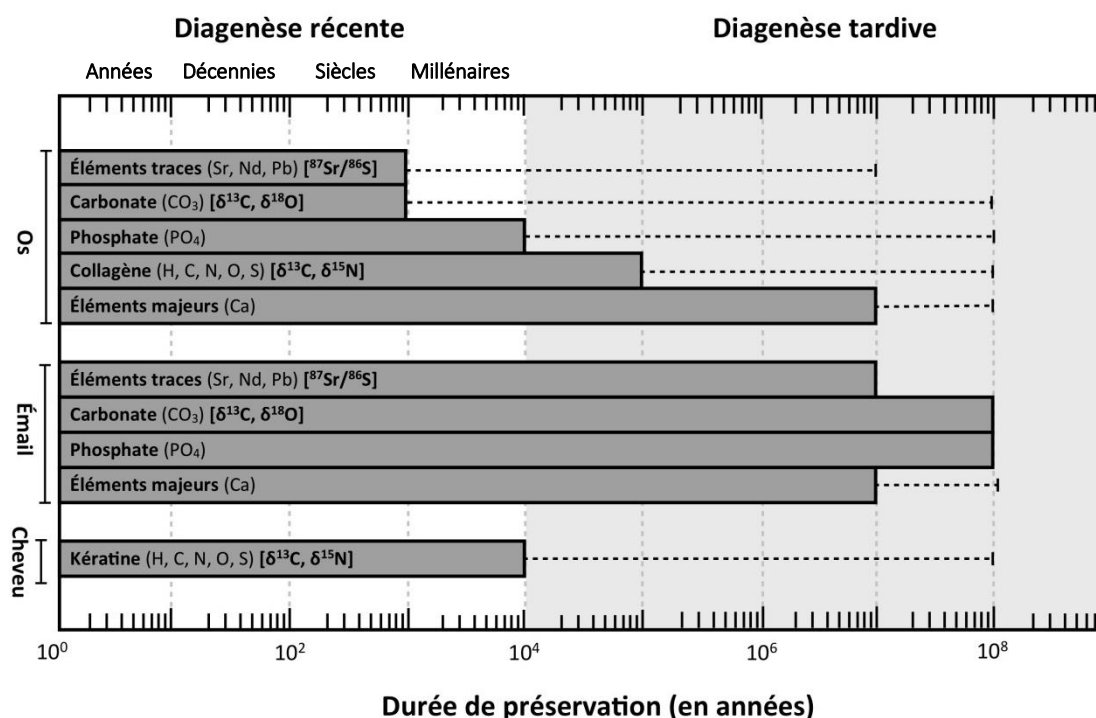


Figure 22. Conservation différentielle des tissus étudiés à l'échelle des temps géologiques
 Note : Modifié d'après Clementz (2012). Données issues de Kohn et Cerling (2002), Koch (2008), Schweitzer (2011) et Tütken et al. (2011). Les barres grises représentent la durée de préservation des éléments chimiques constituant les différents tissus étudiés tandis que les lignes pointillées font références à la durée de préservation maximum des éléments chimiques de ces tissus avec des conditions exceptionnelles de conservation. Les rapports isotopiques mesurés dans le cadre de ce travail sont indiqués entre crochets pour les différents composés chimiques.

4.5.2. Indicateurs de l'état d'altération des phases carbonatées de l'os et de l'émail

a. Indicateurs empiriques en routine

Il n'existe actuellement aucun critère permettant d'évaluer de façon fiable et en routine l'état d'altération des phases carbonatées de l'os et de l'émail (Zazzo 2001). Toutefois, quelques paramètres permettent de façon empirique d'acquérir une vision toute relative de l'état de conservation de ces phases minérales. La production de CO₂ lors de la réaction complète entre l'acide ortho-phosphorique (H₃PO₄) et les carbonates (CO₃) des phases minérales de l'os ou de l'émail peut être utilisée pour évaluer l'état de conservation des phases carbonatées. En effet, les ions carbonate sont la seule source de carbone des bioapatites. La quantité de CO₂ produit est donc le reflet de l'état de conservation des carbonates dans les phases minérales de l'os ou de l'émail. La **pression de CO₂ produit (PCO₂)** est mesurée par un analyseur élémentaire couplé à un spectromètre de masse et s'exprime en μbar. Des valeurs de pression du CO₂ produit supérieures à 600 μbar indiqueraient que les phases carbonatées des échantillons sont relativement bien conservées. À l'inverse, les valeurs de pression du CO₂ produit

inférieures à 600 μbar révéleraient qu'une perte en carbonates des phases minérales des échantillons a eu cours, et ce, en raison d'altérations diagénétiques diverses (Joël Ughetto-Manfrin, communication personnelle). La production de CO_2 est toutefois dépendante de la masse de poudre d'os ou d'émail analysée. Ainsi, le **rapport $\text{PCO}_2/\text{Masse}$** peut être utilisé tel un indicateur supplémentaire. Ce rapport s'exprime sans unité. Un échantillon dont la phase carbonatée est relativement bien préservée montre un rapport $\text{PCO}_2/\text{Masse}$ variant entre 1 et 1,6 tandis qu'un échantillon dont la phase carbonatée est altérée présente un rapport $\text{PCO}_2/\text{Masse}$ inférieur à 1 (Antoine Zazzo, communication personnelle).

b. *Caractérisation des altérations diagénétiques de la phase carbonatée de l'os par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier*

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) peut s'avérer d'une grande utilité pour caractériser à micro-échelle des modifications de compositions élémentaires induites par les processus *post mortem* (Weiner et Bar-Yosef 1990 ; Lee-Thorp et van der Merwe 1991 ; Wright et Schwarcz 1996 ; Lebon *et al.* 2011b). Différents paramètres spectraux permettant d'acquérir des données quantitatives concernant la cristallinité de la phase carbonatée et les teneurs relatives en carbonates et collagène des échantillons osseux ont été utilisés dans cette perspective (Weiner et Bar-Yosef 1990 ; Wright et Schwarcz 1996 ; Sponheimer et Lee-Thorp 1999 ; Lebon 2008 ; Lebon *et al.* 2011b).

Les phénomènes de dissolution/recristallisation, d'absorption et de substitution affectant la phase minérale des os au cours de la diagenèse peuvent conduire à d'importantes réorganisations de la structure apatitique, la rendant thermodynamiquement plus stable. L'une des conséquences de ces altérations diagénétiques est l'augmentation de la cristallinité – *i.e.* taille et perfection des cristaux – de la phase minérale des os. La cristallinité est couramment évaluée en spectrométrie IRTF par le **Splitting factor (IRSF)**. Cet indice de cristallinité est basé sur le degré d'individualisation des deux bandes $\nu_4\text{PO}_4$ situées vers 600 cm^{-1} . Les absorbances sont mesurées à partir de la ligne de base établie entre 450 et 700 cm^{-1} (Termine et Posner 1966 ; Weiner et Bar-Yosef 1990 ; Stiner *et al.* 2001 ; Lebon 2008) Le calcul précis de ce paramètre spectral est présenté à la Figure 23. Les os modernes ont des valeurs d'IRSF variant entre 2,5 et 3,3 (Stiner *et al.* 1995 ; Wright et Schwarcz 1996 ; Nielsen-Marsh et Hedges 2000 ; Berna *et al.* 2004 ; Munro *et al.* 2007 ; Asscher *et al.* 2011). Les os archéologiques présentent, quant à eux, des valeurs d'IRSF plus élevées généralement comprise **entre 3,4 et 4,5** (Weiner et Bar-Yosef 1990 ; Stiner *et al.* 1995 ; Wright et Schwarcz 1996 ; Munro *et al.* 2007). Au-delà d'une valeur d'IRSF de 3,8/4, les os sont considérés comme fortement altérés ou hautement fossilisés (Shemesh 1990 ; Stiner *et al.* 1995 ; Berna *et al.* 2004).

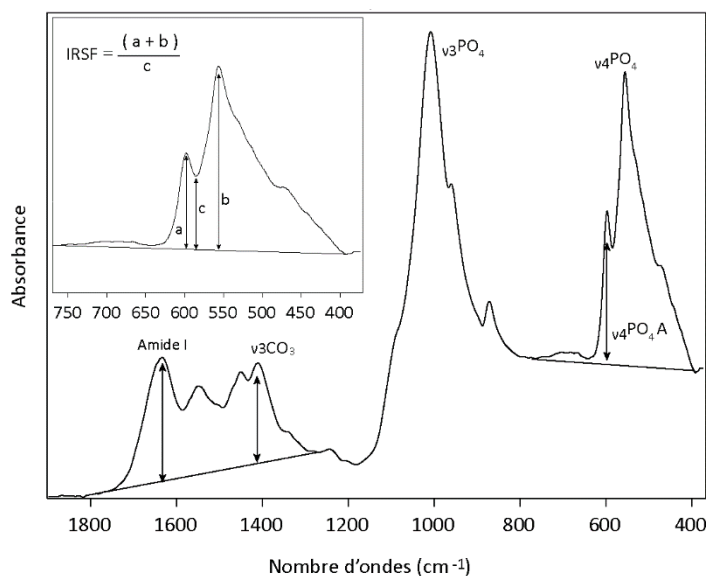


Figure 23. Spectre typique d'un os dont les phases collagénique et apatitique sont bien préservées acquis en spectrométrie IRTF et présentant le mode de calcul de différents indices (IRSF, rapport CO_3/PO_4 et rapport AmideI/ PO_4)

Source : Graphique de M. Lebon, communication personnelle.

L'incorporation de carbonates exogènes, la perte de carbonates biogéniques et la réorganisation endogène des carbonates sont autant de processus diagénétiques pouvant affecter de façon plus ou moins importante selon les environnements la phase carbonatée des ossements archéologiques. De ce fait, la teneur relative en carbonates se révèle être un indicateur spectral pertinent pour étudier l'état d'altération de la phase minérale des os (Wright et Schwarcz 1996 ; Lebon 2008). La proportion des carbonates est évaluée par le rapport d'intensité entre la bande $\nu_3\text{CO}_3$ (type B) à 1415 cm^{-1} et celle $\nu_4\text{PO}_4$ à 600 cm^{-1} (Figure 23) (Sønju Clasen et Ruyter 1997 ; Sponheimer et Lee-Thorp 1999 ; Lebon 2008). Ce **rapport CO_3/PO_4** est compris **entre 0,7 et 1** pour les os modernes et peut être **inférieurs à 0,2** pour des os archéologiques fortement altérés (Lebon 2008 ; Matthieu Lebon, communication personnelle).

Le degré d'altération de la phase carbonatée est en règle générale dépendant du niveau de dégradation de la phase collagénique. Dès lors, la teneur relative en collagène constitue un paramètre spectral indirect important pour évaluer l'état de préservation de la phase minérale de l'os (Collins *et al.* 2002 ; Trueman *et al.* 2008 ; Lebon *et al.* 2011a). La part relative de matière organique au sein des ossements est estimée par le rapport d'intensité entre la bande amide I du collagène à 1660 cm^{-1} et la bande $\nu_4\text{PO}_4$ (**rapport AmideI/ PO_4**) (Figure 23). L'absorbance de la bande amide I est mesurée à partir de la ligne de base établie entre 1850 et 1300 cm^{-1} . Ce rapport AmideI/ PO_4 est généralement compris **entre 0,9 et 1,2** pour les os modernes et **diminue** à mesure que la matière organique se décompose.

En règle générale, il existe une forte corrélation entre les rapports CO_3/PO_4 et $\text{Amidel}/\text{PO}_4$ (Lebon 2008 ; Lebon et al. 2011a ; Matthieu Lebon, communication personnelle).

Enfin, durant la diagenèse, certaines substances sont susceptibles de précipiter dans les pores des ossements. La précipitation de calcite secondaire à la surface des os à partir des carbonates de calcium présents dans les eaux environnementales peut être mise en évidence par la présence d'une bande caractéristique de cette phase cristalline située à 712 cm^{-1} (Lee-Thorp et van der Merwe 1991 ; Sponheimer et Lee-Thorp 1999 ; Lebon 2008 ; Trueman *et al.* 2008).

c. *Validation du signal isotopique de la phase carbonatée osseuse par datation ^{14}C sur couple collagène-apatite*

Les rapports $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ et $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ diffèrent l'un l'autre de plusieurs ordres de grandeur. Il en résulte une plus grande sensibilité du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ que du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ à la diagenèse. Le ^{14}C s'avère de ce fait un puissant outil pour évaluer l'influence des processus diagénétiques sur la composition isotopique en carbone de la phase carbonatée d'un os (Shin et Hedges 2012 ; Zazzo 2014). L'âge ^{14}C mesuré sur la phase collagénique – bien préservée – d'un os ($^{14}\text{C}_{\text{col}}$) doit **en théorie** être **identique** à celui mesuré sur la phase carbonatée de ce même os ($^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$). Si tel n'est pas le cas, et qu'une **différence** entre les âges ^{14}C obtenus sur les différentes phases d'un même os ($^{14}\text{C}_{\text{col-carb (os)}}$) est relevée, ceci est le signe d'un **échange isotopique** de carbone entre la phase carbonatée de l'os et l'environnement dans lequel l'os est déposé. En prenant l'âge $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ comme référence et en tenant compte de la différence d'âge $^{14}\text{C}_{\text{col-carb (os)}}$ dans un os donné, il est alors possible de **quantifier** le pourcentage de carbone d'origine diagénétique – ou pourcentage de carbone moderne (pMC) (Hedges *et al.* 1995a) – s'étant introduit par échange isotopique dans la phase carbonatée de cet os.

CHAPITRE III.

MATERIELS ET METHODES

1. MATERIELS

1.1. Le matériel de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin

1.1.1. Vestiges humains

a. Choix d'échantillonnage

Le protocole d'échantillonnage que nous avons mis en œuvre repose sur le prélèvement systématique pour chaque individu d'une seconde molaire permanente (M2), d'un fragment d'os, et, lorsque ceux-ci étaient préservés, de cheveux, et ce dans l'objectif d'appréhender différents temps de l'histoire de vie des sujets inhumés dans les sépultures plurielles de la région X de la catacombe SSPM.

L'édification et la minéralisation de la couronne de la M2 débute vers l'âge de 3 ans et s'achève vers l'âge de 8 ans (Moorrees *et al.* 1963). Le signal isotopique biogénique de l'émail correspond donc – à un facteur de fractionnement près – au signal isotopique moyen de l'ensemble des aliments consommés et de l'eau ingérée durant cette période de l'enfance d'un individu (Section II, 2.3.2). Le recours à la M2 permet en outre de s'affranchir des problèmes d'interprétation du signal isotopique de l'émail inhérents à l'allaitement (maternel) d'un nourrisson (Section II, 2.3.2). De nombreuses études isotopiques ont pu en effet mettre en évidence que l'âge au sevrage dans l'Empire romain, et donc aussi probablement à Rome, était autour de 2-3 ans (Dupras *et al.* 2001 ; Prowse *et al.* 2008 ; Keenleyside *et al.* 2009).

Les rythmes du remodelage de l'os cortical sont dépendants de nombreux paramètres biologiques tels que l'âge, le sexe ou l'état sanitaire d'un individu mais également de la région anatomique considérée. Il s'agit d'un processus long, s'effectuant sur plusieurs années voire dizaines d'années (Section II, 2.3.1). Ainsi, le signal isotopique biogénique de l'os cortical reflète – à un facteur de fractionnement près – la moyenne des valeurs isotopiques de l'intégralité des aliments consommés et de l'eau ingérée durant les dernières années voire les dernières décennies de la vie d'un individu. En raison de l'état de conservation macroscopique relativement indigent des restes osseux mis au jour, différents types d'os (longs, plats, irréguliers et courts) ont été prélevés.

Enfin, la tige pileaire d'un cheveu pousse en moyenne de 1 cm par mois (Section II, 2.3.3). De ce fait, le signal isotopique biogénique d'un cheveu correspond, selon sa longueur - à un facteur de fractionnement près - au signal moyen des aliments consommés durant les dernières semaines voire les derniers mois de la vie d'un individu.

b. Campagnes d'échantillonnage et études post-échantillonnage

Deux campagnes d'échantillonnage, l'une du 10 au 24 octobre 2010, l'autre du 5 novembre au 20 décembre 2011, ont été réalisées pour constituer notre corpus d'étude. L'essentiel des prélèvements réalisés dans les chambres X78/T15, X80/T16, X82/T18, X83 et X84 a été effectué sur des sujets clairement individualisés lors de la fouille. Ceux-ci portent comme identifiant un simple numéro, compris entre 1 et n , parfois accompagné du préfixe « Sq » pour « Squelette ». Deux individus ont toutefois des identifiants différents. Pour ceux-là, les informations inscrites sur les sacs dans lesquels ils sont conservés ont été utilisées. En outre, certains prélèvements ont été réalisés sur des sujets sortis à l'occasion de deux sondages, l'un fait dans la chambre X81, l'autre fait dans la chambre X83, et individualisés non sur le terrain mais en post-fouille à la suite d'une estimation du nombre minimal d'individu (NMI). Ce NMI de fréquence, que nous avons réalisé nous-même, a été mené à partir des héli-mandibules possédant encore leur M2 en place. Ces sujets portent comme identifiant le numéro d'unité stratigraphique (US) dans lequel ils ont été découverts ou à défaut le numéro de caisse (n°) dans laquelle ils ont été prélevés. Le suffixe « Mand » pour « Mandibule » suivi d'un numéro allant de 1 à n , de plus, été arbitrairement donné à ces échantillons.

Après chaque campagne d'échantillonnage, le matériel prélevé a été photographié puis ré-identifié et latéralisé en laboratoire¹. Ainsi quatre dents que nous avons initialement identifiées sur le terrain comme des M2 se sont avérées être après réexamen trois M1 et une M3. Les quatre individus représentés par ces dents ont cependant été maintenus dans notre corpus. Nous garderons toutefois en mémoire que la couronne des M1 se forme vers l'âge de 0-3 ans tandis que celle des M3 se forme vers l'âge de 7-15 ans (Moorrees *et al.* 1963). Par ailleurs, à partir des vestiges dentaires que nous possédions, nous avons attribué un âge dentaire minimal à partir des abaques de Moorrees *et al.* (1963) (borne inférieure des gammes de variation d'âge retenue) pour les sujets dont l'âge au décès précis n'a pas pu être déterminé.

¹ Au sein des UMR 5199 et 7209 avec l'aide ponctuelle de Vanessa Urzel (Dentiste et Post-doctorante, Smithsonian Institution) et Patrice Courtaud (Ingénieur de recherche, UMR 5199)

c. Corpus d'étude

Au total, ce sont 129 dents (5 M1, 121 M2 et 3 M3 ; $n_{\text{individus}} = 124$), 128 fragments osseux (58 os longs, 40 os irréguliers, 24 os plats, 1 os court et 5 fragments indéterminés ; $n_{\text{individus}} = 128$) et 11 mèches de cheveux ($n_{\text{individus}} = 11$) appartenant à un total de 130 sujets individualisés qui ont été prélevés (Annexe 5). À ce corpus s'ajoute 10 mèches de cheveux appartenant probablement à des individus distincts bien que non individualisés.

Ce corpus se compose de 114 grands adolescents/adultes (≥ 15 ans), d'un adolescent (10-19 ans), d'un enfant (5-9 ans) et de 14 sujets dont un âge dentaire minimal inférieur à 15 ans a pu être établi (Annexe 5). En outre, ce corpus se constitue d'un individu masculin et de neuf individus féminins, le sexe des individus restant n'a pu être déterminé (Annexe 5).

Parmi ces sujets, 71 sont issus des chambres exhaustivement fouillées (2 de X78/T15, 31 de X80/T16 et 38 de X82/T18) et 57 sont issus des chambres en cours de fouille ou qui ont fait l'objet de sondages archéologiques (7 de X81, 27 de X83 et 25 de X84) (Annexe 5). Les individus échantillonnés dans la chambre X78/T15 proviennent de deux niveaux distincts, ceux échantillonnés dans la chambre X80/T16 proviennent de sept niveaux différents et enfin ceux échantillonnés dans la chambre X82/T18 proviennent de 11 niveaux différents (Annexe 5). Les individus sélectionnés dans les chambres X81, X83 et X84 semblent être issus d'un seul et même niveau de dépôt (Annexe 5). Nombre de ces individus ont été découverts en association avec différents matériaux et artefacts (plâtre, tissu, fils d'or, boucles d'oreille en or, épingle en os, tesson, etc.) (Annexe 5).

Les 10 mèches de cheveux retrouvées de façon erratique parfois en association avec un fragment de calotte crânienne ont également été prélevées dans différentes chambres. Conscient néanmoins de l'éventualité que ces dernières soient de potentiels doublons ou appartiennent à des sujets individualisés déjà échantillonnés, ce corpus de mèches de cheveux ne peut permettre d'acquérir qu'une vision très générale à l'échelle populationnelle de l'alimentation des individus durant les quelques semaines ou mois ayant précédé leur mort.

L'intégralité des échantillons prélevés a été analysée par IRMS (pour *Isotope-ratio mass spectrometry*) de façon à mesurer les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$, de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$, de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$, de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ (Annexe 5). Seuls 38 échantillons d'os et cinq échantillons d'émail ont été analysés par IRMS de façon à mesurer les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ (Annexe 5). De plus, 30 échantillons osseux ont été analysés par spectroscopie IRTF (pour InfraRouge à Transformée de Fourier) (Annexe 5). Un sous-échantillon de cinq os a aussi été utilisé pour mesurer des âges ^{14}C (Annexe 5). Un second sous-échantillon de cinq os a été étudié par spectroscopie RMN (pour Résonance Magnétique Nucléaire) des solides (Annexe 5).

1.1.2. Sédiments

Différents prélèvements de sédiments ont été réalisés dans les chambres funéraires de la région X. Un morceau de plâtre issu de la chambre X81 (caisse n°18), un fragment de paroi de la chambre X84 et des sédiments se composant vraisemblablement de résidus organiques, de paroi effritée et de plâtre délité (carrés D4, E4 et F4) provenant de cette même chambre ont ainsi été échantillonnés. Ces sédiments ont été analysés par IRMS de façon à connaître leurs rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et ainsi caractériser l'environnement sépulcral d'un point de vue isotopique.

1.2. Le matériel de comparaison de Saint-Benoît de Prague

Un sous-échantillon de cinq os biochimiquement bien préservés issus d'un contexte archéologique (plus récent) relativement similaire à celui de la région X de la catacombe SSPM et que nous avons par le passé étudié (Salesse *et al.* 2013), a été utilisé comme matériel de comparaison pour les analyses RMN. Ces analyses ont été faites pour s'assurer de l'applicabilité et de l'efficacité du protocole de purification des phases carbonatées mis en œuvre. Ces échantillons osseux sont ceux des sujets H60, H62, H63, H75 et H77 inhumés dans le cimetière Saint-Benoît (Prague, République Tchèque) en sépultures plurielles, mises en place très probablement à la suite d'une crise de mortalité ayant eu lieu au XVIII^e s. ap. J.-C. et pour lesquels des analyses isotopiques ont déjà été réalisées (Salesse *et al.* 2013).

1.3. Le référentiel faunique moderne

Du fait de la difficulté – voire de l'impossibilité – de réaliser des prélèvements osseux sur des cadavres humains, deux os de bœuf, un os de cheval et un os de mouton, tous frais, récoltés par Matthieu Lebon (Maître de conférence, UMR 7194) auprès de boucheries parisiennes, ont été utilisés comme matériel de référence moderne pour les analyses IRTF visant à étudier l'état d'altération de la phase carbonatée des os.

2. METHODES ANALYTIQUES

2.1. Prélèvements en laboratoire

2.1.1. Prélèvements des échantillons d'os

À l'aide d'un disque à tronçonner en résine, l'échantillon osseux prélevé à Rome est reséqué en laboratoire en un fragment de 1 à 2 g. Ce dernier est ensuite abrasé à l'aide d'une fraise en carbure de tungstène afin d'en retirer l'os trabéculaire et la partie superficielle de l'os cortical (sections les plus susceptibles d'être contaminées ou altérées par les processus diagenétiques). Ainsi nettoyé, le fragment est utilisé comme tel (protocole recourant à l'EDTA disodique) ou broyé (protocole recourant à l'acide chlorhydrique). Quatre procédés de broyage ont été indifféremment utilisés, à savoir 1) l'os peut être réduit en poudre à l'aide d'un blender électrique, 2) l'os peut être calé entre une enclume et un pilon en acier pour y être concassé à l'aide d'un marteau, 3) l'os peut être déposé dans un mortier et y être réduit en poudre à l'aide d'un pilon, tous deux en agate, et 4) l'os peut être cryo-broyé dans un broyeur à billes (uniquement pour le protocole RMN). La procédure de broyage est plus ou moins longue selon l'état de conservation de l'os. Le broyat est finalement tamisé et subdivisé en trois portions, la première d'une granulométrie comprise entre 0,7 et 0,3 mm (pour le protocole d'extraction du collagène), la seconde d'une granulométrie comprise entre 0,1 et 0,3 mm (pour le protocole de purification des carbonates de la phase carbonatée et pour le protocole IRTF), la troisième d'une granulométrie inférieure à 0,1 mm (pour le protocole RMN).

Les échantillons osseux ont été classés *a posteriori* en trois catégories en fonction de leurs caractéristiques macroscopiques ainsi qu'en fonction de la solidité et de la résistance qu'ils ont présentées lors du prélèvement en laboratoire. Les os qui ont été considérés comme macroscopiquement bien préservés sont des os résistants, solides, lourds et difficiles à découper et à broyer (Figure 24). Les os qui ont été considérés comme macroscopiquement mal préservés sont des os fragiles, légers, pulvérulents, facile à couper et à broyer (Figure 24). Les os présentant une conservation macroscopique médium caractérisaient des os ayant des états macroscopiques intermédiaires (Figure 24).



Figure 24. Photographies présentant les différents stades de classification des échantillons osseux à partir de leur apparence macroscopique.

Note : A : os macroscopiquement bien préservé ; B : os aux caractéristiques intermédiaires ; C : os macroscopiquement mal préservé.

2.1.2. Prélèvements des cheveux

Les cheveux dont la longueur dépasse 4 cm ont fait l'objet d'un prélèvement séquentiel tous les 2 cm. Les mèches dont les cheveux n'excèdent pas 2 cm ont été prélevées en vrac.

2.1.3. Prélèvements des échantillons d'émail

Le prélèvement de l'émail s'effectue selon 2 *modi operandi* différents.

Le premier se décompose en deux étapes, à savoir 1) l'élimination par abrasion, à l'aide d'une fraise en carbure de tungstène montée sur une mini-perceuse, du tartre et autres dépôts potentiellement présents sur la surface de l'émail et 2) le fraisage de l'émail à l'aide d'une mèche diamantée. Pour chaque dent, le prélèvement se cantonne à une seule face (mésiale, distale, linguale ou vestibulaire) et s'effectue sur toute la hauteur de la couronne de façon à pouvoir mesurer le signal

isotopique moyen enregistrer dans l'émail durant toute la période d'édification et de minéralisation de la couronne.

Le second se décompose en trois étapes, à savoir 1) le détachement d'un éclat d'émail à l'aide d'un outil de dentiste ou d'un pilon en agate par de petites percussions données contre la couronne dentaire, 2) l'élimination par abrasion à l'aide d'une fraise en carbure de tungstène de la dentine ainsi que du tartre et autres dépôts potentiellement présents sur la surface externe de l'éclat, et 3) le broyage dans un mortier à l'aide d'un pilon, tous deux en agate.

2.1.4. Prélèvements des sédiments

Les sédiments prélevés sur le site n'ont pas eu besoin d'être ré-échantillonnés en laboratoire avant les prétraitements chimiques.

2.2. Prétraitements chimiques

Tous les prétraitements ont été menés à l'UMR 7209 à l'exception de ceux relatifs à l'extraction du strontium qui ont eu lieu à l'UMR 5276 hébergée à l'École Nationale Supérieure (ENS) de Lyon et ceux relatifs à la validation du protocole de purification des carbonates des phases minérales qui ont eu lieu à l'UMR 5248 localisée à l'Université de Bordeaux à Pessac.

2.2.1. Les phases organiques de l'os et du cheveu

a. Extraction du collagène

a.1. Prétraitements par acide chlorhydrique

L'extraction du collagène osseux suit le protocole établi par Longin (1971), adapté par DeNiro et Epstein (1981) puis modifié par Bocherens *et al.* (1988 ; 1991). Ce protocole a été intensivement utilisé au cours de ces 20 dernières années (Lösch *et al.* 2006 ; Grupe *et al.* 2009 ; Harbeck *et al.* 2011 ; Drucker *et al.* 2012). Son efficacité a été démontrée à maintes reprises, en particulier pour les échantillons d'os archéologiques (Marie Balasse, Élise Dufour et Estelle Herrscher, communications personnelles).

Entre 0,1 et 1,1 g de poudre d'os sont plongés dans 40 ml d'une solution d'acide chlorhydrique (HCl) à 1 M. La quantité de poudre d'os initiale varie selon l'état de préservation des échantillons. Cette réaction s'effectue durant 20 min sous agitation continue à température ambiante et a pour objectif d'éliminer la phase minérale de l'os et les éventuels composés phosphatés ou carbonatés d'origine

diagénétique. Après filtration au travers d'un filtre à membrane en cellulose (\varnothing 5 μ m) (Figure 25), le rétentat est rincé à l'eau distillée avant d'être déposé dans 20 ml d'une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) à 0,125 M. Cette réaction s'effectue durant 20 h à température ambiante et vise à solubiliser les substances humiques potentielles présentes dans l'échantillon. Contrairement à ce que certains auteurs ont pu avancer par le passé (par exemple Ambrose 1987, 1990), cette étape ne permet pas l'élimination des lipides présents dans l'os (Moore *et al.* 1989 ; Liden *et al.* 1995). Après une nouvelle filtration selon le même procédé qu'évoqué précédemment, le rétentat est rincé à l'eau distillée puis plongé dans 15 ml d'une solution d'HCl à 0,01 M et de pH = 2. Cette réaction a lieu durant 17 h à 100°C et a pour objectif de solubiliser le collagène. Après une dernière filtration selon le procédé susdit, le filtrat est récupéré puis congelé pendant un minimum de 5 h à -18°C ou surgelé durant quelques minutes dans un bain d'azote liquide à -196°C avant d'être lyophilisé à -87°C pendant 48 à 72 h. Cette opération vise à éliminer l'eau résiduelle présente dans l'échantillon. Le résidu blanc/beige d'aspect cotonneux ou mousseux obtenu à l'issue de la lyophilisation est le collagène qui sera analysé par spectrométrie de masse isotopique.

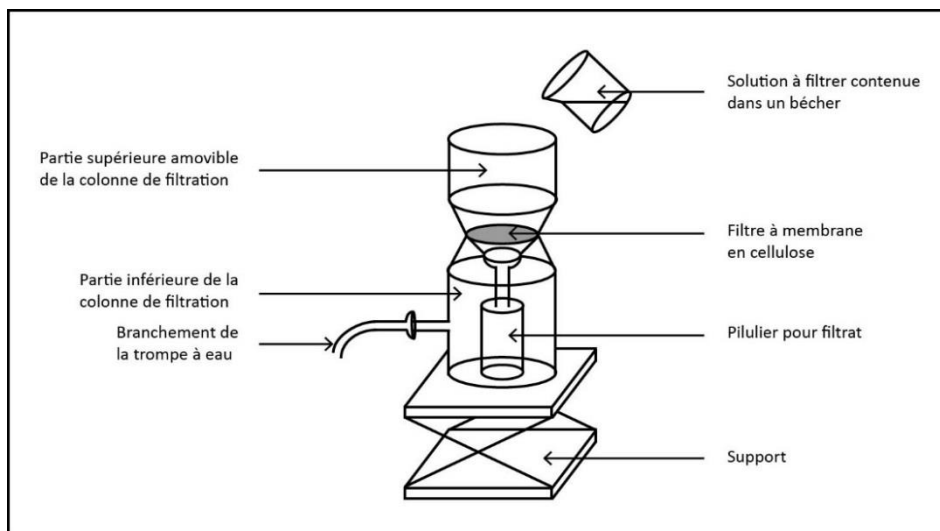


Figure 25. Colonne de filtration utilisée durant le protocole d'extraction du collagène

a.2. Prétraitements par EDTA disodique

Les échantillons pour lesquels l'extraction de collagène précédente a échoué ont subi une seconde tentative d'extraction en s'appuyant sur un autre protocole expérimental utilisant de l'EDTA disodique. Moins fort que l'HCl, le recours à l'EDTA permet en règle générale d'obtenir de meilleurs rendements de collagène que ceux obtenus par le protocole que nous venons de détailler, en

particulier pour des échantillons de collagène mal préservés (Bocherens *et al.* 1996b ; Tuross 2002). Le mode opératoire mis en œuvre pour isoler le collagène est adapté du protocole développé par Tuross *et al.* (1988).

L'échantillon est placé dans 50 ml d'une solution d'EDTA disodique ($C_{10}H_{16}N_2Na_2O_6$) à 0,5 M et de pH = 7,2. Cette réaction s'effectue à température ambiante durant plusieurs jours au cours desquels la solution d'EDTA est régulièrement renouvelée pour éviter tout effet de saturation. Cette opération a pour objectif d'éliminer la phase minérale de l'os ainsi que les différents composés d'origine diagénétique potentiellement présents dans l'échantillon. Ce dernier est ensuite plongé dans un bain d'eau distillée durant 24 h à température ambiante puis subit une série de 14 rinçages à l'eau distillée. S'ensuit une solubilisation de la gélatine et une lyophilisation de l'échantillon selon la même procédure qu'évoquée ci-devant.

b. Extraction et purification du CO₂ du collagène

La production de CO₂ à partir des échantillons de collagène osseux suit le protocole détaillé par Hedges (1992). Entre 7 et 11 mg de collagène sont calcinés à 800°C durant 15 min en présence de dioxygène (O₂) pur à une pression de 800 mbar. Les gaz de combustion (CO₂, H₂O, NO₂, O₂ et autres gaz non condensables) sont ensuite introduits dans une ligne sous vide avec un volume jaugé calibré dite *offline* (Figure 26) conçue par Antoine Zazzo (Chargé de recherche, UMR 7209) et Jean-François Saliège† (Assistant ingénieur, UMR 7209), lesquels nous ont encadré tout au long de ces manipulations. Le CO₂ est isolé des autres gaz puis purifié via un système de piégeage par cryogénie. Environ 1 mg de C, soit ± 40 mbar de CO₂, est piégé dans un tube en verre en vue des mesures AMS. Le CO₂ excédant est, quant à lui, condensé dans un porte-échantillon en vue des mesures par spectrométrie de masse isotopique.

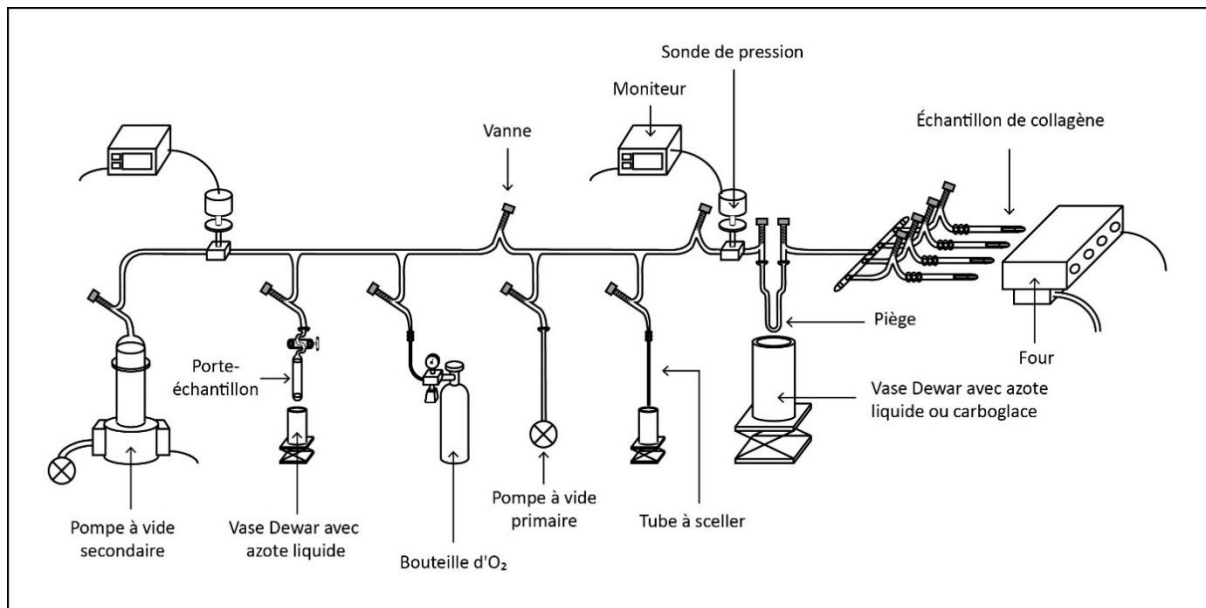


Figure 26. Schéma de la ligne d'extraction et de purification du CO₂ sous vide utilisée pour les échantillons de collagène osseux

c. Purification de la kératine

Le protocole de purification du cheveu que nous avons appliqué a été adapté du protocole proposé par O'Connell (1996) puis modifié par O'Connell et Hedges (1999a).

Les cheveux sont lavés pour enlever le sédiment en contact avec la kératine en étant plongés dans 50 ml d'eau distillée et soumis aux ultrasons durant environ 1 h à 1 h 30. Les cheveux sont ensuite délipidés dans 40 ml d'une solution de méthanol (CH₃OH) et de chloroforme (CHCl₃) (2 :1 v/v) pendant 4 h. Les cheveux sont enfin rincés en étant plongés dans 50 ml d'eau distillée et soumis aux ultrasons durant 30 min. Ces trois étapes sont répétées jusqu'à ce que plus aucun dépôt et/ou surnageant gras ne soit observé. Les cheveux sont finalement séchés à une température de 60°C durant 24 h.

Une fois secs, les cheveux sont isolés les uns des autres. Une observation à la loupe binoculaire est ensuite menée systématique sur les cheveux dont la longueur dépasse 4 cm afin de déterminer la présence de bulbe ou de pointe pour attribuer un sens aux cheveux. Cette tentative de latéralisation s'est cependant révélée infructueuse en raison de leurs états de conservation.

2.2.2. Les phases minérales de l'os et de l'émail

a. Purification des carbonates et test de la méthode appliquée

a.1. Purification des carbonates en vue d'acquérir les $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$

Le protocole de purification des phases apatitiques carbonatées mené dans le cadre de cette étude a été adapté d'après celui proposé par Balasse *et al.* (2002). Le protocole suivi est identique pour l'os et l'émail.

Entre 30 et 36 mg de poudre d'os et entre 20 et 36 mg de poudre d'émail sont plongés dans 1,5 ml d'une solution d'hypochlorite de sodium (NaOCl) à 2-3 %. Cette réaction s'effectue durant 48 h à température ambiante et a pour objectif d'oxyder la matière organique présente dans l'échantillon. La solution de NaOCl est renouvelée après 24 h pour éviter un possible effet de saturation. L'échantillon est régulièrement agité afin d'améliorer l'efficacité de la réaction. L'échantillon subit une série de 5 rinçages à l'eau distillée. La fraction résiduelle est ensuite placée dans 1,5 ml d'acide acétique (CH_3COOH) à 1 M. Cette réaction se déroule durant 1 h à température ambiante et vise à éliminer les carbonates exogènes potentiellement présents dans l'échantillon. La solution est renouvelée après 30 min, toujours afin d'éviter une saturation de la solution. L'échantillon est agité à 2 reprises durant cette opération de façon à améliorer l'efficacité de l'attaque chimique. A l'issue de cette étape, l'échantillon est rincé 5 fois de suite à l'eau distillée. Enfin, l'échantillon est soit séché à 60°C durant minimum 24 h, soit congelé à -18°C durant minimum 12h puis lyophilisé à -87°C pendant 24 h afin d'en retirer l'eau résiduelle. La fraction recueillie en fin de traitement est la phase carbonatée purifiée qui sera analysée par spectrométrie de masse isotopique.

a.2. Purification des carbonates en vue d'acquérir les âges

$^{14}\text{C}_{\text{carb.}(os)}$

Le protocole de purification de la phase carbonatée de l'os mis en œuvre ici a été adapté de celui proposé par Krueger (1991).

Entre 1900 et 2100 mg de poudre d'os sont placés dans une solution de NaOCl concentrée à 2-3 %. Cette réaction s'effectue durant 6 jours à température ambiante et a pour objectif de supprimer la matière organique présente dans l'échantillon. 2 à 3 fois par jour la solution contenant l'échantillon est agitée de façon à remettre en suspension la poudre d'os dans la solution et ainsi améliorer l'efficacité de l'attaque chimique. La solution de NaOCl est remplacée toutes les 24 h pour éviter un possible effet de saturation. L'échantillon est ensuite plongé à 2 reprises dans un bain d'eau distillée durant 24 à 48 h pour être rincé puis séché à 100°C durant minimum 3 h.

Après séchage, la poudre d'os est à nouveau broyée puis déposée dans 40 ml d'une solution de CH_3COOH à 2 M. Cette réaction s'effectue durant 24 h à température ambiante pour éliminer de l'échantillon la présence éventuelle de carbonates d'origine diagénétique. La solution contenant l'échantillon est régulièrement agitée durant ce temps. L'échantillon subit par la suite une série de 3 rinçages à l'eau distillée. La poudre d'os est finalement séchée à 100°C durant minimum de 3 h. La fraction récupérée à l'issue de cette procédure est celle qui sera utilisée pour mener l'extraction et la purification du CO_2 en vue d'une datation par le radiocarbone.

a.3. Protocole de validation de la méthode de purification des carbonates ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$)

Pour valider le protocole de purification des phases carbonatées des tissus calcifiés que nous avons utilisé (Section III, 2.2.2, a.1), nous avons comparé ce dernier à un protocole recourant en lieu et place du CH_3COOH à 1 M durant 1 h à du CH_3COOH à 0,1 M pendant 4 h.

L'intérêt de recourir à un acide acétique à forte concentration ($> 1 \text{ M}$) lors de la dernière phase du protocole de purification des phases carbonatées des tissus calcifiés est régulièrement remis en question dans la littérature. Un certain nombre d'auteurs semble en effet plaider en faveur de l'utilisation d'un acide acétique à 0,1 M plutôt qu'à 1 M, soulignant que cette dernière concentration conduirait à 1) des pertes de matière élevées, 2) de possibles recristallisations de la phase carbonatée de l'os, et enfin 3) des modifications importantes des teneurs isotopiques des échantillons traités (Koch *et al.* 1997 ; Balasse *et al.* 2002 ; Garvie-Lok *et al.* 2004 ; Yoder et Bartelink 2010).

Pour vérifier l'efficacité de chaque étape des protocoles susdits, nous avons décomposé ces derniers en différents temps, à savoir :

1. T0 correspondant à un échantillon non traité (échantillon témoin).
2. T1 correspondant à un échantillon traité avec une solution de NaOCl (2-3 %) durant 48 h.
3. T2 correspondant à un échantillon traité avec une solution de NaOCl (2-3 %) durant 48 h puis une solution de CH_3COOH à 1 M durant 1 h.
4. T2Bis correspondant à un échantillon traité avec une solution de NaOCl (2-3 %) durant 48 h puis une solution de CH_3COOH à 0,1 M durant 4 h.

Chaque échantillon de poudre d'os a été subdivisé en quatre aliquotes, lesquelles ont été utilisées pour T0, T1, T2 ou T2Bis. Entre 100 et 120 mg et entre 430 et 490 mg de poudre d'os ont été utilisés respectivement pour T0 et pour T1, T2 et T2Bis. Les aliquotes T1, T2 et T2Bis ont ensuite été partagées en 12 fractions de 32 à 42 mg afin de respecter les mêmes conditions de traitement que celles présentées précédemment pour le protocole de purification des phases carbonatées (Section III, 2.2.2, a.1).

Des analyses isotopiques seront réalisées à T0, T1, T2 et T2Bis dans le but d'estimer l'influence des différents traitements chimiques sur les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ des échantillons traités.

Des analyses en RMN des solides seront effectuées pour vérifier l'action des différents traitements chimiques mis en pratique. L'action du NaOCl a été évaluée par RMN du carbone-13 (RMN ^{13}C), laquelle permet de mettre en évidence les groupes carboxyle (COOH) et carbonyle (CO) ainsi que les chaînes aliphatiques (CH, CH_2 et CH_3) des acides aminés constitutifs du collagène (Saitô *et al.* 1984 ; Fujisawa et Kuboki 1990 ; Zhu *et al.* 2009) (Figure 27) et donc de vérifier l'efficacité de la procédure d'élimination du collagène. De même, afin de contrôler l'efficacité du processus d'élimination des carbonates d'origine diagénétique, l'action du CH_3COOH a été évaluée 1) par RMN du proton (RMN ^1H), laquelle permet de montrer les groupes hydroxyle (OH) de la phase apatitique et éventuellement des contaminants diagénétiques présents (*e.g.* sels bicarbonatés) (Lee *et al.* 1995 ; Cho *et al.* 2003 ; Jaeger *et al.* 2005 ; Alfano *et al.* 2009) (Figure 28), et 2) par RMN ^{13}C , laquelle permet de mettre en évidence la présence éventuelle des groupes CO des contaminants diagénétiques (*e.g.* calcite) (Lee *et al.* 1995 ; Alfano *et al.* 2009) (Figure 27).

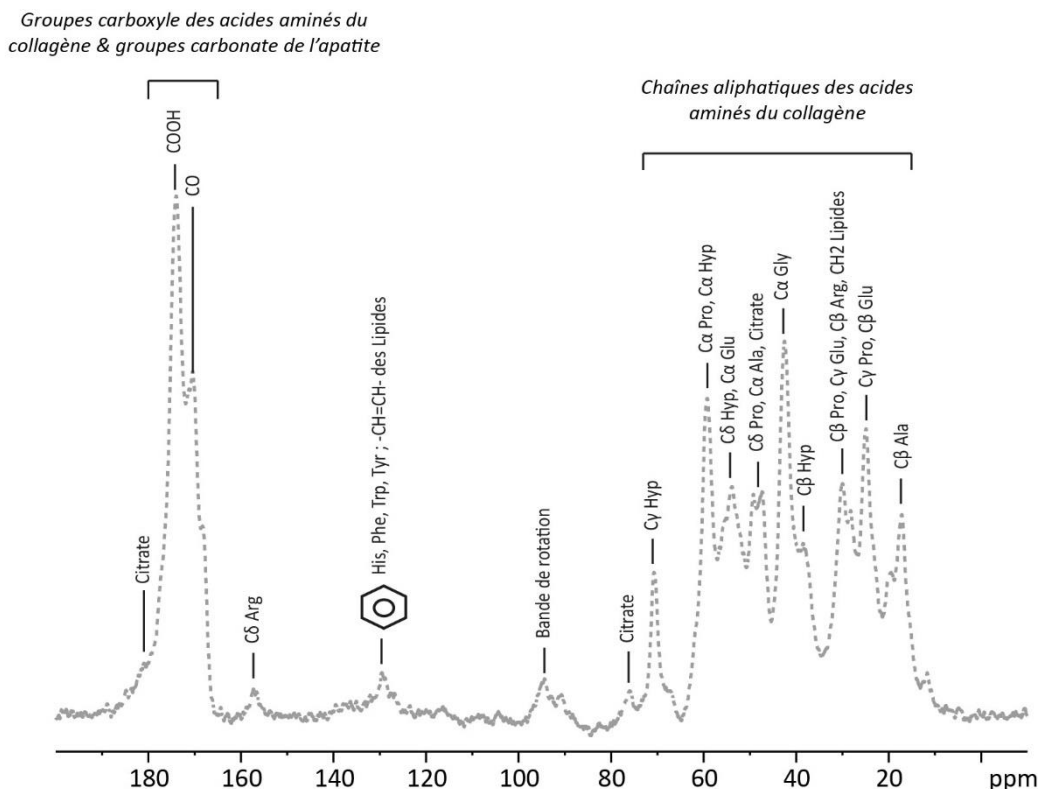


Figure 27. Spectre RMN ^{13}C caractéristique d'un os moderne non lyophilisé avec attribution des pics de résonance des acides aminés du collagène et des carbonates de l'apatite

Note : Figure modifiée d'après Urzel (2014).

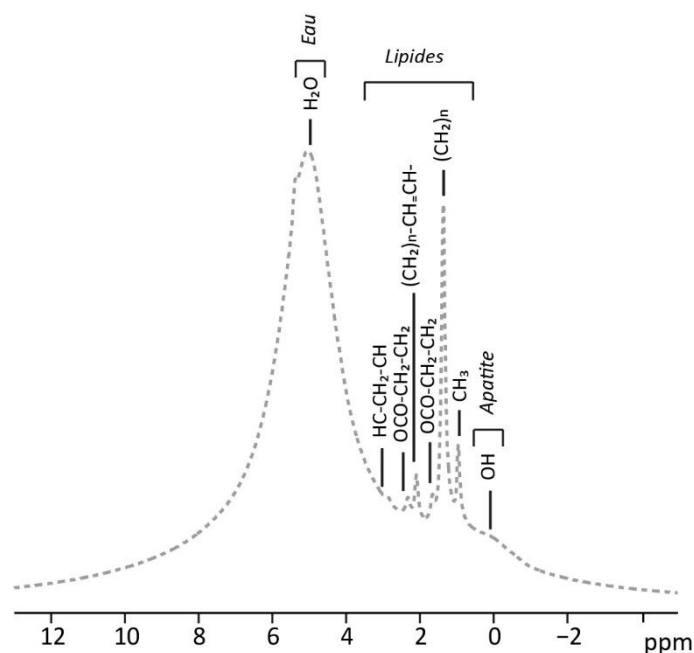


Figure 28. Spectre RMN ^1H caractéristique d'un os moderne non lyophilisé avec attribution des pics de résonance de l'eau, des lipides et du groupe hydroxyle de l'apatite
 Note : Figure modifiée d'après Urzel (2014).

b. Extraction et purification du CO_2 de la phase carbonatée de l'os

L'extraction du CO_2 de la phase minérale de l'os est menée selon le protocole proposé par Haas et Banewicz (1980) et adapté par Surovell (2000). Entre 200 et 252 mg de poudre d'os purifiée sont déversés dans 20 ml d'une solution de H_3PO_4 à 70°C durant 12 min sous vide (pression de 10^{-4} Pa). Les gaz produits (H_2O , CO_2 , O_2 , N_2 et autres gaz non condensables) sont ensuite détendus dans une ligne sous vide *offline* (Figure 29) fabriquée par Antoine Zazzo et Jean-François Saliège, lesquels nous ont encadré tout au long de ces manipulations. Le CO_2 est isolé et purifié selon la procédure détaillée ci-devant dans la Section III, 2.2.1, b.

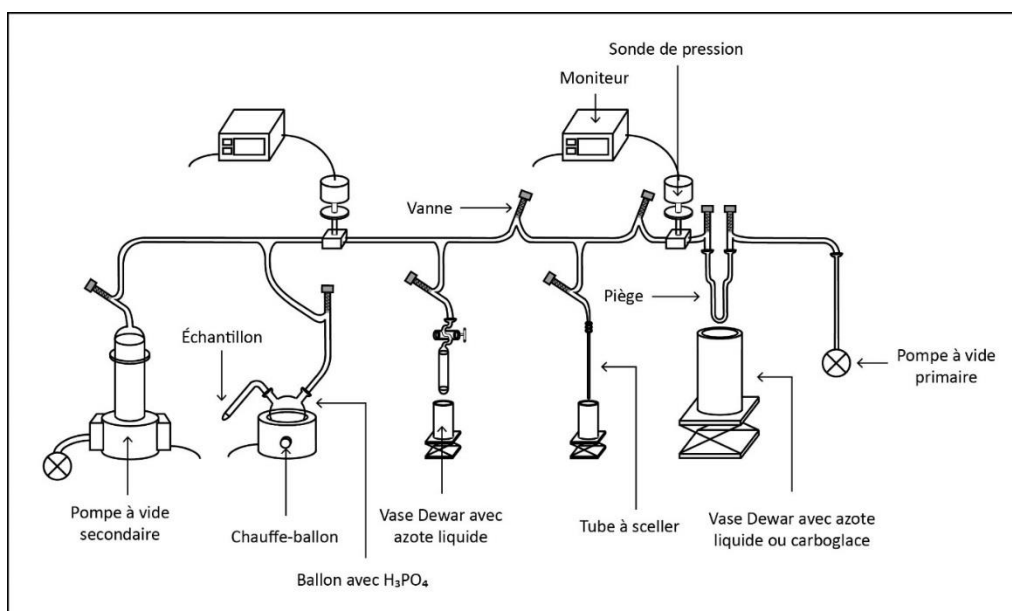


Figure 29. Schéma de la ligne d'extraction et de purification du CO₂ sous vide utilisée pour les échantillons de bioapatite osseuse

c. Extraction du strontium

Toutes ces manipulations ont été réalisées sous le tutorat de Vincent Balter (Directeur de recherche, UMR 5276).

c.1. Lessivage des échantillons

L'os et l'émail

Entre 12 et 64 mg de poudre d'émail et entre 32 et 56 mg de poudre d'os sont déposés dans 1 ml de CH₃COOH à 0,1 M. Cette réaction s'effectue durant 5 min à température ambiante sous agitation continue et a pour objectif d'éliminer les carbonates exogènes potentiellement présent dans l'échantillon. Les échantillons sont ensuite rincés à 3 reprises à l'eau MilliQ avant d'être surgelés à -86°C durant 2 h puis lyophilisés à -87°C durant minimum 12 h pour éliminer l'eau résiduelle. Certains échantillons ont subi 2 fois cette procédure. Ces derniers sont marqués d'un astérisque.

Les standards

Une aliquote de 15 mg du standard international NIST SRM 1400 et six aliquotes pesant entre 5 et 21 mg du standard interne AZÉ (os d'*Ursus deningeri* broyé et homogénéisé, 200 000 ans,

découvert aux grottes d'Azé) ont été soumises à la même procédure de lessivage que l'os et l'émail présentée précédemment. Une aliquote supplémentaire de 15 mg du standard NIST SRM 1400 non traitée servira de témoin. Ces standards, dont les concentrations en strontium et les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont connus, permettront de valider les différentes étapes de ce protocole et de vérifier la justesse des analyses qui seront réalisées.

c.2. Séparation du strontium

Le protocole utilisé pour la séparation du strontium par chromatographie échangeuse d'ions est adapté des protocoles développés par Horwitz *et al.* (1992) et par Muynck *et al.* (2009). Le système d'extraction utilisé est une résine nommée « Résine Sr » de la société Triskem International. Cette résine est composée d'un support chromatographique inerte (microbilles de résine d'un diamètre compris entre 100 et 150 μm) sur lequel est fixé un éther-couronne (4,4'(5')-di-t-butylcyclohexano-18-couronne-6) dilué dans de l'octan-1-ol ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{OH}$) à 1 M. Pour réaliser la chromatographie, des colonnes en téflon de 2 ml avec un réservoir de 5 ml ont été utilisées (Figure 30). Les colonnes ont été préalablement remplies avec 2 ml de résine. Ces colonnes sont munies d'un disque en Téflon fritté en entrée. Avant son utilisation, une colonne contenant de la résine est rincée avec 5 ml d'eau MilliQ puis 5 ml d' HNO_3 à 0,05 M. Ce rinçage est fait à 2 reprises.

La colonne est chargée de 3 ml d'une solution d' HNO_3 à 4 M afin de permettre la rétention du strontium. 900 μl de solution d' HNO_3 à 4 M contenant l'échantillon dissout sont introduits dans la colonne. La solution traverse la résine en 3 min. La solution sortant de la colonne n'est pas récupérée. La colonne est ensuite chargée de 5 ml d' HNO_3 à 4 M afin de rincer la matrice et d'éliminer l'ensemble des éléments constitutifs (notamment le calcium) de l'os ou de l'émail sauf le strontium qui reste collé à la résine. La solution migre au travers de la résine en 15 min. La solution sortant de la colonne n'est pas conservée. Enfin, la colonne est chargée en 2 fois de 6 ml d'une solution d' HNO_3 à 0,05 M permettant le relâchement des ions Sr^{2+} dans la phase mobile. La solution transite au travers de la résine durant 18 min. La solution sortant de la colonne, contenant le strontium à analyser, est récupérée. Celle-ci est ensuite évaporée à une température comprise entre 100 et 120°C durant environ 12 h jusqu'à obtention d'un résidu orangé. Des blancs sont intercalés parmi les échantillons à analyser afin de vérifier l'efficacité de la chromatographie.

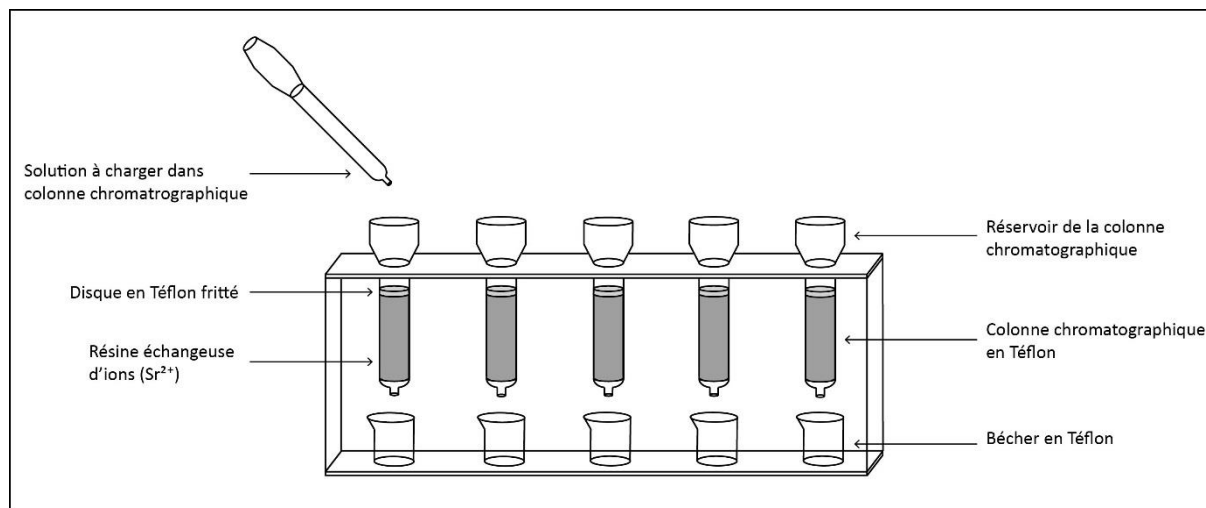


Figure 30. Séparation du strontium sur colonnes chromatographiques échangeuses d'ions

c.3. Dissolution préalable aux mesures élémentaires

Des 100 μl restant de la solution initiale d' HNO_3 à 4 M contenant l'échantillon dissout, 30 μl sont prélevés et dilués dans 2,970 ml d'une solution d' HNO_3 à 0,5 M contenant 2 ppb d'indium. 0,2 ml de cette nouvelle solution sont ensuite prélevés et dilués dans 3,8 ml d'une solution d' HNO_3 à 0,5 M contenant 2 ppb d'indium. L'échantillon a donc été dilué 2000 fois au total. L'indium, un élément chimique extrêmement rare, servira de traceur durant l'analyse élémentaire. En parallèle, une gamme d'étalonnage est réalisée à partir d'une solution multi-élémentaire commerciale à 100 ppm de Sr et de Ba. Cette gamme comprend 1 blanc (solution d' HNO_3 contenant 2 ppb d'indium) et 4 étalons de 1, 2, 10 et 20 ppb de Sr et de Ba. Elle permettra de vérifier l'absence de pollution de la machine et de dérive instrumentale.

c.4. Dissolution préalable aux mesures des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

L'échantillon purifié se présentant sous la forme d'un résidu orangé sec est repris dans 1 ml d'une solution d' HNO_3 à 0,05 M. Cette opération s'effectue à une température comprise entre 100 et 120°C durant environ 12 h et a pour objectif de mettre en solution le Sr contenu dans l'échantillon. L'échantillon solubilisé est ensuite dilué dans une solution d' HNO_3 à 0,05 M en fonction de sa concentration en Sr (mesurée auparavant). Le facteur de dilution varie entre 0 et 37 fois. Cette dilution permet d'obtenir une solution contenant environ 1 ppm de Sr par échantillon.

2.2.3. Les sédiments

Toutes ces manipulations ont été réalisées sous le tutorat de Vincent Balter.

a. Lessivage des échantillons

Le fragment de paroi, le morceau de plâtre et les sédiments – tous pesants entre 1,2 et 1,7 g – sont plongés dans 50 ml d'une solution d'acide nitrique (HNO_3) à 0,1 M. Cette réaction s'effectue durant 72 h à température ambiante et a pour objectif de solubiliser les éléments les plus mobiles constitutifs de ces échantillons. Les échantillons sont régulièrement agités de façon à améliorer l'efficacité de la réaction. 15 ml du lixiviat sont prélevés puis chauffé entre 100 et 120°C durant 24 h dans le but de ne garder qu'un résidu sec contenant le Sr.

b. Séparation du strontium et dilutions

Le protocole employé ici est strictement identique à celui présenté ci-devant pour l'os et l'émail.

2.3. Analyses spectrométriques

2.3.1. Analyses IRTF-RTA

Les analyses IRTF en réflexion totale atténuée (RTA) ont été réalisées sur des échantillons traités et non-traités. Moins d'un 1 mg de poudre d'os est requis pour ce type d'analyse. Les spectres infrarouges (domaine : 4000-400 cm^{-1}) sont obtenus par addition de 64 scans avec une résolution de 2 cm^{-1} via un spectromètre IRTF Bruker Vector 22 équipé d'un cristal de diamant RTA Specac Golden Gate. Les spectres ont été traités via le logiciel Bruker OPUS 7.2. Les analyses ont été menées par Matthieu Lebon (Maître de conférences, UMR 7194) et Olivier Tombret (Ingénieur d'étude, UMR 7209) au plateau de caractérisation des matériaux archéologiques du MNHN.

2.3.2. Datations ^{14}C

La transformation des échantillons en graphite et les mesures ^{14}C par AMS ont été réalisées au ^{14}C Chrono Center de la Queen's University (prestataire de service) à Belfast (Irlande du Nord).

2.3.3. Analyses RMN

Les acquisitions en RMN des solides ont été réalisées sur un spectromètre Bruker Avance II 500 MHz équipé d'un aimant Wide Bore Ultrashield et d'une sonde de type DVT, CP-MAS $^1\text{H}/\text{X}$ bas-gamma de 4 mm. La fréquence de résonance du proton est à 500,16 MHz et celle du carbone-13 à 152,76 MHz. La séquence d'acquisition pour les spectres ^1H est simple avec une accumulation de 156 acquisitions et un délai entre deux acquisitions de 5 s. Pour les acquisitions proton, nous avons choisi une référence de 3 % de chloroforme CHCl_3 dans de l'acétone- d_6 (CH_3) $_2\text{CO}$. Les protons de l'acétone résonnent à 2,05 ppm et celui du chloroforme à 8,02 ppm (Gottlieb *et al.* 1997 ; Pretsche *et al.* 2009 ; Fulmer *et al.* 2010). La séquence d'acquisition pour les spectres ^{13}C est une séquence CP-MAS (Cross Polarization at Magic Angle Spinning) à 10 kHz, qui correspond à un transfert de polarisation des protons vers les atomes de carbone associés à un découplage des protons durant l'acquisition alors que l'échantillon tourne à 10 000 tours par seconde sur lui-même (Perry *et al.* 1988 ; Mroue *et al.* 2012). Concernant nos échantillons, nous avons réalisé une accumulation de 18 000 acquisitions, avec un délai entre deux acquisitions de 2 s et un temps de contact de 3 ms. Les spectres en RMN des solides du carbone-13 sont calibrés grâce à l'utilisation d'un échantillon de référence externe, la glycine cristalline ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) dont le groupe carboxyle COOH résonne à 176,03 ppm (Saitô et Yokoi 1992). Ces analyses ont été menées par Vanessa Urzel (Post-doctorante, Smithsonian Institution) à la plateforme RMN de l'UMS 3033 localisée à l'Université de Bordeaux (Pessac).

2.3.4. Analyses élémentaires

Les concentrations des éléments d'intérêts (principalement l'In, le Sr et le Ca) des échantillons sont mesurées à l'aide d'un Q-ICP-MS Agilent Technologies 7500cx équipé d'une cellule de collision. Les échantillons sont introduits dans le spectromètre à l'aide d'un passeur automatique. La limite de détection de cette machine se situe autour de 0,1 ppb. On prend également soin à ce que les éléments majeurs ne dépassent pas 100 ppm dans les dilutions pour ne pas polluer la machine. L'évaluation des concentrations des éléments d'intérêts est nécessaire pour 1) vérifier l'efficacité de la chimie mise en œuvre à partir des standards – dont les concentrations élémentaires sont connues – ayant subi la purification du strontium, 2) vérifier si de potentielles contaminations des échantillons ont eu lieu durant la chromatographie grâce aux blancs d'analyse et 3) déterminer les dilutions à effectuer à partir des échantillons purifiés pour pouvoir réaliser les analyses spectrométriques. Ces analyses ont été effectuées par nos soins sous la direction de Vincent Balter au parc analytique de l'ENS-Lyon.

2.3.5. Analyses IRMS

a. Mesure des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ des phases organiques

Entre 200 et 400 μg d'extrait de collagène et un minimum de 80 μg de kératine, préalablement encapsulé dans de l'étain, sont introduits via un passeur automatique dans un analyseur élémentaire CHNS-O Costech ECS 4010. L'échantillon subit une combustion catalytique suivie d'une oxydation puis d'une réduction dans différents fours. Les gaz formés (CO_2 , H_2O , N_2 et SO_2) sont transportés dans une colonne chromatographique par un courant porteur d'hélium. Ces gaz sont alors séparés puis dirigés vers un détecteur de conductivité thermique permettant de mesurer les teneurs atomiques en carbone et en azote de l'échantillon analysé. Le CO_2 et le N_2 sont ensuite injectés dans un IRMS Thermo Scientific Delta V Plus via l'interface universelle ConFlo IV. Durant la période d'analyse, la précision analytique de l'analyseur élémentaire, calculée à partir de mesures répliquées des standards internes au laboratoire (taipan et chitine), était de $\pm 5\%$ pour les $\%C_{\text{col}}$ et $\%N_{\text{col}}$ tandis que celle du spectromètre de masse isotopique était de $\pm 0,1\text{‰}$ pour le $\delta^{13}\text{C}$ et de $\pm 0,2\text{‰}$ pour le $\delta^{15}\text{N}$. Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ des standards internes sont normalisées par rapport à celle du standard international USGS 40. Ces mesures ont été réalisées au Advanced Analytical Centre de la James Cook University à Cairns (Australie) par Chris Wurster (Chargé de recherche, James Cook University) et à l'UMR 7159 à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris) par Antoine Zazzo (dans le cadre du protocole ^{14}C).

b. Mesure des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des phases carbonatées

Entre 580 et 630 μg de bioapatite purifiée sont déposés dans un réacteur qui est ensuite introduit manuellement dans un préparateur automatique Thermo Scientific Kiel IV Carbonate Device. Les carbonates composant l'échantillon réagissent avec de l'acide phosphorique (105 %) à 70°C durant 360 s. Les gaz formés (H_2O , CO_2 , O_2 , N_2 et autres gaz non condensables) sont isolés puis purifiés via un système de piégeage par cryogénie. Le CO_2 est finalement injecté dans un IRMS Thermo Scientific Delta V Advantage. Durant la période d'analyse, la précision analytique du spectromètre, calculée à partir de mesures répliquées du standard interne au laboratoire (Mabre LM), était de $\pm 0,03\text{‰}$ pour le $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ et de $\pm 0,07\text{‰}$ pour le $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$. Les valeurs moyennes de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$, calculées à partir de l'ensemble des standards mesurés durant cette période d'analyse, sont respectivement de 2,05 ‰ (valeur théorique : 2,13 ‰) et -1,62 ‰ (valeur théorique : -1,83 ‰). Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ des échantillons de chaque série d'analyses ont été corrigées par la différence moyenne entre les valeurs obtenues sur les standards de la série et leurs valeurs théoriques. Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ du standard interne sont normalisées par rapport à celle du standard international NBS 19. Ces analyses ont été faites par Joël Ughetto-Monfrin (Ingénieur d'étude, UMR 7209) au service de

spectrométrie de masse isotopique du MNHN (SSMIM) et par Antoine Zazzo à l'UMR 7159 (dans le cadre du protocole ^{14}C).

c. *Mesure des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$*

Les mesures des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont réalisées sur un MC-ICP-MS Nu Plasma 1700. Les échantillons sont introduits dans le spectromètre via un passeur automatique. La précision analytique calculée à partir des 2 aliquotes du standard international NIST SRM 1400 mesurées dans chaque série d'analyses est de 0,00009 ‰ pour le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ moyen, calculé à partir des 4 aliquotes du standard NIST SRM 1400 mesurées est de 0,713905 ‰ ($\sigma = 0,0008$ ‰) (valeur théorique (non certifiée) : 0,713104 ‰ ($\sigma = 0,000019$ ‰) ; Schweissing et Grupe (2003) et Balter *et al.* (2008)). Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des échantillons de chaque série d'analyses ont été corrigés par la différence moyenne entre les valeurs obtenues sur les standards de la série et leurs valeurs théoriques. Ces mesures ont été effectuées par nos soins sous la direction de Vincent Balter au parc analytique de l'ENS-Lyon.

CHAPITRE IV.

Résultats

1. TEST DE VALIDATION DU PROTOCOLE DE PURIFICATION DES CARBONATES DE L'OS UTILISE

1.1. Résultats RMN

Les différents spectres RMN ^{13}C réalisés à T0 pour les échantillons des collections SSPM et Saint-Benoît présentent tous, comparativement au spectre RMN ^{13}C d'un os moderne (Urzel 2014), une intensité du signal global plus faible ainsi qu'une perte de résolution des différentes raies – *i.e.* augmentation de la largeur à mi-hauteur des raies – (Figures 31 et 32).

Les spectres RMN ^{13}C obtenus à T1 pour ces mêmes échantillons mettent en évidence, quant à eux, une perte du signal au niveau des groupes carboxyle et carbonyle ainsi qu'au niveau du massif des chaînes aliphatiques des acides aminés du collagène et des lipides, comparativement aux spectres RMN ^{13}C initiaux obtenus à T0 (Figures 31 et 32). Toutefois, les profils spectraux obtenus en RMN ^{13}C à T2 et T2Bis révèlent une légère rémanence de raies au niveau du massif des chaînes aliphatiques plus marquée pour les individus provenant du cimetière Saint-Benoît que pour ceux provenant de la catacombe SSPM alors qu'une perte totale de signal est constatée au niveau des groupes carboxyle et carbonyle pour l'ensemble de ces individus (Figures 31 et 32).

Bien qu'il soit théoriquement possible d'identifier les CO_3 substitués (type A et/ou B) de la phase carbonatée de l'os entre 166 et 170 ppm via la RMN ^{13}C (Beshah *et al.* 1990 ; Errassifi 2011 ; Wang 2012), aucune raie caractéristique de ces carbonates n'est observée sur les spectres RMN ^{13}C que nous avons obtenus à T0, T1, T2 et T2Bis (Figures 31 et 32).

En revanche, du fait d'interactions importantes entre les CO_3 adsorbés et les molécules d'eau présentent à la surface du réseau cristallin (Beshah *et al.* 1990), un pic bien résolu et intense à 168 ppm caractéristique des CO_3 exogènes adsorbés serait en principe aisément identifiable par RMN ^{13}C en cas de contamination de l'échantillon analysé (Lee *et al.* 1995 ; Alfano *et al.* 2009).

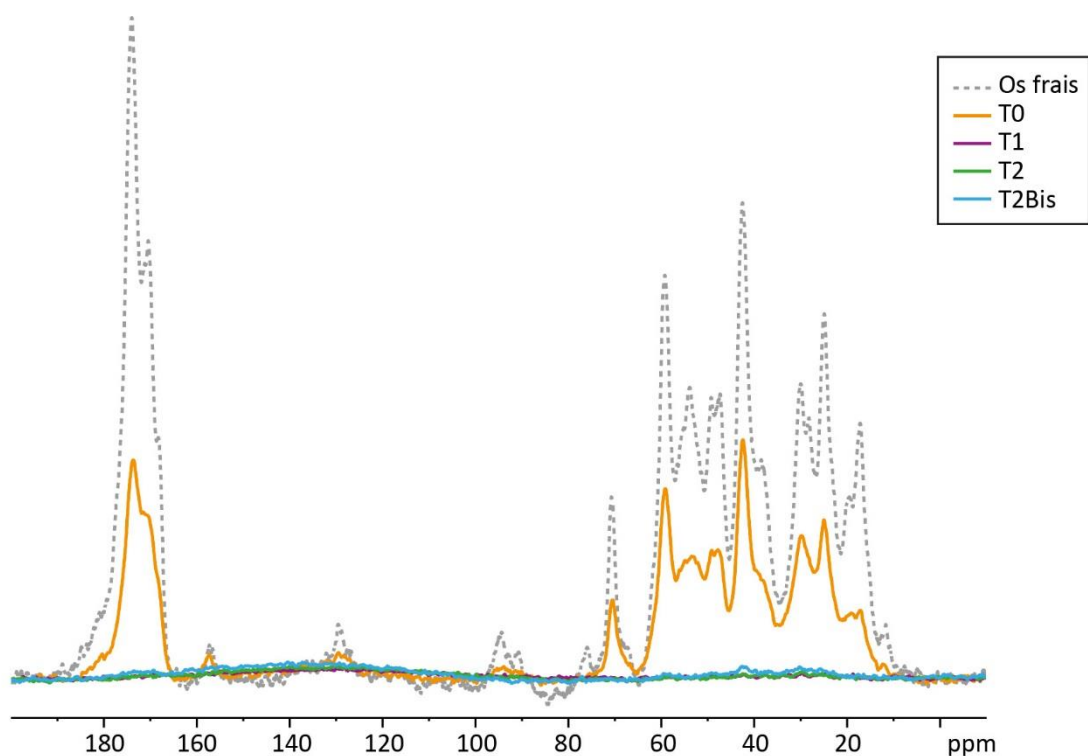


Figure 31. Superposition des spectres RMN ^{13}C obtenus à T0, T1, T2 et T2Bis pour les échantillons de la collection SSPM

Note : Chaque spectre est une somme des 5 échantillons analysés à T0, T1, T2 et T2Bis. Le spectre en pointillé est celui d'un os frais (référence) et ne représente que 75 % de l'intensité réelle mesurée.

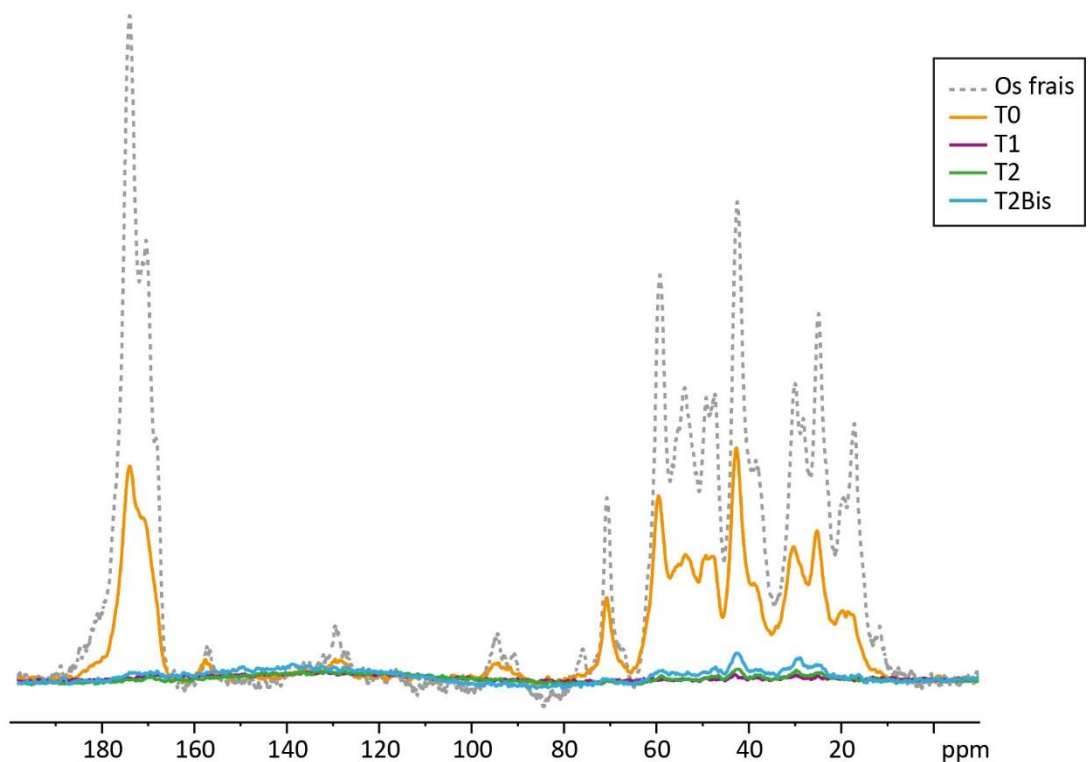


Figure 32. Superposition des spectres RMN ^{13}C obtenus à T0, T1, T2 et T2Bis pour les échantillons de la collection Saint-Benoît

Note : Chaque spectre est une somme des 5 échantillons analysés à T0, T1, T2 et T2Bis. Le spectre en pointillé est celui d'un os frais (référence) et ne représente que 75 % de l'intensité réelle mesurée.

Par ailleurs, les spectres RMN ^1H réalisés à T0 pour les 10 échantillons ont, par rapport à un spectre RMN ^1H d'un os moderne (Urzel 2014), une intensité spectrale moins forte ainsi qu'une perte de résolution des différents pics assimilés aux lipides (Figures 33 et 34). Paradoxalement, une raie mieux résolue apparaît sur ces spectres vers 0,2 ppm correspondant aux groupes hydroxyles OH de l'apatite (Figures 33 et 34).

Suite à l'élimination de la matière organique par le NaOCl, nous observons sur les spectres RMN ^1H obtenus à T1 vis-à-vis de ceux obtenus à T0 pour les échantillons de la collection SSPM une diminution de l'intensité du pic de résonance de l'eau à 5,4 ppm (Figure 33). Parallèlement, les spectres RMN ^1H obtenus à T1 pour l'ensemble des échantillons mettent en évidence une augmentation de l'intensité du signal dans la région des groupes OH à 0,2 ppm par rapport aux spectres RMN ^1H réalisés à T0 (Figures 33 et 34).

À l'exemple de ce que nous avons pu observer entre les spectres RMN ^1H obtenus à T0 et ceux obtenus à T1, nous constatons entre les spectres RMN ^1H obtenus à T0 et ceux obtenus à T2 pour les échantillons de la collection SSPM (Figures 33), une diminution de l'intensité du signal à 5,4 ppm. De même, les spectres RMN ^1H obtenus à T2 pour les échantillons de la collection SSPM mettent en évidence, par comparaison aux spectres RMN ^1H réalisés à T1, une baisse de l'intensité du signal des groupes hydroxyles (Figure 33). Enfin, on observe une diminution de l'intensité de la raie correspondant aux groupes hydroxyles (Figure 33).

Les spectres RMN ^1H obtenus à T2 pour les échantillons de la collection Saint-Benoît montrent, comparativement à ceux obtenus à T0 ou T1, un signal moins intense à 5,4 ppm (Figures 34). Par ailleurs, aucune différence d'intensité du signal au niveau des groupes hydroxyles n'est observée sur les spectres RMN ^1H entre T1 et T2 (Figures 34).

Les spectres RMN ^1H obtenus à T2Bis pour les 10 échantillons, comparativement à ceux obtenus à T0, montrent une diminution de l'intensité du signal à 5,4 ppm (Figures 33 et 34). De surcroît, nous constatons sur les spectres RMN ^1H réalisés à T2Bis pour les échantillons de la collection SSPM, par comparaison aux spectres RMN ^1H réalisés à T1, une diminution de la hauteur du pic à 0,2 ppm correspondant aux groupes hydroxyles (Figures 33).

En revanche, les spectres RMN ^1H obtenus à T2Bis pour les échantillons de collection de Saint-Benoît ne présentent aucune différence en termes d'intensité du signal au niveau des groupes hydroxyle comparativement aux spectres RMN ^1H obtenus à T2 ou T1 (Figures 34).

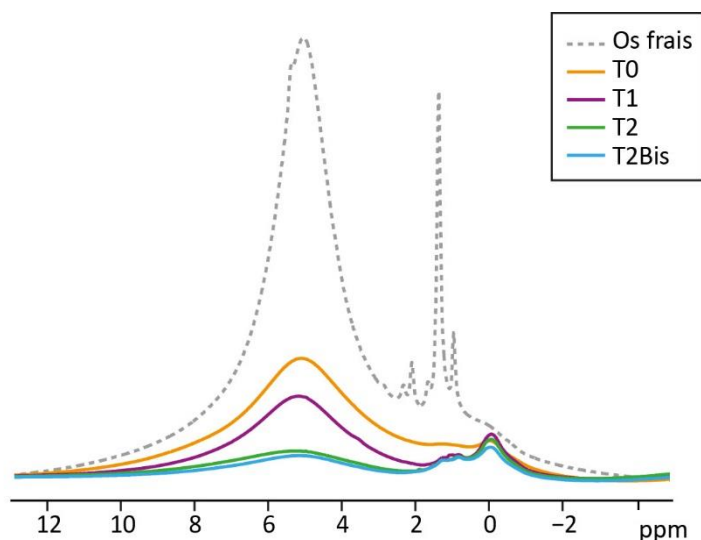


Figure 33. Superposition des spectres RMN ¹H obtenus à T0, T1, T2 et T2Bis pour les échantillons de la collection SSPM

Note : Chaque spectre est une somme des 5 échantillons analysés à T0, T1, T2 et T2Bis. Le spectre en pointillé est celui d'un os frais (référence).

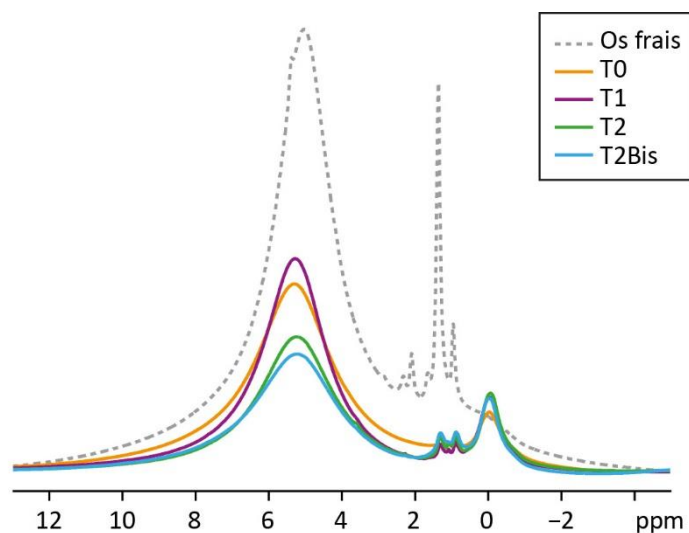


Figure 34. Superposition des spectres RMN ¹H obtenus à T0, T1, T2 et T2Bis pour les échantillons de la collection Saint-Benoît

Note : Chaque spectre est une somme des 5 échantillons analysés à T0, T1, T2 et T2Bis. Le spectre en pointillé est celui d'un os frais (référence).

1.2. Résultats isotopiques

Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$, mesurées sur les différentes aliquotes des échantillons issus de la collection SSPM et Saint-Benoît ayant subi les traitements *ad hoc* à T0, T1, T2 et T2Bis, sont présentées dans le Tableau 21. Les modifications des valeurs isotopiques d'un temps à l'autre engendrées par les différents prétraitements sont présentées en Annexe 6. Les valeurs de

$\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ des échantillons de la collection SSPM et Saint-Benoît sont d'une façon générale plus élevées à T1 qu'à T0, à l'exception de l'échantillon H77 (Tableau 21 ; Figure 35 ; Annexe 6).

Tableau 21. Présentation des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ des échantillons des collections SSPM et Saint-Benoît mesurées à T0, T1, T2 et T2Bis.

Collection	Identifiant	$\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$				$\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$			
		T0	T1	T2	T2Bis	T0	T1	T2	T2Bis
SSPM	X81 n°14 Mand1	-13,0	-11,0	-12,8	-12,9	-1,2	-3,5	-3,5	-2,6
	X83 US219 Mand1	-13,3	-11,9	-13,2	-13,4	0,2	-2,6	-1,6	-1,2
	X83 US219 Mand2	-13,9	-12,5	-14,0	-14,1	-1,4	-3,8	-3,3	-2,8
	X84 Sq141	-14,9	-12,9	-14,7	-15,0	-2,8	-3,7	-3,4	-2,9
	X84 Sq187	-13,9	-12,3	-13,7	-13,9	-1,4	-4,1	-3,3	-2,8
Saint-Benoît	H60	-12,9	-11,8	-13,2	-13,6	-3,6	-4,8	-4,6	-4,5
	H62	-12,3	-11,5	-13,5	-14,0	-3,3	-5,0	-4,2	-3,7
	H63	-13,4	-11,6	-12,9	-13,7	-4,4	-5,9	-5,7	-5,6
	H75	-13,2	-11,6	-13,0	-13,2	-3,7	-4,8	-5,0	-4,9
	H77	-10,4	-10,6	-11,8	-12,9	-4,7	-4,9	-5,3	-5,6

Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ des 10 échantillons mesurées à T2 ou T2Bis sont quant à elles systématiquement plus basses que celles mesurées à T1 mais relativement similaires à celles mesurées à T0 (Tableau 21 ; Figure 35 ; Annexe 6). Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ de ces échantillons mesurées à T2 sont, de façon systématique, plus faibles que celles mesurées à T2Bis (Tableau 21 ; Figure 35 ; Annexe 6). Enfin, les différences entre les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ à T2 et celles à T2Bis sont en moyenne de -0,2 ‰ ($\sigma = 0,0$ ‰) pour les échantillons de la collection SSPM et de -0,6 ‰ ($\sigma = 0,3$ ‰) pour les échantillons de la collection Saint-Benoît.

Les échantillons de la collection SSPM et Saint-Benoît présentent des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ toujours plus négatives à T1 qu'à T0 (Tableau 21 ; Figure 35 ; Annexe 6). Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ des 10 échantillons mesurées à T2 ou T2Bis sont, quant à elles, plus hautes que celles mesurées à T1 (à l'exception de l'échantillon H77) mais toujours plus basses que celles obtenues à T0 (Tableau 21 ; Figure 35 ; Annexe 6). Les mesures isotopiques réalisées montrent que les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ de ces échantillons sont, de façon générale, plus élevées à T2 qu'à T2Bis, sauf dans un cas à savoir l'échantillon H77 (Tableau 21 ; Figure 35 ; Annexe 6).

Enfin, les différences entre les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ à T2 et celles à T2Bis sont en moyenne de -0,5 ‰ ($\sigma = 0,2$ ‰) pour les échantillons de la collection SSPM et de -0,1 ‰ ($\sigma = 0,3$ ‰) pour les échantillons de la collection Saint-Benoît. Une configuration opposée à celle observée précédemment pour les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ est constatée ici avec des différences relativement importantes entre les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ à T2 et celles à T2Bis pour les échantillons de la collection SSPM et des différences

insignifiantes entre les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ à T2 et celles à T2Bis pour les échantillons de la collection Saint-Benoît.

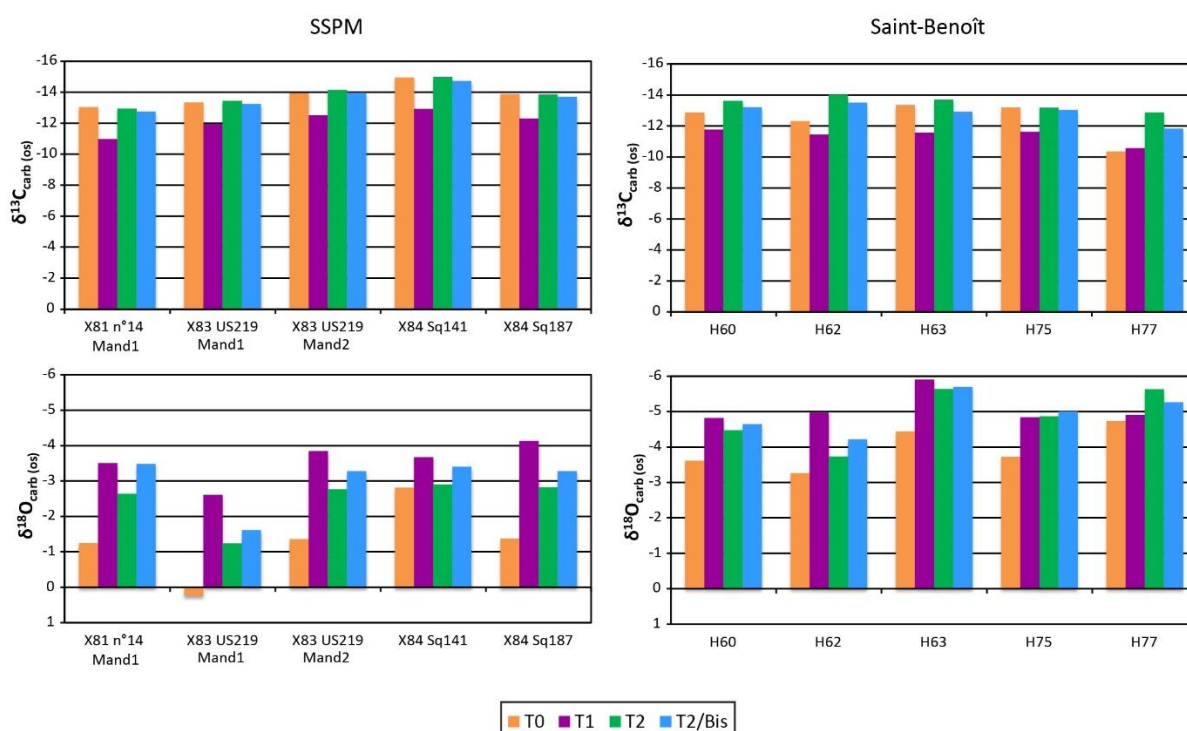


Figure 35. Diagrammes en barres présentant les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ des échantillons des collections SSPM et Saint-Benoît mesurés à T0, T1, T2 et T2Bis.

2. PRESERVATION DES SIGNAUX ISOTOPIQUES BIOGENIQUES SUR LA BASE DE CRITERES CONVENTIONNELS MESURES EN ROUTINE ET VARIABILITE

2.1. Le collagène de l'os et les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$

2.1.1. Conservation et variabilité à l'échelle du site

Les %Col sont compris entre 0,1 et 22,6 % ($\bar{x} = 9\%$; $\sigma = 6,5\%$) (Tableau 22 ; Annexes 7 et 8). Les %C_{col} et %N_{col} varient respectivement entre 0,7 et 46,7 % ($\bar{x} = 34,3\%$; $\sigma = 13,4\%$; $n = 127$) et entre 0 et 17,2 % ($\bar{x} = 12,5\%$; $\sigma = 4,6\%$; $n = 127$) (Tableau 22 ; Annexes 7, 9 et 10). Les rapports C/N varient enfin entre 1,4 et 5,4 ($\bar{x} = 3,1$; $\sigma = 0,5$; $n = 126$) (Tableau 22 ; Annexes 7 et 11). Ces derniers sont faiblement corrélés aux %C_{col} ($R^2 = 0,43$) et aux %N_{col} ($R^2 = 0,34$). Ces corrélations restent cependant non significatives. Au total, 29 échantillons – soit 23 % du corpus total – présentent au moins un des critères de conservation en dehors des gammes de valeurs acceptées (Figure 36). Parmi les 99

échantillons qui présentent des valeurs acceptables pour l'ensemble des critères de conservation, la préservation biochimique du collagène reste très variable (Tableau 22 ; Annexe 7). Les rapports C/N de ces derniers ne sont plus corrélés à leurs %C_{col} (R² = 0,14) et à leurs %N_{col} (R² = 0,02). Les valeurs de δ¹³C_{col} et de δ¹⁵N_{col} des individus dont le collagène est bien préservé sont comprises entre -20,3 et -17,8 ‰ (Moyenne = -19 ‰ ; σ = 0,3 ‰ ; n = 99) (Tableau 22 ; Annexe 7) et entre 7,6 et 14,9 ‰ (Moyenne = 11,2 ‰ ; σ = 1,1 ‰ ; n = 99) (Tableau 22 ; Annexe 7). Il n'y a aucune corrélation entre ces valeurs isotopiques au sein de ce corpus (R² = 0,19). Aucune corrélation n'est de plus observée entre les différents indicateurs de conservation et les valeurs de δ¹³C_{col} (R² ≤ 0,05) ou de δ¹⁵N_{col} (R² ≤ 0,20).

Tableau 22. Synthèse à l'échelle du site des critères de conservation du collagène et valeurs isotopiques (δ¹³C_{col} et δ¹⁵N_{col}) des échantillons composant le corpus total d'une part et des échantillons dont le collagène est bien préservé d'autre part.

Phase collagénique de l'os		Corpus total						Extraits de collagène bien préservés					
		%Col	%C _{col}	%N _{col}	C/N	δ ¹³ C (‰ VPDB)	δ ¹⁵ N (‰ AIR)	%Col	%C _{col}	%N _{col}	C/N	δ ¹³ C (‰ VPDB)	δ ¹⁵ N (‰ AIR)
Population	n	127	127	127	126	121	120	99					
	Min	0,1	0,7	0	1,4	-22,4	4,8	1,1	19,6	7,2	2,9	-20,3	7,6
	Max	22,6	46,7	17,2	5,4	-17,1	14,9	22,6	46,7	17,2	3,5	-17,8	14,9
	Moyenne	9,0	34,3	12,5	3,1	-19,0	10,9	11,1	40,4	14,5	3,2	-19,0	11,2
	σ	6,5	13,4	4,6	0,5	0,6	1,5	5,6	5,6	1,9	0,1	0,3	1,1

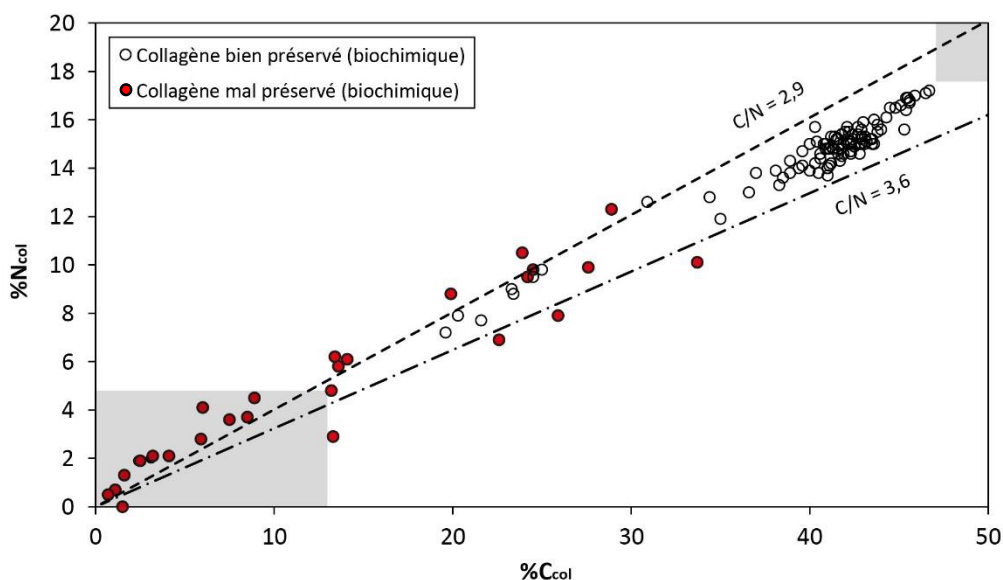


Figure 36. Projection des %C_{col} et des %N_{col}

Note : Les figurés vides représentent les échantillons de collagène bien préservés. Les figurés rouges représentent les échantillons de collagène mal préservés. Les zones grisées correspondent aux gammes de valeurs pour lesquelles un échantillon de collagène est considéré comme mal préservé.

2.1.2. Conservation et variabilité par chambre

Bien que faisant partie *stricto sensu* des petites chambres, l'ensemble des échantillons de X81 ont des valeurs de critères de conservation similaires à celles présentées par l'ensemble des échantillons des deux grandes salles. Le corpus total d'échantillons prélevés dans les petites chambres (X78/T15, X80/T16 et X82/T18) est statistiquement différent du corpus total d'échantillons prélevés dans les grandes chambres (X83 et X84) et dans la petite chambre X81 quel que soit le critère de conservation du collagène considéré (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs = 0,00). Les 29 échantillons de collagène mal préservés sont tous issus des petites chambres. Précisément 63 % des échantillons prélevés dans X82/T18 ($n = 14$) et 13 % de ceux prélevés dans X80/T16 ($n = 26$) n'ont pas fourni un extrait de collagène bien préservé (Figure 37). Après le retrait de ces échantillons mal préservés, le corpus des petites chambres reste statistiquement différent de celui de X81, X83 et X84 au regard de l'ensemble des critères de conservation (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs < 0,04) sauf les %N_{col} (Test U de Mann-Whitney, p -valeur = 0,13). Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ des 99 échantillons de collagène bien préservés sont présentées par chambre à la Figure 38. Le corpus des petites chambres composé des échantillons de collagène bien préservés et celui des chambres X81, X83 et X84 sont statistiquement différents au regard des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ (Tests de Mann-Whitney, p -valeurs $\leq 0,03$). En revanche, il n'y a aucune différence statistique entre ces corpus vis-à-vis des valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ (Tests de Mann-Whitney, p -valeurs $\geq 0,05$). Ce regroupement en deux grands ensembles met en exergue des différences en fonction des valeurs isotopiques qui ne sont cependant pas observées lorsque nous comparons les corpus d'échantillons de collagène de chaque chambre les uns avec les autres par rapport aux valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$, avec ou sans les échantillons de collagène mal préservés (Tests de Kruskal-Wallis, p -valeurs $\geq 0,10$).

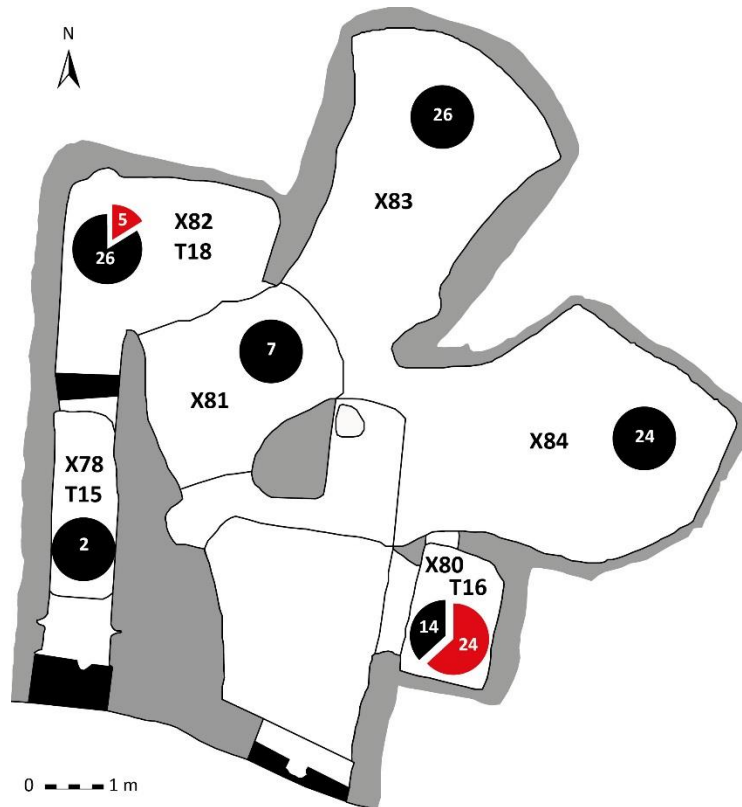


Figure 37. Répartition des échantillons prélevés en fonction des chambres

Note : Les parts de camemberts de couleur noire représentent le nombre d'échantillons de collagène bien préservés et celles de couleur rouge représentent les le nombre d'échantillons de collagène mal préservés.

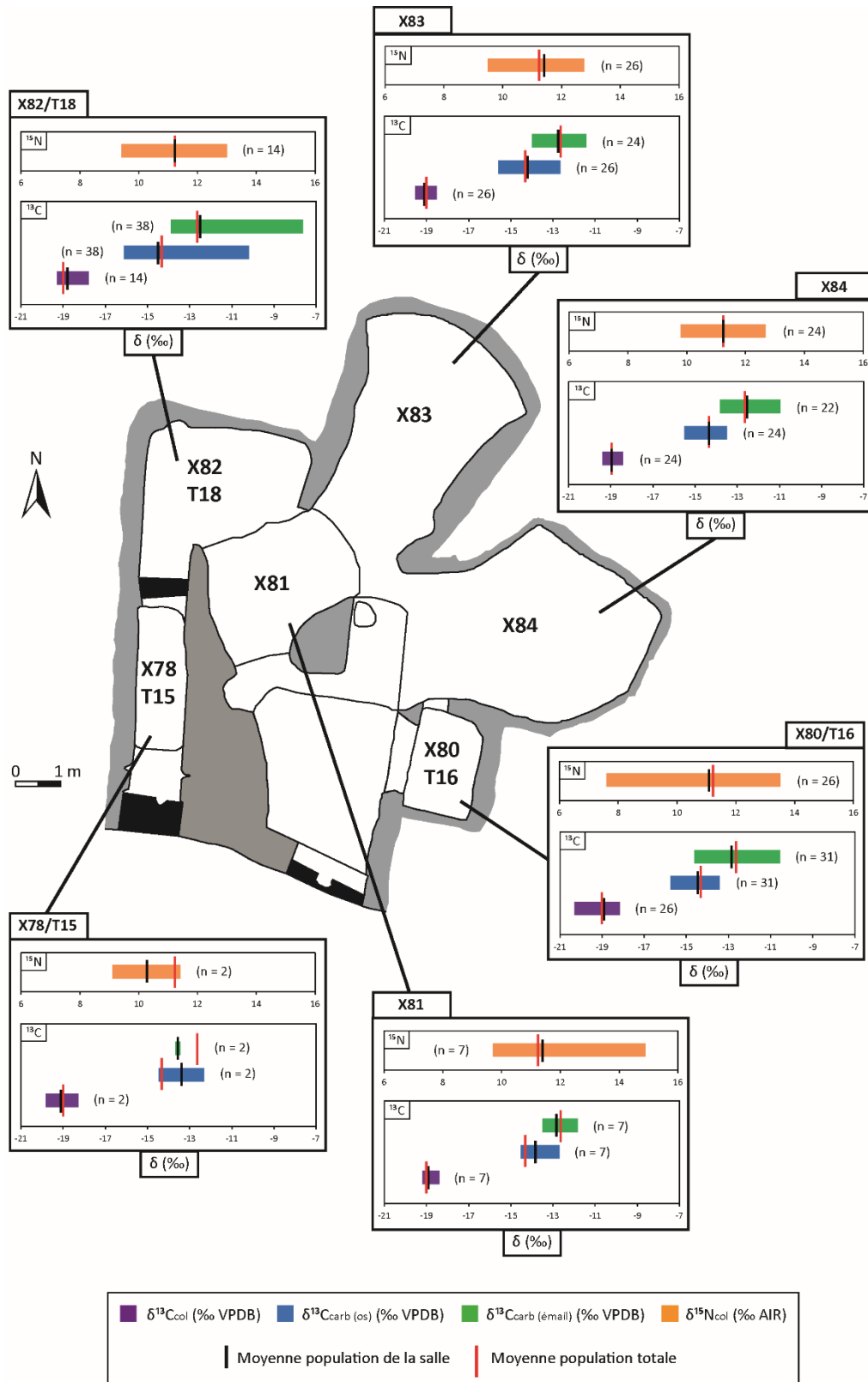


Figure 38. Variabilité des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$, de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ (os) et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ (émail) des échantillons.
 Note : Seules les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ des échantillons de collagène biochimiquement bien préservé sont présentées.

2.1.3. Conservation et variabilité par niveau de dépôts

Dans la chambre X80/T16, les valeurs des critères de préservation du collagène varient fortement au sein des différents niveaux de dépôts, et ce particulièrement dans les phases 1, 2, 3 et 4. Le retrait des 5 échantillons de collagène mal préservés – provenant tous des niveaux de dépôts 2, 3 et 4 – conduit à une réduction importante de la variabilité des valeurs dans les phases 2, 3 et 4. Les niveaux inférieurs (1, 2, 3 et 4) présentent une plus forte variabilité des valeurs des critères de conservation que les niveaux supérieurs (5, 7 et 8). Il n’y a pas de différence statistique entre le corpus d’échantillons des phases 1, 2, 3 et 4 et celui des phases 5, 7 et 8 au regard des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$, avec ou sans prise en considération des échantillons dont le collagène est mal préservé (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs $\geq 0,10$).

Dans la chambre X82/T18, les valeurs des indicateurs de conservation du collagène varient très fortement au sein des différentes phases. L’élimination des 24 échantillons de collagène mal préservés diminue drastiquement le nombre d’échantillons prélevés par phase (entre 0 et 2 échantillons par phase) et la variabilité intra-phase des valeurs des différents critères. Il y a de plus une très forte variabilité des valeurs des différents critères de conservation d’un niveau stratigraphique à l’autre (avec ou sans les échantillons de collagène mal préservés). Il n’y a aucune différence statistique entre les échantillons des différents niveaux de dépôts au regard des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$, avec ou sans prise en compte des 24 échantillons de collagène mal préservés (Tests de Kruskal-Wallis, p -valeurs $\geq 0,14$).

2.1.4. Conservation et variabilité par catégorie d’os

Pour chaque catégorie d’os, les valeurs des critères de conservation du collagène présentent une grande variabilité. D’une façon générale, le collagène des os irréguliers et longs est mieux préservé que celui des os plats et des échantillons divers (Annexes 8, 9, 10 et 11). Le groupe constitué de tous les os longs et irréguliers est statistiquement différent de celui composé de tous les os plats et de tous les échantillons divers au regard de l’ensemble des critères de conservation (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs = 0,00).

Seuls respectivement 10 % et 15 % des os irréguliers et longs ont été éliminés de notre corpus car ils présentaient un collagène biochimiquement mal préservé, alors que respectivement 46 % et 100 % des os plats et des échantillons divers ont été retirés de notre corpus du fait de la mauvaise conservation de leur collagène. À l’exception des rapports C/N, après suppression des 29 échantillons de collagène mal préservés (Test U de Mann-Whitney, p -valeur = 0,02), il n’existe plus aucune

différence statistiquement significative entre le groupe des os longs et irréguliers et celui des os plats et des échantillons divers (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs $\geq 0,08$).

Aucune différence statistique significative n'est observée entre les corpus d'échantillons (corpus comprenant ou non les échantillons de collagène mal préservés) des différentes catégories d'os au regard des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs $\geq 0,05$), hormis entre les os longs et les os irréguliers (corpus comprenant les échantillons mal préservés) en fonction des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ (Test U de Mann-Whitney, p -valeur = 0,04).

2.1.5. Conservation et variabilité en fonction de l'apparence macroscopique des os

Les valeurs des critères de conservation du collagène varient fortement au sein des trois catégories précédemment définies mais aussi entre elles (Annexes 8, 9, 10 et 11). Ces trois groupes sont statistiquement différents au regard de l'ensemble des critères de conservation, avec ou sans les échantillons de collagène biochimiquement mal préservés (Tests de Kruskal-Wallis, p -valeurs = 0,00). Il n'y a aucune différence statistique entre ces trois groupes par rapport aux valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ lorsque les échantillons de collagène mal préservés sont conservés dans les corpus comparés (Tests de Kruskal-Wallis, p -valeurs $\geq 0,09$). De plus, après élimination de ces 29 échantillons, les trois groupes sont toujours statistiquement différents en fonction des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ (Test de Kruskal-Wallis, p -valeur = 0,07) mais ce n'est plus le cas en fonction des valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ (Test de Kruskal-Wallis, p -valeur = 0,03).

2.2. La phase carbonatée de l'os et les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$

2.2.1. Conservation et variabilité à l'échelle du site

Les valeurs de PCO_2 sont comprises entre 406 et 980 μbar (\bar{x} = 806,8 μbar ; σ = 127,9 μbar ; n = 128) tandis que les rapports $\text{PCO}_2/\text{Masse}$ varient entre 0,7 et 1,6 (\bar{x} = 1,3 ; σ = 0,2 ; n = 128) (Tableau 23 ; Annexes 7 et 12). Les échantillons dont le collagène est bien préservé sont statistiquement différents de ceux dont le collagène est mal préservé au regard de ces différents critères (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs = 0,00). À l'échelle populationnelle, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ varient entre -16,1 et -10,2 ‰ (\bar{x} = -14,4 ‰ ; σ = 0,7 ‰ ; n = 128) et entre -5,5 et -1,6 ‰ (\bar{x} = -3,4 ‰ ; σ = 0,7 ‰ ; n = 128) (Tableau 23 ; Figure 39 ; Annexe 7). Aucune corrélation n'est observée entre les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ pour la population totale ou pour les 99 sujets au collagène bien préservé (R^2 = 0,01). Il n'y a de plus aucune corrélation entre les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ ou celles de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ et les indicateurs de contrôle pour ces deux corpus d'échantillons (R^2 < 0,03).

Tableau 23. Tableau synthétique présentant à l'échelle du site les indicateurs de contrôle mesurés durant l'analyse isotopique de la phase carbonatée et les valeurs isotopiques ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$) du corpus total d'une part et des échantillons dont le collagène est bien préservé d'autre part.

Phase carbonatée de l'os		Corpus total				Échantillons au collagène bien préservé			
		PCO ₂ (μbar)	PCO ₂ / Masse	δ ¹³ C (‰ VPDB)	δ ¹⁸ O (‰ VPDB)	PCO ₂ (μbar)	PCO ₂ / Masse	δ ¹³ C (‰ VPDB)	δ ¹⁸ O (‰ VPDB)
Population	n	128				99			
	Min	406,0	0,7	-16,1	-5,5	450,0	0,7	-15,7	-4,9
	Max	980,0	1,6	-10,2	-1,6	980,0	1,6	-10,2	-1,8
	Moyenne	806,8	1,3	-14,4	-3,4	840,3	1,4	-14,3	-3,5
	σ	127,9	0,2	0,7	0,7	107,8	0,2	0,8	0,6

2.2.2. Conservation et variabilité par chambre

Le corpus des petites chambres est statistiquement différent de celui des chambres X81, X83 et X84 au regard des valeurs de PCO₂ et des rapports PCO₂/Masse (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs = 0,00). Après le retrait des 29 échantillons dont le collagène est mal préservé, le corpus des petites chambres ($n = 42$) reste statistiquement différent de celui des chambres X81, X83 et X84 selon ces mêmes indicateurs (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs = 0,00). Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ sont présentées par chambre à la Figure 39. Il n'y a aucune différence statistique entre le corpus des petites chambres et celui des chambres X81, X83 et X84 au regard des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ (avec ou sans les échantillons au collagène mal préservé) et des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ (sans les échantillons au collagène mal préservé) (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs $\geq 0,25$). En revanche une différence statistique est observée entre ces deux groupes au regard des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ (avec les échantillons au collagène mal préservé) (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs = 0,04).

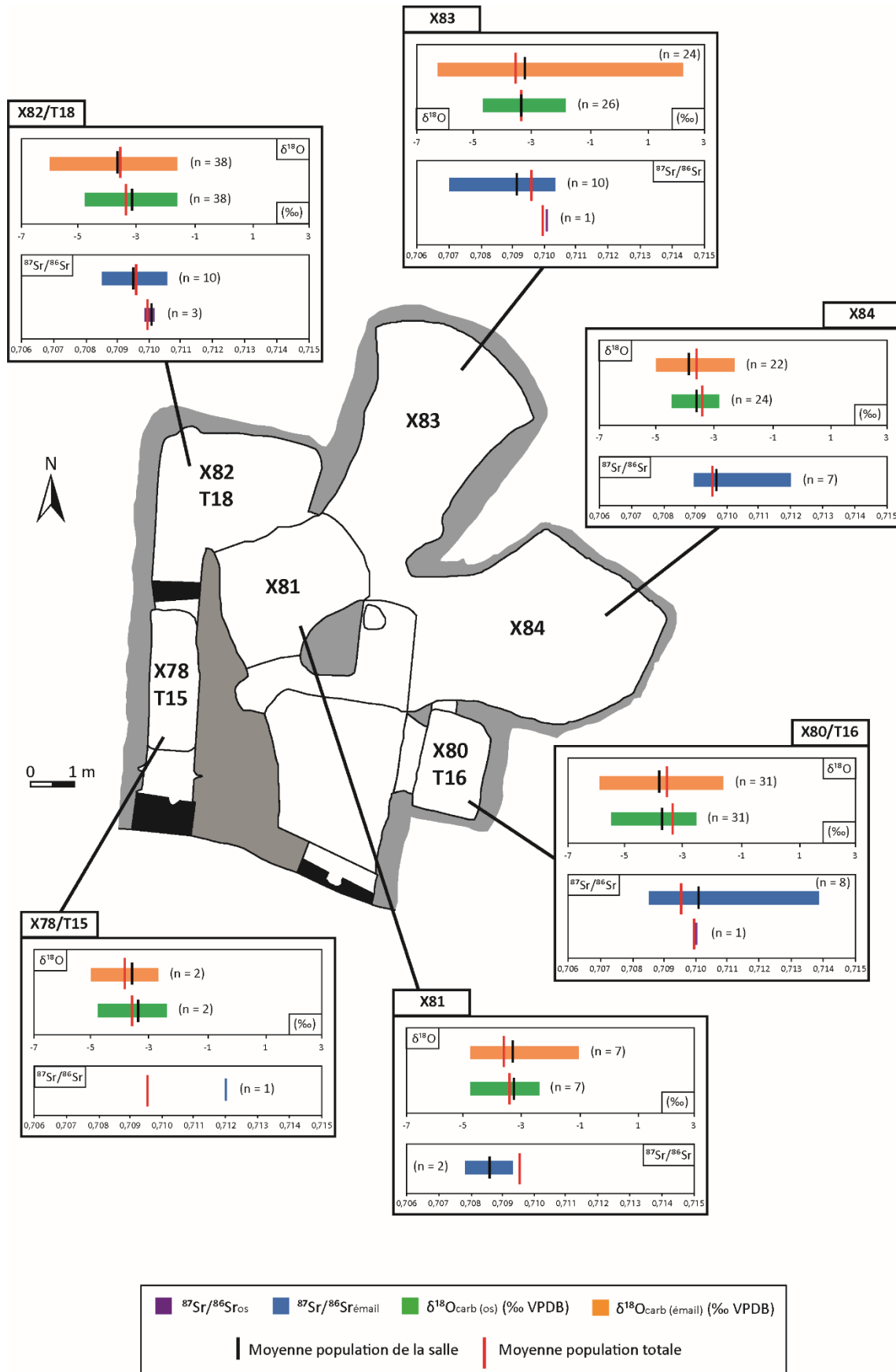


Figure 39. Variabilité des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ ainsi que des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$

2.2.3. Conservation et variabilité par niveau de dépôts

Les échantillons de la chambre X80/T16 et ceux de la chambre X82/T18 montrent une grande variabilité des valeurs des différents indicateurs de contrôle par niveau de dépôt mais également d'un niveau de dépôt à l'autre. Il n'y a aucune différence statistique entre les différents niveaux de dépôts dans chacune des deux chambres au regard des valeurs de PCO_2 et des rapports $\text{PCO}_2/\text{Masse}$, avec ou sans prise en considération des échantillons au collagène mal préservé (Tests de Kruskal-Wallis, p -valeurs $\geq 0,06$). Il en est de même au regard des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ (Tests de Kruskal-Wallis, p -valeurs $\geq 0,05$).

2.2.4. Conservation et variabilité par catégorie d'os

La variabilité des valeurs des indicateurs expérimentaux est relativement importante au sein de chaque catégorie d'os ainsi qu'entre les différentes catégories d'os (Annexe 12). Les os irréguliers et longs sembleraient avoir une phase carbonatée mieux préservée que ceux des os plats ainsi que les échantillons divers. Le corpus composé des fragments d'os longs et irréguliers est statistiquement différent de celui constitué des fragments d'os plats et des échantillons divers quel que soit l'indicateur de contrôle considéré (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs = 0,00). En éliminant les 29 échantillons au collagène mal préservé, plus aucune différence statistique n'est observée entre ces deux corpus d'échantillons (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs $\geq 0,08$). Le corpus composé des os longs et irréguliers et celui formé des os plats et des échantillons divers présentent une différence statistique significative pour les valeurs $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ (avec ou sans les échantillons présentant un collagène mal préservé) (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs $\leq 0,01$) mais ils n'en présentent pas pour les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ (avec ou sans les échantillons présentant un collagène mal préservé) (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs $\geq 0,09$).

2.2.5. Conservation et variabilité en fonction de l'apparence macroscopique des os

La variabilité des valeurs des indicateurs de contrôle est relativement forte pour les échantillons catégorisés comme macroscopiquement bien et mal préservés tout comme ceux présentant un état macroscopique intermédiaire (Annexe 12). Les trois groupes sont statistiquement différents au regard des différents indicateurs expérimentaux, avec ou sans prise en compte des échantillons au collagène mal préservé (Tests de Kruskal-Wallis, p -valeurs = 0,00). Les trois groupes présentent une différence statistique significative en fonction des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ (avec ou sans les échantillons présentant un collagène mal préservé) (Tests de Kruskal-Wallis, p -valeurs 0,00) mais

ils n'en présentent pas en fonction des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ (avec ou sans les échantillons présentant un collagène mal préservé) (Tests de Kruskal-Wallis, p -valeurs $\geq 0,18$).

2.3. La phase carbonatée de l'émail et les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$

2.3.1. Conservation et variabilité à l'échelle du site

Les valeurs de PCO_2 varient entre 596 et 885 μbar ($\bar{x} = 808,2 \mu\text{bar}$; $\sigma = 53,6 \mu\text{bar}$; $n = 124$) (Tableau 24 ; Annexe 7) tandis que les rapports $\text{PCO}_2/\text{Masse}$ sont compris entre 0,8 et 1,5 ($\bar{x} = 1,3$; $\sigma = 0,1$) (Tableau 24 ; Annexe 7). Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ varient respectivement entre -14,6 et -7,7 ‰ ($\bar{x} = -12,6 \text{‰}$; $\sigma = 0,9 \text{‰}$; $n = 124$) et entre -6,3 et 2,3 ‰ ($\bar{x} = -3,6 \text{‰}$; $\sigma = 1,2 \text{‰}$; $n = 124$) (Tableau 24 ; Annexe 7). Aucune corrélation n'existe entre les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$ ou de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ et ces indicateurs de contrôle ($R^2 < 0,02$).

Tableau 24. Tableau synthétique présentant à l'échelle du site les indicateurs de contrôle mesurés durant l'analyse isotopique de la phase carbonatée de l'émail et les valeurs isotopiques $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$ et $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ du corpus total.

Phase carbonatée de l'émail		Corpus total			
		PCO_2 (μbar)	$\text{PCO}_2/\text{Masse}$	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ VPDB)
Population	n	124			
	Min	596,0	0,8	-14,6	-6,3
	Max	885,0	1,5	-7,7	2,3
	Moyenne	808,3	1,3	-12,6	-3,6
	σ	53,5	0,1	0,9	1,2

2.3.2. Conservation et variabilité par chambre

Les valeurs des indicateurs expérimentaux présentent une variabilité relativement grande à l'échelle des différentes chambres. Aucune différence statistique n'est observée entre le corpus des petites chambres et celui des chambres X81, X83 et X84 au regard des valeurs de PCO_2 et des rapports $\text{PCO}_2/\text{Masse}$ (Test U de Mann-Whitney, p -valeurs $> 0,49$). Il en est de même d'après leurs valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs $> 0,51$).

2.3.3. Conservation et variabilité par niveau de dépôts

Les échantillons de la chambre X80/T16 et ceux de la chambre X82/T18 présentent une très grande variabilité des indicateurs de contrôle au sein des différents niveaux de dépôts mais aussi d'un niveau de dépôts à l'autre. Il n'y a aucune différence statistique entre les différents niveaux de dépôts dans chacune des deux chambres au regard des différents indicateurs expérimentaux (Tests Kruskal-Wallis, p -valeurs $\geq 0,33$). Il en est de même pour les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ dans la chambre X80/T16 et pour celles de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ dans la chambre X82/T18 (Tests Kruskal-Wallis, p -valeurs $\geq 0,23$). En revanche, les niveaux de dépôts dans la chambre X80/T16 se distinguent les uns des autres sur la base des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$ (Test Kruskal-Wallis, p -valeurs = 0,04).

2.3.4. Conservation et variabilité par type de dents

La variabilité des indicateurs expérimentaux est relativement forte au sein du groupe constitué des M2 ($n = 120$) mais relativement limitée au sein du groupe formé M1 et M3 ($n = 4$). Les valeurs de PCO_2 et les rapports $\text{PCO}_2/\text{Masse}$ des M1 et M3 s'inscrivent dans la variabilité de ceux des M2. Les M1, M2 et M3 ne se distinguent pas les uns des autres au regard des différents indicateurs expérimentaux (Tests de Kruskal-Wallis, p -valeurs $> 0,05$), à une exception près, à savoir les M1 et les M2 en fonction des rapports $\text{PCO}_2/\text{Masse}$ (Test U de Mann-Whitney, p -valeur = 0,04). Ces trois groupes de dents ne se distinguent pas non plus les uns des autres au regard des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$. En revanche, ces groupes sont statistiquement différents d'après les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ (Test de Kruskal-Wallis, p -valeur = 0,04).

2.4. Les phases apatitiques de l'os et de l'émail, les sédiments et leurs rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Les $[\text{Sr}]_{\text{os}}$ et les $[\text{Sr}]_{\text{émail}}$ varient respectivement entre 477 et 1207 ppm ($\bar{x} = 722$ ppm ; $\sigma = 287$ ppm ; $n = 5$) et entre 68 et 728 ppm ($\bar{x} = 269$ ppm ; $\sigma = 139$ ppm ; $n = 38$) (Tableau 25 ; Annexe 7). Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ sont compris respectivement entre 0,709841 et 0,710131 ($\bar{x} = 0,709970$; $\sigma = 0,000126$; $n = 5$) et entre 0,706902 et 0,713875 ($\bar{x} = 0,709529$; $\sigma = 0,001183$; $n = 38$) (Tableau 25 ; Annexe 7). Il existe une corrélation entre les $[\text{Sr}]_{\text{os}}$ et les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ ($R^2 = 0,78$) mais aucune entre les $[\text{Sr}]_{\text{émail}}$ et les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ ($R^2 = 0,00$). Il n'y a aucune différence statistique entre le corpus des petites chambres et celui des chambres X81, X83 et X84 au regard des $[\text{Sr}]_{\text{émail}}$ et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ (Tests de Mann-Whitney, p -valeurs $\geq 0,08$). Les $[\text{Sr}]$ et les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des sédiments prélevés *in situ* et pris pour référence locale varient respectivement entre 11 et 61 ppm ($\bar{x} = 40$ ppm ; $\sigma = 20$ ppm ; $n = 5$) et entre 0,709122 et 0,711053

($\bar{x} = 0,79962$; $\sigma = 0,000738$; $n = 5$) (Tableau 25). Les [Sr] et les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont corrélés ($R^2 = 0,53$).

Tableau 25. Synthèse à l'échelle du site des [Sr] et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des phases apatitiques de l'os et de l'émail ainsi que des lixiviats des sédiments prélevés *in situ*.

Phase apatitique		Émail		Os		Lixiviat	
		[Sr]	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	[Sr]	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	[Sr]	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Population	<i>n</i>	5		38		5	
	Min	477	0,709841	68	0,706902	11	0,709122
	Max	1207	0,710131	728	0,713875	61	0,711053
	Moyenne	722	0,709970	269	0,709529	40	0,79962
	σ	287	0,000126	139	0,001183	20	0,000738

2.5. La kératine du cheveu et les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$

Les $\%C_{\text{kér}}$ et les $\%N_{\text{kér}}$ sont compris respectivement entre 38,1 et 48,4 % ($\bar{x} = 46$ % ; $\sigma = 2,4$ % ; $n = 17$) et entre 9,4 et 14,7 % ($\bar{x} = 13,1$ % ; $\sigma = 1,3$ % ; $n = 17$). Les rapports C/N varient entre 3,7 et 4,7 ($\bar{x} = 4,1$; $\sigma = 0,3$) (Tableau 26 ; Annexe 13). Ces derniers sont faiblement corrélés aux $\%C_{\text{col}}$ ($R^2 = 0,17$) et fortement corrélés aux $\%N_{\text{col}}$ ($R^2 = 0,82$). Au total, 13 échantillons – soit 76 % du corpus total – présentent des rapports C/N en dehors de la gamme de valeurs acceptées. Les 4 échantillons dont la kératine est bien préservée détiennent des rapports C/N très proches des limites de la gamme de valeurs acceptables. Les rapports C/N de ces derniers sont corrélés à leurs $\%C_{\text{col}}$ ($R^2 = 0,73$) et à leurs $\%N_{\text{col}}$ ($R^2 = 0,70$). Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ varient respectivement entre -21,5 et -19 ‰ ($\bar{x} = -20,4$ ‰ ; $\sigma = 0,7$ ‰ ; $n = 17$) et entre 10,6 et 14,7 ‰ ($\bar{x} = 12,5$ ‰ ; $\sigma = 1,1$ ‰ ; $n = 17$) (Tableau 26 ; Annexe 13). Que ce soit pour le corpus total ou pour celui constitué des 4 échantillons bien préservés, aucune corrélation n'est observée entre les différents indicateurs de conservation et les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ ($R^2 \leq 0,16$) ou de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ ($R^2 \leq 0,30$), sauf pour les rapports C/N des 4 échantillons dont la kératine est bien préservée et les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ ($R^2 = 0,6$). Les échantillons bien préservés et ceux mal préservés ne présentent aucune différence significative entre eux selon les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ (Test U de Mann-Whitney, p -valeur = 0,61) et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ (Test U de Mann-Whitney, p -valeur = 0,69). Les corpus des chambres X81, X83 et X84 ne se différencient pas statistiquement les uns des autres, et ce, quel que soit le critère de conservation considéré (Tests U de Mann-Whitney, p -valeurs $\geq 0,11$). Les échantillons dont la kératine est bien préservée sont issus des chambres X83 ($n = 2$) et X84 ($n = 2$) (Annexe 13). Il n'y a aucune différence statistique entre les corpus des chambres X81, X83 et X84

(composés avec ou sans les échantillons mal préservés) au regard des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$ (Tests de Mann-Whitney, p -valeurs $\geq 0,13$).

Tableau 26. Synthèse à l'échelle du site des critères de conservation de la kératine et des valeurs isotopiques ($\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$ et $\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$) des échantillons composant le corpus total d'une part et des échantillons dont le collagène est bien préservé d'autre part.

	Phase kératinique du cheveu	Corpus total					Extraits de kératine bien préservés				
		%C _{kér}	%N _{kér}	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ VPDB)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰ AIR)	%C _{kér}	%N _{kér}	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ VPDB)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰ AIR)
Population	<i>n</i>	17					4				
	Min	38,1	9,4	3,7	-21,5	10,6	44	13,8	3,7	-20,5	11,7
	Max	48,4	14,7	4,7	-19	14,7	48,4	14,7	3,8	-20,2	13,6
	Moyenne	46,0	13,1	4,1	-20,4	12,5	46,4	14,3	3,8	-20,4	12,7
	σ	2,4	1,3	0,3	0,7	1,2	1,9	0,4	0,0	0,1	1,1

3. CARACTERISATION DES ALTERATIONS DIAGENETIQUES DE LA PHASE CARBONATEE DE L'OS PAR SPECTROSCOPIE IRTF

3.1.1. Avant purification la phase minérale de l'os

Le matériel de référence – os frais d'animaux (Section III, 1.3) – présente des valeurs IRSF relativement faibles (Moyenne = 3,4 ; $\sigma = 0,1$) ainsi que des rapports CO_3/PO_4 relativement élevés (Moyenne = 0,85 ; $\sigma = 0,10$) (Tableau 27 ; Figure 40A). De plus, ce matériel montre des rapports Amidel/ PO_4 également relativement élevés (Moyenne = 1,00 ; $\sigma = 0,15$) (Tableau 27 ; Figure 40B et C). Ces résultats sont en adéquation avec les gammes de valeurs présentées précédemment dans la (Section III, 1.3), pour les os modernes.

Tableau 27. Résultats des analyses IRTF réalisées sur la phase carbonatée de 4 os d'animaux modernes

Taxon	Références modernes (avant traitement)		
	IRSF	CO_3/PO_4	Amidel/ PO_4
Bœuf	3,57	0,73	0,89
Veau	3,20	1,01	1,21
Cheval	3,40	0,84	0,91
Mouton	3,26	0,83	0,99

À l'exception de trois échantillons, tous les os humains issus des différentes chambres de la catacombe SSPM ont des valeurs IRSF plus élevées et des rapports CO_3/PO_4 plus faibles que les os modernes utilisés comme référence (Tableaux 27 et 28 ; Figure 40A). Les valeurs IRSF mesurées sur les échantillons archéologiques avant tout traitement chimique varient entre 3,6 et 5,1 (Moyenne 4,3 ; $\sigma = 0,4$) (Tableau 28). Ces mêmes échantillons présentent en outre des rapports CO_3/PO_4 compris entre 0,15 et 1,01 (Moyenne = 0,49 ; $\sigma = 0,20$) (Tableau 28). Les valeurs IRSF des ossements humains sont négativement corrélées aux rapports CO_3/PO_4 (Figure 40A). Aucune trace de calcite n'a été détectée – limite de détection autour de 1,5 % - dans les échantillons d'os non-traités. Les échantillons humains détiennent de plus des rapports Amidel/ PO_4 plus faibles que le matériel faunique moderne analysé ici (Tableaux 27 et 28). Ces rapports oscillent entre 0,07 et 0,86 (Moyenne = 0,35 ; $\sigma = 0,25$) (Tableau 28). Les rapports Amidel/ PO_4 et CO_3/PO_4 sont positivement corrélés ($R^2 = 0,76$) (Figure 40B). De même, les rapports Amidel/ PO_4 et les valeurs IRSF sont négativement corrélés ($R^2 = 0,59$) (Figure 40C). Par ailleurs, les échantillons issus des petites chambres X80/T16 et X82/T18 présentent des valeurs IRSF plus élevées, des rapports CO_3/PO_4 plus faibles ainsi que des rapports Amidel/ PO_4 également plus faibles que les échantillons issus des grandes chambres X83 et X84 (Tableau 27 ; Figure 40). Ces deux groupes d'échantillons sont statistiquement différents l'un de l'autre au regard de l'ensemble des indices IRTF (Tests U de Mann-Whitney, p-valeurs < 0,03).

3.1.2. Après purification de la phase minérale de l'os

À la suite des prétraitements chimiques mis en œuvre pour purifier la phase minérale de l'os, les échantillons analysés voient leurs valeurs d'indice de cristallinité augmentées et leurs teneurs relatives en CO_3 diminuées (Tableau 28). Ces échantillons présentent plus précisément après traitements des valeurs IRSF variant entre 4,05 et 5,40 (Moyenne = 4,6 ; $\sigma = 0,3$) (Tableau 28), des rapports CO_3/PO_4 compris entre 0,11 et 0,52 (Moyenne = 0,28 ; $\sigma = 0,10$) (Tableau 28) et enfin des rapports Amidel/ PO_4 oscillant entre 0,01 et 0,26 (Moyenne = 0,09 ; $\sigma = 0,05$) (Tableau 28). Les valeurs IRSF restent fortement corrélées aux rapports CO_3/PO_4 ($R^2 = 0,74$) (Figure 40A) après les prétraitements chimiques. Les rapports Amidel/ PO_4 s'avèrent moins fortement corrélés aux valeurs CO_3/PO_4 ($R^2 = 0,62$) (Figure 40B) et non corrélés aux valeurs IRSF ($R^2 = 0,29$) (Figure 40C) après traitements.

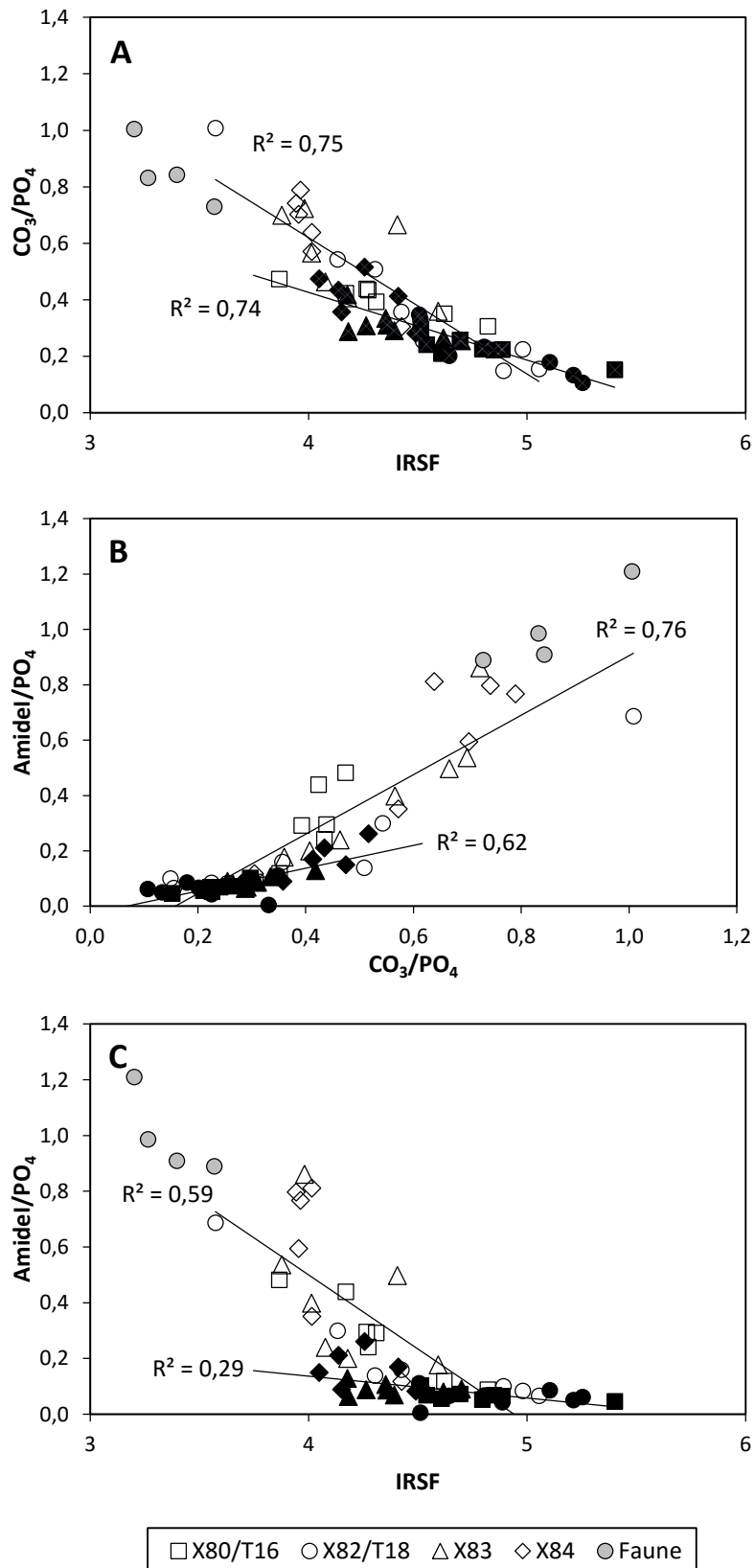


Figure 40. Relations entre les valeurs IRSF et les rapports CO_3/PO_4 (A), entre les rapports CO_3/PO_4 et Amidel/ PO_4 (B) et entre les valeurs IRSF et les rapports Amidel/ PO_4 (C) des échantillons issus de 4 chambres (n = 30)

Note : Les échantillons en blanc n'ont subi aucun prétraitement chimique à l'inverse des échantillons en noir. Les os de faune servent de valeurs de référence pour des échantillons modernes.

Tableau 28. Résultats des analyses IRTF réalisées sur la phase carbonatée d'un sous-échantillon de 30 sujets issus de 4 chambres différentes

Salles	Identifiant	Avant purification			Après purification		
		IRSF	CO ₃ /PO ₄	Amidel/PO ₄	IRSF	CO ₃ /PO ₄	Amidel/PO ₄
X80/T16	Sq003	4,31	0,39	0,29	4,51	0,30	0,10
	Sq009	4,27	0,43	0,24	4,89	0,22	0,06
	Sq024	4,17	0,42	0,44	4,54	0,24	0,07
	Sq030	4,62	0,35	0,12	4,69	0,26	0,07
	Sq045	4,82	0,31	0,09	5,40	0,15	0,05
	Sq060	3,86	0,47	0,48	4,85	0,22	0,07
	Sq067	4,27	0,44	0,30	4,80	0,23	0,05
	Sq079	-	-	-	4,61	0,21	0,06
X82/T18	Sq007	5,05	0,16	0,07	5,21	0,13	0,05
	Sq019	4,52	0,25	0,08	4,64	0,20	0,07
	Sq032	3,57	1,01	0,69	4,51	0,33	0,01
	Sq037	4,13	0,54	0,30	4,80	0,23	0,07
	Sq060	4,42	0,36	0,16	4,51	0,35	0,11
	Sq064	4,89	0,15	0,10	5,25	0,11	0,06
	Sq071	4,98	0,22	0,08	5,10	0,18	0,09
	Sq079	4,30	0,51	0,14	4,89	0,23	0,04
X83	Sq093=113=115	4,59	0,36	0,18	4,62	0,26	0,08
	Sq096	4,41	0,67	0,50	4,18	0,42	0,13
	Sq122	4,18	0,41	0,20	4,36	0,31	0,09
	US212 Mand1	3,98	0,72	0,86	4,26	0,31	0,09
	US215 Mand1	4,08	0,46	0,24	4,39	0,29	0,07
	US216 Mand1	-	-	-	4,18	0,29	0,06
	US216 Mand2	4,01	0,57	0,40	4,70	0,25	0,09
US216 Mand3	3,88	0,70	0,54	4,35	0,33	0,11	
X84	Sq140	3,94	0,74	0,80	4,26	0,52	0,26
	Sq178	4,01	0,64	0,81	4,14	0,43	0,21
	Sq179=197	3,96	0,79	0,77	4,41	0,41	0,17
	Sq203	3,95	0,70	0,59	4,15	0,36	0,09
	Sq205	4,01	0,57	0,35	4,05	0,47	0,15
	Sq208	4,43	0,30	0,12	4,49	0,28	0,08

4. DATATIONS ¹⁴C SUR COUPLES COLLAGENE-CARBONATE

Les âges ¹⁴C_{col} des 5 individus prélevés varient entre 1779 ± 27 BP et 1965 ± 31 BP (Tableau 29 ; Figures 41, 42 et 43). Les âges ¹⁴C_{carb (os)} varient entre 1690 ± 27 BP et 1848 ± 22 BP (Tableau 29 ; Figures 41, 42 et 43). Les différences d'âge ¹⁴C_{col-carb (os)} sont comprises entre -1 ± 40 années ¹⁴C et 153 ± 46 années ¹⁴C (Tableau 29). À l'exception d'un seul individu (US216/Mand1, chambre X83) pour

lequel les âges mesurés sur les deux phases de l'os sont identiques, les âges mesurés sur la phase apatitique sont toujours plus jeunes que ceux mesurés sur la phase collagénique d'un os donné (Tableau 29 ; Figures 41, 42 et 43). En moyenne, cette différence est de 86 ± 89 BP (Tableau 29 ; Figures 41, 42 et 43). Les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ sont positivement corrélés aux valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ ($R^2 = 0,95$), négativement corrélés aux valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ ($R^2 = 0,68$), et enfin non corrélés aux valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ ($R^2 = 0,24$). Les âges $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ sont, quant à eux, négativement corrélés aux valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ ($R^2 = 0,86$) et non corrélés aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ ($R^2 = 0,01$). Les différences d'âges $^{14}\text{C}_{\text{col-carb}}$ ne sont aucunement corrélées aux valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ ou de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ ($R^2 < 0,42$) mais sont négativement corrélées aux valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ ($R^2 = 0,88$). En termes d'activité ^{14}C , les valeurs de $F^{14}\text{C}$ de la phase collagénique varient entre $78,30 \pm 0,31$ et $80,13 \pm 0,26$ pMC tandis que les valeurs de $F^{14}\text{C}$ de la phase apatitique carbonatée varient entre $79,45 \pm 0,22$ et $81,02 \pm 0,27$ pMC, soit une différence d'activité d'environ 1 % entre les deux phases de l'os et ce en faveur de la phase apatitique (Tableau 29).

Tableau 29. Présentation des âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ et $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ conventionnels (BP) et calibrés (cal BC/AD), des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$, ainsi que des différences d'âges $^{14}\text{C}_{\text{col-carb (os)}}$ de 5 individus issus des chambres X80/T16, X82/T18 et X83

Salle	Identifiant	Collagène						Carbonate (os)						Différences	
		# ^{14}C	Âge ^{14}C BP	Âge ^{14}C cal BC/AD	F ^{14}C pMC	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ VPDB)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰ AIR)	# ^{14}C	Âge ^{14}C BP	Âge ^{14}C cal BC/AD	F ^{14}C pMC	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ VPDB)	Âge ^{14}C BP	F ^{14}C pMC
X80/T16	017	Beta-346785	1880 ± 30	66-222	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	024	UBA-20207	1851 ± 27	85-234	79,42 ± 0,26	-18,7	9,8	UBA-20202	1709 ± 26	255-402	80,84 ± 0,26	-13,4	-4,8	142 ± 37	1,42 ± 0,37
	038	Ly-13761	1910 ± 30	21-210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	065	Beta-346786	1870 ± 30	73-226	-	-18,9	11,7	-	-	-	-	-14,4	-4,4	-	-
	079	UBA-20208	1891 ± 30	55-217	79,02 ± 0,29	-18,6	11,5	UBA-20205	1848 ± 22	87-235	79,45 ± 0,22	-14,6	-3,3	43 ± 37	0,43 ± 0,36
X82/T18	032	UBA-20211	1785 ± 27	135-330	80,07 ± 0,27	-19	11	UBA-20203	1690 ± 27	258-417	81,02 ± 0,27	-12,8	-3,0	95 ± 38	0,95 ± 0,38
	064	UBA-20209	1965 ± 31	-42-118	78,30 ± 0,31	-17,8	10,1	UBA-20204	1812 ± 34	92-324	79,81 ± 0,34	-14,4	-4,1	153 ± 46	1,51 ± 0,46
	074	Beta-346788	1870 ± 30	73-226	-	-	-	-	-	-	-	-13,6	-1,6	-	-
	079	Lyon-8814(SacA-27773)	1855 ± 30	83-233	-	-19	11,5	-	-	-	-	-10,2	-2,6	-	-
X83	015	Lyon-8813(SacA-27772)	1865 ± 30	77-228	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	170	Lyon-8744(GrA)	1855 ± 30	83-233	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	US216 Mand1	UBA-20210	1779 ± 27	137-336	80,13 ± 0,26	-19,1	11,6	UBA-20206	1780 ± 29	136-336	80,13 ± 0,29	-13,4	-4,1	-1 ± 40	0,00 ± 0,39
	Bas de strati.	Beta-278223	1770 ± 40	137-380	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Note : Les âges ^{14}C que nous avons mesuré sont en gras. Les âges ^{14}C obtenus par Dominique Castex et Philippe Blanchard sont également reportés pour comparaison. La calibration des âges conventionnels a été réalisée avec le logiciel Oxcal v.4.2.3 (IntCal13).

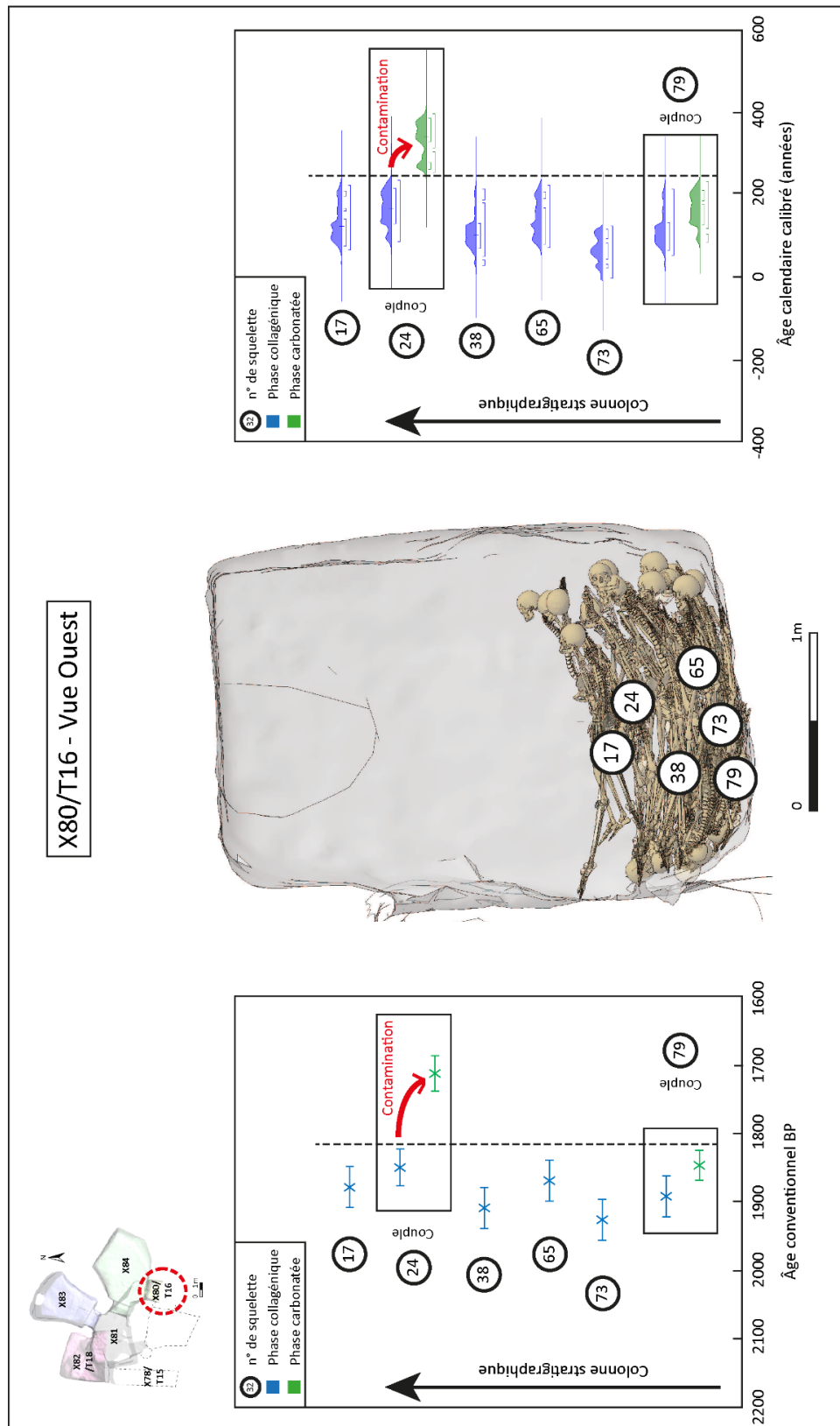


Figure 41. Séquence stratigraphique de la chambre X80/T16 avec seulement les squelettes échantillonnés en vue d'analyses isotopiques (vue Ouest) et projection des âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ et $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ calibrés (cal BC/AD). Note : Les âges ^{14}C mesurés sur les couples collagène-carbonate sont ceux obtenus au cours de cette étude. Les âges supplémentaires sont ceux obtenus par Dominique Castex et Philippe Blanchard (communications personnelles). La reconstruction 3D de la chambre et des squelettes a été réalisée par Géraldine Sachau (communication personnelle).

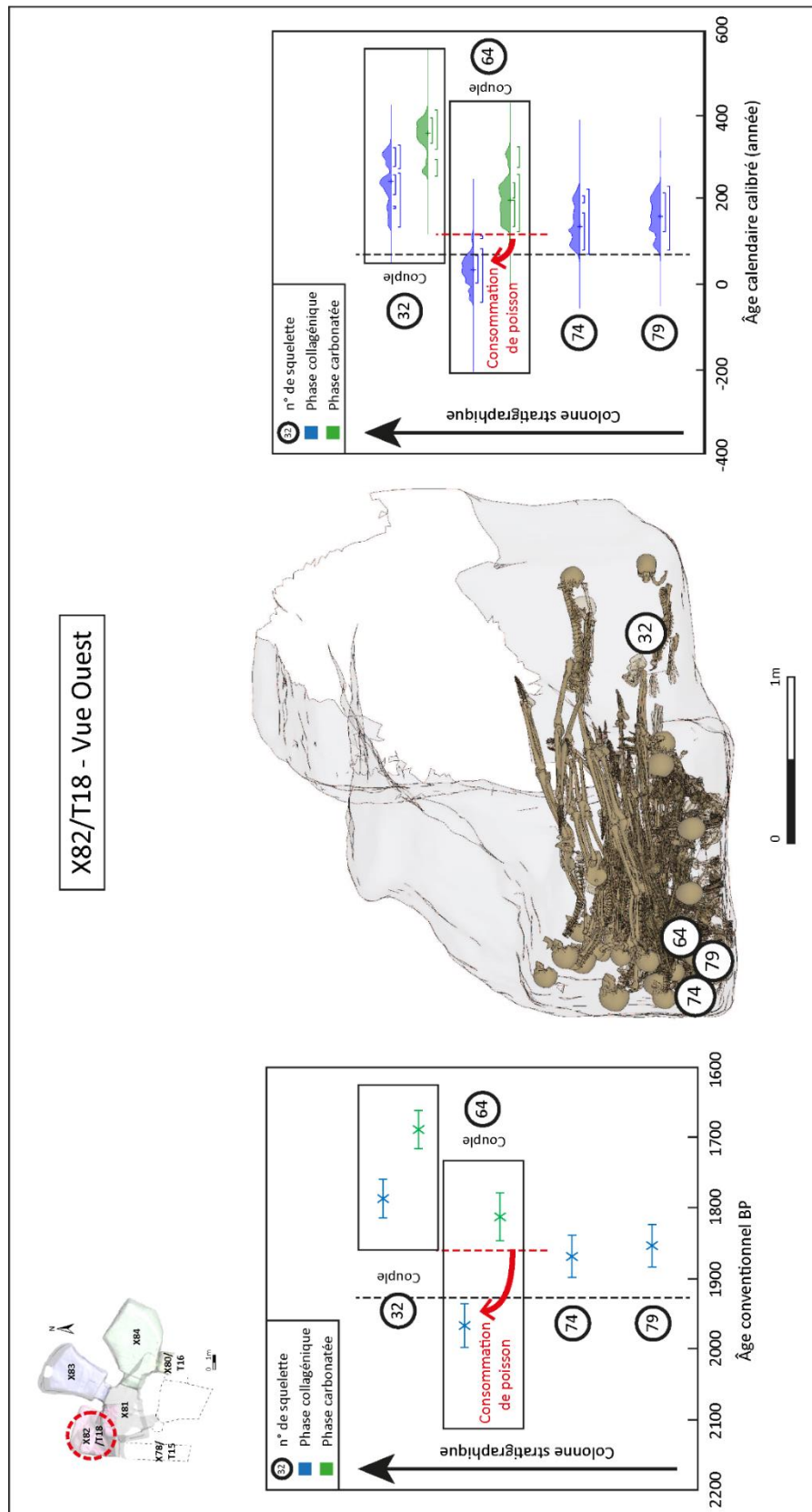


Figure 42. Séquence stratigraphique de la chambre X82/T18 avec seulement les squelettes échantillonnés en vue d'analyses isotopiques (vue Ouest) et projection des âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ et $^{14}\text{C}_{\text{carb(0s)}}$ calibrés (cal BC/AD).
 Note : Les âges ^{14}C mesurés sur les couples collagène-carbonate sont ceux obtenus au cours de cette étude. Les âges supplémentaires sont ceux obtenus Dominique Castex et Philippe Blanchard (communications personnelles). La reconstruction 3D de la chambre et des squelettes a été réalisée par Géraldine Sachau (communication personnelle).

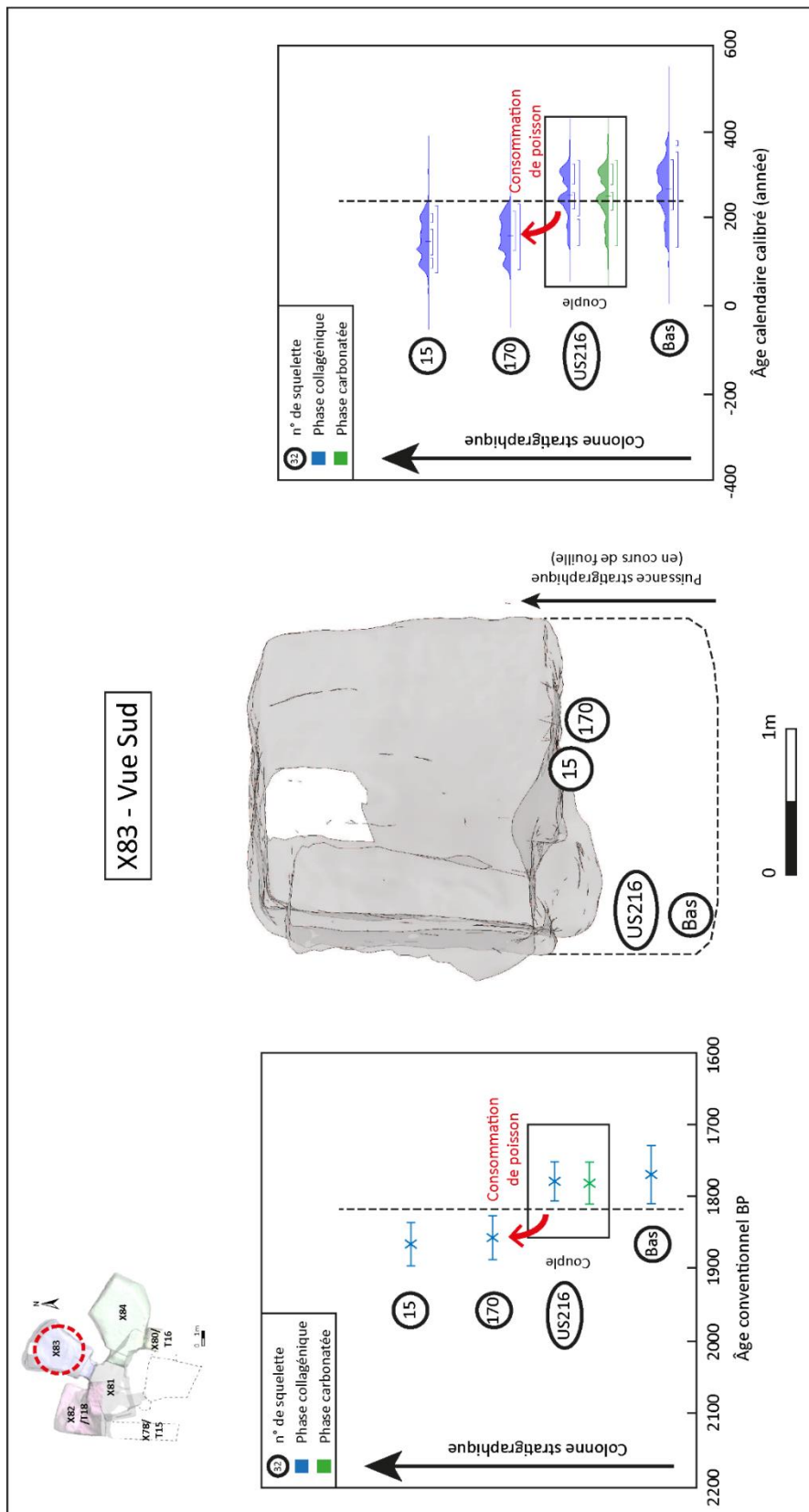


Figure 43. Séquence stratigraphique de la chambre X83 avec seulement les squelettes échantillonnés en vue d'analyses isotopiques (vue Sud) et projection des âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ et $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ calibrés (cal BC/AD).
 Note : Les âges ^{14}C mesurés sur les couples collagène-carbonate sont ceux obtenus au cours de cette étude. Les âges supplémentaires sont ceux obtenus par Dominique Castex et Philippe Blanchard (communications personnelles). La reconstruction 3D de la chambre et des squelettes a été réalisée par Géraldine Sachau (communication personnelle).

CHAPITRE V.

Discussion

1. VALIDITE DU PROTOCOLE DE PURIFICATION DES CARBONATES DE L'OS UTILISE

1.1. Efficacité des prétraitements

1.1.1. Effets à T0

Les spectres RMN ^{13}C et RMN ^1H à T0 mettent en évidence une dégradation modérée en quantité comme en qualité du collagène osseux (Figures 31 et 32), une perte très importante des lipides constitutifs (Figures 31, 32, 33 et 34) ainsi qu'une perte relativement faible de l'eau (Figures 33 et 34) dans ces échantillons des collections de SSPM et de Saint-Benoît.

1.1.2. Effets à T1

Les spectres RMN ^{13}C à T1 démontrent l'efficacité de l'action du NaOCl utilisé pour oxyder la matière organique et faciliter l'attaque chimique subséquente au CH_3COOH (Figures 31 et 32). Les spectres RMN ^1H à T1 mettent en évidence une perte d'eau des échantillons de la collection SSPM entre T0 et T1 (Figure 33). Le séchage par étuvage durant plusieurs heures à 60°C à la fin de T1 est probablement à l'origine de cette perte en eau résiduelle des échantillons. Ce fait n'est cependant pas observé pour les échantillons de la collection Saint-Benoît (Figure 34), probablement en raison d'une réhydratation des échantillons après séchage. Les spectres RMN ^1H à T1 mettent cependant en évidence pour l'ensemble des échantillons une augmentation de la concentration en apatite, et donc par ce fait d'une concentration des ions OH^- , dans les aliquotes analysées à T1 comparativement à celles analysées à T0 (Figures 33 et 34). En effet, après élimination de la matière organique, l'échantillon à T1 s'apparente davantage à une apatite poly-substituée pure qu'à T0, de sorte que la concentration en apatite, mais également celle en ions substitués, pour une masse d'échantillon analysée égale, augmente.

1.1.3. Effets à T2 et T2Bis

Les profils spectraux de RMN ^{13}C à T2 et T2Bis révèlent une élimination différentielle de la matière organique entre T1 et T2 ou entre T1 et T2Bis. Cela s'observe malgré le fait que le traitement au NaOCl soit réalisé dans des conditions expérimentales similaires à T1, T2 et T2Bis (temps d'immersion, concentration, température, volume) et que celui-ci ait été appliqué sur des aliquotes formées à partir des 10 mêmes échantillons. Le nombre de répétitions de la phase d'agitation des échantillons pourrait être à l'origine de cette différence d'efficacité du traitement au NaOCl (Figures 31 et 32).

L'absence de raie caractéristique des CO_3 substitués (type A et/ou B) de la phase carbonatée de l'os entre 166 et 170 ppm sur les spectres RMN ^{13}C à T0, T1, T2 et T2Bis (Figures 31 et 32) peuvent s'expliquer de plusieurs façons. D'une part, la faible abondance naturelle du ^{13}C ($\approx 1,1\%$; cf. Tableau 1) combinée à la faible concentration en ions CO_3^{2-} de la phase minérale de l'os ($\pm 6\%$; cf. Section II, section 2.2.2) rend difficilement détectable le C des carbonates par RMN ^{13}C . Les apatites carbonatées synthétiques étudiées par RMN ^{13}C sont en effet en règle générale enrichies en ^{13}C pour faciliter l'identification des raies correspondant aux différentes positions cristallographiques des ions CO_3^{2-} (Beshah *et al.* 1990 ; Kolodziejski 2004 ; Errassifi 2011 ; Wang 2012). D'autre part, la spécificité de la séquence CP-MAS permet une meilleure détection des ^{13}C lorsqu'ils sont liés à des ^1H grâce au transfert de polarisation $^1\text{H} \rightarrow ^{13}\text{C}$ (Metz *et al.* 1996). Le C des carbonates n'étant jamais en liaison covalente directe avec les atomes d'hydrogène, le transfert de polarisation est donc sinon inefficace, du moins peu opérant. En revanche l'absence d'un pic à 168 ppm, constatée sur l'ensemble des spectres RMN ^{13}C à T2 que nous avons obtenus (Figures 31 et 32), suggérerait qu'aucun carbonate d'origine diagénétique n'ait été adsorbé par les échantillons issus des collections SSPM et Saint-Benoît ou que ces carbonates soient présents en trop faible quantité pour être détectés par RMN.

Les spectres RMN ^1H montrent à T2 et T2Bis qu'en plus de l'élimination de l'eau résiduelle, une élimination d'une partie de l'eau adsorbée suite au traitement au CH_3COOH et au séchage par étuvage a probablement eu lieu (Wang *et al.* 2013) (Figures 33 et 34). La différence de perte d'eau constatée entre T2 et T2Bis pourrait être due à une différence d'élimination de l'eau adsorbée des échantillons par le CH_3COOH ayant une concentration plus faible à T2Bis qu'à T2.

Les spectres RMN ^1H à T2 pour les échantillons de la collection SSPM mettent en évidence une perte d'ions OH^- imputable à l'action du CH_3COOH (Figure 33). Malgré le fait que les spectres RMN ^1H ne nous permettent pas de montrer directement un effet de l'action du CH_3COOH sur les CO_3 substitués dans la structure apatitique, nous pouvons toutefois émettre l'hypothèse qu'une perte d'ions CO_3^{2-} de type A (*i.e.* en lieu et place des ions OH^-) a probablement été concomitante à celle d'ions OH^- . Cette perte d'ions suggérerait donc que la structure apatitique ait été partiellement

altérée par l'utilisation du CH_3COOH . Les ions substitués étant par définition moins labiles que les ions adsorbés, l'élimination au cours du traitement au CH_3COOH à T2 des ions OH^- et probablement CO_3^{2-} incorporés dans le réseau cristallin sous-entend qu'une élimination préalable des ions CO_3^{2-} d'origine diagénétique potentiellement présents à la surface du réseau cristallin ait eu lieu. Enfin, la diminution de l'intensité de la raie correspondant aux groupes hydroxyles (Figure 21) indiquerait qu'aucune recristallisation ne s'est réalisée durant le traitement au CH_3COOH . Les spectres RMN ^1H à T2Bis pour les échantillons de la collection SSPM mettent en évidence une perte d'ions OH^- au cours du traitement au CH_3COOH traduisant une altération de la structure apatitique de ces échantillons (Figure 33). Cette altération est néanmoins moins importante à T2Bis qu'à T2. Ce fait pourrait s'expliquer par la différence de concentration de l'acide utilisé, moins fort à T2Bis qu'à T2.

Les spectres RMN ^1H à T2 pour les échantillons de la collection Saint-Benoît montrent une perte d'eau (Figure 34). Cependant, contrairement à ce que nous avons pu évoquer pour les échantillons de la collection SSPM à T2, il ne nous est pas possible de distinguer ici si l'eau éliminée des échantillons est plutôt une eau résiduelle ou une eau adsorbée, en raison de la réhydratation des échantillons de la collection Saint-Benoît après le processus de séchage à T1. Par ailleurs, aucune perte d'ions OH^- ne semblerait avoir eu lieu durant le traitement au CH_3COOH . La structure apatitique de l'os n'a donc pas été altérée par ce traitement contrairement à ce que nous avons pu observer pour les échantillons de la collection SSPM à T2. En revanche, les spectres RMN ^1H à T2Bis pour les échantillons de la collection de Saint-Benoît démontrent qu'aucune altération de la structure apatitique n'a eu lieu pour ces 5 échantillons au cours du traitement au CH_3COOH , et ce quel que soit la concentration d'acide utilisée (Figure 34).

1.2. Influence des prétraitements sur les teneurs isotopiques

L'évolution des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ entre T0 et T1 (Tableau 21 ; Figure 35 ; Annexe 6) pourrait s'expliquer par une précipitation de bicarbonate (HCO_3) ou de bicarbonate de sodium (NaHCO_3) sur les échantillons au cours du traitement au NaOCl (Zazzo *et al.* 2006). Initialement absents de la solution de NaOCl utilisée, ces éléments se formeraient suite à une réaction entre CO_2 atmosphérique dissout dans la solution, l'eau (H_2O) de cette solution voire le sodium (Na) présent dans cette solution. La précipitation de ces éléments serait rendue possible du fait du pH légèrement basique de la solution de NaOCl (Antoine Zazzo, communication personnelle). Ainsi, l'augmentation des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ constatée entre T0 et T1 serait imputable à un apport de C du CO_2 atmosphérique, lequel présente une valeur de $\delta^{13}\text{C}$ d'environ -8 ‰.

L'évolution des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ entre T1 et T2 ou entre T1 et T2Bis (Tableau 21 ; Figure 35 ; Annexe 6) est probablement due à l'action du CH_3COOH permettant 1) d'éliminer les HCO_3 et

NaHCO₃ précédemment précipités sur l'échantillon durant le traitement au NaOCl et donc de recouvrer le signal isotopique des échantillons à T0 (Zazzo *et al.* 2006), et 2) d'éliminer, lorsque ceux-ci sont présents, les carbonates d'origine diagénétique adsorbés à la surface du réseau cristallin ayant pour effet une légère modification des teneurs isotopiques mesurées à T0 (Koch *et al.* 1997 ; Garvie-Lok *et al.* 2004 ; Yoder et Bartelink 2010).

La différence constatée entre les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ à T2 et T2Bis (Tableau 21 ; Figure 35 ; Annexe 6) pourrait être due à 1) une meilleure efficacité du protocole T2 que du protocole T2Bis pour éliminer les HCO₃ et NaHCO₃ précipités ainsi que les CO₃ adsorbés, ou à 2) une altération de la structure apatitique des échantillons plus importante à T2Bis qu'à T2 engendrant une modification du signal isotopique biogénique. Cette première hypothèse serait à privilégier pour les échantillons de la collection Saint-Benoît, lesquels au vu des spectres RMN ¹H (Figure 34) sembleraient n'avoir subi aucune altération de leur structure apatitique imputable aux différents prétraitements. En revanche, la seconde hypothèse expliquerait davantage les effets sur les teneurs isotopiques observées pour les échantillons de la collection SSPM. En effet, au vu des spectres RMN ¹H (Figure 33), il semblerait qu'une altération de la phase minérale de l'os ait bien eu lieu et que celle-ci serait plus importante à T2 qu'à T2Bis. Cette altération pourrait être responsable d'une perte plus importante d'ions CO₃²⁻ de type A à T2 par rapport à T2Bis, et ce en raison de la concentration plus forte du CH₃COOH utilisée à T2 par rapport à T2Bis.

Les protocoles T2 ou T2Bis semblent pouvoir être indifféremment utilisés sur les échantillons de la collection SSPM en raison des différences relativement faibles, voire négligeables, constatées entre les valeurs isotopiques entre T2 et T2Bis. Inversement et paradoxalement, le protocole T2 semble plus adapté pour les échantillons de la collection Saint-Benoît en raison des différences de valeurs isotopiques relativement fortes observées entre T2 et T2Bis, et ce alors même qu'aucune altération de la phase carbonatée n'ait été mise en évidence par RMN. Le protocole T2 permettrait donc d'éliminer plus efficacement les HCO₃, NaHCO₃ et les CO₃ d'origine diagénétique des échantillons de la collection de Saint-Benoît.

Le fait que les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ soient toujours plus négatives à T1 qu'à T0 (Tableau 21 ; Figure 35 ; Annexe 6) est quelque peu étonnant et à contre-courant des données précédemment publiées (Koch *et al.* 1997 ; Garvie-Lok *et al.* 2004 ; Yoder et Bartelink 2010). Les auteurs s'étant intéressés à la question des effets isotopiques engendrés par les différents prétraitements mis en œuvre pour purifier la phase carbonatée des os montrent qu'en règle générale une augmentation des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ a lieu entre T0 et T1. Les causes de cette augmentation sont cependant généralement éludées. Dans notre cas, la baisse des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ entre T0 et T1 semblerait être liée à un apport en oxygène issu d'une source appauvrie en ¹⁸O par rapport à l'os. Au vu des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ du CO₂ atmosphérique – variant entre +2,9 et -1,9 ‰ d'après Keeling (1958 et 1961) et

Amundson *et al.* (1998) – ce dernier ne semble pas pouvoir être à l'origine des modifications constatées entre T0 et T1. Malheureusement, en l'état actuel de nos connaissances et des données publiées nous ne sommes pas en mesure de pouvoir expliquer cet effet isotopique que nous observons. Des analyses complémentaires devront être réalisées dans le futur pour nous permettre de mieux appréhender les causes de cette influence des prétraitements sur les valeurs isotopiques.

L'évolution des valeurs $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ entre T1 et T2 ou entre T1 ou T2Bis (Tableau 21 ; Figure 35 ; Annexe 6) serait due vraisemblablement à 1) une élimination des composés ou ions appauvris en ^{18}O précédemment précipités ou adsorbés à T1, et 2) une élimination des CO_3 d'origine diagénétique présents dans les échantillons à T0.

Comme pour les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$, la différence des valeurs $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ entre T2 et T2Bis (Tableau 21 ; Figure 35 ; Annexe 6) pourrait être due à 1) une élimination plus efficace à T2 qu'à T2Bis des CO_3 d'origine diagénétique et des composés ou ions appauvris en ^{18}O formés durant le traitement au NaOCl, ou 2) une altération plus importante à T2 qu'à T2Bis de la structure apatitique des échantillons. Il nous est cependant impossible de privilégier l'une ou l'autre de ces deux hypothèses dans le cas présent pour les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ puisque nous ne comprenons pas à ce stade l'effet isotopique provoqué par le NaOCl et l'appauvrissement des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ qui en découle.

Enfin, comme évoqué précédemment, en l'état de nos connaissances actuelles nous ne pouvons pas conclure concernant lequel de T2 ou T2Bis est le plus efficace pour éliminer les contaminants d'origine diagénétique au regard des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$.

1.3. Synthèse

En somme, nous avons pu montrer que les différentes étapes des protocoles T2 et T2Bis engendrent des effets isotopiques importants mais similaires d'un échantillon à l'autre au sein de chaque collection étudiée (Figure 44). Ces effets sont induits soit par un apport en C ou en O aux échantillons durant le traitement au NaOCl (précipitation de HCO_3^- , de NaHCO_3 ou autres), soit par une élimination des composés précédemment formés et des CO_3 d'origine diagénétique lors du traitement au CH_3COOH .

Nos résultats mettent également en évidence une meilleure efficacité du protocole T2 par rapport au protocole T2Bis pour éliminer les HCO_3^- , NaHCO_3 et CO_3 exogènes au regard des spectres RMN et des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ pour les échantillons de la collection Saint-Benoît. Concernant les échantillons de la collection SSPM, les protocoles T2 et T2Bis démontrent une efficacité comparable pour éliminer les HCO_3^- , NaHCO_3 et CO_3 exogènes d'après les spectres RMN et les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ que nous avons obtenus. Cependant, en raison d'un inexplicable appauvrissement à T1 des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$, nous ne sommes pas en mesure de conclure à ce stade de nos recherches lequel de T2 ou

T2Bis est le plus efficace pour éliminer les contaminants d'origine diagenétique au regard des spectres RMN et des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ que nous avons réalisés.

Finalement, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ que nous avons mesurées à T2 et à T2Bis sont, en dépit des différences observées, relativement similaires et peuvent être considérées comme comparables.

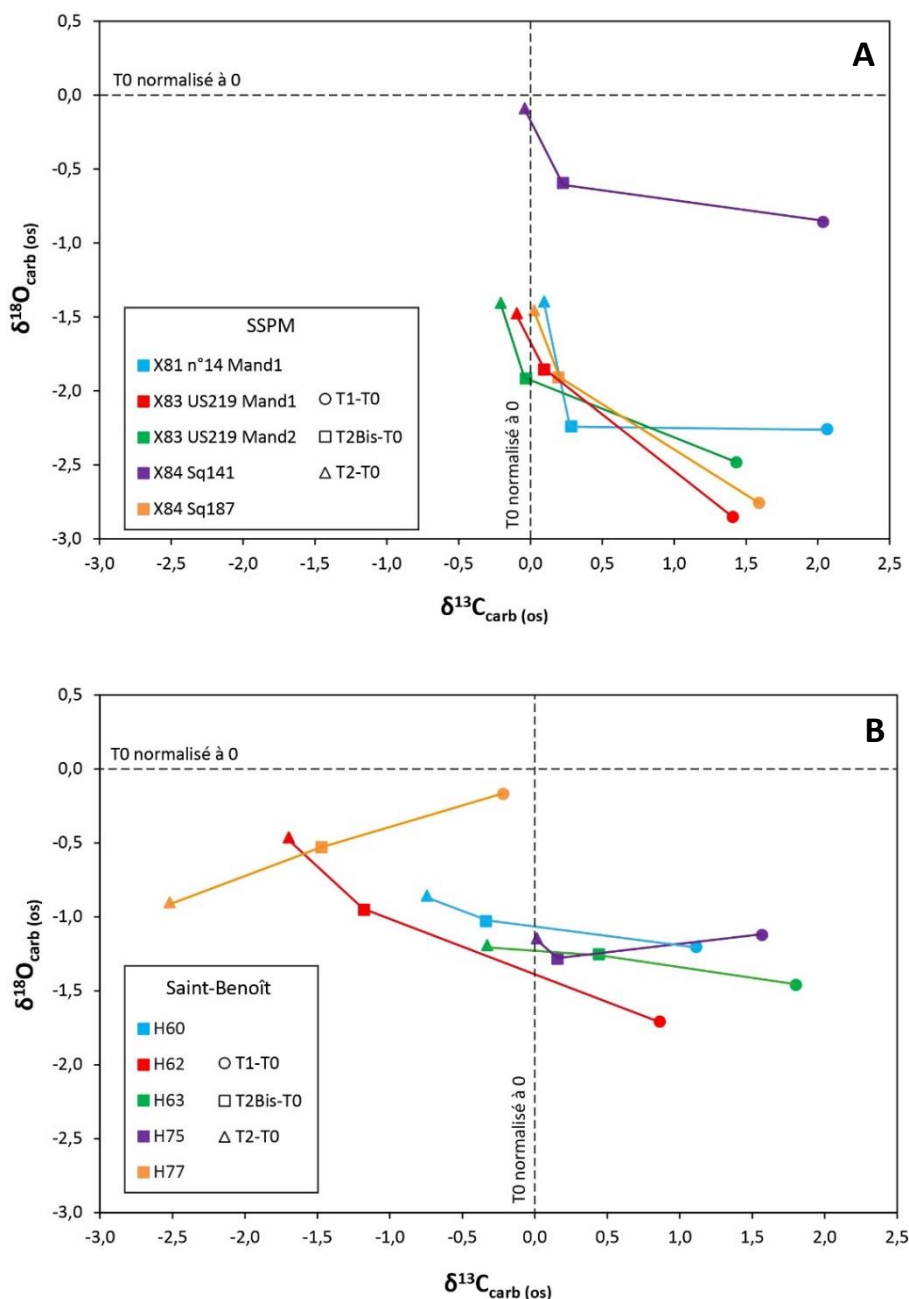


Figure 44. Effets isotopiques enregistrés à T1, T2 et T2Bis normalisés par rapport à T0 pour les échantillons des collections SSPM (A) et Saint-Benoît (B)

2. PRESERVATION DES SIGNAUX ISOTOPIQUES BIOGENIQUES

2.1. Trajectoire diagénétique

Les valeurs IRSF calculées pour les échantillons osseux issus des sépultures plurielles de la catacombe SSPM indiquent que les os prélevés sont moyennement voire fortement recristallisés (Tableau 28 ; Figure 40A). La présence d'un pic à 1093 cm^{-1} et d'épaulements à 3570 cm^{-1} and 630 cm^{-1} sur les spectres IRTF des os les plus altérés plaident en faveur d'une recristallisation de la phase carbonatée des os en hydroxyapatite pure. La corrélation négative observée entre les valeurs IRSF et celles du rapport CO_3/PO_4 (Figure 40A) indiquent que d'importants processus de dissolution/recristallisation de la phase minérale des os ont eu lieu après le dépôt des corps dans les sépultures plurielles de la catacombe SSPM (Nielsen-Marsh et Hedges 2000). Une telle altération est fréquemment liée à une perte de matière organique. Ceci est par ailleurs confirmé ici par la corrélation positive existant entre les valeurs des rapports CO_3/PO_4 et Amide I/ PO_4 (Figure 40B). Cette relation est liée à l'étroite imbrication à l'échelle nanométrique de la matrice de fibrilles de collagène et des cristaux d'apatite dans l'os. En effet, une dissolution de la phase minérale de l'os expose la phase organique aux altérations physico-chimiques et biologiques. La dégradation de la phase organique de l'os augmente les microporosités dans la phase apatitique et favorise à son tour les interactions entre cette dernière et l'eau environnementale (Collins *et al.* 2002 ; Hedges 2002). Deux mécanismes sont généralement responsables de la dégradation de la phase organique de l'os, à savoir les attaques de microorganismes (bactéries, champignons et protozoaires) et l'hydrolyse chimique. Les attaques bactériennes résultent généralement en une perte de l'intégrité chimique du collagène ainsi qu'en une diminution de la quantité de collagène dans l'os total (Child 1995 ; Balzer *et al.* 1997 ; Grupe 2001 ; Harbeck et Grupe 2009). Ce phénomène prend place rapidement après le décès d'un individu et continue après l'inhumation du défunt (Collins *et al.* 2002). L'hydrolyse chimique quant à elle est un mécanisme généralement plus lent bien que des conditions micro-environnementales peuvent accélérer sa mise en place (Child 1995 ; Hedges 2002 ; Smith *et al.* 2002). Le manque de données concernant l'état histologique des échantillons osseux que nous avons analysés nous empêche d'arbitrer en faveur de l'une de ces deux hypothèses de dégradation du collagène. Cependant, les données archéologiques semblent indiquer que les deux mécanismes peuvent avoir eu lieu de façon concomitante. La décomposition simultanée ou quasi-simultanée d'un grand nombre de corps dans les sépultures plurielles de la catacombe SSPM pourrait avoir été propice au développement des microorganismes. De plus, les chambres funéraires de la catacombe ont été creusées dans un tuf volcanique, ou pouzzolane (localement appelé *pozzolanne* ; Funicelllo *et al.* (2008)), présentant un pH basique variant entre 7,5 et 7,9 (mesures réalisées par Zitelli (2013) sur des échantillons prélevés au niveau de

la voûte des chambres X82/T18 et X83). Ces résultats sont particulièrement cohérents avec le pH de l'eau environnementale enregistré dans les autres catacombes de Rome variant entre 7,5 et 7,8 (Sánchez-Moral *et al.* 2005a). Cependant des valeurs de pH beaucoup plus faibles oscillant entre 5,9 et 6,4 ont été trouvées au niveau du sol de ces deux chambres funéraires (Zitelli 2013). Cette diminution du pH de la roche à la base des séquences stratigraphiques pourrait être causée par les jus de décomposition (principalement des acides organiques ; Vass *et al.* (2002)) s'écoulant des corps en putréfaction (Gill-King 1997 ; Carter et Tibbett 2008 ; Schotsmans *et al.* 2014). Par ailleurs, nous savons qu'en gestion de l'environnement, le plâtre est parfois incorporé, seul ou avec d'autres amendements, aux sols trop alcalins afin de réduire le pH (Carter 1986 ; Kordlaghari et Rowell 2006 ; Wong *et al.* 2009 ; Courtney et Kirwan 2012). Aussi, le plâtre – élément constitutif de l'appareil funéraire – utilisé dans les chambres funéraires de la catacombe pourrait avoir contribué à la diminution du pH voire à une légère acidification du milieu d'inhumation. La phase carbonatée de l'os est connue pour avoir une faible solubilité dans des environnements au pH basique ($\text{pH} > 7,5$) tandis que sa solubilité devient relativement élevée dans des environnements acides ($\text{pH} < 6,5$) (Pate *et al.* 1989 ; Nielsen-Marsh et Hedges 2000 ; Berna *et al.* 2004). La chute du pH du milieu d'inhumation pourrait avoir favorisé les processus de dissolution/recristallisation responsable des fortes valeurs IRSF que nous avons mesurées. Enfin, la forte porosité de la roche (Sánchez-Moral *et al.* 2005a ; Sánchez-Moral *et al.* 2005b ; Zitelli 2013) pourrait avoir facilité le drainage de l'eau environnementale. Cette porosité ainsi que l'absence de passes de sédiments entre les niveaux de dépôts de cadavres dans certaines salles (X81, X83 et X84) pourraient avoir limité la capacité du milieu d'inhumation à tamponner l'eau et avoir augmenté les interactions entre l'os et l'eau environnementale (Smith *et al.* 2002 ; Nielsen-Marsh *et al.* 2007). Ces paramètres environnementaux pourraient avoir accéléré la perte du collagène ainsi que la recristallisation de la phase carbonatée de l'os.

2.2. Hétérogénéité spatiale au sein de la catacombe de la conservation de l'os et de l'émail dentaire

La préservation des os dans les sépultures plurielles de la catacombe SSPM est très variable. Les rendements d'extraction du collagène présentent une forte variabilité avec des valeurs oscillant entre 0 et 100 %, que ce soit en fonction des chambres funéraires, des parties anatomiques prélevées ou des apparences macroscopiques des échantillons (Annexes 7 et 8). Un même constat peut être fait pour les autres indicateurs de conservation du collagène ($\%C_{\text{col}}$, $\%N_{\text{col}}$ et rapports C/N) (Annexes 7, 9, 10 et 11). De surcroît, bien qu'empiriques, les indicateurs de contrôle de l'os détaillés dans la Section II, 4.5.1 montrent également une forte variabilité que ce soit en fonction des chambres funéraires ou des parties anatomiques échantillonnées (Annexes 7 et 12). En outre, aucun échantillon osseux analysé

par IRTF ne présente un indice de cristallinité ou une teneur relative en carbonates similaires à celles reportées pour des échantillons modernes (Tableau 28 ; Figure 40A). Par ailleurs, la préservation de l'émail dentaire est relativement similaire au sein des différentes chambres de la région, d'une chambre à l'autre et selon de type de dent d'après les différents critères de contrôles empiriques présentés ci-devant dans la Section II, 4.5.2 (Annexe 7).

Le temps, l'environnement d'inhumation (température, hydrologie, pH du sol, *etc.*) et les processus taphonomiques (modes de dépôts des cadavres, modes de remplissage des sépultures, perturbations anthropiques ou animales, *etc.*) sont les trois principaux paramètres contrôlant l'état de préservation des différentes phases des ossements découverts en contextes archéologiques (Collins *et al.* 2002 ; Hedges 2002). Ces différents paramètres interagissent de façon complexe et généralement imprévisible d'un site archéologique à l'autre, voire au sein d'un même site (Hedges *et al.* 1995b ; Nielsen-Marsh et Hedges 2000 ; Pestle et Colvard 2012). La liste de ces paramètres influençant la préservation de l'os peut dans certains cas d'étude être drastiquement réduite du fait de l'exceptionnalité et des caractéristiques intrinsèques d'un site archéologique, à l'instar de la catacombe SSPM.

En effet, l'organisation des dépôts de cadavres et leurs évolutions taphonomiques semblent indiquer que plusieurs dizaines voire centaines de défunts ont été déposés simultanément au cours d'un même évènement démographique (Castex *et al.* 2007 ; Castex *et al.* 2009 ; Castex *et al.* 2011). Cependant, la restitution théorique des volumes corporels des sujets confrontée aux caractéristiques des chambres funéraires – notamment les dimensions et la configuration de X80/T16 et X82/T18 – montre qu'un dépôt simultané *stricto sensu* de 2000 à 3000 individus fut impossible (Sachau-Carcel 2012 ; Sachau-Carcel *et al.* 2013). Il semblerait toutefois que ces espaces sépulcraux aient été en usage durant une période de temps relativement courte au cours de laquelle plusieurs phases de dépôt simultanée – voire occasionnellement de dépôts individuels – se sont succédées (Castex et Blanchard 2011 ; Kacki *et al.* 2014). Ainsi, le temps ne peut être retenu comme un paramètre rendant compte de la forte hétérogénéité de l'état de conservation des vestiges osseux du secteur central de la catacombe. Cette conservation différentielle des os est donc imputable à d'autres paramètres que nous allons tenter de discuter ci-après.

La préservation de l'os n'est pas aléatoire. L'essentiel des échantillons macroscopiquement et biochimiquement bien préservés provient des deux grandes chambres (X83 et X84) tandis que ceux mal préservés sont principalement issus des petites chambres (X80/T16 et X82/T18). Nous pouvons toutefois souligner une exception pour une des petites chambres – la X81 – au sein de laquelle les vestiges osseux sont macroscopiquement et biochimiquement bien préservés. Le nombre limité d'échantillons prélevés dans la petite chambre X78/T15 (n = 2) ne nous permet pas d'extrapoler quant à l'état de conservation des vestiges osseux de cette salle. Ce constat d'une conservation différentielle

des vestiges osseux est en adéquation avec les observations anthropologiques réalisées durant la fouille (Castex *et al.* 2007 ; Castex *et al.* 2009 ; Castex *et al.* 2011).

Actuellement, à l'exemple des autres grandes catacombes de Rome, la catacombe SSPM bénéficie d'un climat relativement stable tout au long de l'année. Sánchez-Moral *et al.* (2005a) ont reporté un certain nombre de paramètres micro-environnementaux dans les catacombes de St Calixte et de Domitille qui peuvent être aisément transposés à la catacombe SSPM étant donné les caractéristiques similaires et la proximité géographique – quelques kilomètres de distance – de ces complexes cimetériaux. Un taux d'humidité relative proche de la saturation ($\geq 97\%$) et une température constante de 15-17°C ont ainsi été relevés par Sanchez *et al.* (2005). L'exiguïté du secteur où sont localisés les sépultures plurielles de même que la présence de grandes ouvertures entre les différentes salles rend difficilement probable l'hypothèse d'un microclimat différent selon la chambre considéré, lequel aurait pu être responsable d'une conservation différentielle des phases organique et minérale des vestiges osseux. Lors de la fouille, l'équipe scientifique a observé – visuellement – dans les grandes salles une différence de conservation de l'intégrité anatomique des vestiges osseux entre ceux présents à proximité des parois et ceux localisés au centre des chambres (Castex *et al.* 2009). Ce fait pourrait être la conséquence de la condensation de l'humidité relative de l'air – très élevée – contre les parois ainsi que du suintement, du ruissellement ou du goutte-à-goutte des eaux d'infiltration le long des parois. Dans les petites chambres, tous les os restent assez près des parois et pourraient donc être tous affectés de façon similaire par les processus précédemment cités. En revanche, dans les grandes chambres, les os les plus éloignés des parois – *i.e.* localisés au centre des salles – pourraient être les mieux préservés macroscopiquement et biochimiquement. Du fait de sa position centrale et permettant la communication entre les différentes salles à sa périphérie, la petite chambre X81 est peu murée. La surface des parois étant de ce fait moins importante, les phénomènes de condensation ou de ruissellement contre les parois ont dû être limités. Ceci pourrait expliquer pourquoi les os présents dans cette petite chambre sont macroscopiquement et biochimiquement bien préservés. Enfin, un espace de circulation le long de la paroi ouest de la chambre X83 a été mis en évidence lors de la fouille. Celui-ci semble avoir été mis en place et utilisé à la suite des dépôts des individus dans cette sépulture et donnait accès au couloir X21, actuellement obstrué (Figure 4) (Castex *et al.* 2009). Les vestiges osseux présents à l'endroit où cet espace de circulation a été installé ont perdu leur intégrité anatomique (Castex *et al.* 2009). La présence de cet espace de circulation est donc une preuve irréfutable que des hommes – fossoyeurs, familles, pèlerins ou autres – ont cheminé dans ces espaces sépulcraux. Le piétinement, en particulier le long des parois pourrait donc être une autre cause explicative de l'hétérogénéité spatiale de la conservation des os dans cette région de la catacombe.

2.3. Validation du signal isotopique biogénique de la phase carbonatée de l'os par la comparaison de datation ^{14}C sur couples collagène-carbonate

Un prérequis indispensable aux interprétations des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ est d'établir si la recristallisation de la phase minérale des ossements issus des différentes chambres de la région X de la catacombe SSPM est associée à des échanges isotopiques.

Pour un même os, et ce dans quatre cas de figure sur cinq, nous avons pu mettre en évidence que la phase apatitique avait une activité ^{14}C plus élevée (entre 0 et 1,5 pMC) que la phase collagénique. Cette différence d'activité ^{14}C entre les phases d'un même os a par ailleurs pu être mise en évidence pour des ossements issus d'autres sites Holocène datant entre 0 et 9500 BP (Zazzo 2014). Aussi, il s'agit là d'un phénomène relativement trivial conduisant *in fine* à des différences d'âges ^{14}C plus ou moins importantes entre la phase organique et la phase minérale d'un os. Ces différences d'âge $^{14}\text{C}_{\text{col-carb (os)}}$ positives ainsi que la corrélation entre les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et les âges $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ sembleraient indiquer ici que des échanges isotopiques en carbone entre la phase apatitique des ossements et du carbone inorganique dissous d'origine diagénétique aient eu lieu. Le sens de ces différences et de cette corrélation suggérerait de surcroît que le carbone du pool diagénétique serait enrichi en ^{13}C possédant ainsi des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ plus élevées, et, serait en outre d'âge plus jeune que le carbone biogénique. En revanche, la corrélation positive trouvée entre les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ semblerait attester, quant à elle, que les individus ayant les plus fortes valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ aient consommé des ressources marines, celles-ci montrant en règle générale des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ plus élevées que celles des ressources terrestres (Schoeninger *et al.* 1983 ; Richards *et al.* 2005 ; Craig *et al.* 2013). En outre, l'absence de corrélation entre les valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ pourraient s'expliquer par une consommation de poissons de bas niveaux trophiques (*e.g.* anchois, sardines, maquereau, *etc.*) ou de mollusques bivalves (*e.g.* huîtres, coques, clams, *etc.*) (Garvie-Lok 2001 ; Carlier *et al.* 2007).

Nos données sont en relative adéquation avec les résultats de Craig *et al.* (2013). Ces derniers ont en effet récemment pu démontrer à Herculaneum que les victimes de l'éruption du Vésuve en 79 après J.-C. avaient consommé une quantité relativement importante, bien que non-dominante dans le régime alimentaire global, de ressources marines (environ 15-20 %). Aussi, à titre strictement indicatif, nous avons recouru à l'équation établie par ces auteurs – initialement formulée pour leur population (Figure 3A de l'article de Craig *et al.* (2013)) – afin d'estimer approximativement à partir de nos valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ obtenus sur les cinq sujets que nous avons datés le nombre d'années ^{14}C excédentaires que pourraient présenter les âges ^{14}C obtenus sur les différentes phases des os. Les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ et ceux $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ que nous avons mesurés seraient ainsi possiblement vieillis de 60 (pour l'individu US216/Mand1 de

la chambre X83) à 133 (pour l'individu 64 de la chambre X82/T18) années ^{14}C . Ce décalage entre les âges mesurés et les âges réels serait imputable à la consommation de ressources aquatiques.

En outre, la forte différence entre les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ des individus 64 et 32 de la chambre X82/T18 (180 ± 40 années ^{14}C) suggérerait une importante dépendance de l'individu 64 aux produits d'origine marine. Parallèlement, la faible différence entre les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ des individus 79 et 24 dans la chambre X82/T18 ainsi que leurs valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ identiques et relativement basses pourraient indiquer une faible voire une non consommation de ressources d'origine marine par ces individus.

Les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ et $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ non calibrés obtenus dans le cadre de ce travail ont été comparés à ceux obtenus par Dominique Castex et Philippe Blanchard sur d'autres squelettes issus des trois mêmes chambres (communications personnelles) (Tableau 29 ; Figures 41, 42 et 43) afin de mettre en exergue d'éventuelles anomalies chronologiques dans la séquence de remplissage de ces sépultures. Aucun remaniement majeur n'ayant été mis en évidence dans les séquences de remplissage des différentes sépultures, ces anomalies, si elles existent, ne devraient être le fait que d'un âge $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ trop vieux (consommation de ressources aquatiques) ou d'un $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ trop jeune (contamination diagénétique) d'un individu par rapport aux autres inhumés dans la même sépulture.

Pour la chambre X80/T16, les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ sont similaires d'un individu à l'autre, et ce sur toute la hauteur de la colonne stratigraphique (Tableau 29 ; Figure 41). L'âge $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ présenté par l'individu 79 s'inscrit également dans l'intervalle de temps des âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ (Tableau 29 ; Figure 41). En revanche, l'âge $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ présenté par l'individu 24 est plus récent et se distingue nettement des autres datations obtenues dans cette salle (Tableau 29 ; Figure 41). Cette anomalie chronologique doit nous amener à nous questionner quant à la validité de cette datation. Stratigraphiquement compris entre l'individu 17, au-dessus, et l'individu 38, en dessous, l'individu 24 devrait être contemporain de ces deux individus circonvoisins. Aussi, ce faisceau d'indices permet de confirmer que l'âge $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ est rajeuni du fait de la diagenèse.

Pour la chambre X82/T18, nous remarquons 1) que les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ des individus 79 et 74 sont identiques, 2) l'âge $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ de l'individu 64 paraît plus anciens que ceux des individus situés stratigraphiquement en dessous de lui, et 3) l'âge $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ de l'individu 32 semble plus jeune que les individus situés stratigraphiquement en dessous de lui, bien qu'un large recouvrement existe dans les plages calibrées (Tableau 29 ; Figure 42). Le vieillissement de l'âge $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ de l'individu 64 ne peut s'expliquer que par une contribution de ressources marines dans son régime alimentaire. Cette hypothèse semble être confirmée par la valeur de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ de cet individu plus élevée que celles de ces circonvoisins. De plus, l'âge $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ de cet individu s'inscrit dans l'intervalle de temps des âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ des individus situés stratigraphiquement au-dessus et en dessous de lui, renforçant l'hypothèse du vieillissement de son âge $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ du fait d'une consommation de poisson. Enfin, l'âge $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ calibré de l'individu 32 se démarque complètement des âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ des individus 79, 74 et 64 et en partie de

l'âge $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ mesuré sur ce même échantillon (Tableau 29 ; Figure 42). Ce rajeunissement de l'âge $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ pourrait être attribuable à une contamination en carbone d'origine diagénétique.

Pour la chambre X83, les 2 échantillons provenant des niveaux inférieurs de la séquence stratigraphique (« bas de stratigraphie » et US216 Mand1) présentent des âges similaires tout comme les 2 individus 170 et 15 issus du haut de la séquence stratigraphique (Tableau 29 ; Figure 43). Les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ de ces derniers semblent toutefois plus anciens que ceux des individus situés en dessous d'eux. Ceci pourrait être dû à une consommation de ressources marines. Nous soulignerons enfin le fait que l'échantillon US216 Mand1 présente un âge $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ strictement identique – à l'année près – à son âge $^{14}\text{C}_{\text{col}}$, suggérant que 1) la phase carbonatée de cet os n'est pas contaminée, et 2) aucune composante d'origine marine ne constituait le régime alimentaire de cet individu (Tableau 29 ; Figure 43).

Ainsi, la comparaison des âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ et $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ a permis de mettre en évidence plusieurs anomalies chronologiques dans les séquences stratigraphiques de ces chambres. Parmi ces anomalies révélées, une seule est clairement imputable à la diagenèse (individu 24, chambre X80/T16) et une autre semble fortement attribuable à un effet réservoir (individu 64, chambre X82/T18). En outre, un seul échantillon semble préservé de ces deux processus (échantillon US216 Mand1, chambre X83).

Dès lors qu'il y a suspicion d'une consommation de ressources aquatiques pour un individu donné, l'âge $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ étant de ce fait vieilli ne peut plus servir d'âge de référence pour mettre en lumière un rajeunissement de l'âge $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ dû à la diagenèse. Aussi, les 4 échantillons qui ont montré des différences d'âge $^{14}\text{C}_{\text{col-carb (os)}}$ ont été utilisées pour estimer l'effet isotopique sur les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ lié à la diagenèse, au risque de l'amplifier démesurément.

Les salles du secteur central de la catacombe ont été creusées dans une roche pyroclastique (ou ignimbrite) au faciès massif et chaotique appelée *Pozzolanelle* ou tuf de Villa Senni (Formation Villa Senni) (Funciello *et al.* 2008 ; Giordano 2010). Cette roche principalement constituée de cendres, de scories, de lapilli, et dans une moindre mesure de xénolites (magmatiques, plutoniques, métamorphiques et sédimentaires) (Funciello *et al.* 2008 ; Giordano 2010) est riche en phyllosilicates (50 à 78 %), en pyroxènes (5 à 15 %), en feldspaths (4 à 6 %), en analcime (2 à 25 %) et enfin en calcite (1 à 5 %) (Sánchez-Moral *et al.* 2005a ; Sánchez-Moral *et al.* 2005b). Les teneurs isotopiques en carbone de cette calcite ne nous sont malheureusement pas connues. En revanche, des données relatives à la composition isotopique en carbone de la calcite des laves et éjectas émises par le même complexe volcanique (Monts Albains) sont disponibles. Ainsi, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ de la calcite des laves et des éjectas varient respectivement entre -19,8 et +2,8 ‰ et entre -9,3 et +3,5 ‰ (Fornaseri et Turi 1969). Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ du pôle diagénétique varieraient donc entre -19,8 et +3,5 ‰.

Considérant la valeur de $\delta^{13}\text{C}$ la plus élevée du pôle diagénétique, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et les différences intra-os d'activité ^{14}C , il est possible en procédant à de simples règles de

proportionnalité d'estimer quantitativement l'effet isotopique maximal de la diagenèse sur les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ biogéniques (Tableau 30). Celui-ci varie entre 0,08 ‰ ($\sigma = 0,07$ ‰) et 0,27 ‰ ($\sigma = 0,08$ ‰) (Tableau 30). Aussi, la quantité de carbone d'origine diagénétique ayant intégré la phase apatitique est relativement limitée et les modifications des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ inhérentes à ces contaminations sont négligeables. De plus, s'agissant d'effets isotopiques maximaux, il est fort probable que ces derniers soient largement surévalués.

Tableau 30. Estimation quantitative de la contamination en carbone de la phase carbonatée des échantillons osseux de quatre individus pour lesquels des âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ et $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ ont été obtenus

Salle	Identifiant	$\delta^{13}\text{C}_{\text{pool diagénétique maximal}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$	$\Delta^{13}\text{C}_{\text{pool diagénétique-carb (os)}}$	Différence F^{14}C (pMC)	Contamination en carbone (‰)
X80/T16	024		-13,4	+16,9	1,42 ± 0,37	0,24 ± 0,06
	079		-14,6	+18,1	0,43 ± 0,36	0,08 ± 0,07
		+3,5				
X82/T18	032		-12,8	+16,3	0,95 ± 0,38	0,15 ± 0,07
	064		-14,4	+17,9	1,51 ± 0,46	0,27 ± 0,08

Ainsi, au vu de ces résultats, les compositions isotopiques de la phase carbonatée de l'os peuvent être considérées comme étant aussi fiables que celles de la phase collagénique de l'os. De ce fait, les valeurs isotopiques obtenues sur les deux phases des ossements peuvent être utilisées afin de reconstruire l'histoire de vie des individus inhumés dans les différentes chambres de la région X de la catacombe SSPM.

Enfin, les différences entre les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ des échantillons au collagène biochimiquement bien préservé ($n = 99$) et ceux au collagène biochimiquement mal préservé ($n = 29$) sont intrigantes et méritent une attention particulière. En effet, les échantillons dont le collagène est bien préservé ont des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ supérieures en moyenne de 0,3 ‰ à celles des échantillons dont le collagène est mal préservé (respectivement -14,3 ‰ *versus* -14,6 ‰). En outre, les échantillons dont le collagène est bien préservé ont des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ inférieures en moyenne de 0,3 ‰ à celles des échantillons dont le collagène est mal préservé (respectivement -3,5 ‰ *versus* -3,2 ‰). Bien que relativement faibles, ces différences sont statistiquement significatives (Tests U de Mann-Whitney ; p-valeurs $\ll 0,05$). La direction et la magnitude des changements isotopiques que nous observons pour nos échantillons sont similaires à celles des changements isotopiques mesurés par Koch *et al.* (1997) entre des échantillons modernes d'émail ou d'os non traités et d'autres traités à l'acide acétique. Par ailleurs, les échantillons de notre corpus présentant des rendements d'extraction de collagène faibles sont hautement recristallisés et ont perdu une part importante de

leurs carbonates structuraux. Ces derniers, localisés en deux sites distincts – A et B – dans la phase apatitique ont pu être substitués par des ions OH. Les spectres IRTF mettent en évidence que ces substitutions ont davantage lieu au niveau du site A que B, du fait d'une différence de résistance face à la diagenèse des liaisons chimiques des carbonates de type A vis-à-vis de ceux de type B avec la matrice cristalline. Nous pouvons supposer, à l'instar de ce que proposèrent Koch *et al.* (1997), que ces deux sites aux liaisons chimiques différentes discriminent différemment les isotopes stables du carbone et de l'oxygène. Aussi, les légères différences isotopiques mesurées à l'échelle populationnelle entre les échantillons dont la phase apatitique est fortement recristallisée et ceux dont la phase apatitique est plus faiblement recristallisée pourraient refléter cette différence de fractionnement isotopique. Les différences de valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ entre ces deux groupes d'échantillons résulteraient donc *in fine* de la recristallisation de la phase apatitique et non d'échanges isotopiques.

2.4. Variabilité de la conservation de l'os à l'échelle régionale et globale : les catacombes versus les sites de plein-air

van der Linde (2008) et Rutgers *et al.* (2009) ont récemment émis l'hypothèse que le microclimat des catacombes affectait de façon négative la conservation du collagène osseux. Pour venir soutenir ou, au contraire, pour infirmer cette assertion non vérifiée par les auteurs susnommés, nous avons entrepris une comparaison des rendements d'extraction du collagène d'échantillons osseux issus de complexes cimetériaux souterrains et de sites funéraires de plein-air, tous italiens et contemporains (Figure 45). Les sites inclus dans cette comparaison ont été sélectionnés selon le protocole utilisé dans les différentes études isotopiques pour extraire le collagène des ossements. En effet, certains procédés techniques employés durant les prétraitements chimiques des ossements peuvent réduire drastiquement les rendements de collagène calculés *in fine*. Aussi, les sites italiens pour lesquels l'ultrafiltration – procédé conservant uniquement les fragments de collagène ayant un haut poids moléculaire (> 30 kDa) – a été utilisé n'ont pu être intégrés à notre comparaison, à l'image des sites de Vélia (Craig *et al.* 2009) ou d'Herculaneum (Craig *et al.* 2013). Notre comparaison s'est donc cantonnée aux sites de la région de Rome, mieux connue sous le nom de Latium (Figure 45) (Prowse 2001 ; Prowse *et al.* 2004 ; Prowse *et al.* 2005 ; Prowse *et al.* 2007 ; van der Linde 2008 ; Rutgers *et al.* 2009 ; Killgrove 2010 ; Killgrove et Tykot 2013).

Avec un rendement de collagène moyen proche de 50 %, les ossements de la catacombe SSPM apparaissent comme étant les mieux préservés de Rome, et plus largement du Latium. Nous constatons en outre que si les rendements de collagène moyens des petites chambres de la catacombe SSPM (à l'exception de X81) sont similaires à ceux reportés pour les sites contemporains du Latium

(moins de 50 %), ceux des grandes chambres sont bien plus élevés (entre 60 et 100 %), soulignant la très bonne conservation biochimique de vestiges osseux provenant de ces salles (Figure 45). Malgré les limites décrites ci-dessus dépendantes des protocoles utilisés, les conditions qui prévalent dans les catacombes semblent être plutôt favorables à la préservation biochimique de la phase organique. Ces résultats viennent ainsi s'inscrire en faux avec les postulats avancés par van der Linde (2008) et Rutgers *et al.* (2009).

Parallèlement, de façon à appréhender l'état de préservation général de la phase apatitique des os issus de la région X de la catacombe SSPM, nous avons procédé à une comparaison des valeurs IRSF calculées pour un sous-échantillon d'os que nous avons prélevés avec celles déjà publiées mesurés sur des ossements issus d'autres sites contemporains. Du fait d'une relative rareté de telles données, nous avons été contraint d'élargir notre comparaison à des collections ostéologiques autres qu'italiennes, tous restant contemporains de la catacombe SSPM. Notre corpus de comparaisons se compose ainsi de sites de différentes régions de l'Empire romain, voire même hors de ce dernier (Figure 46) (Dupras 1999 ; Dupras et Schwarcz 2001 ; Prowse 2001 ; Prowse *et al.* 2004 ; Prowse *et al.* 2005 ; Prowse *et al.* 2007 ; Alfano *et al.* 2009 ; Keenleyside *et al.* 2009 ; Reitsema 2012 ; Reitsema et Kozłowski 2013).

Avant traitement, les valeurs IRSF calculées pour les échantillons osseux issus des sépultures plurielles de la catacombe SSPM excèdent celles reportées pour d'autres sites contemporains du pourtour du bassin méditerranéen (Figure 46). Après traitement, les valeurs IRSF calculées pour les échantillons de la catacombe SSPM restent plus élevées que celles reportées pour un cimetière contemporain de Rogowo localisé actuellement en Pologne (Figure 46) (Reitsema 2012 ; Reitsema et Kozłowski 2013). Il est important toutefois de noter que ces différences de cristallinité observées entre les échantillons des différents sites peuvent être accentuées par des différences dans les protocoles de préparations (granulométrie et concentration de la poudre analysée) et les méthodes de mesures (pastille de KBr vs. « Attenuated Total Reflection (ATR) » sur poudre) utilisées (Surovell et Stiner 2001). Nous constatons néanmoins que les valeurs IRSF calculées ici se distinguent fortement de celles mesurées pour des échantillons modernes (Figure 46) (Matthieu Lebon, communication personnelle et Wright et Schwarcz (1996)) ou pour des ossements fortement altérés provenant d'environnements défavorables pour la conservation de la phase minérale de l'os (Berna *et al.* 2004 ; Lebon *et al.* 2010).

En somme, les os issus des catacombes semblent posséder, à l'instar du dieu Janus², différentes facettes, l'une bien préservés renvoyant à la phase organique et l'autre fortement altérée

² Divinité romaine ambivalente possédant une seule tête mais deux visages, l'un regardant vers l'avant, l'autre regardant vers l'arrière. Par extension, ce dernier caractérise généralement deux aspects, souvent contraires, d'une même personne ou d'un même objet.

renvoyant à la phase minérale. Les signaux isotopiques de cette dernière ne seraient toutefois pas modifiés du fait des différents éléments qui ont été précédemment avancés.

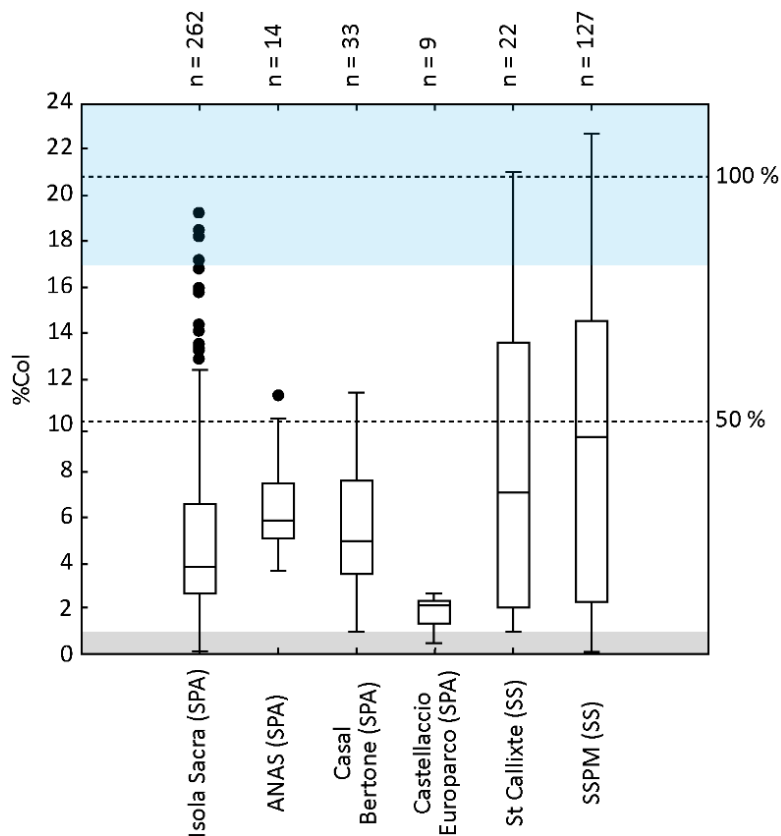


Figure 45. Comparaison inter-site des rendements de collagène mesurés sur les ossements humains provenant du Latium (Italie)

Note : La nécropole d'Isola Sacra est localisée près d'Ostie et de Portus Romae et est datée entre le 1^{er} et le 3^{ème} s. ap. J.-C. (Prowse 2001 ; Prowse et al. 2004 ; Prowse et al. 2005 ; Prowse et al. 2007). Le cimetière ANAS est localisé entre Ostie et Rome et est aussi daté entre le 1^{er} et le 3^{ème} s. ap. J.-C. (Prowse 2001 ; Prowse et al.

2004). Les nécropoles de Casal Bertone et Castellaccio Europarco sont situées à Rome et sont datées respectivement entre le 2^{ème} et le 3^{ème} s. ap. J.-C. et entre le 1^{er} et le 2^{ème} s. ap. J.-C. (Killgrove 2010 ; Killgrove et Tykot 2013). La catacombe St Callixte est située également à Rome et est datée entre le 3^{ème} et le 5^{ème} s. ap. J.-C. (van der Linde 2008 ; Rutgers et al. 2009). Le sigle « SPA » est utilisé pour désigner les sites de plein-air tandis que le sigle « SS » est utilisé pour désigner les sites souterrains.

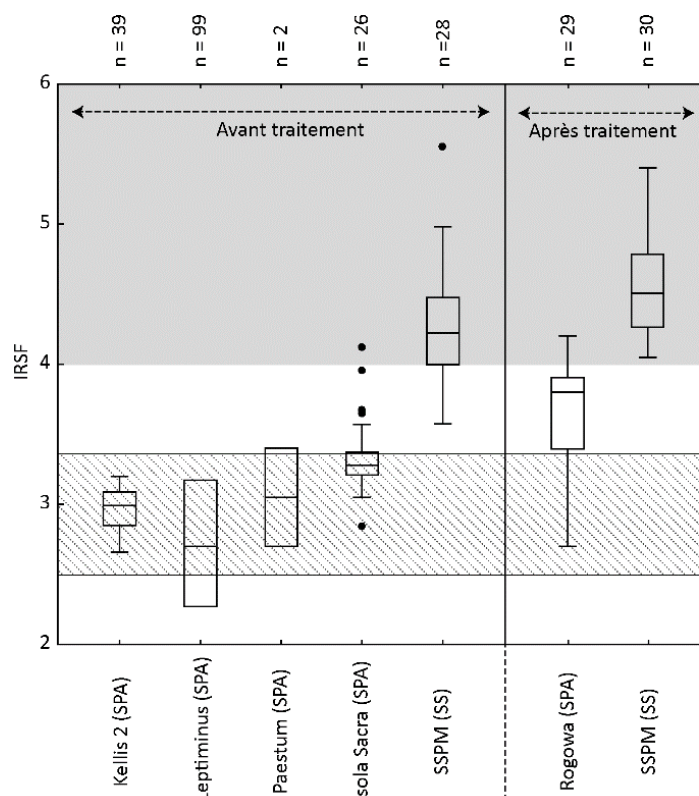


Figure 46. Comparaison inter-site des valeurs IRSF calculées sur les ossements humains provenant de différentes régions de l'Empire romain

Note : Le cimetière de Kellis 2 est localisé près de Mut dans l'oasis Ad-Dakhla en Égypte et est daté entre le 1^{er} et le 5^{ème} s. ap. J.-C. (Dupras 1999 ; Dupras et Schwarcz 2001). Les cimetières de Leptiminus sont localisés à Lamta en Tunisie et sont datés entre le 2^{ème} et le 6^{ème} s. ap. J.-C. (Keenleyside et al. 2009). Les nécropoles de Pastum/Poseidonia sont situées près de Capaccio-Paestum en Italie et sont datés entre le 7^{ème} s. av. J.-C. et le 2^{ème} s. ap. J.-C. (Alfano et al. 2009). La nécropole d'Isola Sacra est localisée près d'Ostie et de Portus Romae en Italie et est datée entre le 1^{er} et le 3^{ème} s. ap. J.-C. (Prowse 2001 ; Prowse et al. 2004 ; Prowse et al. 2005 ; Prowse et al. 2007). Le cimetière de Rogowa est situé près du village de Boguchwały en Pologne et est daté du 2^{ème} s. ap. J.-C. (Reitsemá 2012 ; Reitsemá et Kozłowski 2013). Le sigle « SPA » est utilisé pour désigner les sites de plein-air tandis que le sigle « SS » est utilisé pour désigner les sites souterrains.

2.5. Conclusion

Notre approche multi-proxys a permis de mettre en évidence que des différences extrêmes de la préservation tant de la phase organique que de la phase minérale des vestiges humains, alors même que ceux-ci sont contemporains les uns des autres et découverts en position primaire dans une région particulièrement exiguë comparativement au nombre de restes que celle-ci accueille. Cette préservation différentielle des vestiges – notamment osseux – dans cet environnement confiné que représente la région X de la catacombe SSPM ne semble pas être le fait uniquement de variations taphonomiques locales. Nos résultats démontrent que l'hétérogénéité de la préservation des restes humaines n'est pas aléatoire ici et que les vestiges des grandes salles *sensu lato* (X83 et 84 + X81) sont bien mieux préservés que ceux des petites salles (X78/T15, X80/T16 et X82/T18). Ces résultats sont par ailleurs en parfaite adéquation avec les observations macroscopiques faites par les archéo-

anthropologues au moment de la fouille. La combinaison de conditions environnementales relativement acides associées à une forte humidité atmosphérique pouvant se condenser puis ruisseler le long des parois ainsi que d'occasionnels ruissellements d'eau d'infiltration contre les parois pourraient expliquer cette conservation différentielle. La comparaison de nos données avec celles précédemment publiées pour des sites d'âges contemporains aux individus inhumés dans la région X de la catacombe souligne l'ambivalence de l'état de préservation général des restes humains. Les deux sites présentant les meilleurs rendements moyens de collagène s'avèrent être des catacombes. Les os issus de ces contextes souterrains voient leur phase collagénique bien mieux conservées – en particulier dans les grandes salles de la catacombe SSPM – que celle des os issus de sites de plein-air. La relative stabilité climatique prévalant dans les catacombes semblerait être d'une façon générale favorable à la conservation de la matière organique des os. En revanche, un schéma de conservation inverse semble émerger lorsque nous nous intéressons à la fraction minérale des os. Fortement recristallisés, les vestiges osseux apparaissent bien plus altérés que ceux d'âges contemporains. Malgré ce fait, les âges radiocarbone mesurés sur les phases collagénique et carbonatée des mêmes os sont très similaires les uns des autres et démontrent l'existence de très faibles échanges isotopiques entre la phase minérale et l'environnement sépulcral. Ces échanges ne modifient cependant pas les valeurs isotopiques. Par ailleurs, nous avons pu mettre en évidence que les faibles différences entre de valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ ou $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ pourraient être dues à une élimination différentielle au cours des prétraitements chimiques des carbonates de A *versus* ceux de type B, lesquels pourraient détenir des valeurs isotopiques biogéniques légèrement différentes d'un site à l'autre. Ces modifications isotopiques sont proches de l'erreur analytique et peuvent en cela être considérées comme négligeables. Aussi, en raison de l'ensemble des éléments que nous venons ici d'explicitier, les valeurs isotopiques mesurées sur les phases collagénique – quand celle-ci est conservée – et apatitique permettraient d'étudier de façon fiable les différents traits d'histoire de vie des individus inhumés dans la région X de la catacombe SSPM. Nous soulignerons enfin ici que cette étude est à ce jour la première à s'être intéressée aussi exhaustivement aux processus diagénétiques ayant altéré les vestiges osseux humains inhumés au sein d'une catacombe.

3. RECONSTRUCTIONS DES REGIMES ALIMENTAIRES

3.1. L'alimentation durant l'enfance

Compte tenu d'un enrichissement moyen en ^{13}C de la phase carbonatée de l'émail par rapport à l'alimentation de +13,4 ‰ (cf. Section II, 3.1.2, b), nous pouvons estimer que les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{alim}}$

des individus variaient entre -28 et -21,1 ‰ (\bar{x} = -26 ‰ ; σ = 0,9 ‰ ; n = 124). Ces valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{alim}}$ entrent dans la variabilité des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ des plantes et herbivores terrestres C_3 (cf. Section II, 3.1.3, a ; Section II, 3.3.1 et 3.3.2). Sur la base des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ (émail), les individus sembleraient donc avoir eu accès durant leur enfance à des ressources végétales et/ou animales terrestres C_3 . Par ailleurs, compte tenu d'un enrichissement moyen en ^{13}C 1) entre la phase carbonatée de l'émail et celle de l'os de +2,7 ‰, 2) entre la phase carbonatée de l'os et celle collagénique de +5,9 ‰, et, 3) entre la phase collagénique d'un consommateur et celles de ses aliments de 1 ‰ (cf. Section II, 3.1.1, b.1 et 3.1.2, b), nous pouvons déterminer que les ressources consommées par les hommes avaient des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ variant entre -24,2 et -17,3 ‰ (\bar{x} = -22,2 ‰ ; σ = 0,9 ‰ ; n = 124). Ces valeurs entrent à leur tour dans la variabilité des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ des herbivores terrestres C_3 . Ceci viendrait corroborer le fait que ces individus aient une alimentation essentiellement terrestre C_3 . Les reconstructions des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{alim}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ des aliments que nous proposons ici doivent être appréhendées comme des ordres de grandeurs et non comme de réelles valeurs en raison des grands écarts types associés à chacun des facteurs d'enrichissement utilisés. Par ailleurs, en l'absence de données isotopiques mesurées sur des phases organiques s'étant formées de façon synchrone à l'émail et n'ayant connu par la suite aucun remaniement, il s'avère impossible de caractériser avec plus de précision l'alimentation des individus durant l'enfance. Bien que purement spéculatif, d'autres ressources que celles terrestres C_3 possédant des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ similaires à ces dernières pourraient s'être vues consommées (e.g. poissons dulcicoles).

3.2. L'alimentation à l'âge adulte

3.2.1. Les ressources terrestres C_3 comme base alimentaire

La totalité ou presque des individus se concentre autour du pôle inférieur du modèle de Froehle *et al.* (2010) modifié par Eerkens *et al.* (2013) (Figures 47 et 48) et dans les clusters 1, 4 et 6 du modèle de Froehle *et al.* (2012) que nous avons adapté (Figure 49) (cf. Section II, 3.2.5, b.2). Ce positionnement des individus dans les modèles indique que les ressources terrestres C_3 représentent la majorité des aliments consommés. Ces modèles ne sont toutefois d'aucun recours pour déterminer l'origine végétale ou animale des ressources C_3 consommées. La comparaison des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ à celle du référentiel alimentaire que nous avons constitué (cf. Section II, 3.3) peut cependant, en partie, pallier cette lacune. Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ des individus s'inscrivent dans la variabilité de celles de la faune terrestre C_3 (Figure 50). En moyenne, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ des hommes se différencient de celles des herbivores de +2 ‰, soit un à deux saut(s) trophique(s), et de celles des carnivores de -0,4 ‰, soit moins d'un saut trophique (Figure 50). Les individus pourraient donc avoir

consommé de la viande ou des produits secondaires (e.g. le lait) d'herbivores en de fortes proportions, presque équivalentes aux carnivores. En revanche, les valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ des individus ne s'inscrivent que partiellement dans la variabilité de celles de la faune terrestre C_3 (Figure 50). En moyenne, les valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ des hommes se distinguent de celles des herbivores de +6,8 ‰, soit plus d'un saut trophique, et de celles des carnivores de 2,6 ‰, soit moins d'un saut trophique (Figure 50). Les hautes valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ des hommes ne peuvent donc pas s'expliquer par la consommation unique de viande ou produits secondaires d'herbivores terrestres C_3 de notre référentiel. Ces valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ pourraient cependant être le reflet d'une consommation de viande voire de produits secondaires d'herbivores terrestres C_3 non-sevrés ou ayant consommé des végétaux provenant de champs amendés. Les phases protéiques de ces derniers seraient enrichies en ^{15}N du fait de l'allaitement ou des fertilisants riches en azote utilisés pour faire croître les végétaux consommés (cf. Section II, 3.2.4, a.2). Outre ces ressources, les hommes pourraient également avoir eu accès en partie à des ressources non-terrestres comme nous allons le discuter dans la section suivante.

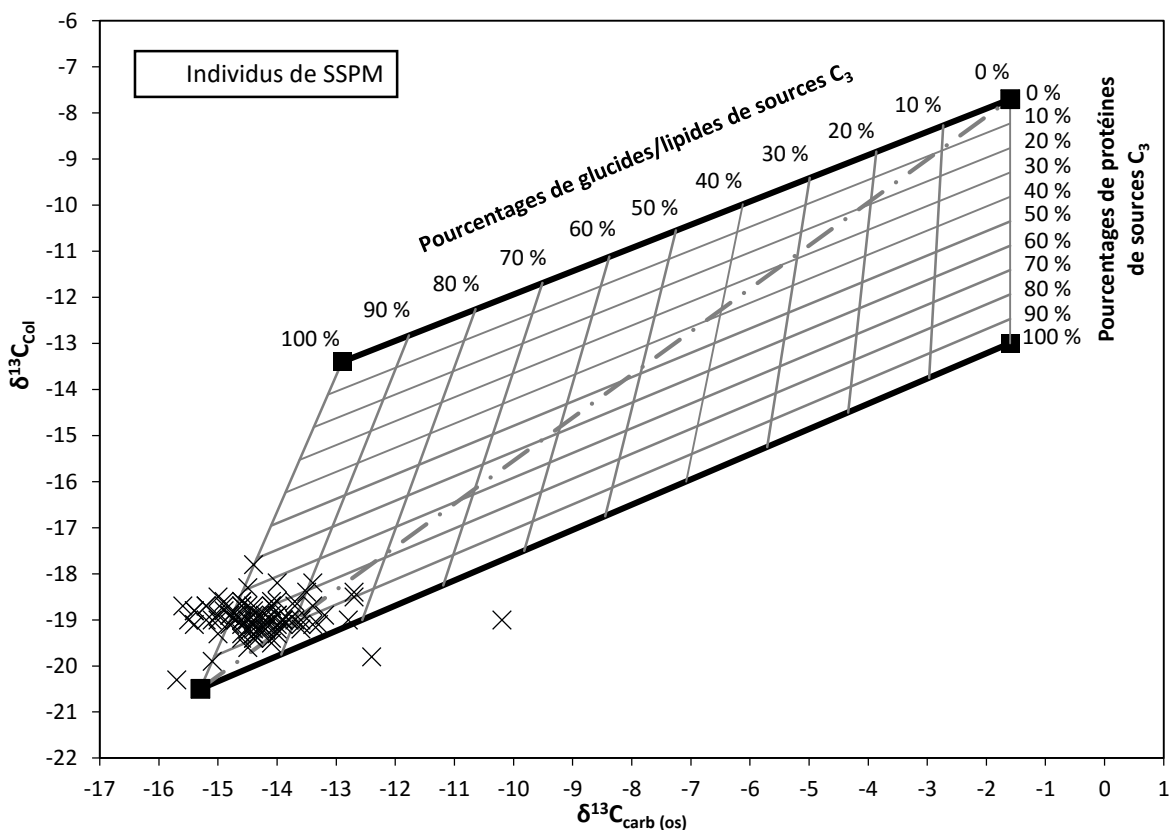


Figure 47. Projection des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ des sujets sur le modèle de Kellner et Schoeninger (2007) adapté par Froehle *et al.* (2010) puis par Eerkens *et al.* (2013).

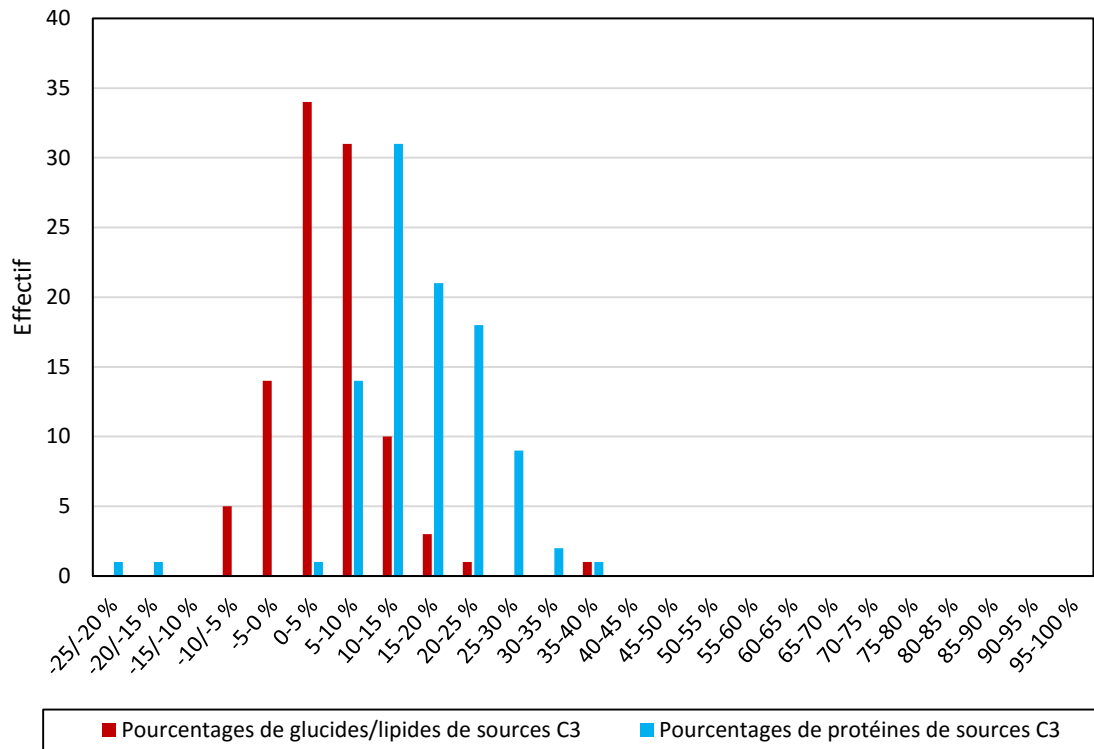


Figure 48. Pourcentages de protéines ingérées d'une part et de glucides/lipides ingérés d'autres part estimés via le modèle développé par Kellner et Schoeninger (2007) modifié par Froehle *et al.* (2010) et adapté par Eerkens *et al.* (2013)

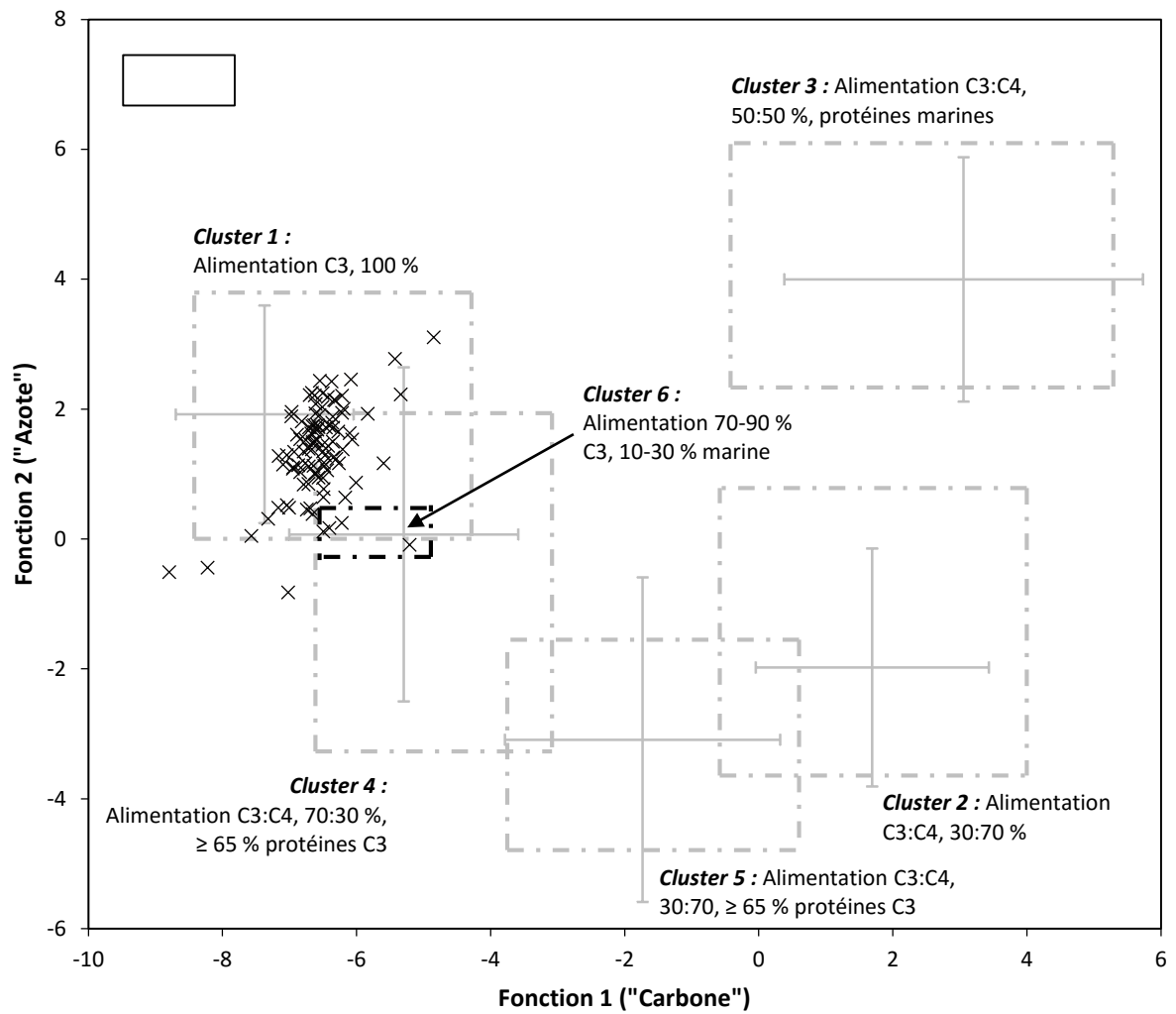


Figure 49. Projections des résultats des analyses factorielles discriminantes obtenus pour les individus étudiés sur les clusters définis par Froehle *et al.* (2012) correspondant à cinq types de régimes alimentaires différents.

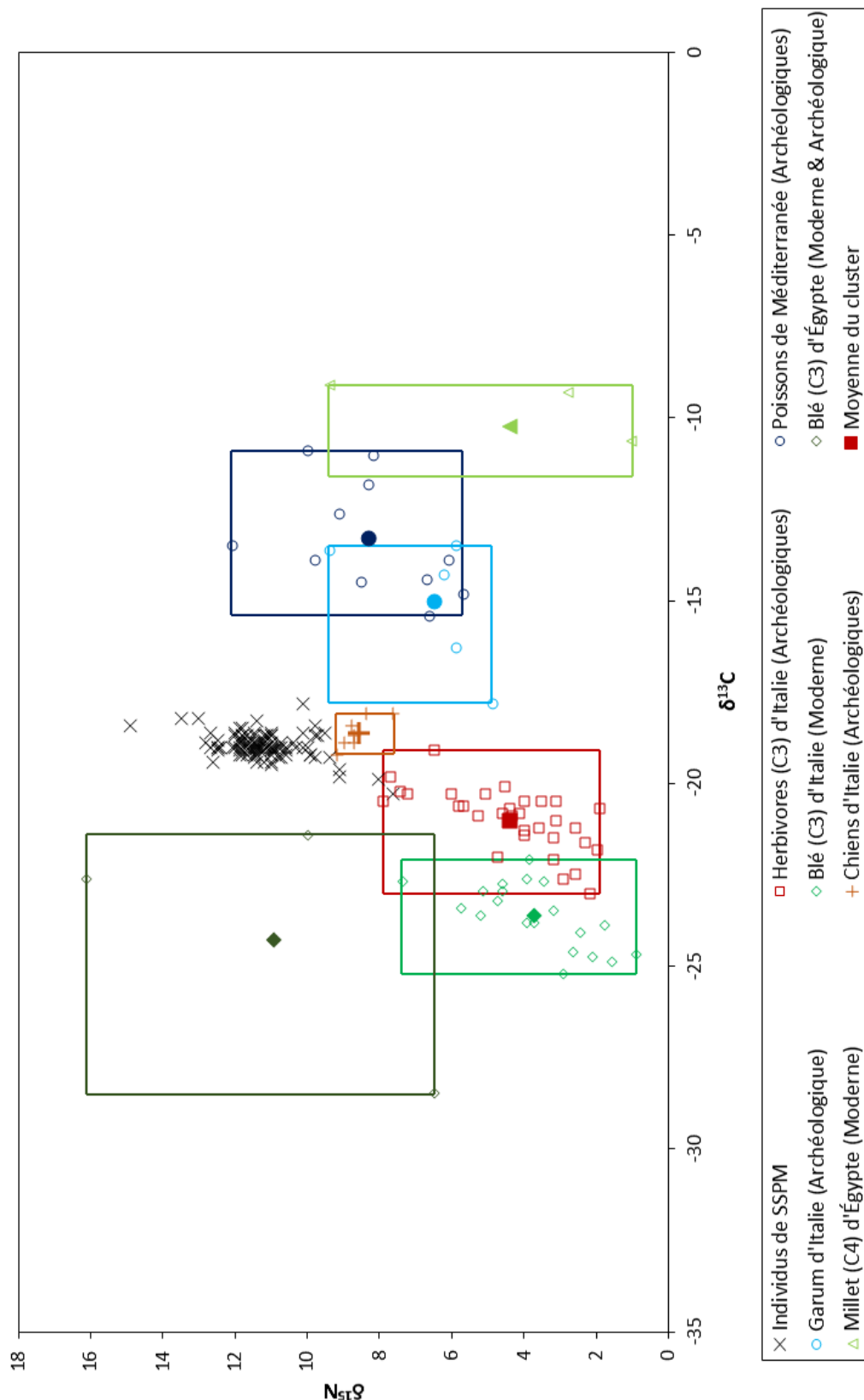


Figure 50. Projection des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ des individus inhumés dans la région X de la catacombe SSPM (phase collagénique) et de celles des ressources alimentaires ayant potentiellement été consommées par les sujets étudiés (mesures *bulk* pour les céréales et le *garum*, mesures réalisées sur le collagène osseux pour les animaux). Les boîtes représentent les limites inférieures et supérieures de chaque variable projetée ici et constituent les clusters de ressources alimentaires.

3.2.2. Les poissons marins comme ressources subsidiaires

La corrélation des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ aux âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$, les différences d'âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ au sein des différentes chambres ainsi que les anomalies chronologiques dans les séquences stratigraphiques nous ont permis de mettre en évidence qu'*a minima* un petit nombre individus ($n = 3$) avaient consommés des ressources marines (cf. Section V, 2.3). En prenant pour référence les âges $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ mesurés sur les mêmes os que les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ de ces individus, ou, à défaut, en prenant les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ de sujets placés stratigraphiquement en dessous de ces derniers, il est possible d'évaluer la quantité de ressources marines consommées. Pour l'individu 64 de la chambre X82/T18, nous avons pu déterminer en s'appuyant sur son âge $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et sur l'âge $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ du sujet 74 déposé avant lui que $24 \pm 15\%$ à $38 \pm 17\%$ des protéines consommées étaient d'origine marine. Pour les individus 15 et 170 de la chambre X83, nous avons pu estimer en se référant à l'âge $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ du sujet US216/Mand1 déposé avant eux que respectivement $22 \pm 15\%$ et $19 \pm 15\%$ des protéines consommées étaient d'origine marine. En moyenne, les protéines d'origine marine représentent donc moins de 50 % des protéines ingérées. Ceci suggérerait que les ressources marines aient été consommé en quantité significative mais aussi et surtout consommé en complément d'autres ressources, qui, au regard des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ relativement faibles de ces individus, ne peuvent être que des ressources terrestres C_3 . Par ailleurs, l'absence de corrélation entre les valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ nous permet de formuler l'hypothèse que les ressources animales marines consommées devaient de bas niveaux trophiques et avoir d'assez faibles valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$. C'est donc une alimentation mixte se composant de ressources marines et terrestres C_3 que ces trois individus sembleraient avoir eu. Ce régime alimentaire est-il l'apanage de ces quelques individus ou au contraire caractérise-t-il l'ensemble des individus échantillonnés ? Concernant la consommation de ressources terrestres C_3 des éléments de réponses ont déjà été avancés dans la Section précédente. Reste donc ci-après à discuter de la consommation de ressources animales marines à l'échelle populationnelle.

À l'exception notoire de trois sujets sur lesquels nous reviendrons plus tard, l'ensemble des individus ($n = 96$) présentent des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$ inférieures à 5,9 ‰, soit la valeur-seuil caractérisant une alimentation mono-isotopique (cf. Section II, 3.1.4, a ; Annexes 14 et 15). De telles valeurs indiqueraient que les individus avaient une alimentation mixte où les protéines ingérées détenaient des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ plus hautes que les glucides et lipides consommés. Cette alimentation mixte pourrait s'être composée de ressources animales marines ayant des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{protéine}}$ élevées et de ressources animales et végétales terrestres C_3 possédant des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{glucide}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{lipide}}$ plus faibles. Les proportions respectives de ces différentes ressources dans le régime alimentaire des individus auraient fortement fluctué au regard la variabilité importante des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$ (entre 3,1 et 5,8 ‰). L'absence de corrélation entre les valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ ($R^2 = 0,01$)

(Annexe 15) révéleraient que 1) les ressources animales marines consommées étaient de bas niveaux trophiques, et/ou, 2) les ressources animales terrestres C₃ avaient des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ relativement élevées. Cette hypothèse d'une alimentation mixte où prendraient part notamment des ressources marines se verrait conforter par le positionnement des individus dans les modèles de Froehle *et al.* (2010, 2012). Se plaçant pour la plupart (n = 86) au-dessus de la droite reliant les deux pôles du modèle de Froehle *et al.* (2010) modifié par Eerkens *et al.* (2013) (Figure 47), les individus auraient consommé des ressources non-terrestres C₃ riches en protéines et relativement faibles en glucides et lipides. Seules des ressources animales marines, en particulier des poissons, répondent à ces caractéristiques alimentaires. De façon empirique, il peut être estimé qu'entre 0 et 40 % du carbone du collagène osseux dériveraient des protéines marines et qu'entre 0 et 20 % du carbone de la phase carbonatée de l'os dériveraient des glucides et lipides marins (Figures 47 et 48). Les poissons étaient donc semble-t-il consommés en des quantités relativement importantes bien qu'inférieure à celles des ressources terrestres végétales et/ou animales C₃. Par ailleurs, la majeure partie des individus se positionne à l'intérieur ou aux abords du cluster 6 du modèle de Froehle *et al.* (2012) que nous avons précédemment défini (Figure 49) (*cf.* Section II, 3.2.5, b.2). Ce cluster caractérise un régime alimentaire se composant de ressources terrestres C₃ (entre 70 et 90 %), et, dans une moindre mesure, de ressources marines (entre 10 et 30 %). Parce que construit à partir d'un exemple théorique, le cluster 6 ne tient pas compte de la variabilité interhumaine des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ pour un tel régime alimentaire. Une modification des valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ de notre exemple théorique conduit ainsi à une translation du cluster selon une droite parallèle à l'axe des ordonnées. Il est donc probable que les individus localisés à proximité de ce cluster aient également eu accès en sus de ressources terrestres C₃ à des ressources animales marines.

L'ensemble des approches utilisées mettent toutes en évidence une consommation de ressources animales marines en complément de ressources terrestres C₃. Ces approches ne permettent toutefois pas d'appréhender de façon quantitative la part relative des différentes ressources consommées. De telles estimations, au regard des données dont nous disposons, ne peut se faire qu'en recourant à l'inférence bayésienne.

3.2.3. Un régime alimentaire *type* : la triade Céréale C₃/Viande C₃/Poisson marin

Le scénario d'une alimentation mixte se composant de céréales C₃ (blé) cultivées dans la péninsule italienne, de ressources carnées C₃ (herbivores) issues de la même région et de poisson provenant de mer Méditerranée s'est vu tester par une approche bayésienne. Lorsqu'aucune hiérarchisation des ressources alimentaires consommées n'est faite *a priori* des simulations

stochastiques, FRUITS estime qu'en moyenne 1) les individus auraient consommé en poids sec 56 ± 22 % de viande, 35 ± 24 % de céréales C_3 et 9 ± 5 % de poisson, et, 2) le régime alimentaire de ces derniers serait composé de 30 % de protéines et de 70 % de glucides et lipides (Tableau 31 ; Figure 51 ; Annexe 16). Dans la configuration où une priorisation de la consommation de blé est formulée en amont des simulations mathématiques, FRUITS évalue qu'en moyenne 1) les individus auraient consommé en poids sec 29 ± 13 % de viande, 65 ± 13 % de céréales C_3 et 6 ± 4 % de poisson, et, 2) le régime alimentaire de ces derniers serait composé de 26 % de protéines et 75 % de glucides et lipides (Tableau 31 ; Figure 51 ; Annexe 17). Dans les deux cas, la contribution des protéines à l'apport énergétique global de ces individus dépasserait celle de la majeure partie des populations actuelles d'Europe, d'Amérique ou d'Asie, lesquelles n'ingèrent en moyenne qu'entre 13 et 17 % de protéines, bien que des apports plus importants – frôlant les 30 % sans toutefois jamais les atteindre – aient quelquefois pu être constatés (Tableau 31 ; Annexes 16 et 17) (Lands *et al.* 1990 ; AHA 2000 ; Layman *et al.* 2003 ; Cordain *et al.* 2005 ; AFSSA 2007 ; Gropper et Smith 2012). Cette différence nous conduit à nous interroger quant à la fiabilité des estimations des apports protéiques proposées par FRUITS. Ces dernières paraissent quelque peu surévaluées. De plus, si une contribution des protéines à l'apport énergétique global de l'ordre de 26 % s'avère à l'échelle populationnelle déjà particulièrement élevée, un apport de l'ordre de 30 % s'avère, lui, démesuré et peu plausible. Le principe de parcimonie nous induirait à considérer comme plus vraisemblable l'hypothèse où l'apport protéique serait moindre, à savoir le scénario alimentaire avec une priorisation de la consommation du blé. Ainsi, un régime alimentaire *type* semblerait se dégager. Celui-ci serait fondé sur la triade Blé/Viande d'herbivore C_3 /Poisson marin. Ce régime *type* ne renverrait pas tant à l'idée que l'essentiel des individus ait consommé strictement les mêmes ressources en des quantités identiques mais plutôt à celles que la majorité des individus ait consommé en des proportions relatives similaires les ressources de la triade susdite. En d'autres termes, la notion de régime alimentaire *type* signifierait que les individus se soient sustentés de plus de blé que de viande et de plus de viande que de poisson.

Tableau 31. Estimations par FRUITS de la part relative des ressources alimentaires consommées et de la quantité de protéines et de glucides/lipides ingérés par les individus étudiés (n = 99)

Scénarios alimentaires testés	Types de ressources alimentaires consommées (%)					Type de macronutriments ingérés (%)		
	Herbivores (C_3) d'Italie	Blé (C_3) d'Italie	Blé (C_3) d'Égypte	Poissons de Méditerranée	Millet (C_4) d'Égypte	Protéines	Glucides & lipides	Bulk
Scénario 1 Sans hiérarchisation	$0,56 \pm 0,22$	$0,35 \pm 0,24$	-	$0,09 \pm 0,05$	-	$0,15 \pm 0,03$	$0,35 \pm 0,02$	$0,5 \pm 0$
Scénario 1 Avec hiérarchisation	$0,29 \pm 0,13$	$0,65 \pm 0,13$	-	$0,06 \pm 0,04$	-	$0,12 \pm 0,02$	$0,37 \pm 0,01$	$0,51 \pm 0$
Scénario 2 Avec hiérarchisation	$0,29 \pm 0,12$	-	$0,6 \pm 0,12$	$0,11 \pm 0,07$	-	$0,13 \pm 0,02$	$0,36 \pm 0,02$	$0,51 \pm 0$
Scénario 3 Avec hiérarchisation	$0,29 \pm 0,13$	$0,63 \pm 0,14$	-	$0,05 \pm 0,04$	$0,03 \pm 0,03$	$0,11 \pm 0,02$	$0,39 \pm 0,02$	$0,5 \pm 0,01$

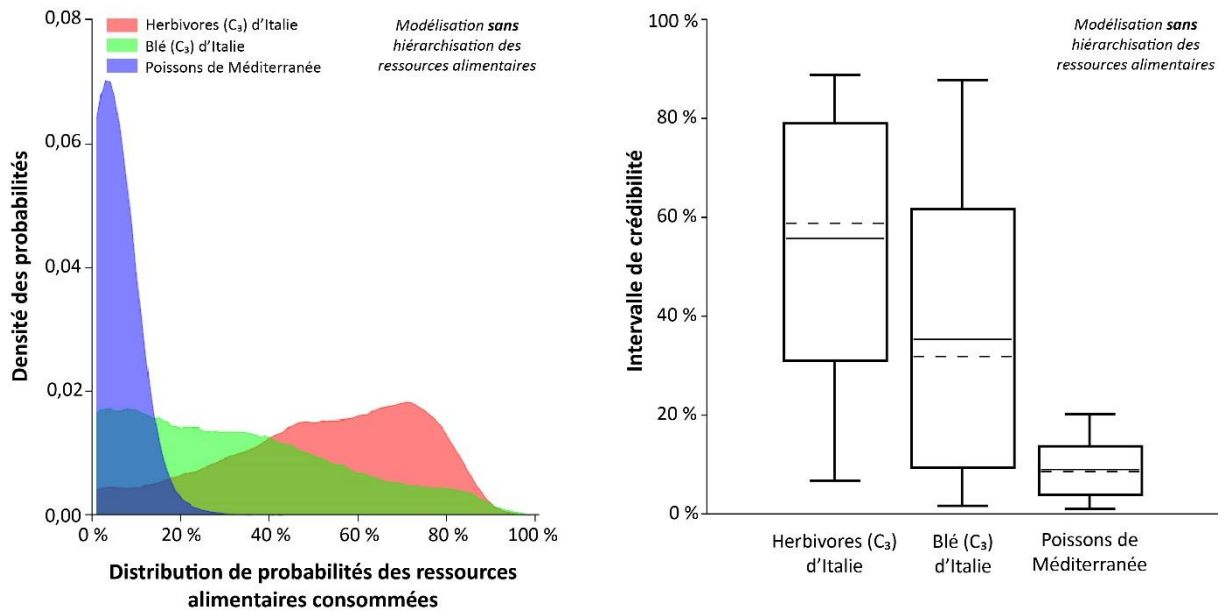


Figure 51. Estimations obtenues en sortie des simulations stochastiques réalisées par FRUITS pour le scénario 1 *sans* hiérarchisation des ressources alimentaires et faites pour la population SSPM totale (n =99). À gauche : distribution et densité associée des probabilités des ressources alimentaires consommées. À droite : intervalle de crédibilité associé à chacune des ressources alimentaires consommées.

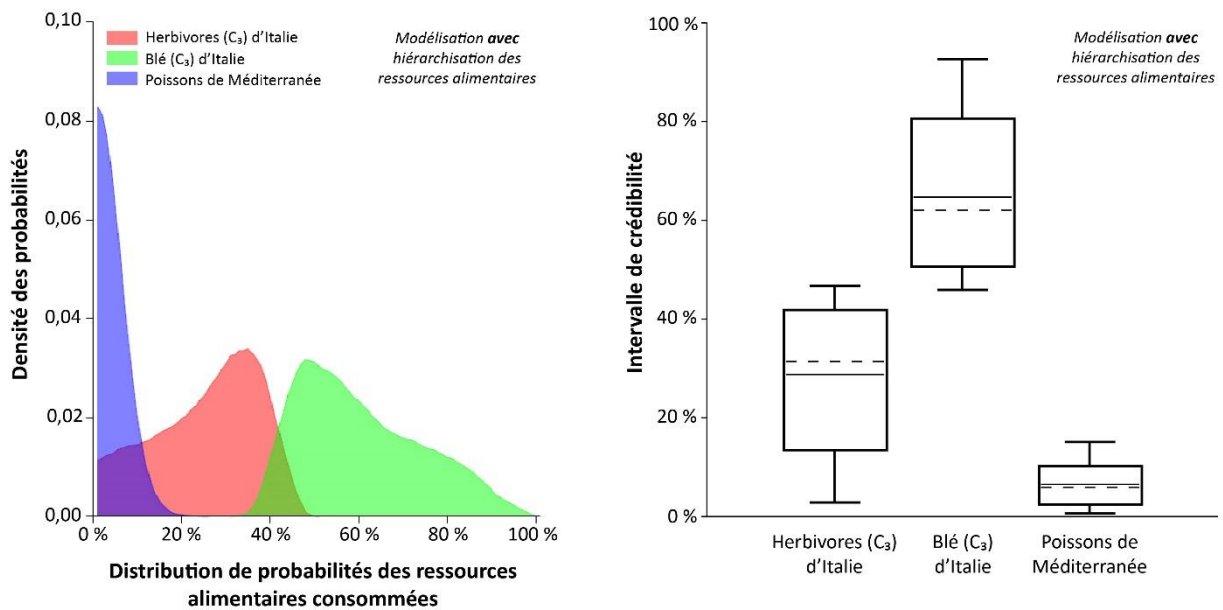


Figure 52. Estimations obtenues en sortie des simulations stochastiques réalisées par FRUITS pour le scénario 1 *avec* hiérarchisation des ressources alimentaires et faites pour la population SSPM totale (n =99). À gauche : distribution et densité associée des probabilités des ressources alimentaires consommées. À droite : intervalle de crédibilité associé à chacune des ressources alimentaires consommées.

3.2.4. Le millet et les poissons dulcicoles rarement consommés

En parallèle de ce régime alimentaire *type*, des ressources provenant d'autres environnements semblent avoir été consommées de façon occasionnelle par certains individus. En particulier, 10 individus (Tableau 32) se positionnant en dessous de la droite joignant les pôles inférieur et supérieur du modèle de Froehle *et al.* (2010) modifié par Eerkens *et al.* (2013) (Figure 51) sembleraient avoir consommés des ressources non-terrestres C₃ plus riches en glucides et lipides qu'en protéines. Ces ressources ne pourraient correspondre qu'à des végétaux C₄, à l'instar du millet. Pour ces individus, il peut être évalué de manière empirique qu'entre 0 et 60 % du carbone de la phase carbonatée de l'os dériveraient des glucides et lipides terrestres C₄ et qu'entre 0 et 20 % du carbone du collagène osseux dériveraient des protéines terrestres C₄ (Figures 51 et 52). Le scénario d'une alimentation où prendraient part des céréales C₃ (blé) d'Italie, de la viande d'herbivore C₃ aussi d'Italie, du poisson de Méditerranée et enfin des céréales C₄ (millet) a été testé via une approche bayésienne. Une priorisation de la consommation de ressources végétales C₃ a été de surcroît formulée en amont des simulations stochastiques conformément à ce que nous avons pu démontrer dans la Section précédente. Dès lors, FRUITS estime qu'en moyenne à l'échelle populationnelle 1) les individus auraient consommé en poids sec 29 ± 13 % de viande, 63 ± 14 % de blé, 5 ± 4 % de poisson et 3 ± 3 % de millet, et, 2) le régime alimentaire de ces derniers serait composé de 22 % de protéines et de 78 % de glucides et lipides (Tableau 31 ; Figure 53 ; Annexe 18). Ce résultat indique que d'une façon générale les ressources végétales C₄ ne seraient que peu consommées par les individus. Seule une dizaine pourrait s'en être sustenté occasionnellement en complément de ressources terrestres C₃ voire peut-être de ressources marines.

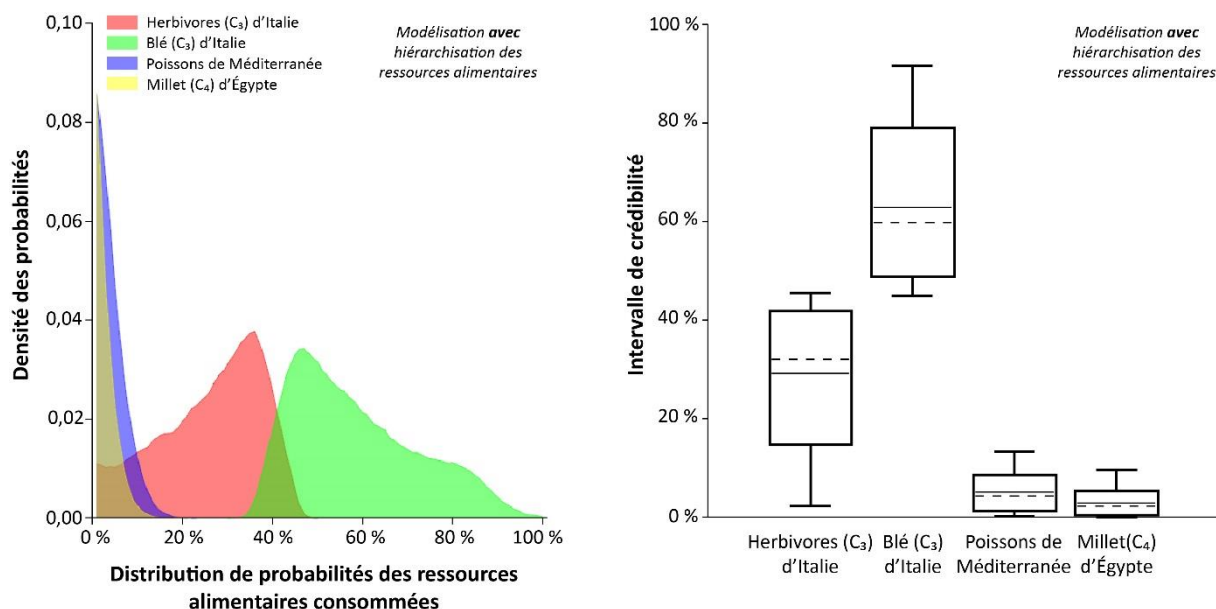
Par ailleurs, trois individus (Tableau 32) se positionnant en dessous du modèle de Froehle *et al.* (2010) modifié par Eerkens *et al.* (2013) (Figure 51) et se marginalisant par des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$ particulièrement élevées (> 5,9 ‰) comparativement au reste du groupe pourraient avoir eu accès à des ressources non prises en considération par ces approches, à l'instar des ressources animales dulcicoles. Une alimentation riche en protéines dulcicoles et terrestres C₃, riche en glucides C₃ mais pauvre en lipides dulcicoles et terrestre C₃ pourraient être la raison de l'emplacement atypique de ces individus dans le modèle de Froehle *et al.* (2010) modifié par Eerkens *et al.* (2013). De même, de telles valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$ pourraient être le fait d'une alimentation mixte se composant de ressources terrestres végétales et animales C₃ ainsi que des ressources animales dulcicoles, ces dernières pouvant présenter des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{protéine}}$ relativement basses, souvent inférieures ou égales à celles des plantes terrestres C₃.

Ainsi, si un régime alimentaire *type* se dégagerait parmi les individus étudiés, celui-ci ne serait pas pour autant exclusif. D'autres types d'alimentations pourraient en effet avoir existé. En revanche,

la prédominance des ressources terrestres C₃ semble un fil rouge à l’ensemble des régimes alimentaires mis en évidence.

Tableau 32. Listes des individus ayant consommés des ressources terrestres C₄ ou dulcicoles d’après le modèle de Froehle *et al.* (2010) et les valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$

	Modèle de Froehle <i>et al.</i> (2010)					$\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$	
	X78/T15	X81	X82/T18	X83	X84	X78/T15	X82/T18
Ressources terrestres C₄	-	n°13 Mand1 n°14 Mand1	32	108, 109, 115, US216 Mand1, US217 Mand1	28, 178, 187		
Ressources dulcicoles	LivelloXII n°42-44	-	79	-	-	LivelloXII n°42-44	32, 79



3.2.5. Quid de la consommation de blé africain et du *garum* ?

Si de nombreuses sources historico-archéologiques font état à Rome d’une forte consommation de blé importé des provinces frumentaires africaines ainsi que d’une utilisation

généralisée de certains condiments à l'image du *garum*, nos résultats ne nous ont pas permis jusqu'ici de mettre en lumière de tels faits.

Le blé africain se différencie principalement du blé européen par de plus hautes valeurs de $\delta^{15}\text{N}$. La consommation d'un tel blé pourrait modifier le régime alimentaire *type* mis en évidence. Aussi, un nouveau scénario alimentaire a été formulé pour se voir tester par une approche bayésienne. Ce scénario consiste en une alimentation mixte où prendraient part des céréales C_3 (Blé) d'Afrique, des ressources carnées C_3 (herbivores) d'Italie et du poisson de Méditerranée. Hormis la provenance du blé, ce scénario est donc identique à celui présenté dans la Section V, 3.3. Une priorisation de la consommation du blé a été une fois de plus retenue en amont des simulations stochastiques. FRUITS estime qu'en moyenne à l'échelle populationnelle 1) les individus auraient consommé en poids sec $29 \pm 12\%$ de viande, $60 \pm 12\%$ de blé, $11 \pm 7\%$ de poisson, et, 2) le régime alimentaire de ces derniers serait composé de 26% de protéines et de 74% de glucides et lipides (Tableau 31 ; Figure 54 ; Annexe 19). Malgré une substitution du blé italien par celui égyptien, les proportions des différentes ressources consommées restent inchangées ou presque. La consommation de ressources animales marines pourrait être à l'origine de cette non-différenciation des scénarios alimentaires. Bien que consommés en des proportions plus faibles que les céréales C_3 , le poisson marin, six fois plus riches en protéines et donc en azote que le blé, influencerait prioritairement les valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ des individus.

Les échantillons de *garum* présentent des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ nettement plus faibles que celles des poissons marins ($\Delta = -1,8\text{‰}$ en moyenne) (Figure 50). Or, nous pouvions nous attendre à ce que le *garum* détienne des valeurs similaires au principal ingrédient qui le compose. Au regard des données dont nous disposons, il nous est impossible de déterminer si cette différence est simplement due à une utilisation de poissons de bas niveaux trophiques pour lesquels nous ne disposons pas de données isotopiques dans notre référentiel alimentaire ou si cette différence est bien réelle. Une certitude, à elles seules les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ du *garum* ne peuvent expliquer celles mesurés sur la phase collagénique des individus étudiés.

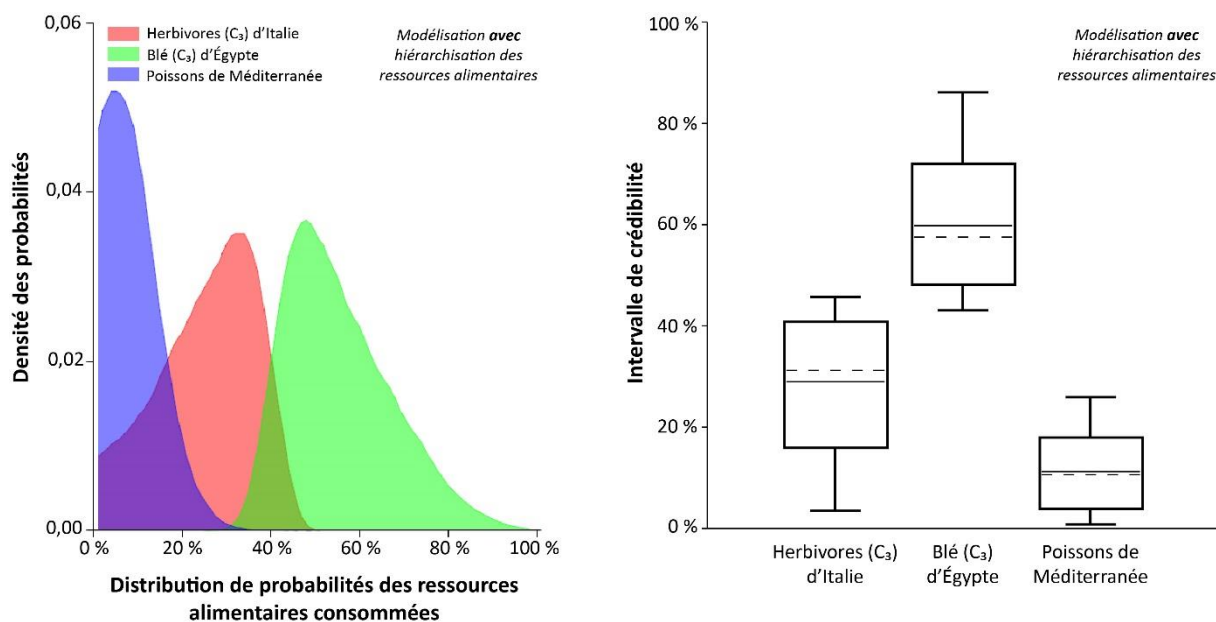


Figure 54. Estimations obtenues en sortie des simulations stochastiques réalisées par FRUITS pour le scénario 3 avec hiérarchisation des ressources alimentaires et faites pour la population SSPM totale (n =99). À gauche : distribution et densité associée des probabilités des ressources alimentaires consommées. À droite : intervalle de crédibilité associé à chacune des ressources alimentaires consommées.

3.3. Une certaine immuabilité du régime alimentaire au cours de la vie ?

Nous l'avons dit, il existe un enrichissement moyen en ^{13}C de la phase carbonatée de l'émail par rapport à celle de l'os de $+2,7\text{‰}$ ($\pm 3,4\text{‰}$; 2σ) (cf. Section II, 3.1.2, b). Cet enrichissement serait en outre systématique (Warinner et Tuross 2009 ; Webb *et al.* 2014). En s'appuyant sur ces éléments, un intervalle de valeurs d'enrichissement peut être établi. Celui-ci se bornerait par 0‰ et $+6,1\text{‰}$. Hormis quatre cas, tous les individus présentent des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}(\text{émail-os})$ comprises entre 0 et $3,6\text{‰}$ ($\bar{x} = 1,7\text{‰}$; $\sigma = 0,7\text{‰}$; $n = 119$) (Figure 55). Ces valeurs s'intègrent toutes dans l'intervalle défini ci-devant (Figure 55), *i.e.* dans la variabilité populationnelle attendue pour un même régime alimentaire. Ceci signifierait qu'aucun changement profond de l'alimentation n'ait eu cours de la prime enfance à la fin de la vie pour la quasi-totalité des individus (97 %). Trois individus se démarquent en revanche du reste de la population par des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}(\text{émail-os})$ négatives et un par une valeur de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}(\text{émail-os})$ nettement plus positive (Figure 55). Les trois individus dont les valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}(\text{émail-os})$ sont négatives auraient eu accès à l'âge adulte à des ressources possédant des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ plus hautes que celles des ressources consommées durant l'enfance. Deux de ces individus ont été reconnus précédemment comme des consommateurs de ressources dulcicoles sur la base de leurs valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}(\text{os})$. Ces deux individus ne se distingueraient donc pas par une alimentation différente durant leur enfance mais par une consommation de ressources atypiques à l'âge adulte. Il

pourrait en être de même pour le troisième individu bien que peu d'éléments viennent étayer cette hypothèse. Quant à l'individu présentant la valeur de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail-os)}}$ la plus positive dans notre population, celui-ci aurait eu accès à l'âge adulte à des ressources alimentaires détenant des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ plus basses que celles des ressources consommées pendant l'enfance. Sa valeur de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$ pourrait notamment être le reflet d'une très forte consommation de ressources terrestres C_4 voire de ressources marines durant l'enfance. Hormis ces quatre sujets, une certaine immuabilité du régime alimentaire des individus semblerait transparaître au regard des $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail-os)}}$. Toutefois, de plus amples investigations seraient nécessaires pour infirmer ou confirmer ce point

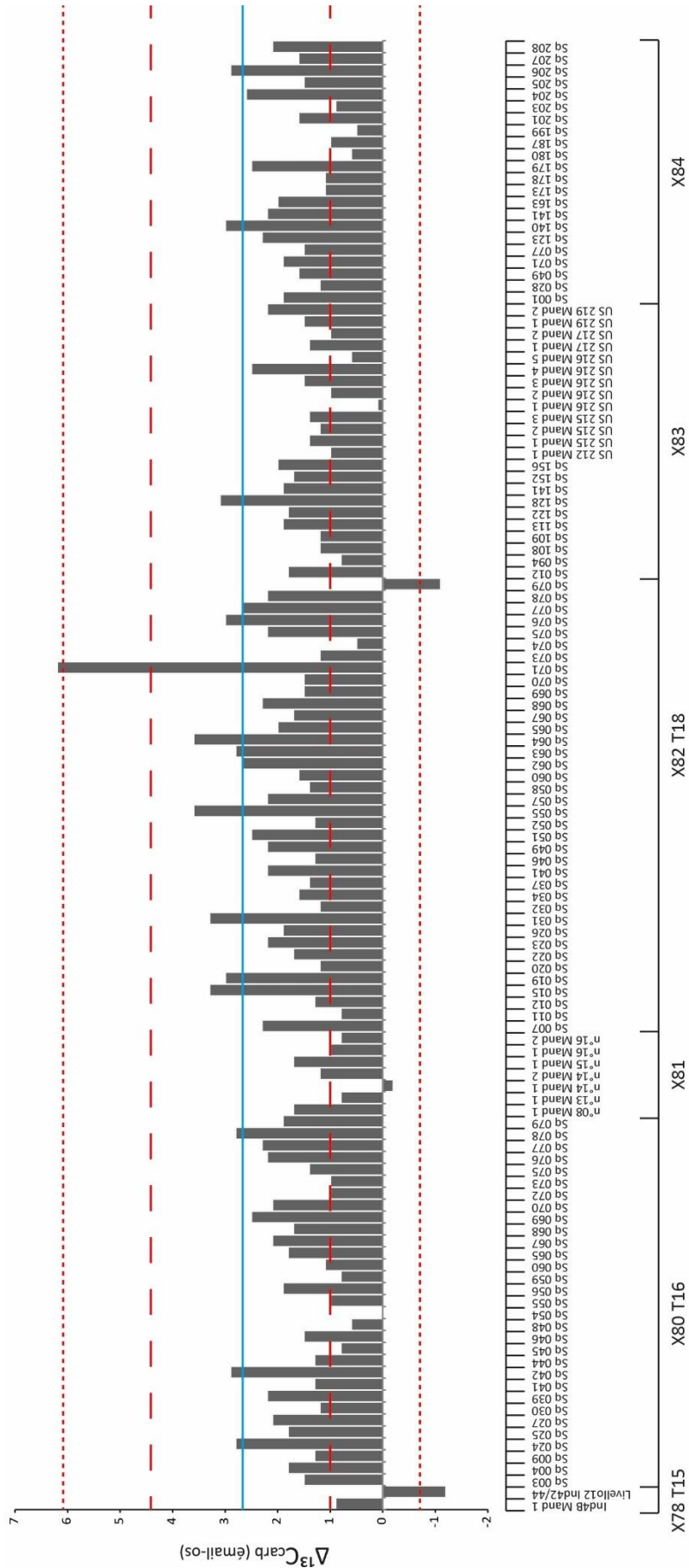


Figure 55. Diagramme présentant les valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ (‰) de l'ensemble des sujets (n = 123)

3.4. Singularité de l'alimentation des individus de la région X à Rome

Les sites de comparaison utilisés sont le site de la région I de la catacombe SSPM (Nitsch 2012), le site de la région Libérienne de la catacombe de Saint Calixte (Rutgers *et al.* 2009), la nécropole de Casal Bertone (Killgrove 2010 ; Killgrove et Tykot 2013) et celle de Castellaccio Europarco (Killgrove 2010 ; Killgrove et Tykot 2013). Tous ces sites sont datés d'entre le I^{er} et le IV^e s. ap. J.-C., ou, à défaut, d'une période chronologique recouvrant partiellement cet intervalle de temps.

Sur la base des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$, Nitsch (2012) a formulé l'hypothèse que les sujets de la région I auraient consommé des ressources végétales et animales terrestres C₃, mais aussi, en des proportions plus faibles, des ressources animales marines. Cette alimentation serait donc relativement similaire au régime alimentaire *type* mis en évidence pour notre population. Les deux populations présentent des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ relativement proches (Test U de Mann-Whitney ; *p*-valeur = 0,03). En revanche, notre population se différencie de celle de la région I par des valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ plus élevées (Test U de Mann-Whitney ; *p*-valeur = 0,03). En outre, en se chevauchant, les ellipses de confiance générées autour des centroïdes populationnels de l'ACP 1 mettent en évidence que la population de la région X de la catacombe SSPM détient une certaine affinité avec celle de la région I (Figure 56). À partir de ces faits, il peut être proposé que notre population ait consommé des ressources animales marines de plus hauts niveaux trophiques que celles dont s'est sustentée la population I. Les deux populations auraient toutefois mangé ces ressources en des quantités similaires.

En outre, en s'appuyant sur les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$, Killgrove (2010) ainsi que Killgrove et Tykot (2013) ont argué que les individus de Casal Bertone et de Castellaccio Europarco auraient consommé en complément de ressources terrestres C₃, des ressources végétales terrestres C₄ voire des ressources animales marines. Seule une poignée d'individus de notre population pourraient s'être nourrie de tous ces aliments à la fois. D'une façon générale, notre population détient des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ plus basses que celles des populations de Casal Bertone et de Castellaccio Europarco et des valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ bien plus hautes que celles de ces deux populations (Tests U de Mann-Whitney ; *p*-valeurs < 0,03). Les ellipses de confiance dessinées autour des centroïdes populationnels de l'ACP 2 mettent en exergue que notre population se discrimine assez nettement des populations de Casal Bertone et de Castellaccio (Figure 57). Ces différences suggéreraient que notre population ait consommé bien moins de ressources terrestres C₄ que les populations de comparaison et bien plus de ressources marines que ces dernières.

Enfin, à partir des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$, van der Linde (2008) et Rutgers *et al.* (2009) ont proposé que les individus de la région Libérienne de la catacombe de Saint Calixte aient eu accès en plus de ressources terrestres C₃ à des ressources dulcicoles. Possiblement trois individus de notre population pourraient avoir consommé une telle alimentation. D'une façon générale, les valeurs de

$\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ de notre population sont plus élevées que celles de la population de la catacombe de Saint Calixte (Tests U de Mann-Whitney ; p -valeurs = 0,00). L'absence de recoupement des ellipses de confiance générées autour des centroïdes populationnels de l'ACP 1 montrent que la population SSPM se distingue franchement sur la base de son alimentation de celle de Saint Calixte (Figure 56). Ces différences seraient le signe que notre population ait eu accès dans leur très grande majorité à des ressources marines plutôt que dulcicoles en sus de ressources terrestres C_3 .

In fine, les populations de Rome auraient toutes une même base alimentaire, à savoir les ressources végétales ou animales terrestres C_3 . Des ressources subsidiaires telles que le poisson marin ou d'eau douce et les céréales C_4 seraient consommées en complément de cette base alimentaire. Les populations romaines sembleraient se différencier les unes des autres grâce à ces dernières et aux quantités que représentent celles-ci dans le régime alimentaire *type*. Notre population se singulariserait par rapport aux autres en particulier par une plus forte consommation de ressources animales marines. D'une façon générale toutefois, nous relèverons l'existence d'une grande pluralité des régimes alimentaire à Rome durant l'époque impériale.

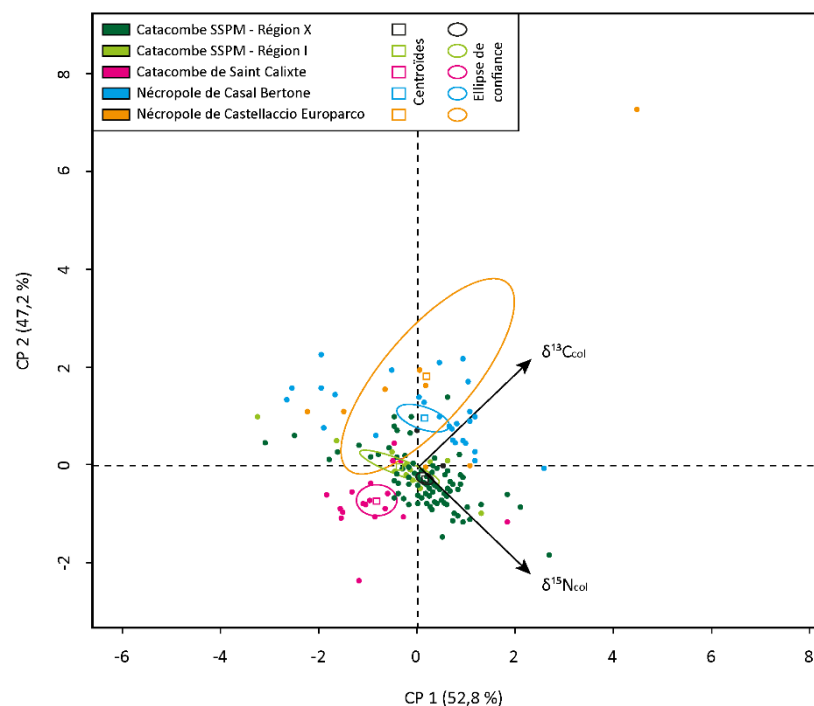


Figure 56. Représentation des composantes 1 et 2 de l'ACP 1 générée à partir des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ des populations de la région X et I de la catacombe SSPM (Cette étude et Nitsch 2012), de la région Libérienne de la catacombe de Saint Calixte (Rutgers *et al.* 2009), et des nécropoles de Casal Bertone et de Castellaccio Europarco (Killgrove 2010 ; Killgrove et Tykot 2013).

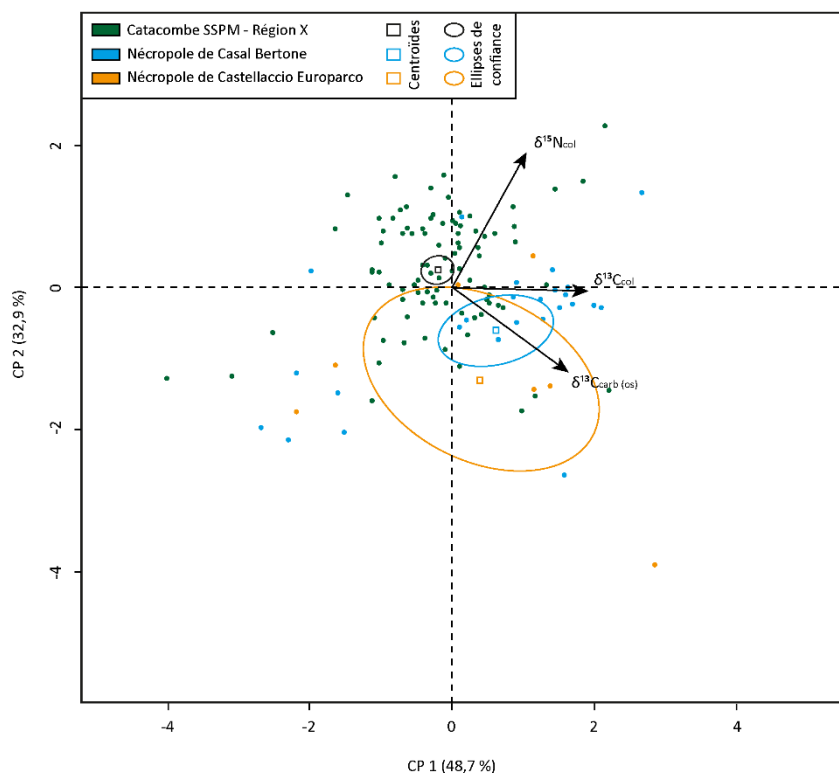


Figure 57. Représentation des composantes 1 et 2 de l'ACP 2 générée à partir des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ des populations de la région X de la catacombe SSPM (Cette étude) et des nécropoles de Casal Bertone et de Castellaccio Europarco (Killgrove 2010 ; Killgrove et Tykot 2013).

3.5. Conclusion

3.5.1. Quid des hypothèses historico-archéologiques ?

Nos résultats plaideraient en faveur d'une alimentation où les ressources végétales primeraient sur les autres denrées consommées. Les céréales C_3 , ou plus exactement le blé, s'avérerait être l'aliment de base des individus. Corollaire de ce fait, les ressources animales terrestres C_3 tiendraient une place secondaire mais néanmoins essentielle dans le régime alimentaire de ces individus. En outre, l'essentiel des individus auraient eu accès aux ressources animales marines, et ce parfois en des quantités très significatives bien que toujours inférieures à celles des ressources animales terrestres. Le régime alimentaire *type* des individus étudiés serait ainsi fondé sur la triade Céréale C_3 /Viande C_3 /Poisson marin. Si nos résultats paraissent corroborer les hypothèses historico-archéologiques 1, 4 et 5 exposées dans la Section I, 4.2, ils apportent une réponse moins franche à l'hypothèse 3. En dépit du fait que le millet était connu des Romains, les individus ne sembleraient pas dans leur majorité s'en être nourris. Seule une poignée d'individus – peut-être 10 – pourraient avoir eu accès en des proportions assez faibles à cette céréale C_4 . En outre, deux voire trois sujets pourraient

avoir consommées en de faibles quantités des ressources animales dulcicoles. Une telle consommation appuierait également l'hypothèse historico-archéologique 5. Par ailleurs, nos tentatives de mettre en évidence une éventuelle consommation de blé importé des provinces frumentaires africaines et de *garum* se sont révélées vaines en raison probablement d'une consommation de ressources animales marines. Les hypothèses historico-archéologiques 2 et 6 restent donc à ce stade sans réponse. Enfin, en raison de la très grande proximité des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ des *Suinae* avec celles des autres animaux terrestres herbivores C_3 , à l'instar des *Bovinae*, des *Equidae* ou des *Caprinae*, nous n'avons pu mettre en évidence si la viande de porc était effectivement la plus consommée tel que le laissait sous-entendre l'hypothèse historico-archéologique 4. Les éléments de réponses que nous apportons aux hypothèses historico-archéologiques ne valent toutefois que pour notre population.

3.5.2. De l'intérêt de recourir à différentes approches interprétatives

C'est en recourant à un ensemble d'approches et de modèles interprétatifs complémentaires que nous avons pu faire ressortir les résultats les plus percutants et sans doute aussi les plus crédibles. Ces approches et modèles sont d'autant plus indispensables qu'ils nous ont permis de prendre en considération un ensemble de facteurs limitants (*e.g.* modalité de routage des atomes, variabilité des facteurs de fractionnements, concentrations en macronutriments des ressources, priorisation des aliments consommés) qui d'ordinaire sont minimisés ou éludés par les approches plus classiques (*e.g.* biplot $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}/\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$). En outre, ces approches et modèles nous ont permis de quantifier, parfois de façon empirique, parfois de façon précise, la part respective des différentes ressources consommées, étape essentielle pour caractériser au mieux un régime alimentaire.

4. ÉTUDE DE LA MOBILITE

4.1. Identification des migrants et résidents romains

4.1.1. Identification des migrants et résidents durant l'enfance

a. Identification des individus allochtones

Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ ont été obtenus pour 38 individus. À partir des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ de ces derniers, des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ variant entre -9,8 et +2,6 ‰ ($\bar{x} = -5,4 \text{ ‰}$; $\sigma = 2,5 \text{ ‰}$) ont été estimées. Toutes ces valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ sont assorties

d'une erreur de mesure de $\pm 1 \text{ ‰}$ (cf. Section II, 4.1.2). Dans un souci de clarté, cette erreur de mesure est transférée des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ à celles de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$ de la Rome impériale des I^{er}-III^e s. ap. J.-C. (cf. Section II, 4.3.1, a.2.4). Deux zones d'incertitude de 1 ‰ de part et d'autre des bornes inférieure (i.e. -7,7 ‰) et supérieure (i.e. -4,6 ‰) de l'intervalle de valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$ ont ainsi été établies. Tout individu dont la valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ est supérieure à -8,7 ‰ ou inférieure à -3,6 ‰ peut donc être considéré comme migrant. En revanche, tout individu à l'intérieur de cette zone d'incertitude peut tout aussi bien être migrant que résident romain. Parmi les individus de ce corpus, neuf peuvent sur cette base être considérés comme migrants. Parallèlement, en comparant les valeurs de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ aux rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques de Rome (cf. Section II, 4.3.2, a.1), cinq individus de ce corpus peuvent être assimilés à des migrants. Sur la base des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ ce ne sont donc pas moins de 14 individus différents qui peuvent être identifiés comme migrants. Pour seulement trois sujets, les deux proxys isotopiques vont dans le même sens en indiquant de façon concordante une origine extra-romaine de ces derniers. À l'inverse, pour 11 individus, les proxys isotopiques fournissent des informations pouvant de prime abord paraître discordantes en indiquant, pour les uns, une potentielle origine extra-romaine, et, pour les autres non. Pour ces derniers, trois configurations sont observées, à savoir 1) les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ ne sont pas compris dans l'intervalle local et les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ tombent dans la zone d'incertitude autour des bornes de l'intervalle local (n = 4), 2) les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ sont distantes de plus 1 ‰ des bornes de l'intervalle local et les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ sont compris dans l'intervalle local (n = 6), et 3) les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ sont distantes de plus 1 ‰ des bornes de l'intervalle local et les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ sont en dehors de l'intervalle locale (n = 1). Tout ceci pourrait s'expliquer par 1) des caractéristiques géographiques ou géologiques plus ou moins similaires de la région d'origine à celles de Rome, 2) des caractéristiques isotopiques des eaux et des substrats géologiques des régions d'origine identiques, ou presque, à celles de Rome, voire, 3) une consommation de ressources alimentaires importées provenant de régions aux conditions climatiques ou aux substrats géologiques différents de ceux de Rome.

En plus des 38 individus précédents, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ ont été obtenues pour 86 autres sujets. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ estimées à partir de ces dernières varient entre -9,2 et -2,1 ‰ ($\bar{x} = -5,4 \text{ ‰}$; $\sigma = 1,6 \text{ ‰}$). Parmi ce corpus de 86 individus, 13 présentent des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ strictement inférieures à -8,7 ‰ ou strictement supérieures à -3,6 ‰ et peuvent donc être assimilés à des migrants de façon certaine. Plus précisément, deux individus présentent des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ très basses et 11 des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ très hautes.

Au total, ce serait donc 27 individus qui auraient vécu leur enfance en dehors de Rome sur la base des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ estimées à partir de celle de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ ainsi que des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ considérés de concert ou séparément. Ce nombre de migrants doit toutefois être

appréhendé comme un nombre minimal, et ce pour deux raisons. La première tient au fait qu'une partie des individus a des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ tombant dans la zone d'incertitude autour des bornes de l'intervalle de valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$. Dès lors, ces derniers peuvent tout aussi bien être résidents romains qu'étrangers. La seconde tient au fait que les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{email}}$ n'ont été mesurés que sur un sous-échantillon d'individus. Or, nous l'avons vu, en particulier pour l'individu 79 de la chambre X80/T16, en dépit d'une valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ s'intégrant parfaitement dans l'intervalle local, un individu peut avoir un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{email}}$ très différent de ceux des substrats géologiques locaux et ainsi se voir assimiler à un migrant. Une étude plus exhaustive aurait peut-être pu fournir une vision de notre population différente de celle que nous avons à ce stade.

Par ailleurs, l'erreur de mesure de $\pm 1\text{‰}$ associée aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ n'est jamais, à notre connaissance, prise en compte pour discuter l'allochtonie d'un individu. Seules les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ estimées sont en règle générale considérées et comparées aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau}}$ d'un référentiel dont les bornes servent de valeurs-seuils permettant de déterminer si un individu est local ou non-local. L'erreur de mesure est pourtant conséquente. L'éluder peut donc s'avérer particulièrement risqué et conduire à des interprétations fausses des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$. En effet, sans prise en compte de cette erreur de mesure, le nombre de migrants potentiels dans notre population totale passerait à 48 individus sur la base des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ seules voire 51 sur la base de ces dernières et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{email}}$, soit près du double du nombre précédemment avancé. Notre approche de la mobilité nous paraît plus prudente que celle consistant à ne pas tenir compte de cette erreur de mesure. Corolaire de ce fait, à savoir la possible sous-estimation du nombre de migrants au sein de notre population, seuls les cas les plus extrêmes sont par l'approche que nous avons suivie mis en exergue.

b. Identification des sujets locaux

Pour être considéré comme résident romain, un individu doit présenter une valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ comprise entre -6,7 et -5,6 ‰, soit à plus de 1 ‰ (en valeur absolue) des bornes inférieure et supérieure de l'intervalle de valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$. En revanche, un individu présentant une valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ qui se positionne à moins de 1 ‰ (en valeur absolue) des bornes de l'intervalle de valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$ ne pourra se voir attribuer un statut de résident ou de migrant (zones d'incertitude). Sept individus du corpus des 38 sujets pour lesquels nous avons obtenu des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (email)}}$ et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{email}}$ peuvent sur cette base être identifiés comme des résidents romains. Parmi ceux-ci, un individu possède un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{email}}$ bien plus élevé que les autres et en dehors de l'intervalle des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques de Rome (cf. Section II, 4.3.2, a.1). Aussi, sur la base des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{email}}$ pris de concert, six

individus peuvent être assimilés à des locaux. En outre, parmi les 86 individus pour lesquels nous n'avons obtenu que des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$, 26 ont des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ comprises entre -6,7 et -5,6 ‰ et peuvent de ce fait être considérés comme résidents romains. Ce sont donc au total à l'échelle populationnelle 32 sujets qui peuvent être considérés comme habitants de Rome durant l'enfance.

L'approche que nous avons suivie ne permet pas de statuer sur le fait qu'un individu soit migrant ou résident pour plus de la moitié de la population ($n = 65$; $n_{\text{total}} = 124$). Ces individus non classés sont tous positionnés dans les zones d'incertitude que nous avons établies. Ce chiffre conséquent n'est pas tant le reflet des limites de notre approche que celles de l'utilisation des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ estimées à partir des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ pour discuter de la mobilité par comparaison à un référentiel local. En d'autres termes, attribuer un statut de migrant ou de résident à ces 65 individus non classés serait selon nous spéculatif et possiblement faux.

4.1.2. Identification des migrants et résidents durant l'âge adulte

a. Identification des individus allochtones

Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ ont été obtenus pour cinq individus seulement. À partir des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$, des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ variant entre -7,4 et -3,7 ‰ ($\bar{x} = -5,6$ ‰ ; $\sigma = 1,5$ ‰) ont été estimées. Au sein de ce corpus, aucun migrant n'a été reconnu. En plus de ces 5 individus, des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ ont été obtenues pour 123 autres sujets. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ estimées à partir de ces dernières varient entre -8,5 et -2,1 ‰ ($\bar{x} = -5,1$ ‰ ; $\sigma = 1,1$ ‰). Parmi ces 123 individus, 6 présentent des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ strictement supérieures à -3,6 ‰ et peuvent être considérés comme des migrants. Ce nombre de migrants doit cependant une fois encore être appréhendé comme un nombre minimal pour les mêmes raisons que celles que nous avons évoquées dans la Section V, 4.1.1, a. Par une approche plus classique faisant fi de l'erreur de mesure associée aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ estimées, non plus 6 mais 33 individus auraient pu être identifiés comme migrants. Mais nous réitérerons ici le fait que l'approche que nous avons choisie de mener est assurément plus prudente que les approches classiquement suivies. Enfin, d'une façon générale, sur la base de nos résultats, il semblerait qu'un plus grand nombre d'individus ait immigré à Rome durant l'enfance que durant l'âge adulte. En somme, ce sont donc 30 individus qui auraient migré au cours de leur vie entre l'enfance et l'âge adulte.

b. Identification des sujets locaux

Parmi les cinq individus pour lesquels des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ ont été obtenus, deux peuvent être considérés comme résidents romains avec des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ comprises entre -6,7 et -5,6 ‰ et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ cohérents avec ceux des substrats géologiques de la capitale impériale. En revanche, les trois autres individus de ce corpus ont des proxys isotopiques fournissant des informations potentiellement discordantes avec des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ comprises dans les zones d'incertitude et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{os}}$ s'intégrant parfaitement dans l'intervalle de rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ locaux. Trois hypothèses peuvent être émises pour expliquer une telle combinaison de proxys, à savoir 1) les individus sont bel et bien locaux, leur localisation dans la zone d'incertitude n'étant pas incompatible avec ce fait, 2) les individus sont étrangers à Rome mais ont vécu sur des substrats géologiques de mêmes compositions isotopiques que ceux de la région de Rome, ou, 3) les individus ont vécu à Rome mais ont eu accès à une alimentation importée aux rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ différents de ceux des aliments provenant de la région de Rome. Il nous est cependant à ce stade impossible de trancher en faveur d'une de ces hypothèses. En outre, parmi les 123 individus pour lesquels nous ne disposons que des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$, 40 ont des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ comprises entre -6,7 et -5,6 ‰ et peuvent de ce fait être considérés comme résidents romains. Ce sont donc au total à l'échelle populationnelle 42 sujets qui semblent avoir vécu durant l'âge adulte à Rome. Parmi ceux-ci, 14 seulement peuvent être considérés résidents romains tout au long de leur vie d'après leurs différents proxys isotopiques.

In fine, seul un peu plus d'un tiers des individus ont pu selon l'approche que nous avons suivie être identifiés à l'âge adulte comme migrants ou résidents romain ($n = 48$; $n_{\text{total}} = 128$). Ce résultat met une fois encore en lumière les limites du recours aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ estimées à partir des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ auxquelles est assortie une erreur de mesure relativement importante pour étudier la mobilité.

4.1.3. Une identification des migrants et résidents romains sur la base de leur alimentation ?

Il n'existe aucune différence statistique 1) entre les 14 résidents romains ayant vécu toute leur vie dans la cité et les 27 migrants ayant vécu leur enfance ailleurs qu'à Rome, et, 2) entre l'ensemble des migrants et le reste de la population au regard des proxys $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ considérés un à un (Tests U de Mann-Whitney ; p -valeurs $> 0,09$) ou conjointement (NPMANOVA ; p -valeurs $> 0,26$). Sur un plan strictement alimentaire, les migrants pris dans leur globalité ne sembleraient donc pas avoir eu des régimes alimentaires distincts. Projetés dans le modèle de Froehle *et al.* (2012), les migrants se superposent parfaitement sur 1) les résidents romains ou 2) le reste de la

population. Le positionnement des migrants suggérerait que ces sujets aient eu accès, à l'image des non-migrants, à une alimentation essentiellement C₃ terrestre (céréales C₃ et viande d'herbivore C₃) voire pour partie marine (poissons) (Figure 58).

Au cas par cas toutefois, certains migrants se démarquent. L'individu 71 de X82/T18 qui détient de loin la plus haute valeur de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$ (-7,7 ‰) au sein de la population SSPM, se serait sustenté durant l'enfance de ressources C₄ en de très fortes proportions comparativement aux autres individus étudiés. Sa valeur de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ entre en revanche parfaitement dans la variabilité populationnelle. Ce sujet, ayant pu émigrer à Rome, aurait changé d'alimentation entre l'enfance et l'âge adulte, peut-être afin de se conformer aux pratiques alimentaires de la capitale impériale. En outre, l'individu n°13/Mand1 de X81 qui possède la valeur de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ la plus élevée (14,9 ‰) de notre population (cf. point le haut sur la Figure 58) aurait eu accès, à l'âge adulte, à plus de ressources marines que les autres sujets étudiés. Cette consommation atypique de ressources marines pourrait être mise en relation avec le fait que cet individu se soit installé à Rome au terme de sa vie, quelques mois voire années avant sa mort si l'on se réfère à ses valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$. De plus, l'individu LivelloXII/n°42-44 de 78/T15 qui présente la seconde valeur de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$ la plus haute (7,5 ‰) au sein de la population SSPM (cf. point le plus bas sur la Figure 58) aurait consommé à l'âge adulte bien plus de ressources dulcicoles que les autres individus étudiés. Avec également la plus faible valeur de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail-os)}}$ (-1,5 ‰) de la population, ce sujet pourrait avoir consommé durant son enfance dans sa région d'origine des ressources dulcicoles ou terrestres possédant des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ très faibles. Ce changement de régime alimentaire ou de types de ressources dulcicoles pourraient avoir eu lieu de façon concomitante à sa migration. Hormis ces trois cas, aucun autre migrant ne se distingue par des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$, de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ ou de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ atypiques ou extrêmes.

Il s'avère *in fine* impossible d'identifier sur la base des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$, de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ ou de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ un migrant d'un non-migrant. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le régime alimentaire *type* mis en évidence plus en amont dans ce travail prévaut d'une façon générale pour tout l'Empire romain. Ceci pourrait également s'expliquer par le fait que l'essentiel des données relatives à l'alimentation que nous avons valent pour les dernières années voire décennies de la vie des individus. Or, la plupart des migrants viennent à Rome entre l'enfance et le début de leur vie d'adulte. S'ils adoptent les pratiques alimentaires de la cité, ils ne se différencieront alors plus par leurs valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ ou de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ des résidents Romains. Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (émail)}}$ considérées seules n'offrent quant à elles qu'une vision générale de l'alimentation durant l'enfance. Considérées en regard de celles de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$, elles ne permettent d'appréhender que les changements importants d'alimentation.

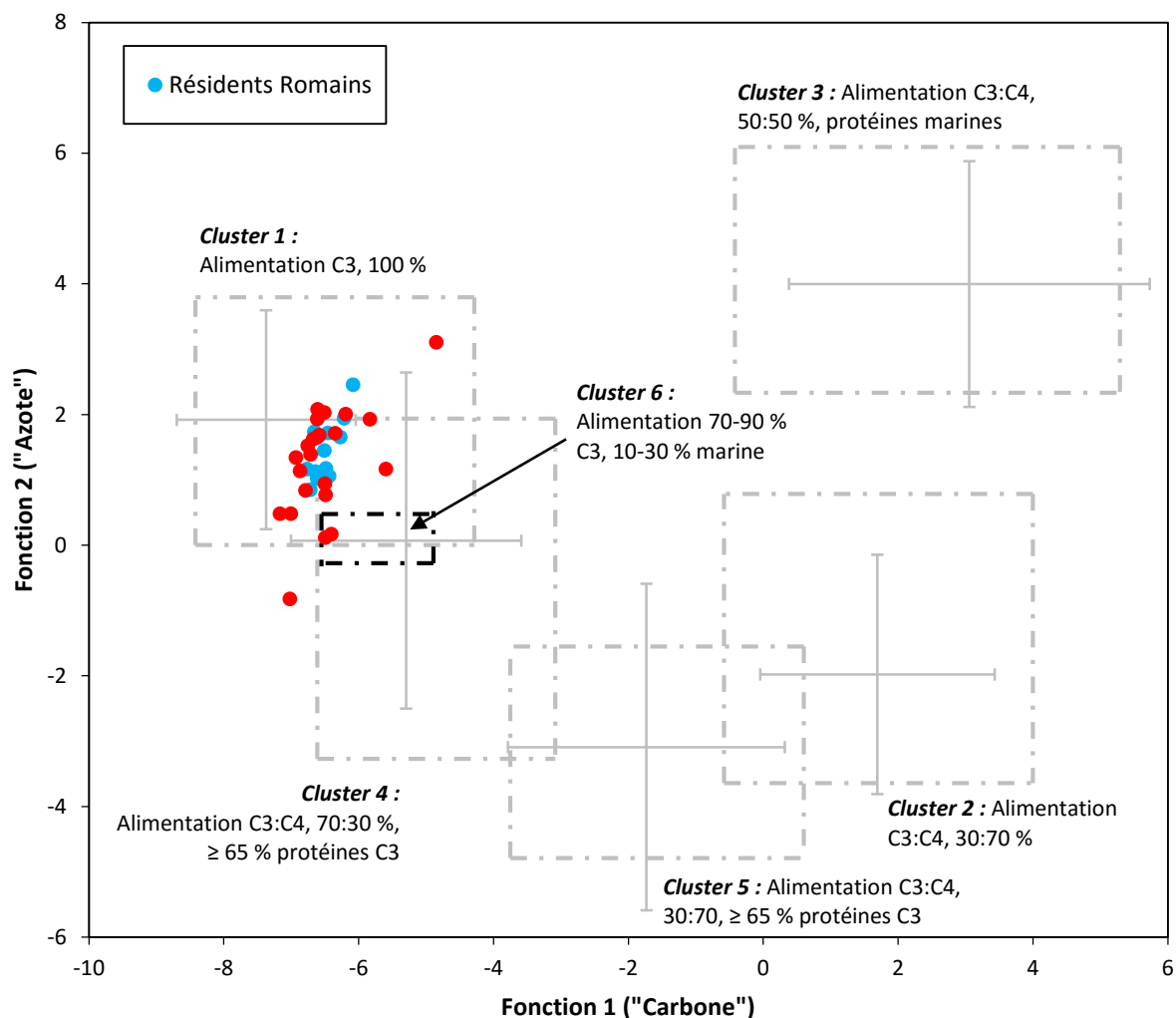


Figure 58. Projections des résultats des analyses factorielles discriminantes obtenus pour les migrants et les résidents romains sur le modèle de Froehle *et al.* (2012).

4.2. Trajectoire de vie et origines géographiques des migrants

Toutes les hypothèses formulées dans cette section tiennent compte de l'erreur de mesure associée aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$. Le caractère ubiquiste des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux superficielles et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques, la possibilité de consommer des ressources importées et enfin la potentialité qu'un individu vienne à Rome de n'importe quelle province de l'Empire qui s'étirait sur trois continents ne donnent à nos interprétations qu'un statut d'hypothèses, de fait, donc, discutables. Les hypothèses exposées sont toutefois celles que nous considérons les plus parcimonieuses.

4.2.1. Schéma de mobilité I : migrations des sujets vers Rome après l'enfance

a. L'Ibérie/l'Afrique du Nord/l'Arabie pour origine

Avec des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (émail)}}$ strictement supérieures à -3 ‰, trois migrants (Sq045 de X80/T16 ; Sq141 et US219/Mand2 de X83) seraient originaires d'Ibérie, d'Afrique du Nord ou encore d'Arabie. Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ de ces sujets, bien que compatibles avec les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques de Rome, entrent en outre dans la variabilité des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques peu radiogéniques de ces trois régions. Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ de ces derniers sont toutefois trop peu discriminants pour identifier des lieux de résidence mieux circonscrits. Assimilé à un résident romain à l'âge adulte d'après sa valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (os)}}$, l'individu 141 de X83 aurait immigré vers la capitale impériale plusieurs années voire décennies avant sa mort. D'après l'évolution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ entre l'enfance et l'âge adulte, les individus 45 de X80/T16 et US219/Mand2 de X83 auraient émigré après l'âge de 8 ans de leur région d'origine. Il nous est cependant impossible de déterminer avec certitude si ces derniers vécurent ou non à Rome (Tableau 33 ; Annexe 20).

En outre, avec des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (émail)}}$ comprises entre -3 et -2 ‰, cinq autres individus (Sq069 de X80/T16 ; Sq026 et Sq031 de X82/T18 ; Sq108 et Sq152 de X83) auraient vécu une partie de leur enfance en Ibérie, en Afrique du Nord ou en Arabie. En revanche, d'après l'évolution de leurs valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ entre l'enfance et l'âge adulte, ces individus sembleraient avoir migré de leur région d'origine après l'âge de 8 ans vers une destination qu'il nous est difficile de déterminer précisément tant leurs valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (os)}}$ sont peu discriminantes. Rome serait toutefois de l'ordre du possible et l'hypothèse la plus parcimonieuse (Tableau 33 ; Annexe 20).

Tableau 33. Présentation des valeurs isotopiques et des schémas de mobilité des migrants

Salle	Identifiant	Émail		Os		Schéma de mobilité
		$\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ (‰ VSMOW)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ (‰ VSMOW)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	
X78/T15	Ind 4.b Mand1	-3,9	-	-3,4	-	III-bis
	LivelloXII-n°42-44	-7,7	0,711996	-7,3	-	II-bis
X80/T16	Sq024	-8,3	0,708500	-7,4	0,709860	II-bis
	Sq045	-2,1	0,710090	-4,6	-	I-bis
	Sq054	-9,2	-	-5,7	-	I
	Sq068	-3,1	-	-6,2	-	I
	Sq069	-2,1	-	-5,2	-	I-bis
	Sq079	-6,5	0,713875	-4,9	-	I-bis
X81	n°13 Mand1	-1,1	0,707829	-2,9	-	II
	n°14 Mand2	-3,4	-	-4,9	-	I-bis
X82/T18	Sq026	-2,8	-	-3,9	-	I-bis
	Sq031	-2,1	-	-5,4	-	I-bis
	Sq049	-3,4	0,709109	-5,1	-	I-bis
	Sq068	-3,9	-	-3,3	-	III-bis
	Sq071	-9,4	0,710256	-5,2	-	I-bis
	Sq074	-5,9	-	-2,1	-	III
	Sq076	-3,3	-	-3,3	-	II
X83	Sq093=113=115	-9,8	0,706902	-7,2	-	I-bis
	Sq108	-2,1	-	-3,7	-	I-bis
	Sq128=145	-8,0	0,708170	-6,5	-	I
	Sq141	-2,9	0,709862	-6,0	-	I
	Sq152	-2,6	-	-4,1	-	I-bis
	US215 Mand1	2,6	0,708589	-4,4	-	I-bis
	US216 Mand2	-3,1	-	-4,2	-	I-bis
	US217 Mand1	-8,8	-	-4,7	-	I-bis
	US219 Mand1	-2,4	0,708333	-2,4	-	II
	US219 Mand2	-2,3	0,709904	-4,6	-	I-bis
X84	Sq001	-3,3	-	-5,7	-	I
	Sq028	-3,3	-	-5,7	-	I
	Sq140	-4,6	0,712022	-4,7	-	I-bis

b. L'Europe/l'Afrique du Nord/l'Arabie pour origine

Au regard de sa valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ (émail) l'individu 49 de X82/T18 serait originaire d'Afrique du Nord, d'Arabie ou bien du littoral méditerranéen (à l'exception du nord de la côte levantine). En outre, son rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$, bien qu'encore une fois compatible avec les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats géologiques, s'intègre également dans la variabilité des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des sols et des

roches peu radiogéniques ($\approx 0,709$) de ces régions extra-romaines (cf. Section II, 4.3.2, b). Par ailleurs, exposés aux embruns marins et aux fortes précipitations, les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des sols des régions côtières peuvent se voir influencer en certains lieux par les ceux des eaux océaniques ($\approx 0,7092$) (cf. Section II, 4.2.3). Définir précisément où dans ces trois régions, l'individu 49 de X82/T18 est originaire paraît donc impossible. Au regard du changement de valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ entre l'enfance et l'âge adulte, ce sujet aurait migré après son enfance probablement vers Rome ou à défaut vers une destination possédant un signal isotopique peu ou prou similaire à celui de Rome (Tableau 33 ; Annexe 21).

Tout comme le précédent individu, cinq autres sujets (Sq068 de X80/T16 ; n°14/Mand2 de X81 ; US216 Mand2 de X83 ; Sq001 et Sq028 de X84) auraient habité durant leur enfance en Afrique du Nord, en Arabie ou le long du littoral méditerranéen au regard de leurs valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (émail)}}$. Ceux-ci auraient ensuite émigré au cours de leur vie de leur région d'origine. Trois individus (Sq068 de X80/T16 ; Sq001 et Sq028 de X84) auraient choisi Rome pour destination finale où ils y auraient vécu plusieurs années voire décennies avant leur mort au regard de leurs valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (os)}}$. Deux individus auraient pu suivre le même itinéraire sans que nous puissions en être sûr d'après leurs valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (os)}}$ relativement ubiquistes dans les régions tempérées (Tableau 33 ; Annexe 21).

c. *L'Europe/l'Afrique du Nord/l'Asie mineure pour origine*

D'après son rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ et sa valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (émail)}}$, l'individu 140 de X84 pourrait avoir vécu son enfance dans le piémont de l'Atlas, dans certaines enclaves libyennes et égyptiennes localisées dans l'arrière-pays ou bien encore sur le littoral de l'Ibérie, de l'Italie (nord-ouest et extrême sud) et de la Turquie. Mort à Rome avec une valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (os)}}$ pouvant entrer dans la variabilité des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{aqueduc}}$, cet individu pourrait avoir migré depuis sa région d'origine vers Rome au cours de sa vie d'adulte sans que nous puissions en être certain (Tableau 33 ; Annexe 22).

En outre, avec des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (émail)}}$ comprises entre -9,2 et -8,8 ‰, les individus 54 de X80/T16 et US217/Mand1 de X83 pourraient avoir vécu leur enfance dans des aires géographiques différentes telles que les régions non-côtières du nord de la Méditerranée et les régions montagneuses d'Europe, d'Asie mineure ou d'Afrique du Nord. L'individu 54 de X80/T16 aurait gagné Rome plusieurs années voire décennies avant sa mort et serait devenu résident romain au regard de sa valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (os)}}$. En revanche, si l'évolution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ entre l'enfance et l'âge adulte indique une migration de l'individu US217/Mand1 de X83, il nous est impossible d'affirmer que Rome fut sa destination première sur la base de sa valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (os)}}$ peu discriminante (Tableau 33 ; Annexe 22).

d. L'Europe/l'Asie mineure pour origine

Avec des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (émail)}}$ strictement inférieures à -9 ‰, les individus 71 de X82/T18 et 93 de X83 seraient originaires de régions montagneuses d'Europe (Apennins, Alpes et Carpates) ou d'Asie mineure voire de régions d'Europe centrale ou du Nord. De même, avec sa valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (émail)}}$, l'individu 128 de X83 pourrait être également originaire de ces régions montagneuses ou septentrionales voire de la façade atlantique de l'Europe. D'une façon générale, leurs rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$, bien que s'intégrant pour deux d'entre eux (Sq093 et Sq128 de X83) dans la variabilité des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des substrats de Rome, entrent également dans la variabilité des roches sédimentaires (marines ou terrestres), volcaniques et métamorphiques pour lesquelles nous disposons de données dans ces régions. L'évolution de leurs valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ entre l'enfance et l'âge adulte indiquerait encore une fois que ces trois sujets aient émigré de leur région d'origine après leur enfance. Pour l'individu 128 de X83, cette migration aurait eu lieu plusieurs années voire décennie avant sa mort. Pour les deux autres sujets, bien que cela soit de l'ordre du possible, il est relativement difficile d'assurer que Rome ait été leur première destination (Tableau 33 ; Annexe 23).

Sur la base de son rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ et de sa valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (émail)}}$, l'individu 79 de X80/T16 pourrait être originaire des régions alpines ou volcaniques de la moitié nord de l'Italie (au nord de Rome) voire de la région de Calabre à l'extrême sud du pays. D'autres régions plus lointaines de Rome pourraient également avoir accueilli l'individu 79 de X80/T16 durant son enfance telles que le piémont pyrénéen ou l'ouest de l'Asie mineure, cette liste n'étant toutefois pas exhaustive. La modification de sa valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ entre l'enfance et l'âge adulte indiquerait que ce sujet ait aussi migré après son enfance vers une destination qui pourrait être Rome (Tableau 33 ; Annexe 23).

e. L'Afrique de l'Est/l'extrême sud de l'Arabie pour origine

Avec sa valeur atypique de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (émail)}}$ (+2,6 ‰), l'individu US215/Mand1 de X83 semblerait avoir vécu entre l'âge de 3 et 8 ans dans la corne de l'Afrique ou dans l'extrême sud de la péninsule arabique. Son rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ s'intègre en outre dans la variabilité des substrats géologiques de ces régions. Plus précisément, il concorde avec les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des roches sédimentaires marines datant du Miocène (0,7082 et 0,7091) voire possiblement avec ceux des substrats non différenciés, ces derniers pouvant se composer d'éléments détritiques des précédentes roches. Au regard de ces proxys, l'individu ne pourrait avoir vécu entre l'âge de 3 et 8 ans que le long des littoraux somalien, djiboutien, érythréen et yéménite voire dans certaines enclaves bien circonscrites d'Éthiopie (Figure 59). Pour mieux caractériser l'histoire de vie de ce sujet, des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ ont également été mesurées sur ses M1 et M3. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ estimées à

partir de ces dernières (M1 : +0,9 ‰ ; M3 : +0,7 ‰) suggéreraient que ce sujet soit né et ait vécu jusqu'à l'adolescence (≈ 15 ans) en Afrique de l'Est ou dans le sud de l'Arabie. L'évolution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (émail)}}$ indiquerait que cet individu ait toutefois changé de lieux de résidence durant son enfance et son adolescence. De même, d'après sa valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (os)}}$, le sujet semblerait avoir migré après l'adolescence vers des régions plus tempérées en Afrique du Nord, en Asie mineure ou en Europe, et ce plusieurs années voire décennies avant sa mort. Rome pourrait avoir été la destination de cette migration sans que cela ne puisse être affirmé de façon catégorique (Tableau 33).

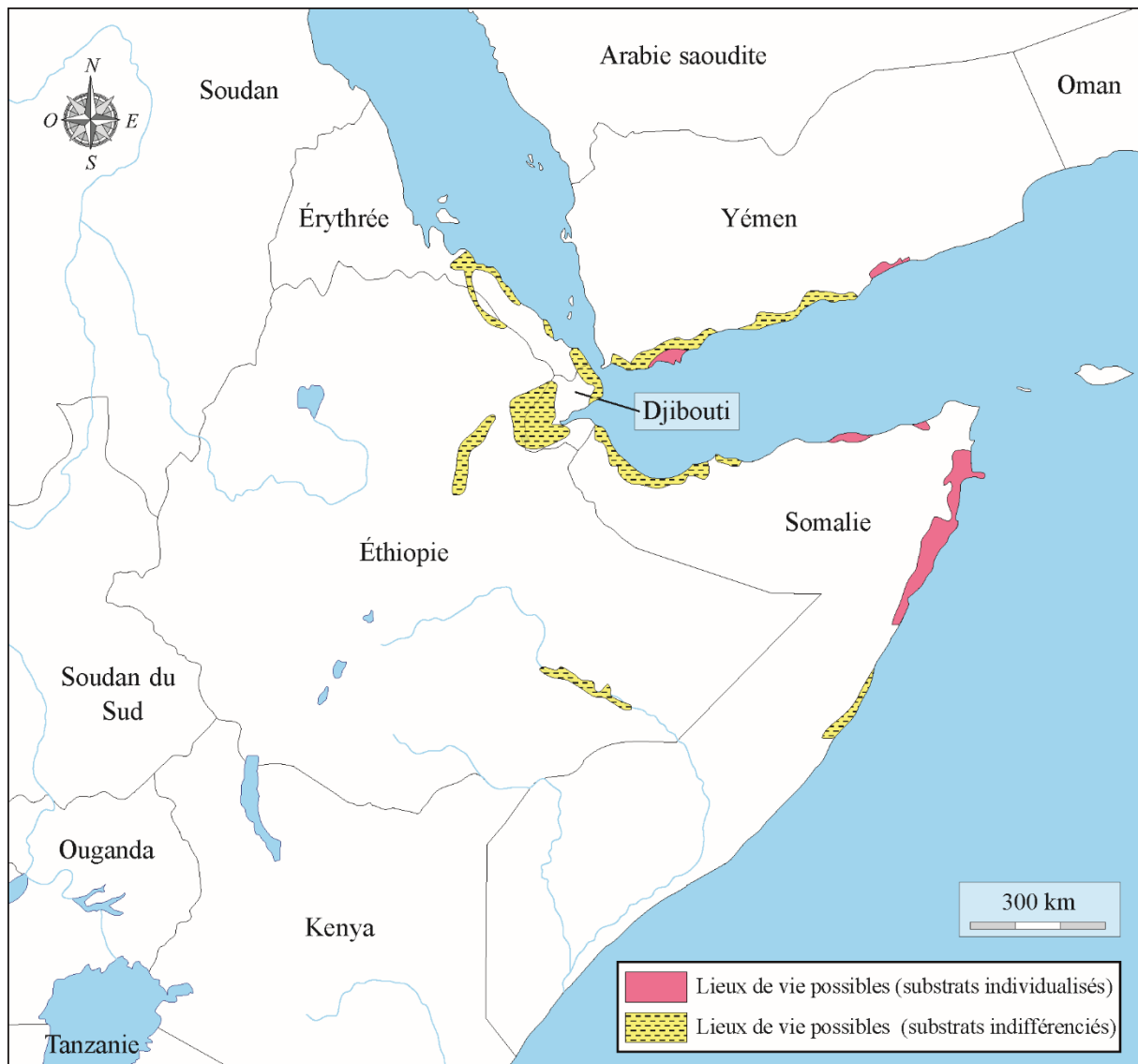


Figure 59. Carte présentant les possibles régions où le sujet US215 Mand1 aurait vécu à l'âge de 3-8 ans dans la corne de l'Afrique sur la base à la fois de sa valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ estimée à partir de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (émail)}}$ et de son rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ considérés de concert.

f. Un schéma de mobilité commun en dépit d'origines diverses

Les 22 migrants pour lesquels nous venons de présenter les histoires de vie ont tous en commun un même schéma de mobilité. Celui-ci consiste en une migration d'un lieu de résidence extra-romain vers Rome entre la fin de l'enfance et le début de l'âge adulte. Ce schéma se matérialise ainsi :

Schéma I $X_{\text{enfant}} \longrightarrow R_{\text{adulte}} \longrightarrow \dagger R$

ou ainsi :

Schéma I-bis $X_{\text{enfant}} \longrightarrow R_{\text{adulte}} ? \longrightarrow \dagger R$

avec « X » correspondant au lieu de résidence extra-romain, « R » correspondant à Rome, « ? » correspondant à une incertitude relative au lieu de résidence et « † » correspondant au lieu de la mort. Parmi les 22 migrants, six ont un schéma I et 16 un schéma I-bis. Ce schéma relativement simpliste n'est aucunement lié à l'origine géographique du migrant (Tableau 33).

4.2.2. Schéma de mobilité II : migrations des sujets vers Rome avant leur mort

a. L'Afrique du Nord/l'Arabie voire l'Ibérie pour origine

Au regard de leurs valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}} (\text{émail})$ supérieures à -3 ‰, l'individu n°13/Mand1 de X81 serait originaire d'Ibérie, d'Afrique du Nord voire d'Arabie tandis que l'individu US219/Mand1 de X83 serait originaire d'Afrique du Nord ou d'Arabie. Leurs rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ relativement bas viendraient appuyer le fait que ces individus aient vécu leur enfance ailleurs qu'à Rome, sur des substrats géologiques peu radiogéniques tels qu'il est possible de trouver en Ibérie, en Afrique ou en Arabie. D'après sa valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}} (\text{os})$ strictement identique à celle de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}} (\text{émail})$, l'individu US219/Mand1 de X83 semblerait avoir vécu son enfance et sa vie d'adulte dans la même région. En revanche, au regard de l'évolution de ses valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$, l'individu n°13/Mand1 de X81 semblerait avoir migré entre l'enfance et l'âge adulte. Rome n'était toutefois pas la destination de cette migration. Ces deux sujets pourraient s'être enfin installés à Rome au terme de leur vie, quelques mois voire quelques années avant leur mort, ou y avoir trouvé la mort au cours d'un voyage (Tableau 33 ; Annexe 24).

b. L'Europe/l'Afrique du Nord/l'Arabie pour origine

L'individu 76 de X82/T18 aurait vécu son enfance et durant l'âge adulte à l'extérieur de Rome, possiblement en Europe, en Afrique du Nord ou en Arabie au regard de ses valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (émail)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (os)}}$. Cet individu n'aurait immigré vers Rome que tardivement dans sa vie, peut-être quelques mois ou années avant sa mort, et y serait décédé (Tableau 33 ; Annexe 25).

c. L'Europe/l'Afrique du Nord/l'Asie mineure pour origine

Pris de concert, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (émail)}}$ et les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{émail}}$ indiqueraient que les individus LivelloXII-n°42-44 de X78/T15 et 24 de X80/T16 aient vécu ailleurs qu'à Rome durant leur enfance. Le premier aurait pu vivre dans des régions d'Europe et d'Asie mineure relativement éloignées des côtes méditerranéennes voire au Proche-Orient ou dans les régions de piémont en Afrique du Nord. Le second aurait pu vivre dans les régions montagneuses d'Europe (Apennins, Alpes, Carpates) et d'Asie mineure voire le long de la façade atlantique ou dans des localités au nord de l'Europe centrale. La faible évolution de leurs valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ entre l'enfance et l'âge adulte pourrait suggérer que ces individus n'aient pas changé de lieu de résidence durant cette période. Ces individus pourraient ne s'être rendus à Rome que quelques temps avant leur décès pour s'y installer définitivement ou à l'occasion d'un séjour ponctuel (Tableau 33 ; Annexe 26).

d. Un schéma de mobilité commun en dépit d'origines diverses

Les cinq individus pour lesquels nous venons de décrire les trajectoires de vie partagent un même schéma de mobilité, et ce malgré des origines géographiques certainement différentes. Ce schéma consiste en une migration des sujets vers Rome peu de temps avant leur décès pour de quelconques motifs (court séjour, installation définitive, etc.). Ce schéma se matérialise ainsi :

Schéma II $X_{\text{enfant/adulte}} \longrightarrow \dagger R$

ou ainsi :

Schéma II-bis $X_{\text{enfant/adulte}} ? \longrightarrow \dagger R$

avec encore une fois « X » correspondant au lieu de résidence extra-romain, « R » correspondant à Rome, « ? » correspondant à une incertitude relative au lieu de résidence et « † » correspondant au lieu de la mort. Parmi les cinq migrants, trois ont un schéma II et deux un schéma II-bis (Tableau 33).

4.2.3. Schéma de mobilité III : migrations temporaires de résidents romains

a. L'Ibérie/l'Afrique du Nord/l'Arabie comme résidence temporaire

Avec une valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (émail)}}$ de -5,9 ‰, l'individu 74 de X82/T18 aurait vécu son enfance à Rome et pourrait de ce fait être considéré comme résident romain. Au regard de l'évolution de ses valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ entre l'enfance et l'âge adulte, cet individu semblerait avoir migré après l'âge de 8 ans en Afrique du Nord ou en Arabie voire possiblement dans le sud de l'Ibérie. Inhumé à Rome, cet individu aurait pu revenir vivre à Rome au terme de sa vie où il y aurait trouvé la mort (Tableau 33 ; Annexe 27).

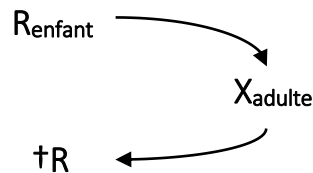
b. L'Europe/l'Afrique du Nord/l'Arabie comme résidence temporaire

Les individus 4.b/Mand1 de X78/T15 et 68 de X82/T18 auraient pu suivre un schéma de mobilité similaire au précédent avec des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (os)}}$ sortant de la variabilité des valeurs des eaux potentiellement bues à Rome et des valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée (émail)}}$ entrant dans la variabilité de ces dernières en tenant compte de l'erreur de mesure associée aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ estimée. Ces individus auraient donc pu vivre leur enfance à Rome, puis leur vie d'adulte proches des côtes méditerranéennes d'Europe voire en Afrique du Nord ou en Arabie, et enfin se réinstaller à Rome au terme de leur vie, peu de temps avant leur décès (Tableau 33 ; Annexe 28).

c. Un schéma de mobilité commun

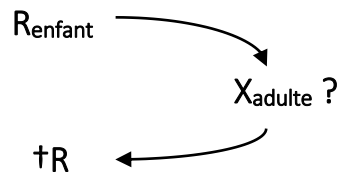
Les trois individus dont nous venons d'étudier les histoires de vie ont en commun un même schéma de mobilité s'apparentant à une migration temporaire de résidents romains vers des destinations variées. Ce schéma se matérialise ainsi :

Schéma III



ou ainsi :

Schéma III-bis



avec encore une fois « X » correspondant au lieu de résidence extra-romain, « R » correspondant à Rome, « ? » correspondant à une incertitude relative au lieu de résidence et « † » correspondant au lieu de la mort. Parmi ces trois migrants, l'un a un schéma III et deux ont un schéma III-bis. Nous soulignerons toutefois que ce schéma de mobilité reste relativement rare au sein de notre population (Tableau 33).

4.3. Une singularité toute relative de la population SSPM

4.3.1. Un taux de migrants ordinaire pour une population de Rome ?

Nous avons pu mettre en évidence dans ce chapitre qu'*a minima* 23 % des individus de la population SSPM auraient migré au cours de leur vie. En suivant la même approche et en recourant aux mêmes référentiels ($\delta^{18}\text{O}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) que ceux utilisés pour déterminer ce précédent taux, il peut être estimé qu'*a minima* respectivement 23 % et 15 % des individus des populations de Casal Bertone et de Castellaccio Europarco auraient également migré à Rome durant leur vie. Le taux de migrants déterminé pour la population SSPM ne serait donc en rien singulier, des pourcentages identiques et similaires étant retrouvés dans d'autres populations romaines datant des I^{er}-III^e s. ap. J. C.

Les taux de migrants déterminés pour les populations de Casal Bertone et de Castellaccio Europarco se distinguent de ceux avancés par Killgrove (2010) (Tableau 34). Cette différence tient principalement au fait que les référentiels ($\delta^{18}\text{O}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) utilisés par l'auteur diffèrent des nôtres. Nous avons eu l'occasion plus en amont de ce travail de discuter des référentiels de Killgrove (2010) et du fait que nous les considérons sujets à caution (*cf.* Section II, 4.3.1, a.3 et 4.3.2, a.3). Recourir à ces référentiels pour évaluer le taux de migrants dans la population SSPM nous aurait conduit à mettre en évidence que 76 % des individus de cette population auraient migré au cours de leur vie, soit un taux trois à quatre fois supérieur à celui que nous avons précédemment estimé et ceux déterminés dans les

autres populations de Rome (Tableau 34). Avec un tel taux de migrants, notre vision de la population SSPM changerait du tout ou tout et ne serait plus une population de Rome mais une population à Rome composée pour l'essentiel d'immigrés.

Les taux de migrants déterminés pour une population donnée peuvent donc considérablement varier selon les référentiels employés ou les approches interprétatives suivies (Tableaux 34 et 35). Les référentiels plus exhaustifs auxquels nous avons recourus, les biais d'ordre culturels et climatiques que nous avons considérés, et enfin l'erreur mathématique associée aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ dont nous avons tenu compte, nous permettent d'avancer l'idée que nos résultats sont à la fois plus prudents et plus fiables que ceux ordinairement obtenus. Notre approche permet en outre de s'assurer que les migrants identifiés ont bel et bien migré aux cours de leur vie en écartant d'office les cas les plus douteux. *In fine*, sur la base de nos données, la population SSPM ne se différencierait pas des autres populations de Rome d'après son taux de migrants. Au contraire même, celui-ci semblerait relativement ordinaire pour une population romaine de l'époque impériale.

Tableau 34. Présentation des taux de migrants estimés selon différentes approches utilisant de concert les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$ et les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Site	Élément anatomique	n _{migrants} total	
		Killgrove (2010)	Cette étude
Casal Bertone	Émail (M1)	15 [19 %]	18 [23 %]
Castellaccio Europarco	Émail (M1)	5 [19 %]	4 [15 %]
Catacombe SSPM	Émail + Os	98 [76 %]	30 [23 %]

Tableau 35. Présentation des taux de migrants estimés selon différents référentiels et en recourant à un seul proxy isotopique

Site	Élément anatomique	n _{migrants}					
		$\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$			$\delta^{18}\text{O}_{\text{eau ingérée}}$		$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
		[-6/-4] ^a	[-5,8/-3,7] ^b	[-5,4/-3,8] ^c	[-7,7 (± 1)/-4,6 (± 1)] ^d	[0,7079/0,7103] ^b	[0,708508/0,7114] ^d
Isola Sacra	Émail (M1)	21 [34 %]	21 [34 %]	25 [40 %]	2 [3 %]	-	-
	Émail (M3)	17 [27 %]	15 [24 %]	23 [37 %]	4 [6 %]	-	-
Casal Bertone	Émail (M1)	12 [29 %]	13 (12) [32 %]	17 [41 %]	9 [22 %]	4 (5) [5 %]	12 [15 %]
Castellaccio Europarco	Émail (M1)	5 [36 %]	2 (4) [14 %]	5 [36 %]	1 [7 %]	2 [8 %]	3 [12 %]
Catacombe SSPM	Émail	74 [60 %]	65 [52 %]	70 [56 %]	22 [18 %]	6 [16 %]	8 [21 %]
	Os	106 [83 %]	80 [63 %]	88 [69 %]	6 [5 %]	0 [0 %]	0 [0 %]

Note : ^a Intervalle défini par Prowse *et al.* (2007) ; ^b Intervalle défini par Killgrove (2010) ; ^c Intervalle présenté en Section II, 4.3.1, a.3 ; ^d Intervalle retenu dans le cadre de cette étude.

4.3.2. Une singularité des origines géographiques des migrants ?

Les migrants de la population SSPM proviendraient, nous l'avons vu, de régions très diverses. Des migrations de courtes ou moyennes distances (Europe) et de longues voire très longues distances ont pu être mises en évidence (Asie mineure, Afrique et Arabie). En d'autres termes, les migrants pourraient être originaires des quatre coins de l'Empire romain. Cette pluralité des origines géographiques a également pu être mise en évidence dans les populations de Casal Bertone et de Castellaccio Europarco par Killgrove (2010). De fait, la présence de migrants issus de différentes régions du monde antique dans une population de Rome ne serait en rien atypique. Un certain cosmopolitisme même pourrait caractériser les populations de la cité éternelle dès les I^{er}-III^e s. ap. J.-C. En revanche, la population SSPM se différencierait des autres populations romaines au regard des différentes cohortes de migrants qui la compose et de certaines origines géographiques singulières. Une plus grande diversité des lieux d'origine dans les supra-régions susmentionnées semblerait caractéristique de la population SSPM. De même, un nombre plus important de migrants originaires du sud de la Méditerranéen semblerait également caractériser la population SSPM. Parmi ces derniers, différents sujets pourraient être originaires d'au-delà du limes (*i.e.* frontière de l'Empire). Un en particulier serait né et aurait vécu jusqu'à son adolescence au moins dans la corne de l'Afrique voire dans l'extrême sud de la péninsule arabique, soit à plus de 10 000 km de Rome, une distance considérable pour l'époque. Une telle migration pour cette période mise en évidence par des analyses isotopiques est à notre connaissance inédite. Aussi, si une pluralité des origines géographiques pouvait être attendue pour les migrants que nous avons identifiés, certaines d'entre elles seraient peu communes. Un plus grand cosmopolitisme semblerait caractériser la population SSPM.

4.4. Conclusion

Près d'un quart ($n = 30$) des individus inhumés dans les sépultures plurielles de la catacombe SSPM seraient migrants. Sauf cas exceptionnels, ces derniers ne se distingueraient pas des résidents Romains sur un plan alimentaire. Les régimes alimentaires ne permettraient donc pas d'une façon générale d'identifier les migrants. Par ailleurs, l'alimentation des migrants ne viendrait pas remettre en question les principaux résultats de notre Section V, 3. Ces migrants auraient des trajectoires de vie complexes et hétérogènes. Trois schémas de mobilité ont notamment pu être mis en évidence pour ceux-ci. Ces migrants seraient en outre originaires de supra-régions très différentes à l'instar de l'Europe, de l'Afrique, de l'Arabie ou de l'Asie mineure. Des migrations de courtes, moyennes, longues voire très longues distances ont ainsi pu être mises en exergue. Enfin, la population SSPM ne se

différencierait pas des autres populations romaines en termes de taux de migrants mais se particulariserait cependant par son cosmopolitisme.

5. ESSAI D'UNE IDENTIFICATION DES DEFUNTS

5.1. Statut social des défunts au prisme de leurs alimentations

L'alimentation est un fait social et l'inégalité en ce domaine était bien plus ostensible à l'époque des Anciens que de nos jours (André 2009). S'il existe nombre d'indices mettant en évidence que riches comme pauvres avaient accès à des ressources de même nature, ces derniers avaient toutefois des pratiques alimentaires bel et bien différentes les uns des autres (Spurr 1983 ; Garnsey et Saller 1987 ; André 2009 ; Schirmer 2014). La qualité mais aussi la diversité des aliments consommés, de même que la manière d'apprêter ceux-ci variaient considérablement entre les basses et hautes strates de la société romaine (André 2009 ; Schirmer 2014). Certaines ressources, néanmoins, n'étaient réservées qu'à la table des plus nantis tandis que d'autres, en revanche, n'en étaient pas dignes et ne se trouvèrent qu'aux menus des couches les plus pauvres (Spurr 1983 ; Wilkins 1993 ; André 2009 ; Schirmer 2014). D'après les données textuelles antiques, deux d'entre elles en particulier permettent de discuter du statut socio-économique de leurs consommateurs, le poisson et les céréales.

Le poisson, qu'il soit de mer ou d'eau douce, est assurément l'une des ressources les plus à mêmes de nous renseigner. Bien qu'il soit admis par les historiens contemporains que le poisson n'occupait pas une place de premier plan dans le régime alimentaire des Romains, en raison de la faible occurrence de telles ressources dans les textes antiques (Garnsey et Saller 1987 ; Garnsey 1999), il y avait à Rome, et ce dès le III^e s. av. J.-C., un marché aux poissons (*i.e. forum piscarium*), au même titre qu'il avait un marché dédié à la vente du vin (*i.e. forum vinarium*), de la viande (*i.e. forum suarium*) ou encore des fruits et légumes (*i.e. forum holitorium*), preuve de l'existence d'une demande relativement importante des habitants de la cité éternelle pour ce type de ressources (André 2009). Parmi tous les poissons pêchés ou élevés, seuls ceux répondant aux goûts et à la mode culinaire en vogue avaient les faveurs des habitants de Rome (André 2009). Il n'en demeure pas moins, au regard des ouvrages de cuisine spécialisés et de la diversité des recettes qu'ils proposent, à l'instar d'Apicius et de son *De re coquinaria* (I^{er} s. ap. J.-C.), qu'une grande variété de poissons devait se trouver sur les étals des marchands romains (Corcoran 1957 ; Higginbotham 1997 ; Sciallano 1997 ; André 2009). L'occurrence plus importante des poissons marins par rapport aux poissons dulcicoles dans les sources antiques ont permis aux historiens contemporains d'en déduire que les premiers étaient très probablement plus appréciés et consommés que les seconds (Corcoran 1957 ; Higginbotham 1997 ; Sciallano 1997 ; André

2009). Deux raisons peuvent être invoquées pour cela. Tout d'abord, dans une péninsule où presque tout point est à moins de 100 km des rivages méditerranéens, il devait être relativement aisé de s'approvisionner en poissons marins, même frais (André 2009). Ensuite, l'assèchement estival des cours d'eau étant une chose fréquente, il était probablement difficile d'assurer une régularité des approvisionnements et de répondre donc correctement à une potentielle demande en poissons d'eau douce (André 2009). Malgré le fait que seule une trentaine de kilomètres distançait Rome de la mer Tyrrhénienne, le poisson marin, et c'est un sujet d'étonnement pour certains historiens à l'instar d'André (2009), a toujours été onéreux à Rome. Caton déjà, selon Plutarque dans ses *Quaestiones convivales* (4, 4, 2, 9), s'insurgea au II^e s. av. J.-C. de la cherté du poisson de mer à Rome, lequel se vendait plus cher que le bœuf. Aux dires de Sénèque (*Epistulae*, 95, 42), de Pline (*Naturalis historia*, 9, 67) et de Tertullien (*De Pallio*, 5), entre le I^{er} et le III^e s. ap. J.-C., certaines grosses pièces pouvaient même atteindre des prix prohibitifs, parfois jusqu'à 8 000 sesterces. L'*Edictum de pretiis rerum venalium* (5, 1-2) émis par l'empereur Dioclétien tenta en 301 ap. J.-C. de réguler le prix de ces denrées. Il fixa notamment le prix maximum d'une livre de poisson de mer de première qualité à 24 deniers et de seconde qualité à 16. À titre de comparaison, selon ce même Édité (4, 1-3) une livre de porc se vendait à 12 deniers seulement, et une livre de bœuf, de mouton ou de chèvre à huit. Dressé afin de faire barrage à la montée des prix, l'Édit annonça bien évidemment des prix inférieurs à ceux qui étaient réellement pratiqués alors sur les places de marché (Frayn 1993 ; Higginbotham 1997 ; André 2009). En outre, en donnant un prix maximum aux denrées, l'Édit a permis aux historiens contemporains d'établir une échelle de valeurs entre les différentes ressources alimentaires (Frayn 1993 ; Higginbotham 1997 ; André 2009). Ainsi, le poisson de mer était vraisemblablement supérieur aux autres produits et il était acceptable de payer un coût plus élevé pour s'en procurer (André 2009). De plus, le poisson était vraisemblablement à Rome une ressource que les individus les moins aisés de la société romaine ne pouvaient s'offrir, sauf dans des cas très particuliers et sans doute très rares (Wilkins 1993 ; André 2009 ; Schirmer 2014). Quant au poisson dulcicole, l'Édit attesta que celui-ci se vendait bien à Rome et pour un coût deux fois moindre que le marin (Frayn 1993 ; Higginbotham 1997 ; André 2009). Dans ses *Satires* (11, 36-37), Juvénal déjà au I^{er} s. ap. J.-C., nous apprenait par les conseils qu'il prodigua aux citoyens des couches moyennes de la société que les poissons d'eau douce étaient bien plus abordables que ceux de mer. Les poissons dulcicoles étaient certainement moins fréquents et moins divers sur les étals des poissonniers du *Forum Piscarium* que les poissons marins (Corcoran 1957 ; Higginbotham 1997 ; Sciallano 1997 ; André 2009). Nombre d'entre eux étaient d'ailleurs qualifiés de peu raffinés voire de médiocres (André 2009). Pourtant, Galien au II^e s. ap. J.-C. dans son *De alimentorum facultatibus* (3, 30) recommanda aux Romains de ne pas consommer les poissons du Tibre, en particulier ceux pêchés à Rome, où les eaux étaient insalubres. Cela suggère un certain attrait des habitants de l'*Urbs*, probablement les moins aisés, pour les poissons tibérins qui, d'après certains

historiens contemporains, étaient certainement très bon marché (Nutto 1995 ; Gourevitch 2012). Nous soulignons toutefois que dans sa mise en garde, Galien n'évoque pas spécifiquement les poissons d'eau douce. Or, différentes espèces de poissons marins, dits euryhalins, capables de supporter de grandes variations de la salinité de l'eau, à l'instar du loup, de la daurade, de l'esturgeon, de la murène ou du mulot, remontaient le Tibre et pouvaient être pêchés à Rome même. Le plus réputé des loups était d'ailleurs celui qui était pris dans la capitale, entre les deux ponts, probablement le *Pons Sublicius* et celui *Aemilius*, où débouchait le *Cloaca Maxima*, c'est-à-dire le grand égout, et que pour cette raison les Romains le dénommaient *Catillo*, littéralement « lécheurs de plats », d'après Macrobe (*Saturnales*, 3, 16, 17-18) (Nutto 1995 ; van der Linde 2008 ; André 2009 ; Gourevitch 2012). Ce dernier, de même que les autres poissons euryhalins capturés à Rome, devaient toutefois être plus cher que les poissons dulcicoles pris au même endroit (Frayn 1993 ; Nutto 1995 ; Higginbotham 1997 ; André 2009 ; Gourevitch 2012). Les poissons d'eau douce à Rome comme en d'autres lieux de l'Empire (Martial, *Épigrammes*, 13, 88 ; Libanios, *Discours*, 11, 254), avaient assurément une place à la table des gens les plus humbles, et seuls ces derniers devaient en manger des quantités significatives. Les sujets plus aisés et les élites pouvaient occasionnellement y goûter, mais préféraient sans nul doute les poissons marins. Outre leurs qualités gustatives, ceux-ci représentaient également un symbole ostentatoire de richesse. En somme, le poisson, qu'il fût de mer ou d'eau douce, était à l'époque impériale un marqueur social (André 2009).

La seconde ressource la plus à même de nous informer quant au statut socio-économique de son consommateur est assurément le millet, principale céréale C₄ exploitée au début de notre ère dans l'ouest de l'Empire romain. De manière quasi unanime, les historiens contemporains conviennent que le millet était, du moins dans la péninsule italienne, une céréale de second ordre par rapport au blé (Evans 1980 ; Spurr 1983 ; Spurr 1986 ; Garnsey 1993 ; Nenci 1999 ; André 2009). À en croire Plinie (*Naturalis historia*, 18, 74) et Columelle (*De Re Rustica*, 2, 9, 14-16), le millet était, durant l'époque impériale, en Italie, principalement consommé par les populations rurales mais également par les populations citadines les plus défavorisées. En revanche, les classes urbaines les plus aisées répugnaient à consommer cette ressource (Evans 1980 ; Spurr 1983 ; Spurr 1986 ; Garnsey 1993 ; Nenci 1999 ; André 2009). Plus encore, elles dédaignaient les mets confectionnés avec cette céréale, ces bouillies trop primitives, préférant consommer du pain de blé qui trouvait sur leurs tables une place de plus en plus prépondérante au tournant du millénaire (André 2009). À Rome en particulier, nous savons que les sujets les plus pauvres avaient accès au blé par le biais des *frumentationes*, ces distributions gratuites et publiques de blé orchestrées par l'empereur (Garnsey 1993 ; Virlouvét 1995a ; Virlouvét 1995b). Toutefois, ceux-ci n'avaient certainement pas les ressources suffisantes pour faire moudre les grains ainsi reçus et étaient alors contraint d'échanger leurs rations contre des céréales

inférieures et meilleur marché, bien souvent du millet (Evans 1980 ; Spurr 1983 ; Spurr 1986 ; Nenci 1999).

Comme nous l'avons vu précédemment (Section V, 3.2.2), les sujets de la région X de la catacombe SSPM ont eu accès dans leur grande majorité à des ressources animales marines, et ce parfois en des proportions très significatives, bien que toujours inférieures à celles des ressources animales terrestres. Ce fait, au regard de ce que nous venons d'exposer, semblerait indiquer que ces sujets étaient issus des strates intermédiaires voire supérieures de la société romaine, donc d'un statut social relativement élevé. D'après des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ similaires, et des valeurs de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ plus élevées, que celles des autres populations romaines (sub-)contemporaines ayant consommé très probablement des poissons marins (Section V, 3.2.2), ces individus sembleraient s'être sustentés de poissons de plus hauts niveaux trophiques. Ces derniers étaient potentiellement de tailles et de poids supérieurs à ceux des niveaux trophiques inférieurs mais ils pouvaient aussi revêtir un caractère plus noble et donc être considérés comme des produits supérieurs. Ainsi, la singularité de notre population mise en évidence précédemment sur la base des valeurs isotopiques et donc d'une alimentation *in fine* quelque peu différente (Section V, 3.4) pourrait être le reflet d'un niveau social distinct entre les sujets que nous avons étudiés et ceux issus d'autres contextes archéologiques romains contemporains. Par ailleurs, nous l'avons vu également (Section V, 3.2.4), deux à trois individus de la région X pourraient s'être nourris de poissons d'eau douce. Ceux-ci auraient été consommés toutefois en des quantités moindres que ceux dont se seraient nourris les individus de la catacombe de Saint-Calixte, si nous nous en tenons aux valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ et de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ des sujets de ces deux populations (Section V, 3.4). Ce fait, au regard de ce que nous venons de présenter ci-avant, suggérerait que ces deux ou trois sujets étaient issus des strates les moins élevées de la société romaine. De tout ceci, nous pouvons donc conclure que notre population n'était en rien homogène sur un plan strictement social contrairement à ce que les pratiques funéraires relativement identiques d'une chambre à l'autre ou d'un niveau archéologique à l'autre pouvaient laisser entendre, contrairement aussi à ce que les profils pathologiques semblaient suggérer par rapport à l'homogénéité plausible des conditions de vie des sujets. Enfin, nous soulignerons un dernier point quelque peu annexe à notre problématique mais somme toute intéressant à noter. Notre étude archéo-biogéochimique ainsi que celles réalisées sur les populations romaines (sub-)contemporaines mettent toutes en évidence le fait que des ressources marines ou dulcicoles ont été consommées en des proportions significatives bien que toujours inférieures à celles des ressources animales et végétales terrestres C_3 (Sections V, 3.2.3 et V, 3.2.4). Ceci tendrait à infirmer l'assertion des historiens contemporains supputant que le poisson n'était pas une ressource essentielle du régime alimentaire *type* des Romains. L'importance des poissons, de mer et d'eau douce, serait ainsi bien plus grande que ce que les textes latins laisseraient supposer.

Une poignée de sujets, peut-être 11, de la région X se seraient, nous l'avons vu (Section V, 3.2.4), nourris de céréales C_4 , probablement de millet, en des proportions assez faibles mais somme toute significatives. Ce fait, à la lumière de ce que nous venons d'exposer, nous indiquerait que ceux-ci appartenaient très probablement aux strates les plus basses de la société romaine et par là même jouissaient d'un statut social relativement faible. Au regard cependant de leurs valeurs de $\delta^{13}C_{col}$ et de $\delta^{13}C_{carb}$ bien plus négatives que celles des individus de Casal Bertone et de Castellaccio Europarco, nos sujets s'en seraient sustentés en des quantités bien plus faibles (Section V, 3.4). De ceci nous pourrions émettre l'hypothèse que les sujets les plus pauvres inhumés dans la région X restaient toutefois d'un statut social possiblement plus élevé que les individus de Casal Bertone et de Castellaccio Europarco. Néanmoins, comparativement aux autres populations romaines (sub-)contemporaines au sein desquelles aucun consommateur de céréales C_4 n'a été mis en évidence (Section V, 3.4), ces sujets seraient d'un statut socio-économique assurément inférieur. Ce point conforterait donc nos précédents propos formulés en guise de conclusion aux paragraphes ayant trait à la consommation de ressources aquatiques. Ici encore, sur un plan strictement socio-économique, et sur la base de nos données isotopiques, il semblerait se confirmer que notre population n'était absolument pas homogène, et ce malgré ce que les données archéo-anthropologiques pouvaient laisser entrevoir de prime abord.

À tout prendre, il s'avèrerait qu'au sein des chambres de la région X des sujets de tous horizons socio-économiques aient été inhumés, suggérant de fait une certaine hétérogénéité de cette population sur ce plan-ci. Toutefois, les individus appartenant aux strates les moins élevées de la société romaine seraient relativement peu nombreux (environ 10 %), comparés à ceux issus des strates intermédiaires et supérieures (environ 90%). Ce résultat corroborerait ce que la nature et la qualité des matériaux et substances employés pour le traitement des corps permettaient de subodorer, à savoir que ces défunts avaient de leur vivant une certaine aisance financière et un statut social possiblement élevé (Section I, 3.5). En outre, ce résultat vient étayer une hypothèse précédemment formulée sur la base de la relative similarité des pratiques funéraires d'un individu à l'autre, d'un niveau de dépôts à l'autre et d'une chambre à l'autre (Section I, 3.5), à savoir que ces individus appartenaient probablement à un même groupe ou à une même communauté. Au regard de ce que nous venons d'exposer, si groupe ou communauté il y avait, celui-ci ou celle-ci ne semblerait avoir aucun fondement socio-économique puisque des sujets pauvres comme riches auraient été inhumés côte à côte de la même façon et dans ce même lieu. Une assise culturelle ou une parenté biologique *sensu lato* pourrait cependant être tout à fait recevable pour expliquer les traits communs mis en évidence entre les individus de ces chambres. Quant à savoir comment des sujets démunis auraient pu jouir des mêmes rites d'inhumations que les individus les plus nantis, l'hypothèse déjà formulée d'une prise en charge collective par les vivants de ce/cette même groupe/communauté assurant à tous les

mêmes droits et un traitement plus ou moins équitable face à la mort serait envisageable (Blanchard *et al.* 2015). Enfin, ce résultat nous permet de mieux appréhender la crise de mortalité en elle-même. Plus précisément, il met en évidence que l'épidémie, ou les épidémies, suspectées être responsables de la mort de ces sujets ne seraient pas particulièrement sélectives sur un plan strictement socio-économique puisque les populations les plus défavorisées mais aussi les plus aisées ont été affectées par la même maladie. Il pourrait paraître évident que les personnes les plus riches étaient les plus susceptibles d'être les mieux soignées, mais ceci pourrait tout simplement être une preuve de l'impuissance du savoir médical de l'époque face à un mal difficilement identifiable, ou bien être lié à la nature de la ou des épidémies incriminées, peu ou pas discriminatoires.

5.2. Exogénéité des pratiques funéraires ou allochtonie des individus ?

La mort est pour celui qui en fait l'expérience un fait biologique éminemment personnel. Mais la mort est aussi pour les vivants, outre une tribulation pour les proches, un fait culturel, par essence collectif. La mort est donc plurielle et se vit différemment selon le rôle qui est le sien lorsqu'elle se présente. En pratique, les rites funéraires sont un trait d'union entre ces facettes de la mort et permettent de transformer une réalité individuelle en un événement communautaire ou public (Parker Pearson 2000 ; De Plaen 2003 ; Clavandier 2009 ; Duday 2009). Les seules traces archéologiques de ces rites sont les ultimes gestes pratiqués sur le défunt ou autour de celui-ci et que l'action du temps n'a pas effacés (Parker Pearson 2000 ; Duday 2009). À Rome, dans les sépultures plurielles de la catacombe SSPM, un grand nombre de vestiges traduisent un appareil funéraire singulier (Section I, 3.5). Parmi les matériaux et autres substances employés, le plâtre est certainement l'un des éléments les plus remarquables (Section I, 3.5). Rares sont, en effet, les sites à Rome où un tel matériau a été mis en évidence en contextes funéraires, du moins à l'époque impériale (Green 1977 ; Viero 2014 ; Blanchard *et al.* 2015). Deux, pour être exact, en sus de celui de la catacombe SSPM, font état d'une utilisation similaire de ce matériau blanchâtre sur les défunts. Le premier est la catacombe de Priscille où les corps placés dans les *loculi* étaient au préalable enveloppés dans un linceul puis enduits de plâtre (Green 1977). Le second est la catacombe de Saint-Calixte où a été découvert un hypogée contenant deux sarcophages dans lesquels étaient déposés des corps embaumés et vraisemblablement couverts de plâtre (Green 1977). La découverte de sujets plâtrés dans la catacombe SSPM ne serait, de fait, en rien inédite en contexte catacombal à Rome. En revanche, l'adjonction à ce dernier d'oléorésines et possiblement d'essences naturelles ainsi que l'embaumement de l'individu plâtré dans un drap seraient, si on ajoute à cela l'utilisation même du plâtre, des pratiques funéraires jamais mises en évidence auparavant à Rome (Castex *et al.* 2009 ; Blanchard *et al.* 2015). Sur la base de ces découvertes a été émise l'hypothèse que ces pratiques funéraires élaborées pouvaient avoir une origine exogène et que

les défunts inhumés de la sorte pouvaient eux aussi être allogènes (Castex *et al.* 2009 ; Blanchard *et al.* 2015). Au regard des sources historiques et bibliographiques ayant trait à l'archéologie, cette pratique d'enduire le corps d'un défunt de plâtre ou, d'une manière plus générale, d'un matériau blanchâtre (*e.g.* chaux, gypse, calcaire, *etc.*) aurait une origine nord-africaine (Viero 2014 ; Blanchard *et al.* 2015). Les témoignages archéologiques les plus anciens de cette pratique seraient tunisiens ou algériens et dateraient d'entre le V^e et le III^e s. av. J.-C d'après Moulard (1924) et Christoflé (1938). Le témoignage historique le plus ancien faisant mention d'une telle pratique est celui d'Hérodote (*Histoires*, 3, 24). Cette pratique aurait ici une origine nubienne et remonterait au moins au V^e s. av. J.-C. Elle aurait perduré dans le temps jusqu'à presque s'universaliser en Afrique du Nord, et plus particulièrement dans ce que nous appelons aujourd'hui le Maghreb, au début de notre ère (Green 1977 ; Philpot 1991). Elle se serait ensuite possiblement diffusée dans le reste de l'Empire avec des modalités encore difficiles à saisir (Green 1977 ; Philpot 1991) et se serait enfin vue adopter par les premiers chrétiens (Green 1977). Un récent travail universitaire a pu mettre en évidence qu'au moins un tiers des sépultures répertoriées, où originellement un corps avait été enduit d'un matériau blanchâtre, étaient vraisemblablement chrétiennes (Viero 2014). L'adoption par les chrétiens de cette pratique ne signifia sans doute pas la fin de son utilisation par les non-chrétiens, du moins localement (Green 1977 ; Philpot 1991). Certains indices sembleraient en effet aller dans ce sens et montrer que des élites païennes romaines exilées un temps en Angleterre, à York pour être précis, sous le règne de Septime Sévère (193-211), auraient eu recours à cette pratique, laquelle aurait été ici un moyen de se démarquer et d'afficher dans la mort leur identité sociale. Cette pratique resta en vogue dans cette partie de l'Empire durant tout le III^e et le IV^e s. ap. J.-C., de sorte que c'est en Angleterre que nous retrouvons à ce jour la plus forte concentration de sépultures plâtrée datant de l'époque impériale. Par mimétisme enfin cette pratique funéraire aurait pu être diffusée au cours du III^e ou du IV^e s. ap. J.-C. à travers l'Empire dans les hautes sphères de la société (Philpot 1991). Au vu de ce qui vient d'être évoqué, le caractère exogène de l'emploi du plâtre en contexte funéraire à Rome semble bel et bien avéré. Une inconnue demeure toutefois, à savoir la date à laquelle une telle pratique serait importée dans l'*Urbs*. Était-elle déjà utilisée à Rome avant la mise en place des sépultures plurielles de la catacombe SSPM ? Ou serait-elle utilisée pour la première fois à cette occasion ? De cette inconnue en découle une seconde, à savoir l'exogénéité de cette pratique funéraire présume-t-elle celle de la population inhumée ? Il pourrait être en effet supposé que l'introduction en un lieu donnée d'une nouvelle pratique funéraire pourrait être liée à l'arrivée d'une première génération de migrants (*i.e.* primo-arrivants) souhaitant perpétuer leurs traditions culturelles et funéraires. Si tel était le cas pour la catacombe SSPM, et tenant compte du fait que cette pratique funéraire aurait pour origine l'Afrique du Nord, notre étude devrait – théoriquement du moins – pouvoir le mettre en évidence, ou à défaut apporter des éléments de réponse permettant de discuter ce point.

Comme nous l'avons vu dans notre étude, près d'un quart des sujets étudiés a pu être identifié comme migrants (Section V, 4.1). Ils présentent des schémas de mobilité très divers les uns des autres et des origines géographiques variées telles que l'Afrique du Nord, l'Afrique de l'Est, l'Asie mineure et l'Europe (Section V, 4.2). Par ailleurs, environ 10 % des sujets étudiés auraient vécu toute leur existence à Rome (Section V, 4.1). De ces différents éléments, nous pouvons donc convenir d'une certaine hétérogénéité de notre population. Issus de provinces distinctes de l'Empire éloignées les uns des autres (*e.g.* Italie, Lusitanie, Numidie, Cyrénaïque, *etc.*) et de contrées situées au-delà du *limes* (*e.g.* région de la corne de l'Afrique) (Section V, 4.2), les sujets inhumés dans la région X pourraient être, de fait, issus de cultures différentes. Chaque culture appréhende la mort selon ses us et coutumes et il serait donc attendu que ces individus soient inhumés par leurs proches, selon leurs propres traditions funéraires. Mais au lieu d'une pluralité de pratiques funéraires mise en évidence dans les différentes chambres de la région X, il semble bien qu'une certaine homogénéité de ces dernières soit présente en ce lieu (Section I, 3.4). L'hypothèse qu'une pratique funéraire en particulier d'un ou plusieurs migrants ait pris le pas sur les autres et qu'ainsi tous aient été inhumés d'une façon similaire ne semble pas ici recevable devant l'absence d'élément pour l'étayer. Une autre hypothèse pourrait être que ces pratiques funéraires aient été en usage avant même l'arrivée des migrants, lesquels auraient été alors inhumés non pas selon leurs rites mais bien selon ceux ayant cours dans la capitale impériale. Pour étayer cette dernière hypothèse, deux points peuvent être invoqués. Le premier a déjà été abordé précédemment, à savoir que la pratique d'enduire de plâtre le corps d'un défunt préalablement à son inhumation a pu être mise en évidence dans d'autres catacombes à Rome, notamment aux catacombes de Priscille et de Saint-Calixte (Green 1977). Le second est que l'époque à laquelle ces deux complexes cémétériels ont commencé à se développer, à savoir dans la seconde moitié du II^e s. ap. J.-C. (Green 1977), est peut-être contemporaine aux ensembles sépulcraux de la région X de la catacombe SSPM. Aussi, en différents cimetières de Rome et de façon synchrone, une même pratique funéraire semblerait avoir été en usage. Ce serait alors selon cette dernière que les sujets romains et non-romains se seraient faits inhumés.

5.3. Réexamen de la chronologie des ensembles sépulcraux

5.3.1. Réexamen d'après les datations ¹⁴C

Au regard des nouvelles datations ¹⁴C et des données relatives aux régimes alimentaires obtenues dans le cadre de ce travail, il nous est possible de rediscuter la chronologie générale de la mise en place des sépultures plurielles dans la région X de la catacombe SSPM.

Via le modèle bayésien FRUITS, nous avons pu mettre en évidence qu'en moyenne, à l'échelle populationnelle, tous scénarios alimentaires confondus (avec hiérarchisation), $12 \pm 0,07$ % du carbone constitutif du collagène dériveraient des macronutriments d'origine marine (Section V, 3.2.3). Compte tenu d'un effet réservoir marins d'environ 400 ans à l'échelle mondiale et à l'aide d'une simple règle de proportionnalité, nous avons pu estimer que les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ obtenus seraient, en moyenne, trop vieux de 48 ± 28 ans. Corrigés de cet effet réservoir, les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ des 7 sujets pour lesquels nous disposons d'aucune information relative à leur régime alimentaire s'inscriraient tous entre le I^{er} et le IV^e s. ap. J.-C. Tous ces âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ corrigés ont en commun un même intervalle de temps s'étendant entre 155 et 285 ap. J.-C., à une exception près (Individu 73 de X80/T16) et sur laquelle nous reviendrons plus tard.

Toujours via FRUITS, nous avons pu montrer, cette fois-ci à l'échelle individuelle, pour 7 sujets en particuliers pour lesquels nous disposons de données relatives à leur régime alimentaire, tous scénarios alimentaires confondus (avec hiérarchisation), qu'entre $12 \pm 0,08$ % et $18 \pm 0,09$ % du carbone constitutif du collagène dériveraient des macronutriments d'origine marine (Section V, 3.2.3). Aussi, les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ obtenus pour ces 7 sujets seraient trop vieux de 48 ± 32 ans à 72 ± 36 ans (Tableau 29). Corrigés de cet effet réservoir, les âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ de ces derniers s'inscriraient tous entre le II^e et le IV^e s. ap. J.-C. à une exception près (Individu 64 de X82/T18). Cette exception a été discutée à différentes reprises plus en amont dans ce travail (Section V, 2.3). Aussi, ne reviendrons-nous pas dessus, si ce n'est pour préciser que cette anomalie est imputable à une forte consommation de ressources marines et qu'il est préférable de tenir compte pour ce sujet de son âge $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ plutôt que de son âge $^{14}\text{C}_{\text{col}}$, celui-ci s'inscrivant parfaitement dans la variabilité des âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ des sujets situés stratigraphiquement en-dessous et au-dessous de lui (Sections IV, 4 et V, 2.3). Nous pointerons au passage ici le fait que FRUITS sous-estime la contribution du carbone des macronutriments marins au pool total de carbone constitutif du collagène. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que cet individu ait consommé des produits marins de bas niveaux trophiques, ce que d'ailleurs laisserait aussi supposer sa valeur de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ modérément élevée (Tableau 29). Nous soulignerons enfin que les arguments avancés ici pour expliquer l'âge de l'individu 64 de X82/T18 prévalent certainement aussi pour expliquer celui de l'individu 73 de X80/T16. Pour ces raisons, ce dernier, comme celui de l'individu 64 de X82/T18, doit être exclu de notre corpus de datations ^{14}C . *In fine*, les 6 âges $^{14}\text{C}_{\text{col}}$ corrigés des sujets pour lesquels nous avons des données concernant leur alimentation ainsi que l'âge de $^{14}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ de l'individu 64 de X82/T18 ont tous en commun un même intervalle de temps s'étendant entre 163 et 308 ap. J.-C.

Tableau 36. Correction des âges ^{14}C cal BC/AD

Salle	Identifiant	Phase	Âge ^{14}C BP	Âge ^{14}C cal BC/AD	Effet réservoir	Âge ^{14}C corrigé cal BC/AD
X80/T16	17	Collagène	1880 ± 30	66-222	48 ± 28	86-298
	24	Collagène	1851 ± 27	85-234	48 ± 32	101-314
	38	Collagène	1910 ± 30	21-209	48 ± 28	41-285
	65	Collagène	1870 ± 30	73-226	52 ± 32	93-310
	73	Collagène	1930 ± 30	4-131	48 ± 28	24-207
	79	Collagène	1891 ± 30	55-216	60 ± 32	83-308
X82/T18	32	Collagène	1785 ± 27	137-330	56 ± 36	157-422
	64	Collagène	1965 ± 31	-42-116	72 ± 36	-6-228
	64	Carbonate	1812 ± 34	-	-	125-327
	74	Collagène	1870 ± 30	73-226	48 ± 28	93-302
	79	Collagène	1855 ± 30	82-234	64 ± 32	114-330
X83	15	Collagène	1865 ± 30	76-230	48 ± 28	96-306
	170	Collagène	1855 ± 30	82-234	48 ± 28	102-310
	US216 Mand1	Collagène	1779 ± 27	139-334	52 ± 28	163-414
	Bas de strati.	Collagène	1770 ± 40	135-379	48 ± 28	155-455

Ces deux intervalles de temps comprennent en leur sein la décennie 260/270 ap. J.-C., période à laquelle remonterait la naissance du complexe cémétériel souterrain. Il existe statistiquement autant de chances que les espaces sépulcraux du secteur central de la région X datent d'avant ou d'après la création de la catacombe. Cependant l'hypothèse la plus parcimonieuse serait que ces espaces aient été créés de façon contemporaine ou postérieure aux premiers développements du réseau catacombale.

Si antériorité de ces espaces sépulcraux il n'y a, comment alors interpréter les âges ^{14}C mesurés sur les pièces de tissu découvertes dans la chambre X78/T15 et datant d'avant 260 ap. J.-C. Nous proposerons l'hypothèse que les âges ^{14}C obtenus sur ces tissus doivent être appréhendés de la même façon que les éléments numismatiques retrouvés dans les chambres X78/T15 et X83, c'est-à-dire comme des *terminus post quem*. En effet, ces textiles pourraient parfaitement avoir été conservés durant un certain temps avant leur utilisation dans ce contexte funéraire.

5.3.2. Des éléments architecturaux comme indicateurs chronologiques

Nous mentionnerons un dernier point, d'ordre architectural et organisationnel, pouvant venir étayer notre hypothèse que ces ensembles sépulcraux aient été établis au moment, ou après, les premiers développements de la catacombe. Noyau originel supposé de la catacombe, la région X se

développe selon un schéma relativement simple (Figure 3) (Guyon 1987). De l'artère principale, la galerie X1, orientée est-ouest, partent perpendiculairement vers le nord ou vers le sud des galeries secondaires, lesquelles tentent entre elles de rester parallèles (Figure 3) (Guyon 1987). Le percement des galeries secondaires au nord de l'artère X1 se fait du sud vers le nord et réciproquement le creusement des galeries secondaires au sud de l'artère X1 se réalise du nord vers le sud (Figure 3) (Guyon 1987). Le secteur central de la région X où se localisent les sépultures plurielles, lequel est situé au nord de l'artère X1, semble s'inscrire en partie dans ce schéma de développement qu'ont souhaité suivre les *fossore*s (Figure 3). Deux galeries se distinguent aisément à la lecture du plan dans le secteur central. La première est au niveau de la chambre X78 (Figure 3). L'autre est au niveau de la chambre X80 (Figure 3). Ces deux galeries ont été percées du sud vers le nord de la même façon que les galeries se localisant au nord de l'artère X1 (Figure 3). De même ces deux galeries s'avèrent parallèles aux galeries X10 et X14 cernant respectivement à l'ouest et à l'est le secteur central (Figure 3). Enfin, ces galeries sont d'une largeur similaire aux galeries classiquement rencontrées dans la catacombe (Figure 3). Aussi, il semblerait que le percement de ces deux galeries du secteur central s'inscrive dans la même dynamique de développement de la région X que l'ouverture des autres galeries secondaires au nord de l'artère X1. Le creusement de ces galeries aurait toutefois pu rapidement se voir stopper en raison de salles d'un arénaire tombé en désuétude, d'ordinaire plus profondes, et que les *fossore*s ne pensaient pas rencontrer ici (Guyon 1987). Dans ce cas de figure, les ensembles sépulcraux n'auraient été mis en place dans ces chambres qu'après l'ouverture de ces galeries, et donc après les premiers développements de la région X.

5.4. Des chrétiens ? Une hypothèse plausible

La probable contemporanéité des ensembles sépulcraux du secteur central avec les premiers développements de la catacombe chrétienne SSPM est sans nul doute l'un des arguments les plus recevables pour suspecter que les individus inhumés là seraient, du moins en partie, des chrétiens. Une catacombe chrétienne, et ceci est aisément compréhensible, a pour principale vocation de recevoir les corps de chrétiens, même si des cas exceptionnels de païens découverts dans ces contextes existent (Guyon 1987 ; Rébillard 1997 ; Fiocchi Nicolai *et al.* 1999 ; Rutgers 2000). La création de la catacombe SSPM à la fin du III^e s. ap. J.-C. n'est pas casuelle mais répond à un besoin, celui pour une communauté grandissante d'inhumer ses morts qui par la force des choses se font de plus en plus nombreux (Guyon 1987). Aussi, les premiers développements d'un réseau cémétériel, et *a fortiori* de celui de SSPM qui soulignons-le n'est pas le premier de ce genre, est réalisé à la demande de chrétiens pour des chrétiens (Guyon 1987). De ce fait, pourrions-nous supputer que des chrétiens furent déposés au sein de la région X, ce secteur le plus ancien de la catacombe.

La configuration atypique des chambres de la région X présumerait-elle toutefois l'inverse, à savoir que soient inhumés ici des non-chrétiens ? Il est en effet étonnant qu'à la naissance même de la catacombe des salles aussi singulières que celles-là puissent avoir été creusées, pouvant laisser à penser qu'elles aient fonctionné séparément du reste de la catacombe (Section I, 3.8). Toutefois, si l'essentiel du secteur X présente un schéma organisationnel inhabituel, deux galeries, l'une au niveau de X78/T15 et l'autre au niveau de X80, sembleraient se dessiner dans ce secteur et s'intégreraient parfaitement dans le plan général de la région X (Figure 3). L'ouverture de ces galeries aurait été rapidement stoppée en raison de la découverte fortuite de salles qui selon Guyon (1987) pourraient être les vestiges d'un arénaire de profondeur anormalement faible. La soudaineté d'une crise de mortalité et la nécessité de remédier à un nombre de décès important aurait pu conduire les *fossores* à réutiliser ces espaces originellement non-sépulcraux en des sépultures de fortune qu'ils n'auraient pas pu préalablement réaménager faute de temps. La configuration étrange de ces chambres n'augurerait donc pas nécessairement qu'elles aient eu une fonction différente du reste de la catacombe, à savoir accueillir les défunts chrétiens.

La diversité des histoires de vie, la variété des statuts socio-économiques et la pluralité des origines tant géographiques que culturelles de ces sujets, réunis dans la mort, nous conduiraient à imaginer qu'un lien transcendant toutes ces différences factuelles et peut-être d'ordre mystique reliait ces individus. Ce lien pourrait être le christianisme, religion que certains auraient pu embrasser tardivement dans leur vie, possiblement après leur migration ou leur installation dans la capitale romaine. Un culte commun expliquerait que des individus, dont certains sont à l'origine assurément de cultures différentes des Romains, comme cet individu originaire de la corne de l'Afrique, soient inhumés de façon similaire aux habitants de la capitale. Il expliquerait également que les sujets les plus nantis comme les plus humbles aient eu accès aux mêmes pratiques funéraires et au même appareil funéraire pourtant onéreux, et enfin que, malgré la crise de mortalité et la fréquence anormalement élevée de défunts, la communauté des vivants ait pris soin d'inhumer de la même façon ces individus.

Par ailleurs, selon certains auteurs, à l'exemple de Green (1977), l'emploi de plâtre en contexte funéraire pourrait être au début de notre ère dans l'Empire romain l'apanage des chrétiens. Cet usage du plâtre aurait de surcroît été démontré dans d'autres catacombes comme celles de Saint-Calixte ou de Priscille, toutes deux indubitablement chrétiennes (Green 1977). Mais l'appareil funéraire mis en évidence dans la catacombe SSPM ne se limite pas au plâtre. La présence dans ce dernier d'oléorésines et possiblement d'essences naturelles suggérerait une certaine complexité jamais observée jusqu'alors à Rome (*cf. supra*). Cependant, il peut être envisagé que la présence de résines ou d'essences n'ait tout simplement pas été reconnue à la fouille dans les autres réseaux cémétériaux par manque d'analyses physico-chimiques. L'emploi de résines ou d'essences naturelles n'aurait toutefois rien d'extraordinaire. Juifs, chrétiens, païens oignaient dans l'Antiquité très souvent les corps des défunts

avec différentes gommes, épices ou résines (Girel et Soldini 2013 ; Viero 2014). Aussi, l'utilisation de résines et d'essences naturelles n'infirmieraient pas le fait que ces individus soient possiblement des chrétiens.

De plus, bien que cela ne soit pas non plus une prérogative strictement chrétienne, le fait que les défunts soient inhumés et non incinérés et qu'ils soient déposés sans mobilier funéraire ou presque peut également supporter l'hypothèse que ces individus sont des chrétiens.

Nous l'avons vu (Section I, 3.4), les sépultures plurielles de la région X ont vraisemblablement fonctionné sur un temps relativement long, au rythme de la ou des épidémie(s) et de ses/leurs phases de quiétude et de résurgence, soit durant plusieurs années voire décennies. Du début à la fin toutefois, les sujets sembleraient avoir été inhumés selon les mêmes pratiques funéraires. Il y aurait donc une certaine permanence de ces dernières tout au long de la crise de mortalité. Tenant compte du fait qu'en sus de cette permanence, l'appareil funéraire utilisé était sophistiqué et probablement complexe à mettre en place, il pourrait être envisagé qu'un groupe d'individus relativement restreint avait en charge l'inhumation de ces défunts. L'existence d'un tel groupe suggérerait une certaine organisation des vivants pour gérer leurs morts. Ce groupe ne pourrait par ailleurs n'être qu'au service d'une communauté, de nature sans doute confessionnelle, qui souhaitait inhumer ses morts de façon normée. Cette communauté devait être suffisamment grande pour perdurer, malgré l'ampleur de la crise de mortalité et les possibles 1500 à 2500 morts qu'elle fit. La communauté chrétienne pourrait être celle-là. Guyon (1987) estime qu'à la fin du III^e s. ap. J.-C. la communauté chrétienne rattachée à la catacombe SSPM devait se composer d'environ 9000 âmes, soit l'une des plus grandes communautés chrétiennes de Rome à cette époque. Une telle communauté aurait, nous le pensons, pu se perpétuer en dépit d'une telle crise de mortalité.

En somme, au regard de ces différents éléments, l'hypothèse selon laquelle furent inhumés dans les sépultures plurielles de la région X de la catacombe SSPM des chrétiens semblerait assez probable.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les salles centrales de la région X de la catacombe SSPM nous ont offert un matériel d'étude inédit. Les ensembles sépulcraux présents ont posé de nombreuses questions sur l'identité et la raison de la présence de ces centaines d'individus inhumés de façon originale par rapport aux autres parties du réseau catacombal. Les analyses isotopiques que nous avons menées ont tenté de répondre à certaines de ces questions.

Nos réflexions initiales nous ont conduit à tester la validité de notre protocole pour étudier la fraction minérale de l'os. Celle-ci est considérée par la communauté scientifique comme moins fiable, en raison de sa porosité, et plus soumise aux altérations diagénétiques. La vérification de cet état de conservation n'est pas vérifiable, de sorte que l'os est rarement utilisé pour étudier l'alimentation et la mobilité. Nous avons testé deux protocoles novateurs (T2 et T2Bis) afin de déterminer le plus efficace pour éliminer les contaminations de carbonates exogènes. Il s'est avéré que tous deux, pour des raisons différentes, nous menaient aux résultats escomptés. Nous n'avons donc pas pu en privilégier un par rapport à l'autre. Pour ce qui est de la préservation post-mortem des signaux isotopiques, nous avons pu mettre en évidence une hétérogénéité spatiale dans la catacombe. En effet, une conservation différentielle de la phase organique de l'os s'observe en fonction des salles. Ceci semble dû 1) à la taille des salles : l'os est moins bien conservé dans les petites salles, 2) l'emplacement des corps dans les salles : plus ils sont près des parois, plus la conservation est mauvaise, en raison de l'humidité, et 3) aux espaces de circulation qui ont contribué à l'altération des vestiges osseux. En revanche, nous avons pu démontrer la bonne conservation de la phase minérale de l'os.

Nous avons pu mettre en évidence un certain nombre de points au sujet du régime alimentaire des sujets que nous avons analysés. Ils auraient consommé un régime *type* constitué de Céréale C₃/Viande C₃/Poisson marin. La consommation de ressources marines est notable, parfois en quantité importante, mais toujours en des proportions moins importantes que les ressources terrestres. Cet élément nous laisse penser qu'il s'agit d'individus de couches sociales aisées. D'autres parmi les sujets analysés ont consommé des poissons d'eau douce ou du millet, aliments plutôt associés à des couches sociales moins aisées. Cependant, comparée à d'autres sites contemporains, cette consommation est beaucoup plus faible et relativise la pauvreté de ces individus. Nous constatons donc une population

peu homogène sur le plan socio-économique par rapport aux données alimentaires, cependant inhumée dans un même lieu selon des pratiques funéraires semblables dans l'ensemble. Il semble donc qu'il s'agisse d'une même communauté sans fondement socio-économique. Il faut ajouter également qu'aucune sélection ne s'observe dans la façon dont la ou les épidémies ont frappé cette population.

L'étude de la mobilité a également permis d'obtenir des conclusions intéressantes. Les pratiques funéraires inédites et élaborées de ces salles de la région X de la catacombe SSPM avaient posé la question d'une exogénéité des individus qui s'y trouvent. Nous avons pu mettre en évidence qu'un quart d'entre eux est migrant, avec des origines géographiques potentiellement très variées sur l'ensemble de l'Empire romain, et même au-delà. Cette diversité de provenance laisse supposer une diversité de cultures parmi ces individus. Une fois encore, l'hétérogénéité des personnes rassemblées dans cette partie de la catacombe est démontrée par nos analyses. Malgré ces différences identitaires, elles sont réunies dans la mort par des pratiques funéraires semblables. Ces dernières seraient antérieures à l'arrivée des migrants dans l'usage communautaire, puisqu'elles sont communes à tous, et participeraient donc d'une tradition commune.

La caractérisation de cette communauté n'est pas résolue, et nous avons établi un faisceau d'indices allant dans le même sens. Nous avons montré que la consommation de poisson rendait plus vieux de quelques dizaines d'années l'âge donné par le ¹⁴C. L'âge réel des sépultures est donc à corriger de l'effet réservoir et positionnerait ces salles de façon contemporaine à la création de la catacombe (vers 260 - 270 ap. J.C.). L'architecture atypique du sous-sol corrobore cette observation avec une intégration des salles de la région X dans la structure environnante. Seule la volonté initiale de créer un système souterrain cohérent expliquerait cela, venant d'une communauté de même confession pour y enterrer ses morts. La plus grande communauté de ce genre à Rome à cette période reste la communauté chrétienne. Les éléments que nous avons précédemment rappelés, à savoir une origine différente pour un quart des individus, ainsi que des statuts socio-économiques différents, mais une réunion dans la mort selon une certaine homogénéité des pratiques, nous mènent également vers les chrétiens. En effet, la réunion dans un même lieu d'une telle diversité de personnes implique une gestion communautaire par les vivants qu'ils sont à même de pratiquer. Certains éléments des pratiques funéraires, tel que le plâtre ou les oléorésines et aromates, sont également couramment utilisés par cette communauté. Enfin, le groupe touché par cette crise de mortalité n'est pas désorganisé et parvient à gérer en masse une crise d'une telle ampleur. A cette période, le seul qui nous semble assez grand et élaboré pour y faire face est le groupe des chrétiens. A l'aune de tous ces éléments, l'hypothèse qu'une communauté chrétienne est inhumée en masse dans ces salles particulières de la région X de la catacombe SSPM nous paraît tout à fait recevable.

* * *

Pour faire suite à ce travail de thèse, plusieurs perspectives se présentent naturellement. Tout d'abord l'étude biologique des individus va être poursuivie, notamment par l'étude des caractères discrets dentaires qui a déjà été commencée. 208 caractères discrets ont été enregistrés selon le système ASU-DAS sur 3670 dents permanentes identifiées et étudiées (340 individus et 638 dents isolées). L'objectif sera d'appréhender l'homogénéité biologique populationnelle.

Afin de poursuivre l'investigation biologique, nous envisageons également, en collaboration avec l'équipe de paléogénétique de PACEA/UMR 5199, de procéder à des analyses ADN pour étayer certains des résultats obtenus dans le cadre de ce travail concernant l'origine géographique des défunts (recherche de lignées maternelles ou paternelles).

Nous souhaitons d'autre part réessayer l'analyse isotopique de la kératine des cheveux humains de la catacombe et entreprendre une analyse de série de carbone et isotopique de l'azote. Ayant eu des problèmes techniques en réalisant ces analyses dans ce travail, nous estimons important de les retenter. Les résultats attendus sur l'alimentation à court terme (derniers mois de vie) pourraient nous permettre d'effectuer une comparaison avec ceux obtenus précédemment sur le carbonate de l'émail (premières années de vie) ainsi que sur le collagène de l'os et du carbonate (dernière décennie de la vie). L'objectif sera d'examiner des changements alimentaires potentiels tout au long de la vie d'un individu (Touzeau *et al.* 2014; White *et al.* 2009).

Enfin, et c'est l'aspect le plus concret de nos perspectives, de nouvelles analyses isotopiques (GC-C-IRMS d'acides aminés, de soufre sur le collagène des os, du carbone sur le tartre dentaire) vont être effectuées sur d'autres échantillons archéologiques de populations romaines de la péninsule italienne. C'est pourquoi nous avons établi, en collaboration avec professeur Robert Tykot (University of South Florida), un projet visant à étudier la composition et la variation de régime alimentaire à travers l'analyse des restes humains et faunique de deux nouveaux sites en Italie: les sites de Cinigiano (Toscane, nord de l'Italie) et le site de San Giovanni di Ruoti (Basilicate, sud de l'Italie). Dans les faits, l'analyse isotopique de l'azote des acides aminés sera utilisée pour déterminer avec plus de précision la proportion de protéines dérivées de plantes, d'animaux et de sources marines consommés (Naito *et al.* 2013; Styring *et al.*, 2010). L'analyse isotopique du soufre sur le collagène faunique sera effectuée pour discriminer les individus selon les éléments ayant été consommés (Nehlich 2015; Privat *et al.*, 2007). Afin d'obtenir des données supplémentaires concernant la consommation de glucides, l'analyse isotopique du carbone du carbonate de tartre sur les dents sera exécutée (Henry *et al.* 2014, Scott *et Poulson* 2012). Dans l'espoir d'avoir une plus grande base de données isotopiques nécessaire pour la comparaison entre les valeurs fauniques et humaines, des analyses isotopiques d'azote et du carbone sur le collagène de restes faunique sera également nécessaire (Craig *et al.* 2009 ; Prowse *et al.* 2005).

Nous tenons également à mentionner l'existence de la base de données en ligne que nous avons créée en parallèle de ce travail, IsoArch. Elle est d'ores et déjà accessible sur le lien

<http://isoarch.eu/> et tend à être exhaustive pour l'Antiquité en Europe. Elle permet d'accéder à l'ensemble des sites recensés, ainsi qu'à leurs caractéristiques archéologiques et isotopiques. Le changement d'échelle d'analyse rend possible l'appréhension de la variabilité de l'alimentation selon une approche populationnelle et une compilation des données en fonction des questionnements. C'est un outil qui demande à être perfectionné mais qui ouvre de prometteuses analyses.

BIBLIOGRAPHIE

- AASENDEN R.** (1975). Post-eruptive changes in the fluoride concentrations of human tooth surface enamel. *Archives of Oral Biology*, 20 (5-6), 359–363.
- ABATE B., KOEBERL C., KRUGER F.J., UNDERWOOD J.R.J.** (1999). BP and Oasis impact structures, Libya, and their relation to Libyan Desert Glass. In: DRESSLER B.O., and SHARPTON V.L. (éd.). *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution II*, Geological Society of America, Boulder, 177-192.
- ÅBERG G., JACKS G., JOSEPH HAMILTON P.** (1989). Weathering rates and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios: an isotopic approach. *Journal of hydrology*, 109 (1–2), 65-78.
- ÅBERG G.** (1995). The use of natural strontium isotopes as tracers in environmental studies. In: ČERNÝ J., NOVÁK M., PAČES T., and WIEDER R.K. (éd.). *Biogeochemical monitoring in small catchments*, Springer Netherlands, 309-322.
- AFSSA** (2007). *Apport en protéines : consommation, qualité, besoins et recommandations*. Agence française de sécurité sanitaires des aliments, Paris, 461 p.
- AGGARWAL P.K., ARAGUAS-ARAGUAS L.J., GROENING M., KULKARNI K.M., KURTTAS T., NEWMAN B.D., VITVAR T.** (2010). Global hydrological isotope data and data networks. In: WEST J.B., BOWEN G.J., DAWSON T.E., and TU K.P. (éd.). *Isoscapes*, Springer, Dordrecht, 33-50.
- AHA** (2000). AHA dietary guidelines. Revision 2000: a statement for healthcare professionals from the nutrition committee of the American heart association. *Circulation*, 102, 2284-2299.
- AKKUS O., POLYAKOVA-AKKUS A., ADAR F., SCHAFFLER M.B.** (2003). Aging of microstructural compartments in human compact bone. *Journal of Bone and Mineral Research*, 18 (6), 1012-1019.
- AL-AASM I.S., ABDALLAH H.** (2006). The origin of dolomite associated with salt diapirs in central Tunisia: Preliminary investigations of field relationships and geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 89 (1–3), 5-9.
- AL-NUAIMI Y., GOODFELLOW M., PAUS R., BAIER G.** (2012). A prototypic mathematical model of the human hair cycle. *Journal of Theoretical Biology*, 310 (0), 143-159.
- ALBARÈDE F.** (2001). *La géochimie*. Gordon and Breach, Paris.
- ALDRETE G.S.** (2007). *Floods of the Tiber in ancient Rome*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 368 p.
- ALFANO D., ALBUNIA A.R., MOTTA O., PROTO A.** (2009). Detection of diagenetic alterations by spectroscopic analysis on archaeological bones from the Necropolis of Poseidonia (Paestum): A case study. *Journal of Cultural Heritage*, 10 (4), 509-513.
- ALI S., STATTEGGER K., GARBE-SCHÖNBERG D., FRANK M., KRAFT S., KUHN W.** (2014). The provenance of Cretaceous to Quaternary sediments in the Tarfaya basin, SW Morocco: Evidence from trace element geochemistry and radiogenic Nd–Sr isotopes. *Journal of African Earth Sciences*, 90 (0), 64-76.
- AMATO J.M., WRIGHT J.E.** (1997). Potassic mafic magmatism in the Kigluaik gneiss dome, northern Alaska: A geochemical study of arc magmatism in an extensional tectonic setting. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102 (B4), 8065-8084.
- AMBROSE S.H., DENIRO M.J.** (1986a). The isotopic ecology of east African mammals. *Oecologia*, 69 (3), 395-406.
- AMBROSE S.H., DENIRO M.J.** (1986b). Reconstruction of African human diet using bone collagen carbon and nitrogen isotope ratios. *Nature*, 319 (6051), 321-324.
- 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.** (1993a). Isotopic analysis of paleodiets: methodological and interpretive considerations. In: SANDFORD M.K. (éd.). *Investigations of ancient human tissue*, Gordon and Breach Science Publishers, Langhorne, 59–130.
- AMBROSE S.H.** (1993b). Diet reconstruction with stable isotopes. In: SANDFORD M.K. (éd.). *Investigations of ancient human tissue Chemical analyses in anthropology*, Gordon and Breach Science Publishers, Langhorne, 59-130.
- 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., and GRUPE G. (éd.). *Prehistoric human bone Archaeology at the molecular level*, Springer, Berlin, 1-37.
- 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.** (2000). Controlled diet and climate experiments on nitrogen isotope ratios of rats. In: AMBROSE S.H., and KATZENBERG M.A. (éd.). *Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*, Kluwer Academic, Plenum Publishers, New York, 243-259.
- AMBROSE S.H., BUIKSTRA J.E., 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., KRIGBAUM J.** (2003). Bone chemistry and bioarchaeology. *Journal of Anthropological Archaeology*, 22 (3), 193-199.
- AMUNDSON R., STERN L., BAISDEN T., WANG Y.** (1998). The isotopic composition of soil and soil-respired CO₂. *Geoderma*, 82 (1–3), 83-114.
- ANDERSON T.F., ARTHUR M.A.** (1983). Stable isotope of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems. In: ARTHUR M.A., ANDERSON T.F., KAPLAN I.R., VEIZER J., and LAND L.S. (éd.). *Stable isotopes in sedimentary geology*, Tulsa, Oklahoma, 439.
- ANDRE J.** (2009). *L'alimentation et la cuisine à Rome*. Les Belles Lettres, Paris, 256 p.
- ANGIBOUST S., GLODNY J., ONCKEN O., CHOPIN C.** (2014). In search of transient subduction interfaces in the Dent Blanche–Sesia tectonic system (W. Alps). *Lithos*, 205 (0), 298-321.
- ARAÚJO R., FERNANDES M., CAVACO-PAULO A., GOMES A.** (2011). Biology of human hair: know your hair to control it. In: NYANHONGO G.S., STEINER W., and GÜBITZ G. (éd.). *Biofunctionalization of polymers and their applications*, Springer, Berlin, 121-143.
- ASCH K.** (2005). *The 1:5 million international geological map of Europe and adjacent areas*. BRG, Hannover.
- ASSCHER Y., WEINER S., BOARETTO E.** (2011). Variations in atomic disorder in biogenic carbonate hydroxyapatite using the infrared spectrum grinding curve method. *Advanced Functional Materials*, 21 (17), 3308-3313.
- ATKINSON B.W.** (2000). *La météorologie : observation, analyse, prévision et modification du temps* Larousse, Paris.
- AYALEW D., YIRGU G., PIK R.** (1999). Geochemical and isotopic (Sr, Nd and Pb) characteristics of volcanic rocks from southwestern Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 29 (2), 381-391.
- BAERTSCHI P.** (1976). Absolute ¹⁸O content of standard mean ocean water. *Earth and Planetary Science Letters*, 31 (3), 341-344.
- BAIOUMY H.** (2011). Rare earth elements and sulfur and strontium isotopes of upper Cretaceous phosphorites in Egypt. *Cretaceous Research*, 32 (3), 368-377.
- BAKER J.A., MENZIES M.A., THIRLWALL M.F., MACPHERSON C.G.** (1997). Petrogenesis of Quaternary intraplate volcanism, Sana'a, Yemen: implications for plume–lithosphere interaction and polybaric melt hybridization. *Journal of Petrology*, 38 (10), 1359-1390.
- BAKER R.E., MURRAY P.J.** (2012). Understanding hair follicle cycling: A systems approach. *Current Opinion in Genetics & Development*, 22 (6), 607-612.

- BALASSE M.** (2002). Reconstructing dietary and environmental history from enamel isotopic analysis: Time resolution of intra-tooth sequential sampling. *International Journal of Osteoarchaeology*, 12 (3), 155-165.
- BALASSE M., AMBROSE S.H., SMITH A.B., PRICE T.D.** (2002). The seasonal mobility model for prehistoric herders in the south-western Cape of South Africa assessed by isotopic analysis of sheep tooth enamel. *Journal of Archaeological Science*, 29 (9), 917-932.
- BALTER V.** (2001). *Les rapports Sr/Ca et Ba/Ca dans les phosphates biogéniques : applications paléo-écologiques et paléo-anthropologiques*. Université Bordeaux 1, 167 p.
- 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 ICPMS. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 (16), 3980-3990.
- BALZER A., GLEIXNER G., GRUPE G., SCHMIDT H.L., SCHRAMM S., TURBAN-JUST S.** (1997). In vitro decomposition of bone collagen by soil bacteria: the implications for stable isotope analysis in archaeometry. *Archaeometry*, 39 (2), 415-429.
- BARBIERI M., PENTA A., TURI B.** (1975). Oxygen and strontium isotope ratios in some ejecta from the Alban Hills volcanic area, Roman comagmatic region. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 51 (2), 127-133.
- BARBIERI M., MASI U., TOLOMEO L.** (1979). Origin and distribution of strontium in the travertines of Latium (central Italy). *Chemical Geology*, 24 (3-4), 181-188.
- BAKIMO I., OUATTARA F., OSHAUG A.** (2004). Protein, carbohydrate and fibre in cereals from Mali—how to fit the results in a food composition table and database. *Journal of Food Composition and Analysis*, 17 (2-3), 291-300.
- BARMAN J.M., ASTORE I., PECORARO V.** (1965). The normal trichogram of the adult. *Journal of Investigative Dermatology*, 44 (4), 233-236.
- BARTH J.H.** (1986). Measurement of hair growth. *Clinical and Experimental Dermatology*, 11 (2), 127-138.
- BENIASH E.** (2011). Biominerals - Hierarchical nanocomposites: The example of bone. *Wiley Interdisciplinary Reviews Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 3 (1), 47-69.
- BENTLEY R.A., KNIPPER C.** (2005). Geographical patterns in biologically available strontium, carbon and oxygen isotope signatures in prehistoric SW Germany. *Archaeometry*, 47 (3), 629-644.
- BENTLEY R.A.** (2006). Strontium isotopes from the Earth to the archaeological skeleton: a review. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 13 (3), 135-187.
- BERGER J., OUZEGANE K., BENDAOU A., LIÉGEOIS J.-P., KIÉNAST J.-R., BRUGUIER O., CABY R.** (2014). Continental subduction recorded by Neoproterozoic eclogite and garnet amphibolites from Western Hoggar (Tassendjanet terrane, Tuareg Shield, Algeria). *Precambrian Research*, 247 (0), 139-158.
- BERNA F., MATTHEWS A., WEINER S.** (2004). Solubilities of bone mineral from archaeological sites: the recrystallization window. *Journal of Archaeological Science*, 31, 867-882.
- BERNARD B.A.** (2006). La vie révélée du follicule de cheveu humain. *Médecine Science*, 22 (2), 138-143.
- BERNARD B.A.** (2012). The human hair follicle, a bistable organ? *Experimental Dermatology*, 21 (6), 401-403.
- BERTRAND H., CHAZOT G., BLICHERT-TOFT J., THORAL S.** (2003). Implications of widespread high- μ volcanism on the Arabian Plate for Afar mantle plume and lithosphere composition. *Chemical Geology*, 198 (1-2), 47-61.
- BERTRAND L., VICHI A., DOUCET J., WALTER P., BLANCHARD P.** (2014). The fate of archaeological keratin fibres in a temperate burial context: microtaphonomy study of hairs from Marie de Bretagne (15th c., Orléans, France). *Journal of Archaeological Science*, 42 (0), 487-499.
- BESHAK K., REY C., GLIMCHER M.J., SCHIMIZU M., GRIFFIN R.G.** (1990). Solid state carbon-13 and proton NMR studies of carbonate-containing calcium phosphates and enamel. *Journal of Solid State Chemistry*, 84 (1), 71-81.

- BETTON P.J., CIVETTA L.** (1984). Strontium and neodymium isotopic evidence for the heterogeneous nature and development of the mantle beneath Afar (Ethiopia). *Earth and Planetary Science Letters*, 71 (1), 59-70.
- BIGI A., COJAZZI G., PANZAVOLTA S., RIPAMONTI A., ROVERI N., ROMANELLO M., NORIS SUAREZ K., MORO L.** (1997). Chemical and structural characterization of the mineral phase from cortical and trabecular bone. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 68 (1), 45-51.
- BLAKELY R.L.** (1989). Bone strontium in pregnant and lactating females from archaeological samples. *American Journal of Physical Anthropology*, 80 (2), 173-185.
- BLANCHARD P., CASTEX D., COQUERELLE M., GIULIANI R., RICCIARDI M.** (2007). A mass grave from the catacomb of Saints Peter and Marcellinus in Rome, second-third century AD *Antiquity*, 81 (314), 989-998.
- BLANCHARD P., CASTEX D., GIULIANI R.** (2010). Les ensembles funéraires multiples de la catacombe des saints Pierre et Marcellin à Rome : une collaboration multi-institutionnelle. *Archéopages*, Hors Série, 6-15.
- BLANCHARD P., REVEILLAS H., KACKI S., CASTEX D.** (2015). La catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin à Rome (I^{er}-III^e s.) : discussion sur l'origine des défunts et leur décès. In: BRANCO G., ROCHA L., DUARTE C., DE OLIVEIRA J., and RAMÍREZ B. (éd.). *Arqueologia de Transição: O Mundo Funerário Actas do II Congresso Internacional Sobre Arqueologia de Transição (29 de Abril a 1 de Maio 2013)*, CHAIA, Évora, 197-216.
- BOCHERENS H., FIZET M., CUIF J.P., JAEGER J.-J., MICHARD J.-G., MARIOTTI A.** (1988). Premières mesures d'abondances isotopiques naturelles en ¹³C et en ¹⁵N de la matière organique fossile de dinosaure. Application à l'étude du régime alimentaire du genre *Anatosaurus* (*Ornithischia*, *Hadrosauridae*). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 306, 1521-1526.
- BOCHERENS H., FIZET M., MARIOTTI A., LANGE-BADRE B., VANDERMEERSCH B., BOREL J.P., BELLON G.** (1991). Isotopic biogeochemistry (¹³C, ¹⁵N) of fossil vertebrate collagen: application to the study of a past food web including Neandertal man. *Journal of Human Evolution*, 20 (6), 481-492.
- BOCHERENS H., KOCH P.L., MARIOTTI A., GERAADS D., JAEGER J.-J.** (1996a). Isotopic biogeochemistry (¹³C, ¹⁸O) of mammalian enamel from African Pleistocene hominid sites. *Palaios*, 11 (4), 306-318.
- BOCHERENS H., PACAUD G., LAZAREV P.A., MARIOTTI A.** (1996b). Stable isotope abundances (¹³C, ¹⁵N) in collagen and soft tissues from Pleistocene mammals from Yakutia: Implications for the palaeobiology of the Mammoth Steppe. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 126 (1-2), 31-44.
- BOCHERENS H., BILLIOU D.** (1998). Implications paléoenvironnementales et paléoalimentaires de l'étude isotopique du néandertalien de la couche 4. In: OTTE M., PATOU-MATHIS M., and BONJEAN D. (éd.). *Recherches aux grottes de Sclayn*, ERAUL, Liège, 311-328.
- BOCHERENS H., BILLIOU D., MARIOTTI A., PATOU-MATHIS M., OTTE M., BONJEAN D., TOUSSAINT M.** (1999). Palaeoenvironmental and palaeodietary implications of isotopic biogeochemistry of last interglacial Neanderthal and mammal bones in Scladina Cave (Belgium). *Journal of Archaeological Science*, 26 (6), 599-607.
- 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 (1), 46-53.
- 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.
- BOKHARI F.Y., KRAMERS J.D.** (1981). Island arc character and late Precambrian age of volcanics at Wadi Shwas, Hijaz, Saudi Arabia: geochemical and Sr and Nd isotopic evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, 54 (3), 409-422.
- BOL R., PFLIEGER C.** (2002). Stable isotope (¹³C, ¹⁵N and ³⁴S) analysis of the hair of modern humans and their domestic animals. *Rapid communications in mass spectrometry*, 16 (23), 2195-2200.
- BOLBOACĂ S.D., JÄNTSCHI L.** (2007). Amino acids sequences analysis on collagen. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine*, 64 (1-2), 311-316.

- BONHOMME M.G.** (1982). The use of Rb/Sr and K/Ar dating methods as a stratigraphic tool applied to sedimentary rocks and minerals. *Precambrian Research*, 18 (1–2), 5-25.
- BONO P., BONI C.** (1996). Water supply of Rome in antiquity and today. *Environmental Geology*, 27 (2), 126-134.
- BOSCH D., HAMMOR D., MECHATI M., FERNANDEZ L., BRUGUIER O., CABY R., VERDOUX P.** (2014a). Geochemical study (major, trace elements and Pb–Sr–Nd isotopes) of mantle material obducted onto the North African margin (Edough Massif, North Eastern Algeria): Tethys fragments or lost remnants of the Liguro–Provençal basin? *Tectonophysics*, 626 (0), 53-68.
- BOSCH D., MAURY R.C., EL AZZOUZI M.H., BOLLINGER C., BELLON H., VERDOUX P.** (2014b). Lithospheric origin for Neogene–Quaternary Middle Atlas lavas (Morocco): Clues from trace elements and Sr–Nd–Pb–Hf isotopes. *Lithos*, 205 (0), 247-265.
- BOSI G., MAZZANTI M.B., FLORENZANO A., N’SIALA I.M., PEDERZOLI A., RINALDI R., TORRI P., MERCURI A.M.** (2011). Seeds/fruits, pollen and parasite remains as evidence of site function: piazza Garibaldi – Parma (N Italy) in Roman and Mediaeval times. *Journal of Archaeological Science*, 38 (7), 1621-1633.
- BOSIO A.** (1632). *Roma sotterranea*, Rome.
- BOSKEY A.** (2006). Assessment of bone mineral and matrix using backscatter electron imaging and FTIR imaging. *Current Osteoporosis Reports*, 4 (2), 71-75.
- BOURBOU C., FULLER B.T., GARVIE-LOK S.J., RICHARDS M.P.** (2011). Reconstructing the diets of Greek Byzantine populations (6th–15th centuries AD) using carbon and nitrogen stable isotope ratios. *American Journal of Physical Anthropology*, 146 (4), 569-581.
- BOWEN G.J., WILKINSON B.** (2002). Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in meteoric precipitation. *Geology*, 30 (4), 315-318.
- BOWEN G.J., REVENAUGH J.** (2003). Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation. *Water Resources Research*, 39 (10), 1299.
- BOWEN G.J., WASSENAAR L.I., HOBSON K.A.** (2005a). Global application of stable hydrogen and oxygen isotopes to wildlife forensics. *Oecologia*, 143 (3), 337-348.
- BOWEN G.J., WINTER D.A., SPERO H.J., ZIERENBERG R.A., REEDER M.R., CERLING T.E., EHLERINGER J.R.** (2005b). Stable hydrogen and oxygen isotope ratios of bottled waters of the world. *Rapid communications in mass spectrometry*, 19 (23), 3442–3450.
- BRANDBURY J.H.** (1966). Separation of chemically unmodified histological components of keratin fibers and analyses of cuticle. *Nature*, 210 (5043), 1333-1334.
- BRAUN T.** (1995). Barley cakes and emmer bread. In: WILKINS J., HARVEY D., and DOBSON M. (éd.). *Food in antiquity*, University of Exeter Press, Exeter, 25-37.
- BRESCIA M.A., DI MARTINO G., GUILLOU C., RENIERO F., SACCO A., SERRA F.** (2002). Differentiation of the geographical origin of durum wheat semolina samples on the basis of isotopic composition. *Rapid communications in mass spectrometry*, 16 (24), 2286-2290.
- BRETTELL R., MONTGOMERY J., EVANS J.** (2012). Brewing and stewing: the effect of culturally mediated behaviour on the oxygen isotope composition of ingested fluids and the implications for human provenance studies. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27 (5), 778-785.
- BRILLAT-SAVARIN J.A.** (1826). *Physiologie du goût ou Méditations de gastronomie transcendante*. Sauteleat, Paris, 415 p.
- BROWN A.G., MEADOWS I., TURNER S.D., MATTINGLY D.J.** (2001). Roman vineyards in Britain: stratigraphic and palynological data from Wollaston in the Nene Valley, England. *Antiquity*, 75 (290), 745-757.
- BRUNO L., AMOROSI A., CURINA R., SEVERI P., BITELLI R.** (2013). Human–landscape interactions in the Bologna area (northern Italy) during the mid–late Holocene, with focus on the Roman period. *The Holocene*, 23 (11), 1560-1571.
- BRYANT J.D., FROELICH P.N.** (1995). A model of oxygen isotope fractionation in body water of large mammals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (21), 4523-4537.

- BÜNTGEN U., TEGEL W., NICOLUSSI K., MCCORMICK M., FRANK D., TROUET V., KAPLAN J.O., HERZIG F., HEUSSNER K.-U., WANNER H., LUTERBACHER J., ESPER J. (2011). 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science*, 331 (6017), 578-582.
- BURKHALTER F. (1997). Irrigation et production agricole en Egypte hellénistique et romaine. *Histoire, économie et société*, 16 (3), 343-352.
- CAPO R.C., STEWART B.W., CHADWICK O.A. (1998). Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods. *Geoderma*, 82 (1-3), 197-225.
- CARDOSO C.A.B., MAGALHAES A.C., RIOS D., LIMA J.E.O. (2009). Cross-sectional hardness of enamel from human teeth at different post-eruptive ages. *Caries Research*, 43 (6), 491-494.
- CARLIER A., RIERA P., AMOUREUX J.-M., BODIQUO J.-Y., GRÉMARE A. (2007). Benthic trophic network in the bay of Banyuls-sur-Mer (northwest Mediterranean, France): an assessment based on stable carbon and nitrogen isotopes analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 72 (1-2), 1-15.
- CARTER D.O., TIBBETT M. (2008). Cadaver decomposition and soil: processes. In: TIBBETT M., and CARTER D.O. (éd.). *Soil analysis in forensic taphonomy*, CRC Press, Boca Raton, 29-52.
- CARTER M.R. (1986). Microbial biomass and mineralizable nitrogen in solonchic soils: Influence of gypsum and lime amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 18 (5), 531-537.
- CARTER S.R., NORRIS M.J. (1976). Genetic implications of Sr isotopic data from the Aden Volcano, South Arabia. *Earth and Planetary Science Letters*, 31 (1), 161-166.
- CASTEX D., BLANCHARD A., GIULIANI R., RICCIARDI M. (2007). Les ensembles funéraires du secteur central de la catacombe des Saints Pierre et Marcellin (Rome, I^{er}-III^e siècle) : caractérisation, hypothèses d'interprétations et perspectives de recherches. *Mélanges de l'École française de Rome - Antiquité*, 119 (1), 274-282.
- CASTEX D., BLANCHARD A., REVEILLAS H., KACKI S., GIULIANI R. (2009). Les sépultures du secteur central de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin (Rome). Etat des analyses bio-archéologiques et perspectives *Mélanges de l'École française de Rome - Antiquité*, 121 (1), 287-297.
- CASTEX D., BLANCHARD A. (2011). Témoignages archéologiques de crise(s) épidémique(s) : la catacombe des Saints Marcellin et Pierre (Rome, fin I^{er}-III^e s.). In: CASTEX D., COURTAUD P., DUDAY H., LE MORT F., and TILLIER A.-M. (éd.). *Le regroupement des morts Genèse et diversité archéologique*, Editions Ausonius - Maison des Sciences de l'Homme d'Aquitaine, Bordeaux, 281-293.
- CASTEX D., BLANCHARD P., KACKI S., REVEILLAS H., GIULIANI R. (2011). Le secteur central de la catacombe des Sts Pierre-et-Marcellin (Rome, I^{er}-III^e siècle). Indices archéologiques d'une crise brutale de mortalité. *Mélanges de l'École Française de Rome – Chronique*, 123 (1), 274-280.
- CASTORINA F., MASI U., MILLI S., ANZIDEI A.P., BULGARELLI G.M. (2015). Geochemical and Sr–Nd isotopic characterization of Middle Pleistocene sediments from the paleontological site of La Polledrara di Cecanibbio (Sabatini Volcanic District, central Italy). *Quaternary International* (0).
- 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.
- CEBEILLAC-GERVASONI M. (1994). Ostie et le blé au II^e siècle ap. J.-C. In. *Le Ravitaillement en blé de Rome et des centres urbains des débuts de la République jusqu'au Haut-Empire Actes du colloque international de Naples, 14-16 Février 1991*, École Française de Rome, Rome, 47-59.
- CERLING T.E., HARRIS J.M. (1999). Carbon isotope fractionation between diet and bioapatite in ungulate mammals and implications for ecological and paleoecological studies. *Oecologia*, 120 (3), 347-363.
- CHADWICK O.A., DERRY L.A., VITOUSEK P.M., HUEBERT B.J., HEDIN L.O. (1999). Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature*, 397 (6719), 491-497.
- CHAZOT G., BERTRAND H. (1993). Mantle sources and magma-continental crust interactions during early Red Sea-Gulf of Aden rifting in southern Yemen: Elemental and Sr, Nd, Pb isotope evidence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98 (B2), 1819-1835.
- CHAZOT G., BERTRAND H. (1995). Genesis of silicic magmas during tertiary continental rifting in Yemen. *Lithos*, 36 (2), 69-83.

- CHEN L., ZONNEVELD K.A.F., VERSTEEGH G.J.M.** (2011). Short term climate variability during “Roman Classical Period” in the eastern Mediterranean. *Quaternary Science Reviews*, 30 (27–28), 3880-3891.
- CHENERY C., MÜLDNER G., EVANS J., ECKARDT H., LEWIS M.** (2010). Strontium and stable isotope evidence for diet and mobility in Roman Gloucester, UK. *Journal of Archaeological Science*, 37 (1), 150-163.
- CHENERY C., ECKARDT H., MÜLDNER G.** (2011). Cosmopolitan Catterick? Isotopic evidence for population mobility on Rome’s Northern frontier. *Journal of Archaeological Science*, 38 (7), 1525-1536.
- CHENERY C.A., PASHLEY V., LAMB A.L., SLOANE H.J., EVANS J.A.** (2012). The oxygen isotope relationship between the phosphate and structural carbonate fractions of human bioapatite. *Rapid communications in mass spectrometry*, 26 (3), 309-319.
- CHIESA S., CIVETTA L., DE FINO M., LA VOLPE L., ORSI G.** (1989). The Yemen trap series: Genesis and evolution of a continental flood basalt province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 36 (4), 337-350.
- CHILD A.M.** (1995). Towards an understanding of the microbial decomposition of archaeological bone in the burial environment. *Journal of Archaeological Science*, 22 (2), 165-174.
- 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.
- CHISHOLM B.S.** (1986). *Reconstruction of prehistoric diet in British Columbia using stable carbon isotope analysis*. Simon Fraser University 185 p.
- CHISHOLM B.S.** (1989). Variation in diet reconstructions based on stable carbon isotopic evidence. In: PRICE T.D. (éd.). *The chemistry of prehistoric human bone*, Cambridge, Cambridge University Press, 10-37.
- CHO G., WU Y., ACKERMAN J.L.** (2003). Detection of hydroxyl ions in bone mineral by solid-state NMR spectroscopy. *Science*, 300 (5622), 1123-1127.
- CHOI W.J., ARSHAD M.A., CHANG S.X., KIM T.H.** (2006). Grain ¹⁵N of crops applied with organic and chemical fertilizers in a four-year rotation. *Plant and Soil*, 284 (1-2), 165-174.
- CHOUBERT G., FAURE-MURET A.** (1990). *Carte internationale géologique de l’Afrique, 1/5000000*. CCGM-UNESCO, Paris.
- CHRISTOFLE M.** (1938). *Rapport sur les travaux de fouilles et consolidations effectuées en 1933-1936 par le Service des monuments historiques de l’Algérie*. Jules Carbonel, Alger, 477 p.
- CHRISTOL M.** (1994). Le blé africain et Rome. Remarques sur quelques documents. In. *Le Ravitaillement en blé de Rome et des centres urbains des débuts de la République jusqu’au Haut-Empire Actes du colloque international de Naples, 14-16 Février 1991*, École Française de Rome, Rome, 295-304.
- CIAMPINI G.G.** (1693). *De sacris aedificiis a Constantino Magno constructis : synopsis historica*. Apud Joannem Jacobum Komarek, Bohemum typographum & Characterum Fusorem Apud S. Angelum Custodem, Rome, 220 p.
- CLAUER N., WILLIAMS L.B., FALLICK A.E.** (2014). Genesis of nanometric illite crystals elucidated by light-element (hydrogen, lithium, boron and oxygen) isotope tracing, and K–Ar and Rb–Sr dating. *Chemical Geology*, 383 (0), 26-50.
- CLAVANDIER G.** (2009). *Sociologie de la mort: Vivre et mourir dans la société contemporaine*. Armand Colin, Paris.
- CLAY R.C., COOK K., ROUTH J.I.** (1940). Studies in the composition of human hair. *Journal of the American Chemical Society*, 62 (10), 2709-2710.
- CLEMENTZ M.T.** (2012). New insight from old bones: Stable isotope analysis of fossil mammals. *Journal of Mammalogy*, 93 (2), 368-380.
- CLOERN J.E., CANUEL E.C., HARRIS D.** (2002). Stable carbon and nitrogen isotope composition of aquatic and terrestrial plants of the San Francisco Bay estuarine system. *American Society of Limnology and Oceanography*, 47 (3), 713-729.
- CODRON D., CODRON J., SPONHEIMER M., BERNASCONI S.M., CLAUSS M.** (2011). When animals are not quite what they eat: diet digestibility influences C-13-incorporation rates and apparent

- discrimination in a mixed-feeding herbivore. *Canadian Journal of Zoology-Revue Canadienne De Zoologie*, 89 (6), 453-465.
- COLLINS M.J., RILEY M.S., CHILD A.M., TURNERWALKER G.** (1995). A basic mathematical simulation of the chemical degradation of ancient collagen. *Journal of Archaeological Science*, 22 (2), 175-183.
- COLLINS M.J., NIELSEN-MARSH C.M., HILLER J., SMITH C.I., ROBERTS J.P., PRIGODICH R.V., WEISS T.J., CSAPO J., MILLARD A.R., TURNER-WALKER G.** (2002). The survival of organic matter in bone: a review. *Archaeometry*, 44, 383-394.
- CONTICELLI S., D'ANTONIO M., PINARELLI L., CIVETTA L.** (2002). Source contamination and mantle heterogeneity in the genesis of Italian potassic and ultrapotassic volcanic rocks: Sr–Nd–Pb isotope data from Roman Province and Southern Tuscany. *Mineralogy and Petrology*, 74 (2-4), 189-222.
- COPLIN T.B.** (1988). Normalization of oxygen and hydrogen isotope data. *Chemical Geology: Isotope Geoscience section*, 72 (4), 293-297.
- COPLIN T.B.** (1996). New guidelines for reporting stable hydrogen, carbon, and oxygen isotope-ratio data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60 (17), 3169-3361.
- COPLIN T.B.** (2011). Guidelines and recommended terms for expression of stable-isotope-ratio and gas-ratio measurement results. *Rapid communications in mass spectrometry*, 25 (17), 2538-2560.
- CORBIER M.M.** (1989). Le statut ambigu de la viande à Rome. *Dialogues d'histoire ancienne*, 15 (2), 107-158.
- CORCORAN T.H.** (1957). *The Roman fishing industry of the late Republic and early Empire*. Northwestern University, 370 p.
- CORDAIN L., EATON S.B., SEBASTIAN A., MANN N., LINDEBERG S., WATKINS B.A., O'KEEFE J.H., BRAND-MILLER J.** (2005). Origins and evolution of the Western diet: health implications for the 21st century. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81 (2), 341-354.
- COULON C., MEGARTSI M.H., FOURCADE S., MAURY R.C., BELLON H., LOUNI-HACINI A., COTTEN J., COUTELLE A., HERMITTE D.** (2002). Post-collisional transition from calc-alkaline to alkaline volcanism during the Neogene in Oranie (Algeria): magmatic expression of a slab breakoff. *Lithos*, 62 (3-4), 87-110.
- COURTNEY R., KIRWAN L.** (2012). Gypsum amendment of alkaline bauxite residue – Plant available aluminium and implications for grassland restoration. *Ecological Engineering*, 42 (0), 279-282.
- COURTOIS M., LOUSSOUARN G., HOURSEAU C., GROLLIER J.F.** (1994). Hair cycle and alopecia. *Skin Pharmacology*, 7 (1), 84-89.
- COURTOIS M., LOUSSOUARN G., HOURSEAU C., GROLLIER J.F.** (1995). Ageing and hair cycles. *British Journal of Dermatology*, 132 (1), 86-93.
- CRABB H.S.** (1976). The porous outer enamel of unerupted human premolars. *Caries Research*, 10 (1), 10-17.
- CRAIG H.** (1957). Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 12 (1-2), 133-149.
- CRAIG O.E., BIAZZO M., TAFURI M.A.** (2006). Palaeodietary records of coastal Mediterranean populations. *Journal of Mediterranean Studies*, 16 (1-2), 63-77.
- CRAIG O.E., BIAZZO M., O'CONNELL T.C., GARNSEY P., MARTINEZ-LABARGA C., LELLI R., SALVADEI L., TARTAGLIA G., NAVA A., RENÒ L., FIAMMENGHI A., RICKARDS O., BONDIOLI L.** (2009). Stable isotopic evidence for diet at the imperial Roman coastal site of Velia (1st and 2nd Centuries AD) in southern Italy. *American Journal of Physical Anthropology*, 139 (4), 572-583.
- 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.
- CREMONINI S., LABATE D., CURINA R.** (2013). The late-antiquity environmental crisis in Emilia region (Po river plain, Northern Italy): Geoarchaeological evidence and paleoclimatic considerations. *Quaternary International*, 316 (0), 162-178.
- CRISS R.E.** (1999). *Principles of stable isotope distribution*. Oxford University Press, Oxford, 264 p.

- CROWLEY B.E., CARTER M.L., KARPANTY S.M., ZIHLMAN A.L., KOCH P.L., DOMINY, N.J.,** (2010). Stable carbon and nitrogen isotope enrichment in primate tissues. *Oecologia*, 164 (3), 611-626.
- CUMMINGS C.** (2009). Meat consumption in Roman Britain: the evidence from stable isotopes. In: DRIESSENS M., HEEREN S., HENDRIKS J., KEMMERS F., and VISSER R. (éd.). *TRAC 2008: proceedings of the eighteenth annual theoretical Roman archaeology conference*, Oxbow Books, Oxford, 73-83.
- CUMMINGS C., HEDGES R.** (2010). Carbon and nitrogen stable isotope analyses. In: BOOTH P., SIMMONDS A., BOYLE A., CLOUGH S., COOL H.E.M., and POORE D. (éd.). *The late Roman cemetery at Lankhills, Winchester: Excavations 2000-2005 Project Report*, Oxford Archaeology, Oxford, 411-421.
- DAHL S.G., ALLAIN P., MARIE P.J., MAURAS Y., BOIVIN G., AMMANN P., TSOUDEROS Y., DELMAS P.D., CHRISTIANSEN C.** (2001). Incorporation and distribution of strontium in bone. *Bone*, 28 (4), 446-453.
- DALCONI M.C., MENEGHINI C., NUZZO S., WENK R., MOBILIO S.** (2003). Structure of bioapatite in human foetal bones: An X-ray diffraction study. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 200 (0), 406-410.
- DALGLEISH R.** (1997). The human type I collagen mutation database. *Nucleic Acids Research*, 25 (1), 181-187.
- DASCH E.J.** (1969). Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments, and sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33 (12), 1521-1552.
- DASSIÉ E.P., LEMLEY G.M., LINSLEY B.K.** (2013). The Suess effect in Fiji coral $\delta^{13}\text{C}$ and its potential as a tracer of anthropogenic CO_2 uptake. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 370 (1), 30-40.
- DAUX V., LÉCUYER C., HÉRAN M.A., AMIOT R., SIMON L., FOUREL F., MARTINEAU F., LYNNERUP N., REYCHLER H., ESCARGUEL G.** (2008). Oxygen isotope fractionation between human phosphate and water revisited. *Journal of Human Evolution*, 55 (6), 1138-1147.
- DAWBER R.P.R., VAN NESTE D.** (2004). *Hair and scalp disorders: common presenting signs, differential diagnosis, and treatment*. Informa Healthcare, London, 294 p.
- DAWSON T.E., MAMBELLI S., PLAMBOECK A.H., TEMPLER P.H., TU K.P.** (2002). Stable isotopes in plant ecology. *Annual Reviews Ecology, Evolution, and Systematics*, 33 (1), 507-559.
- DE FEO G., MAYS L.W., ANGELAKIS A.N.** (2011). 4.01 - Water and Wastewater Management Technologies in the Ancient Greek and Roman Civilizations. In: WILDERER P. (éd.). *Treatise on Water Science*, Elsevier, Oxford, 3-22.
- DE GROSSI MAZZORIN J.** (2000). État de nos connaissances concernant le traitement et la consommation du poisson dans l'Antiquité, à la lumière de l'archéologie. L'exemple de Rome. *Mélanges de l'Ecole française de Rome Antiquité*, 112 (1), 155-167.
- DE JONG K.** (2003). Very fast exhumation of high-pressure metamorphic rocks with excess ^{40}Ar and inherited ^{87}Sr , Betic Cordilleras, southern Spain. *Lithos*, 70 (3-4), 91-110.
- DE MEYER C.M.C., BAUMGARTNER L.P., BEARD B.L., JOHNSON C.M.** (2014). Rb-Sr ages from phengite inclusions in garnets from high pressure rocks of the Swiss Western Alps. *Earth and Planetary Science Letters*, 395 (0), 205-216.
- DE MUYNCK D., HUELGA-SUAREZ G., VAN HEGHE L., DEGRYSE P., VANHAECKE F.** (2009). Systematic evaluation of a strontium-specific extraction chromatographic resin for obtaining a purified Sr fraction with quantitative recovery from complex and Ca-rich matrices. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 24 (11), 1498-1510.
- DE PLAEN S.** (2003). L'Homme et la Mort. A propos du façonnement culturel des réalités biologiques. *Revue internationale de soins palliatifs*, 18 (2), 77-78.
- DECREE S., MARIGNAC C., LIEGEOIS J.-P., YANS J., BEN ABDALLAH R., DEMAÏFFE D.** (2014). Miocene magmatic evolution in the Nefza district (Northern Tunisia) and its relationship with the genesis of polymetallic mineralizations. *Lithos*, 192-195 (0), 240-258.
- DEINES P.** (1980). The isotopic composition of reduced organic carbon. In: FRITZ P., and FONTES J.C. (éd.). *Handbook of environmental isotope geochemistry*, Elsevier, Amsterdam, 329-406.

- DEL BELLO E., MOLLO S., SCARLATO P., VON QUADT A., FORNI F., BACHMANN O.** (2014). New petrological constraints on the last eruptive phase of the Sabatini Volcanic District (central Italy): Clues from mineralogy, geochemistry, and Sr–Nd isotopes. *Lithos*, 205 (0), 28-38.
- DENIEL C., VIDAL P., COULON C., VELLUTINI P.-J., PIGUET P.** (1994). Temporal evolution of mantle sources during continental rifting: The volcanism of Djibouti (Afar). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99 (B2), 2853-2869.
- DENIRO M.J., EPSTEIN S.** (1976). You are what you eat (plus a few ‰): the carbon isotope cycle in food chains. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 8, 834-835.
- 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.** (1985). Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen ratios in relation to palaeodietary reconstruction. *Nature*, 317 (6040), 806-809.
- 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.
- DENIRO M.J., WEINER S.** (1988). Chemical, enzymatic and spectroscopic characterization of “collagen” and other organic fractions from prehistoric bones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52 (9), 2197-2206.
- DERMODY B.J., DE BOER H.J., BIERKENS M.F.P., WEBER S.L., WASSEN M.J., DEKKER S.C.** (2012). A seesaw in Mediterranean precipitation during the Roman Period linked to millennial-scale changes in the North Atlantic. *Clim Past*, 8 (2), 637-651.
- DESSE-BERSET N., DESSE J.** (2000). Salsamenta, garum et autres préparations de poissons. Ce qu'en disent les os. *Mélanges de l'Ecole française de Rome Antiquité*, 112 (1), 73-97.
- DEVIÈSE T.** (2009). *Elucidating funeral rituals in burials from the end of the Roman Empire: development of a multi-analytical approach*. University of Pise, Université Pierre et Marie Curie, 250 p.
- DEVIÈSE T., VANHOVE C., CHAPOULIE R., BLANCHARD P., COLOMBINI M.P., REGERT M., CASTEX D.** (2010). Détermination et fonction des substances organiques et des matières minérales exploitées dans les rites funéraires de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin à Rome (Ier-IIIe siècle). In: CARTRON I., CASTEX D., GEORGES P., VIVAS M., and CHARAGEAT M. (éd.). *De corps en corps Traitement et devenir du cadavre*, Maison des Sciences de l'Homme d'Aquitaine, Bordeaux, 115-139.
- DEVULDER A.** (2009). *Approche micromécanique du remodelage osseux*. École Centrale des Arts et Manufactures, 261 p.
- DICKINSON D.R., DODSON M.H., GASS I.G., REX D.C.** (1969). Correlation of initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ with Rb/Sr in some late tertiary volcanic rocks of South Arabia. *Earth and Planetary Science Letters*, 6 (1), 84-90.
- DILL H.G., NOLTE N., HANSEN B.T.** (2014). Lithology, mineralogy and geochemical characterizations of sediment-hosted Sr–F deposits in the eastern Neo-Tethyan region – With special reference to evaporation and halokinesis in Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 92 (0), 76-96.
- DOBBERSTEIN R.C., COLLINS M.J., CRAIG O.E., TAYLOR G., PENKMAN K.E.H., RITZ-TIMME S.** (2009). Archaeological collagen: Why worry about collagen diagenesis? *Archaeological and Anthropological Sciences*, 1 (1), 31-42.
- DOLPHIN G.W., EVE I.S.** (1963). The metabolism of strontium in adult humans *Physics in Medicine and Biology*, 8 (2), 193-203.
- DONAHUE J.F.** (2004). *The Roman community at table during the principate*. University of Michigan Press, Ann Arbor, 333 p.
- DOROZHKIN S.V., EPPLE M.** (2002). Biological and medical significance of calcium phosphates. *Angewandte Chemie International Edition*, 41 (17), 3130-3146.
- DRIESSENS F.C., HEIJLIGERS H.J., BORGGREVEN J.M., WÖLTGENS J.H.** (1985). Posteruptive maturation of tooth enamel studied with the electron microprobe. *Caries Research*, 19 (5), 390-395.
- DRIESSENS F.C.M.** (1983). *Bioceramics of calcium phosphates*. CRC Press, Boca Raton, 146 p.

- DRIESESENS F.C.M., VERBEECK R.M.H.** (1990). *Biominerals*. CRC Press, Boca Raton, 428 p.
- DRUCKER D.G., BRIDAULT A., CUPILLARD C.** (2012). Environmental context of the Magdalenian settlement in the Jura Mountains using stable isotope tracking (C-13, N-15, S-34) of bone collagen from reindeer (*Rangifer tarandus*). *Quaternary International*, 272, 322-332.
- DUDAY H.** (2009). *The archaeology of the dead: lectures in archaeoethnology*. Oxbow Books, Oxford, 230 p.
- DUFOUR E., BOCHERENS H., MARIOTTI A.** (1999). Palaeodietary implications of isotopic variability in eurasian lacustrine fish. *Journal of Archaeological Science*, 26 (6), 617-627.
- DUNBAR J.** (1982a). A study of the factors affecting the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratio of the water of wine. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 174 (5), 355-359.
- DUNBAR J.** (1982b). Oxygen isotope studies on some New Zealand grape juices. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 175 (4), 253-257.
- DUNN S.M., KEOUGH R.A., ROGERS G.E., POWELL B.C.** (1998). Regulation of a hair follicle keratin intermediate filament gene promoter. *Journal of Cell Science*, 111 (23), 3487-3496.
- DUPRAS T.L.** (1999). *Dining in the Dakhleh Oasis, Egypt: determination of diet using documents and stable isotope analysis*. McMaster University, 345 p.
- DUPRAS T.L., SCHWARCZ H.P.** (2001). Strangers in a strange land: stable isotope evidence for human migration in the Dakhleh Oasis, Egypt. *Journal of Anthropological Archaeology*, 28 (11), 1199-1208.
- DUPRAS T.L., SCHWARCZ H.P., FAIRGRIEVE S.I.** (2001). Infant feeding and weaning practices in Roman Egypt. *American Journal of Physical Anthropology*, 115 (3), 204-212.
- DUPRAS T.L., TOCHERI M.W.** (2007). Reconstructing infant weaning histories at Roman period Kellis, Egypt using stable isotope analysis of dentition. *American Journal of Physical Anthropology*, 134 (1), 63-74.
- EERKENS J.W., MACKIE M., BARTELINK E.J.** (2013). Brackish water foraging: isotopic landscapes and dietary reconstruction in Suisun Marsh, Central California. *Journal of Archaeological Science*, 40 (8), 3270-3281.
- EL AZZOUZI M., GRIFFITHS J.B., BELLON H., MAURY R.C., PIQUÉ A., FOURCADE S., COTTEN J., HERNANDEZ J.** (1999). Évolution des sources du volcanisme marocain au cours du Néogène. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 329, 95-102.
- EL BAKKALI S., GOURGAUD A., BOURDIER J.-L., BELLON H., GUNDOGDU N.** (1998). Post-collision neogene volcanism of the Eastern Rif (Morocco): magmatic evolution through time. *Lithos*, 45 (1-4), 523-543.
- EL HAMMARI L.** (2007). *Synthèse et études physico-chimiques des phosphates de calcium poreux greffés par des molécules organiques : structure et processus d'adsorption*. Université Mohammed V, 184 p.
- 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., HOLCOMB D.W., YOUNG R.A.** (1985). Infrared determination of the degree of substitution of hydroxyl by carbonate ions in human dental enamel. *Calcified Tissue International*, 37 (4), 372-375.
- ELLIOTT J.C.** (1994). *Structure and chemistry of the apatites and other calcium orthophosphates*. Elsevier, Amsterdam, 404 p.
- ELLIOTT J.C., WILSON R.M., DOWKER S.E.P.** (2002). Apatite structures. In: HUANG T.C. (éd.). *Advances in X-ray analysis*, International Centre for Diffraction Data, Newtown Square, PA, 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 (1-4), 537-547.
- ERDKAMP P.** (2009). *The grain market in the Roman Empire: a social, political and economic study*. Cambridge University Press, Cambridge, 380 p.

- ERICSON J.E.** (1985). Strontium isotope characterization in the study of prehistoric human ecology. *Journal of Human Evolution*, 14 (5), 503-514.
- ERIKSSON G., LINDERHOLM A., FORNANDER E., KANSTRUP M., SCHOULTZ P., OLOFSSON H., LIDÉN K.** (2008). Same island, different diet: cultural evolution of food practice on Öland, Sweden, from the Mesolithic to the Roman Period. *Journal of Archaeological Science*, 27 (4), 520-543.
- ERRASSIFI F.** (2011). *Mécanismes d'adsorption du risédronate par des phosphates de calcium biologiques: applications aux biomatériaux*. Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, 266 p.
- EVANS J.** (1980). Plebs Rustica. The peasantry of classical Italy II: the peasant economy. *American Journal of Ancient History*, 5 (1), 134–173.
- EVANS R.D.** (2001). Physiological mechanisms influencing plant nitrogen isotope composition. *Trends in Plant Science*, 6 (3), 121-126.
- FAO** (1989). *Yield and nutritional value of the commercially more important fish species*, Food and agriculture organization of the United Nations, Rome, 187 p.
- FAO** (1995). *Le sorgho et les mils dans la nutrition humaine*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 212 p.
- FAO** (2001). *La nutrition dans les pays en développement*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 520 p.
- 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 (1), 503-537.
- FAURE G., POWELL J.L.** (1972). *Strontium isotope geology*. Springer, Berlin, 190 p.
- FAURE G., MENSING T.M.** (2004). *Isotopes: principles and applications*. Wiley, New York, 928 p.
- FEDERICO M., PECCERILLO A., BARBIERI M., WU T.W.** (1994). Mineralogical and geochemical study of granular xenoliths from the Alban Hills volcano, Central Italy: bearing on evolutionary processes in potassic magma chambers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115 (4), 384-401.
- FELLETTI MAJ B.M.** (1948). (Via Casilina). Tor Pignattara. - Strada romana. *Notizie degli Scavi*, 2 (1-6), 148-153.
- FERNANDES R., NADEAU M.J., GROOTES P.M.** (2012). Macronutrient-based model for dietary carbon routing in bone collagen and bioapatite. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 4 (4), 291-301.
- 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 (2), e87436.
- FERNANDES R.** (2015). A simple(R) model to predict the source of dietary carbon in individual consumers. *Archaeometry*, n/a-n/a.
- FERRARA G., LAURENZI M.A., TAYLOR JR H.P., TONARINI S., TURI B.** (1985). Oxygen and strontium isotope studies of K-rich volcanic rocks from the Alban Hills, Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 75 (1), 13-28.
- FERRUA A.** (1949). Antichità cristiana - La guardia a cavallo. *Civiltà cattolica*, 100 (1), 656.
- FINCHAM A.G., MORADIAN-OLDAK J., SIMMER J.P.** (1999). The structural biology of the developing dental enamel matrix. *Journal of Structural Biology*, 126 (3), 270-299.
- FIOCCHI NICOLAI V., BISCONTI F., MAZZOLENI D.** (1999). *Les catacombes chrétiennes de Rome : Origine, développement, décor, inscriptions*. Schnell und Steiner, Regensburg, 208 p.
- FISCHER A., OLSEN J., RICHARDS M., HEINEMEIER J., SVEINBJÖRNSDÓTTIR Á.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 (12), 2125-2150.
- FOGEL M.L., TUROSS N., OWSLEY D.W.** (1989). Nitrogen isotope tracers of human lactation in modern and archaeological populations. *Annual Report of the Director, Geophysical Laboratory, Carnegie Institution, Washington DC 1988-1989*, 111-117.

- FORNASERI M., TURI B.** (1969). Carbon and oxygen isotopic composition of carbonates in lavas and ejectites from the Alban Hills, Italy. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 23 (3), 244-256.
- FOURCADE S., CAPDEVILA R., OUABADI A., MARTINEAU F.** (2001). The origin and geodynamic significance of the Alpine cordierite-bearing granitoids of northern Algeria. A combined petrological, mineralogical, geochemical and isotopic (O, H, Sr, Nd) study. *Lithos*, 57 (2-3), 187-216.
- FRANCE C.A.M., OWSLEY D.W.** (2013). Stable carbon and oxygen isotope spacing between bone and tooth collagen and hydroxyapatite in human archaeological remains. *International Journal of Osteoarchaeology*, n/a-n/a.
- 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 ^{13}C in atmospheric CO_2 . *Tellus B*, 51 (2), 170-193.
- FRANCHE C., LINDSTRÖM K., ELMERICH C.** (2009). Nitrogen-fixing bacteria associated with leguminous and non-leguminous plants. *Plant and Soil*, 321 (1-2), 35-59.
- FRASER R.A., BOGAARD A., HEATON T., 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 (10), 2790-2804.
- FRAYN J.M.** (1993). *Markets and Fairs in Roman Italy. Their social and economic importance from the second century BC to the third century AD.* Oxford University Press, Oxford, 191 p.
- FREMONDEAU D.** (2012). *Rythmes saisonniers des élevages porcins archéologiques : propositions pour un protocole d'analyse isotopique.* Muséum National d'Histoire Naturelle, 466 p.
- FRIEDENTHAL H.** (1908). *Das dauerhaarkleid des menschen. Ein beitrag zur physiologie der behaarung.* Fisher, Jena, 39 p.
- 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.
- FROEHLE A.W., KELLNER C.M., SCHOENINGER M.J.** (2012). Multivariate carbon and nitrogen stable isotope model for the reconstruction of prehistoric human diet. *American Journal of Physical Anthropology*, 147 (3), 352-369.
- FROST H.M.** (1961). Human osteoblastic activity. *Henry Ford Hospital Medical Bulletin*, 9 (1), 87-99.
- FROST H.M.** (1969). Tetracycline-based histological analysis of bone remodelling. *Calcified Tissue Research*, 3 (1), 211-237.
- FUJISAWA R., KUBOKI Y.** (1990). High-resolution solid-state nuclear magnetic resonance spectra of dentin collagen. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 167 (2), 761-766.
- FULLER B.T., RICHARDS M.P., MAYS S.A.** (2003). Stable carbon and nitrogen isotope variations in tooth dentine serial sections from Wharram Percy. *Journal of Archaeological Science*, 30 (12), 1673-1684.
- 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 (23), 2889-2896.
- FULLER B.T., FULLER J.L., SAGE N.E., HARRIS D.A., O'CONNELL T.C., HEDGES R.E.** (2005). Nitrogen balance and $\delta^{15}\text{N}$: why you're not what you eat during nutritional stress. *Rapid communications in mass spectrometry*, 19 (18), 2497-2506.
- FULLER B.T., FULLER J.L., HARRIS D.A., HEDGES R.E.** (2006). Detection of breastfeeding and weaning in modern human infants with carbon and nitrogen stable isotope ratios. *American Journal of Physical Anthropology*, 129 (2), 279-293.
- FULLER B.T., MARQUEZ-GRANT N., RICHARDS M.P.** (2010). Investigation of Diachronic Dietary Patterns on the Islands of Ibiza and Formentera, Spain: Evidence from Carbon and Nitrogen Stable Isotope Ratio Analysis. *American Journal of Physical Anthropology*, 143 (4), 512-522.
- FULLER B.T., DE CUPERE B., MARINOVA E., VAN NEER W., WAELKENS M., RICHARDS M.P.** (2012). Isotopic reconstruction of human diet and animal husbandry practices during the Classical-Hellenistic,

- imperial, and Byzantine periods at Sagalassos, Turkey. *American Journal of Physical Anthropology*, 149 (2), 157-171.
- FULMER G.R., MILLER A.J.M., SHERDEN N.H., GOTTLIEB H.E., NUDELMAN A., STOLTZ B.M., BERCAW J.E., GOLDBERG K.I.** (2010). NMR chemical shifts of trace impurities: common laboratory solvents, organics, and gases in deuterated solvents relevant to the organometallic chemist. *Organometallics*, 29 (9), 2176-2179.
- FUNICIELLO R., PRATURLON A., GIORDANO G.** (2008). *La geologia di Roma dal centro storico alla periferia*. S.E.L.C.A., Firenze, 660 p.
- GAETA M., FRED A., CHRISTENSEN J.N., DALLAI L., MARRA F., KARNER D.B., SCARLATO P.** (2006). Time-dependent geochemistry of clinopyroxene from the Alban Hills (Central Italy): clues to the source and evolution of ultrapotassic magmas. *Lithos*, 86 (3-4), 330-346.
- GARCÍA-VEIGAS J., ROSELL L., CENDÓN D.I., GIBERT L., MARTÍN J.M., TORRES-RUIZ J., ORTÍ F.** (2015). Large celestine orebodies formed by early-diagenetic replacement of gypsified stromatolites (Upper Miocene, Monteive-Escúzar deposit, Granada Basin, Spain). *Ore Geology Reviews*, 64 (0), 187-199.
- GARNSEY P., SALLER R.P.** (1987). *The Roman Empire: economy, society, and culture*. University of California Press, Berkeley, 231 p.
- GARNSEY P.** (1993). *Famine and food supply in the Graeco-Roman world : responses to risk and crisis*. Cambridge University press, Cambridge.
- GARNSEY P.** (1999). *Food and society in classical Antiquity*. Cambridge University Press, Cambridge.
- GARNSEY P.** (2004). *Cities, peasants and food in classical Antiquity: essays in social and economic history*. Cambridge University Press, Cambridge, 336 p.
- GARRETT R.H., GRISHAM C.M.** (2000). *Biochimie*. De Boeck, Bruxelles, 1254 p.
- GARTNER L.P., HIATT J.L.** (2012). *Atlas en couleur d'histologie*. Éditions Pradel, Reuil-Malmaison, 462 p.
- GARVIE-LOK S.J.** (2001). *Loaves and fishes: a stable isotope reconstruction of diet in medieval Greece*. University of Calgary, 525 p.
- GARVIE-LOK S.J., VARNEY T.L., KATZENBERG M.A.** (2004). Preparation of bone carbonate for stable isotope analysis: the effects of treatment time and acid concentration. *Journal of Archaeological Science*, 31 (6), 763-776.
- GASPERINI D., Blichert-Toft J., BOSCH D., DEL MORO A., MACERA P., ALBARÈDE F.** (2002). Upwelling of deep mantle material through a plate window: Evidence from the geochemistry of Italian basaltic volcanics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107 (B12), 2367.
- GASQUET D., LEVRESSE G., CHEILLETZ A., AZIZI-SAMIR M.R., MOUTTAQI A.** (2005). Contribution to a geodynamic reconstruction of the Anti-Atlas (Morocco) during Pan-African times with the emphasis on inversion tectonics and metallogenic activity at the Precambrian-Cambrian transition. *Precambrian Research*, 140 (3-4), 157-182.
- GAT J.R., MATSUI E.** (1991). Atmospheric water balance in the Amazon basin: An isotopic evapotranspiration model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 96 (D7), 13179-13188.
- GAT J.R.** (1996). Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Annual Review of Earth Planetary Science*, 24 (1), 225-262.
- GAT J.R., MOOK W.G., MEIJER A.J.** (2001). Atmospheric water. In: Mook W.G. (éd.). *Environmental isotopes in the hydrological cycle: Principles and applications*, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- GERACI G.** (1994). L'Egitto provincia frumentaria. In. *Le Ravitaillement en blé de Rome et des centres urbains des débuts de la République jusqu'au Haut-Empire Actes du colloque international de Naples, 14-16 Février 1991*, École Française de Rome, Rome, 279-294.
- GIACCIO B., SPOSATO A., GAETA M., MARRA F., PALLADINO D.M., TADDEUCCI J., BARBIERI M., MESSINA P., ROLFO M.F.** (2007). Mid-distal occurrences of the Albano Maar pyroclastic deposits and their relevance for reassessing the eruptive scenarios of the most recent activity at the Colli Albani Volcanic District, Central Italy. *Quaternary International*, 171-172 (0), 160-178.

- GIACCIO B., ARIENZO I., SOTTILI G., CASTORINA F., GAETA M., NOMADE S., GALLI P., MESSINA P.** (2013). Isotopic (Sr–Nd) and major element fingerprinting of distal tephras: an application to the Middle-Late Pleistocene markers from the Colli Albani volcano, central Italy. *Quaternary Science Reviews*, 67 (0), 190-206.
- GILL-KING H.** (1997). Chemical, ultrastructural aspects of decomposition. In: HAGLUND W.D., and SORG M.H. (éd.). *Forensic taphonomy: the post-mortem fate of human remains*, CRC Press, Boca Raton, 93-108.
- GIORDANO A.** (2010). Stratigraphy, volcano tectonics and evolution of the Colli Albani volcanic field. In: FUNICIELLO R., and GIORDANI A. (éd.). *The Colli Albani volcano*, Geological Society, London, 43-98.
- GIREL S., SOLDINI F.** (2013). *La mort et le corps dans les arts aujourd'hui* L'Harmattan, Paris, 466 p.
- GIULIANI R., CASTEX D., BLANCHARD P., COQUERELLE M.** (2007). La scoperta di un nuovo santuario nella catacomba dei SS. Marcellino e Pietro e lo scavo antropologico degli insiemi funerari annessi. Risultati preliminari di un'indagine multidisciplinare. *Rendiconti della Pontificia Accademia Romana di Archeologia*, 79 (2006-2007), 83-124.
- GIULIANI R.** (2008). *Ad duas lauros* : un exemple emblématique de christianisation. *Les Dossiers d'Archéologie*, 330, 52-59.
- GIULIANI R.** (2011). Le catacombe dei Santi Marcellino e Pietro: un aggiornamento. In: VENDITTELLI L. (éd.). *Il mausoleo di sant'elena Gli scavi*, Mondadori Electa, Milano, 242-253.
- GIULIANI R.** (2012). Le nuove pitture delle catacombe dei ss. Marcellino e Pietro: alcune precisazioni. In: COSCARELLA A., and DE SANTIS P. (éd.). *Martiri, santi, patroni: per una archeologia della devozione Atti X congresso nazionale di archeologia cristiana*, Università della Calabria, Aula Magna, 399-411.
- GLIMCHER M.J.** (2006). Bone: Nature of the calcium phosphate crystals and cellular, structural, and physical chemical mechanisms in their formation. In: SAHAI N., ., and SCHOONEN M.A.A. (éd.). *Medical Mineralogy and Geochemistry*, 223-282.
- GOLDBERG M.** (2007). Histologie de l'émail. *Encyclopédie Médico-Chirurgicale*, 22-007-A-10, 1-27.
- GOTTLIEB H.E., KOTLYAR V., NUDELMAN A.** (1997). NMR chemical shifts of common laboratory solvents as trace impurities. *The Journal of Organic Chemistry*, 62 (21), 7512-7515.
- GOUREVITCH D.** (2012). Manger du poisson sur les rives du Tibre ? In: PALMIERI N. (éd.). *Conserver la santé ou la rétablir : Le rôle de l'environnement dans la médecine antique et médiévale*, Publications de l'Université de Saint-Étienne, Saint-Étienne, 103-128.
- GRAUSTEIN W.C.** (1989). $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios measure the sources and flow of strontium in terrestrial ecosystems. In: RUNDEL P.W., EHLERINGER J.R., and NAGY K.A. (éd.). *Stable isotopes in ecological research*, Springer, New York, 491-512.
- GRAY H., STANDRING S.** (2008). *Gray's anatomy : The anatomical basis of clinical practice - 40th edition*. Churchill Livingstone-Elsevier, Edinburgh, 1576 p.
- GREEN C.** (1977). The significance of plaster burials for the recognition of Christian cemeteries. *CBA Research Report*, 22 (1), 46-52.
- GREGORICKA L.A., SHERIDAN S.G.** (2013). Ascetic or affluent? Byzantine diet at the monastic community of St. Stephen's, Jerusalem from stable carbon and nitrogen isotopes. *Journal of Anthropological Archaeology*, 32 (1), 63-73.
- GREGORICKA L.A.** (2014). Assessing life history from commingled assemblages: the biogeochemistry of inter-tooth variability in Bronze Age Arabia. *Journal of Archaeological Science*, 47 (1), 10-21.
- GROGAN P., BURNS T.D., CHAPIN III F.S.** (2000). Fire effects on ecosystem nitrogen cycling in a Californian bishop pine forest. *Oecologia*, 122 (4), 537-544.
- GROOTES P.M., STUIVER M., WHITE J.W.C., JOHNSEN S., JOUZEL J.** (1993). Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature*, 366 (6455), 552-554.
- GROPPER S.S., SMITH J.L.** (2012). *Advanced nutrition and human metabolism*. Wadsworth Cengage Learning, Wadsworth, 586 p.

- 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., BALZER A., TURBAN-JUST S.** (2000). Modeling protein diagenesis in ancient bone: towards a validation of stable isotope data. In: AMBROSE S.H., and KATZENBERG M.A. (éd.). *Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*, Kluwer Academic, Plenum Publishers, New York, 173-188.
- GRUPE G.** (2001). Archaeological microbiology. In: BROTHWELL D.R., and POLLARD A.M. (éd.). *Handbook of archaeological sciences*, Wiley, New York, 351-363.
- GRUPE G., HEINRICH D., PETERS J.** (2009). A brackish water aquatic foodweb: trophic levels and salinity gradients in the Schlei fjord, Northern Germany, in Viking and medieval times. *Journal of Archaeological Science*, 36 (10), 2125-2144.
- GUERIN G.** (2009). *Modélisation des interactions mécanobiologiques dans la phase de cicatrisation de l'interface os-implant*. Université Toulouse 3 - Paul Sabatier, 99 p.
- GUYON J.** (1987). *Le cimetière aux deux lauriers. Recherches sur les catacombes romaines*. École française de Rome, Rome, 556 p.
- HAAS H., BANEWICZ J.J.** (1980). Radiocarbon dating of bone apatite using thermal release of CO₂. *Radiocarbon*, 22 (2), 537-544.
- HAKENBECK S., MCMANUS E., GEISLER H., GRUPE G., O'CONNELL T.C.** (2010). Diet and mobility in early medieval Bavaria: a study of carbon and nitrogen stable isotopes. *American Journal of Physical Anthropology*, 143 (2), 235-249.
- HALLOY J., BERNARD B.A., LOUSSOUARN G., GOLDBETER A.** (2000). Modeling the dynamics of human hair cycles by a follicular automaton. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97 (15), 8328-8333.
- HAMIDI E.M., COLIN F., MICHARD A., BOULANGÉ B., NAHON D.** (2001). Isotopic tracers of the origin of Ca in a carbonate crust from the Middle Atlas, Morocco. *Chemical Geology*, 176 (1-4), 93-104.
- HANCOCK R.G.V., GRYNPAS M.D., PRITZKER K.P.H.** (1989). The abuse of bone analyses for archaeological dietary studies. *Archaeometry*, 31 (2), 169-179.
- HARBECK M., GRUPE G.** (2009). Experimental chemical degradation compared to natural diagenetic alteration of collagen: implications for collagen quality indicators for stable isotope analysis. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 1 (1), 43-57.
- HARBECK M., SCHLEUDER R., SCHNEIDER J., WIECHMANN I., SCHMAHL W.W., GRUPE G.** (2011). Research potential and limitations of trace analyses of cremated remains. *Forensic Science International*, 204 (1-3), 191-200.
- HARE P.E., FOGEL M.L., STAFFORD JR 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.
- HARKEY M.R.** (1993). Anatomy and physiology of hair. *Forensic Science International*, 63 (1-3), 9-18.
- HARMS U., SCHANDERMEIER H., DARBYSHIRE D.P.F.** (1990). Pan-African reworked early/middle Proterozoic crust in NE Africa west of the Nile: Sr and Nd isotope evidence *Journal of the Geological Society*, 147 (5), 859-872.
- HARRISON R.G., KATZENBERG M.A.** (2003). Paleodiet studies using stable carbon isotopes from bone apatite and collagen: examples from Southern Ontario and San Nicolas Island, California. *Journal of Anthropological Archaeology*, 22 (3), 227-244.
- HARTMAN G., BAR-OZ G., BOUCHNICK R., REICH R.** (2013). The pilgrimage economy of Early Roman Jerusalem (1st century BCE–70 CE) reconstructed from the $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of goat and sheep remains. *Journal of Archaeological Science*, 40 (12), 4369-4376.
- HAWKESWORTH C.J., VOLLMER R.** (1979). Crustal contamination versus enriched mantle: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ evidence from the Italian volcanics. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69 (2), 151-165.
- HAYASHI S., MIYAMOTO I., TAKEDA K.** (1991). Measurement of human hair growth by optical microscopy and image analysis. *British Journal of Dermatology*, 125 (2), 123-129.

- HEDGES R., RUSH E., AALBERSBERG W.** (2009). Correspondence between human diet, body composition and stable isotopic composition of hair and breath in Fijian villagers. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 45 (1), 1-17.
- HEDGES R.E.M.** (1992). Sample treatment strategies in radiocarbon dating. In: TAYLOR R.E., LONG A., and KRA R. (éd.). *Radiocarbon after four decades*, Springer New York, 165-183.
- HEDGES R.E.M., LEE-THORP J.A., TUROSS N.C.** (1995a). Is tooth enamel carbonate a suitable material for radiocarbon dating? *Radiocarbon*, 37 (2), 285-290.
- HEDGES R.E.M., MILLARD A.R., PIKE A.W.G.** (1995b). Measurements and relationships of diagenetic alteration of bone from three archaeological sites. *Journal of Archaeological Science*, 22 (2), 201-209.
- HEDGES R.E.M., VAN KLINKEN G.J.** (2000). "Consider a spherical cow..." - on modeling and diet. In: AMBROSE S.H., and KATZENBERG M.A. (éd.). *Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*, Kluwer Academic, Plenum Publishers, New York, 211-242.
- HEDGES R.E.M.** (2002). Bone diagenesis: an overview of processes. *Archaeometry*, 44, 319-328.
- HEDGES R.E.M.** (2003). On bone collagen—apatite-carbonate isotopic relationships. *International Journal of Osteoarchaeology*, 13 (1-2), 66-79.
- HEDGES R.E.M.** (2004). Isotopes and red herrings: comments on Milner et al. and Lidén et al. . *Antiquity*, 78 (299), 34-37.
- HEDGES R.E.M., CLEMENT J.G., THOMAS C.D.L., 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., REYNARD L.M.** (2007). Nitrogen isotopes and the trophic level of humans in archaeology. *Journal of Archaeological Science*, 34 (8), 1240-1251.
- HEINZ G., HEUTZINGER P.**, (2007). *Meat processing technology for small- to medium-scale producers*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Bangkok, 456 p.
- HEMMINGA M.A., MATEO M.A.** (1996). Stable carbon isotopes in seagrasses: Variability in ratios and use in ecological studies. *Marine Ecology Progress Series*, 140 (1), 285-298.
- HERRSCHER E.** (2003). Alimentation d'une population historique : analyse des données isotopiques de la nécropole Saint-Laurent de Grenoble (XIII^e-XV^e siècle, France). *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 15 (3-4), 145-320.
- HIGGINBOTHAM J.A.** (1997). *Piscinae: artificial fishponds in Roman Italy*. University of North California Press, Chapel Hill, 293 p.
- HIGGINS C.A., WESTGATE G.E., JAHODA C.A.** (2011). Modulation in proteolytic activity is identified as a hallmark of exogen by transcriptional profiling of hair follicles. *Journal of Investigative Dermatology*, 131 (12), 2349-2357.
- HILL P.A.** (1998). Bone Remodelling. *British Journal of Orthodontics*, 25 (2), 101-107.
- HOBBIE E.A., MACKO S.A., WILLIAMS M.** (2000). Correlations between foliar $\delta^{15}\text{N}$ and nitrogen concentrations may indicate plant-mycorrhizal interactions. *Oecologia*, 122 (2), 273-283.
- HOBBIE E.A., OLSZYK D.M., RYGIWICZ P.T., TINGEY D.T., JOHNSON M.G.** (2001). Foliar nitrogen concentrations and natural abundance of ^{15}N suggest nitrogen allocation patterns of Douglas-fir and mycorrhizal fungi during development in elevated carbon dioxide concentration and temperature. *Tree Physiology*, 21 (15), 1113-1122.
- HODGES A.T.** (2002). *Roman aqueducts and water supply*. Bristol Classical Press, London, 512 p.
- HOEFS J.** (2009). *Stable isotope geochemistry*. Springer, Berlin, 287 p.
- HÖGBERG P.** (1997). Tansley Review No. 95 ^{15}N natural abundance in soil-plant systems. *New Phytologist*, 137 (2), 179-203.
- HOLLINGER J.O., SRINIVASAN A., ALVAREZ P., HSU E., MCBRIDE S., EPELL S., BASKIN J., WATERS H., GRUBER R.** (2011). Bone tissue engineering: Growth factors and cytokines. In: DUCHEYNE P. (éd.). *Comprehensive Biomaterials*, Elsevier, Oxford, 281-301.
- HOLZHAUSER H., MAGNY M., ZUMBÜHL H.J.** (2005). Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *The Holocene*, 15 (6), 789-801.

- HOPKINS J.B.I., FERGUSON J.M.** (2012). Estimating the diets of animals using stable isotopes and a comprehensive Bayesian mixing model *PLoS One*, 7 (1), e28478.
- HOPPE K.A., STOVER S.M., PASCOE J.R., AMUNDSON R.** (2004). Tooth enamel biomineralization in extant horses: Implications for isotopic microsampling. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 206 (3–4), 355-365.
- HORWITZ E.P., CHIARIZIA R., DIETZ M.L.** (1992). A novel strontium selective extraction chromatographic resin. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 10 (2), 313-336.
- HOWLAND M.R., CORR L.T., YOUNG S.M., JONES V., JIM S., VAN DER MERWE N.J., MITCHELL A.D., EVERSHERD 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), 54-65.
- HUELSEMANN F., FLENKER U., KOEHLER K., SCHAEZNER W.** (2009). Effect of a controlled dietary change on carbon and nitrogen stable isotope ratios of human hair. *Rapid communications in mass spectrometry*, 23 (16), 2448-2454.
- HULTINE K.R., MARSHALL J.D.** (2000). Altitude trends in conifer leaf morphology and stable carbon isotope composition. *Oecologia*, 123 (1), 32-40.
- HUMPHREY L.T., DEAN M.C., JEFFRIES T.E.** (2007). An evaluation of changes in strontium/calcium ratios across the neonatal line in human deciduous teeth. In: BAILEY S., and HUBLIN J.-J. (éd.). *Dental Perspectives on Human Evolution: State of the Art Research in Dental Paleoanthropology*, Springer Netherlands, 303-319.
- 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.
- HURLEY P.M., FAIRBAIRN H.W., PINSON JR W.H.** (1966). Rb-Sr isotopic evidence in the origin of potash-rich lavas of Western Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 1 (5), 301-306.
- IACUMIN P., BOCHERENS H., CHAIX L., MARIOTH A.** (1998). Stable carbon and nitrogen isotopes as dietary indicators of Ancient Nubian Populations (Northern Sudan). *Journal of Anthropological Archaeology*, 25 (4), 293-301.
- INGRAHAM N.L., CALDWELL E.A.** (1999). Influence of weather on the stable isotopic ratios of wines: tools for weather/climate reconstruction? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104 (D2), 2185-2194.
- IVERSEN C.M., HOOKER T.D., CLASSEN A.T., NORBY J.** (2011). Net mineralization of N at deeper soil depths as a potential mechanism for sustained forest production under elevated $[\text{CO}_2]$. *Global Change Biology*, 17 (2), 1130–1139.
- JAEGER C., GROOM N.S., BOWE E.A., HORNER A., DAVIES M.E., MURRAY R.C., DUER M.J.** (2005). Investigation of the nature of the protein-mineral interface in bone by solid-state NMR. *Chemistry of Materials*, 17 (12), 3059-3061.
- JAY M., RICHARDS M.P.** (2006). Diet in the iron age cemetery population at Wetwang Slack, East Yorkshire, UK: carbon and nitrogen stable isotope evidence. *Journal of Archaeological Science*, 33 (5), 653-662.
- JAY M.** (2008). Iron Age diet at Glastonbury Lake Village : the isotopic evidence for negligible aquatic resource consumption. *Oxford Journal of Archaeology*, 27 (2), 201-216.
- JIM S., AMBROSE S.H., EVERSHERD R.P.** (2004). Stable carbon isotopic evidence for differences in the dietary origin of bone cholesterol, collagen and apatite: implications for their use in palaeodietary reconstruction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68 (1), 61-72.
- JIM S., JONES V., AMBROSE S.H., EVERSHERD R.P.** (2006). Quantifying dietary macronutrient sources of carbon for bone collagen biosynthesis using natural abundance stable carbon isotope analysis. *British Journal of Nutrition*, 95 (06), 1055-1062.
- JØRKOV M.L.** (2007). *Drinking with the rich and dining with the poor in Iron Age Denmark. Evaluating stable isotope analysis as a scientific method in archaeology*. Faculty of Health Science, University of Copenhagen, 265 p.
- JØRKOV M.L.S., HEINEMEIER J., LYNNERUP N.** (2009). The petrous bone - A new sampling site for identifying early dietary patterns in stable isotopic studies. *American Journal of Physical Anthropology*, 138 (2), 199-209.

- JUNK G., SVEC H.J. (1958). The absolute abundance of the nitrogen isotopes in the atmosphere and compressed gas from various sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 14 (3), 234-243.
- KACKI S., CASTEX D., BLANCHARD P., BESSOU M., GIULIANI R., DUTOUR O. (2013). Differential diagnosis of carpal and tarsal ankylosis on dry bones: example from the catacomb of Saints Peter and Marcellinus (Rome, 1st–3rd century AD). *International Journal of Paleopathology*, 3 (4), 274-281.
- KACKI S., REVEILLAS H., SACHAU-CARCEL G., GIULIANI R., BLANCHARD P., CASTEX D. (2014). Réévaluation des arguments de simultanéité des dépôts de cadavres: l'exemple des sépultures plurielles de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin (Rome). *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 1-10.
- KASSIM M., CARMIGNANI L., FANTOZZI P., FERRARA G., TONARINI S., BELLINI G., VISENTIN E., ZANETTIN B. (1992). Flood basalts of the Gedo Region (Southern Somalia): Geology, petrology and isotope geochemistry. *Rendiconti Lincei*, 3 (4), 311-334.
- KATAOKA S., SAKUMA S., WANG J., YOSHIHARA A., MIYAZAKI H. (2007). Changes in electrical resistance of sound fissure enamel in first molars for 66 months from eruption. *Caries Research*, 41 (2), 161-164.
- KATZENBERG M.A., SCHWARCZ H.P., KNYF M., MELBYE F.J. (1995). Stable isotope evidence for maize horticulture and paleodiet in Southern Ontario, Canada. *American Antiquity*, 60 (2), 335-350.
- KATZENBERG M.A., HERRING D.A., SAUNDERS S.R. (1996). Weaning and infant mortality: evaluating the skeletal evidence. *Yearbook of Physical Anthropology*, 39, 177-199.
- KATZENBERG M.A. (1999). Stable isotope ecology and palaeodiet in the Lake Baikal region of Siberia. *Journal of Archaeological Science*, 26 (6), 651-659.
- KATZENBERG M.A., LOVELL N.C. (1999). Stable isotope variation in pathological bone. *International Journal of Osteoarchaeology*, 9 (5), 316-324.
- KATZENBERG M.A., SAUNDERS S.R., ABONYI S. (2000). Bone chemistry, food and history: a case study from 19th century upper Canada. In: AMBROSE S.H., and KATZENBERG M.A. (éd.). *Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*, Kluwer Academic, Plenum Publishers, New York, 1-22.
- KATZENBERG M.A. (2008). Stable isotope analysis: a tool for studying past diet, demography, and life history. In: KATZENBERG M.A., and SAUNDERS S.R. (éd.). *Biological anthropology of the human skeleton*, Wiley-Liss, Hoboken, 413-441.
- KEEGAN W.F., DENIRO M.J. (1988). Stable carbon and nitrogen-isotope ratios of bone collagen to study coral-reef and terrestrial components of prehistoric Bahamian diet. *American Antiquity*, 53 (2), 320-336.
- KEELEY J. (1998). CAM photosynthesis in submerged aquatic plants. *The Botanical Review*, 64 (2), 121-175.
- KEELING C. (1979). The Suess effect: ¹³Carbon-¹⁴Carbon interrelations. *Environment International*, 2 (4-6), 229-300.
- KEELING C.D. (1958). The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural areas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 13 (4), 322-334.
- KEELING C.D. (1961). The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in rural and marine air. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 24 (3-4), 277-298.
- KEENLEYSIDE A., SCHWARCZ H.P., PANAYOTOVA K. (2006). Stable isotopic evidence of diet in a Greek colonial population from the Black Sea. *Journal of Archaeological Science*, 33 (9), 1205-1215.
- KEENLEYSIDE A., SCHWARCZ H.P., STIRLING L., BEN LAZREG N. (2009). Stable isotopic evidence for diet in a Roman and Late Roman population from Leptiminus, Tunisia. *Journal of Archaeological Science*, 36 (1), 51-63.
- KEENLEYSIDE A., SCHWARCZ H.P., PANAYOTOVA K. (2011). Oxygen isotopic evidence of residence and migration in a Greek colonial population on the Black Sea. *Journal of Archaeological Science*, 38 (10), 2658-2666.
- KELLNER C.M., SCHOENINGER M.J. (2007). A simple carbon isotope model for reconstructing prehistoric human diet. *American Journal of Physical Anthropology*, 133 (4), 1112-1127.

- KENDALL E.J., MONTGOMERY J., EVANS J.A., STANTIS C., MUELLER V. (2013). Mobility, mortality, and the middle ages: Identification of migrant individuals in a 14th century black death cemetery population. *American Journal of Physical Anthropology*, 150 (2), 210-222.
- KENNEDY B.V.E. (1988). *Variation in $\delta^{13}C$ values of post-medieval Europeans*. University of Calgary, 200 p.
- KENWARD H. (2001). Insect remains from the Romano-British ditch terminal at the Flodden Hill rectilinear enclosure. In: *Reports from the environmental archaeology unit 49*, York, 1-15.
- KIERSZENBAUM A.L. (2006). *Histologie et biologie cellulaire. Une introduction à l'anatomie pathologique*. De Boeck Université, Bruxelles.
- KILLGROVE K. (2010). *Migration and mobility in imperial Rome*. University of North Carolina, 390 p.
- KILLGROVE K. (2013). Biohistory of the Roman republic: the potential of isotope analysis of human skeletal remains. *Post-Classical Archaeologies*, 3 (1), 41-62.
- KILLGROVE K., TYKOT R.H. (2013). Food for Rome: a stable isotope investigation of diet in the Imperial period (1st–3rd centuries AD). *Journal of Anthropological Archaeology*, 32 (1), 28-38.
- KINASTON R., BUCKLEY H., VALENTIN F., BEDFORD S., SPRIGGS M., HAWKINS S., HERRSCHER E. (2014). Lapita diet in remote Oceania: new stable isotope evidence from the 3000-year-old Teouma site, Efate island, Vanuatu. *PLoS One*, 9 (3), e90376.
- KING A. (1999). Diet in the Roman World: a regional inter-site comparison of the mammal bones. *Journal of Roman Archaeology*, 12 (1), 168-202.
- KING C.L., BENTLEY R.A., TAYLES N., VIÐARSDÓTTIR U.S., NOWELL G., MACPHERSON C.G. (2013). Moving peoples, changing diets: isotopic differences highlight migration and subsistence changes in the Upper Mun River Valley, Thailand. *Journal of Archaeological Science*, 40 (4), 1681-1688.
- KIRKHAM J., ROBINSON C., WEATHERELL J.A., RICHARDS A., FEJERSKOV O., JOSEPHSEN K. (1988). Maturation in developing permanent porcine enamel. *Journal of Dental Research*, 67 (9), 1156-1160.
- KIRKHAM J., BROOKES S.J., SHORE R.C., BONASS W.A., SMITH D.A., WALLWORK M.L., ROBINSON C. (1998). Atomic force microscopy studies of crystal surface topology during enamel development. *Connective Tissue Research*, 38 (1-4), 91-100.
- KLIGMAN A.M. (1959). The human hair cycle. *The Journal of Investigative Dermatology*, 33 (6), 307-316.
- KLONT B., DAMEN J.J., TEN CATE J.M. (1991). Degradation of bovine incisor root collagen in an in vitro caries model. *Archives of Oral Biology*, 36 (4), 299-304.
- KNIPPER C., PETERS D., MEYER C., MAURER A.-F., MUHL A., SCHÖNE B., ALT K. (2013). Dietary reconstruction in Migration Period Central Germany: a carbon and nitrogen isotope study. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 5 (1), 17-35.
- KNUDSON K.J., AUFDERHEIDE A.E., BUIKSTRA J.E. (2007). Seasonality and paleodiet in the Chiribaya polity of southern Peru. *Journal of Archaeological Science*, 34 (3), 451-462.
- KNUDSON K.J., WILLIAMS H.M., BUIKSTRA J.E., TOMCZAK P.D., GORDON G.W., ANBAR A.D. (2010). Introducing $\delta^{88/86}Sr$ analysis in archaeology: a demonstration of the utility of strontium isotope fractionation in paleodietary studies. *Journal of Archaeological Science*, 37 (9), 2352-2364.
- KNUDSON K.J., O'DONNABHAIN B., CARVER C., CLELAND R., PRICE T.D. (2012). Migration and Viking Dublin: paleomobility and paleodiet through isotopic analyses. *Journal of Archaeological Science*, 39 (2), 308-320.
- KOCH P., BEHRENSMEYER A.P., FOGEL M.L. (1991). The isotopic ecology of plants and animals in Amboseli National Park, Kenya. *Annual Report of the Director, Geophysical Laboratory, Carnegie Institution, Washington DC 1990-1991*, 163-171.
- KOCH P.L., TUROSS N., FOGEL M.L. (1997). The effects of sample treatment and diagenesis on the isotopic integrity of carbonate in biogenic hydroxylapatite. *Journal of Archaeological Science*, 24 (5), 417-429.
- KOCH P.L., BEHRENSMEYER A.K., STOTT A.W., TUROSS N., EVERSLED R.P., FOGEL M.L. (2001). The effects of weathering on the stable isotope composition of bones. *Ancient Biomolecules*, 3 (1), 117-134.
- KOCH P.L. (2008). Isotopic study of the biology of modern and fossil vertebrates. In: MICHENER R., and LAJTHA K. (éd.). *Stable isotopes in ecology and environmental science*, Blackwell Publishing Ltd, 99-154.

- KOHN M.J., CERLING T.E.** (2002). Stable isotope compositions of biological apatite. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 48 (1), 455-488.
- KOHN M.J.** (2008). Models of diffusion-limited uptake of trace elements in fossils and rates of fossilization. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 (15), 3758-3770.
- KOŁODZIEJSKI W.** (2004). Solid-state NMR studies of bone. *Topics in Current Chemistry*, 246 (246), 235–270.
- KORDLAGHARI M.P., ROWELL D.L.** (2006). The role of gypsum in the reactions of phosphate with soils. *Geoderma*, 132 (1–2), 105-115.
- KOURKOUHELIS N., TZAPHLIDOU M.** (2010). Spectroscopic assessment of normal cortical bone: Differences in relation to bone site and sex. *The Scientific World JOURNAL*, 10, 402-412.
- KRAFT R.A., JAHREN A.H., SAUDEK C.D.** (2008). Clinical-scale investigation of stable isotopes in human blood: $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ from 406 patients at the Johns Hopkins Medical Institutions. *Rapid communications in mass spectrometry*, 22 (22), 3683-3692.
- KRANE S.** (1975). Degradation of collagen in connective tissue diseases. Rheumatoid arthritis. In: BURLEIGH P.M.C., and POOLE A.R. (éd.). *ynamics of connective tissue macromolecules*, North-Holland Publishing, Amsterdam, 309–326.
- KRÖNER A., LINNEBACHER P., STERN R.J., REISCHMANN T., MANTON W., HUSSEIN I.M.** (1991). Evolution of Pan-African island arc assemblages in the southern Red Sea Hills, Sudan, and in southwestern Arabia as exemplified by geochemistry and geochronology. *Precambrian Research*, 53 (1–2), 99-118.
- KRUEGER H.W., SULLIVAN C.H.** (1984). Models for carbon isotope fractionation between diet and bone. In: TURNLUND J.R., and JOHNSON P.E. (éd.). *Stable isotopes in nutrition*, ACS, Washington DC.
- KRUEGER H.W.** (1991). Exchange of carbon with biological apatite. *Journal of Archaeological Science*, 18 (3), 355-361.
- LAFFOON J.E., ROJAS R.V., HOFMAN C.L.** (2013). Oxygen and carbon isotope analysis of human dental enamel from the Caribbean: implications for investigating individuals origins. *Archaeometry*, no-no.
- LANDI E., CELOTTI G., LOGROSCINO G., TAMPIERI A.** (2003). Carbonated hydroxyapatite as bone substitute. *Journal of the European Ceramic Society*, 23 (15), 2931-2937.
- LANDS W.E., HAMAZAKI T., YAMAZAKI K., OKUYAMA H., SAKAI K., GOTO Y., HUBBARD V.S.** (1990). Changing dietary patterns. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 51 (6), 991-993.
- LAYMAN D.K., BOILEAU R.A., ERICKSON D.J., PAINTER J.E., SHIUE H., SATHER C., CHRISTOU D.D.** (2003). A reduced ratio of dietary carbohydrate to protein improves body composition and blood lipid profiles during weight loss in adult women. *The Journal of Nutrition*, 133 (2), 411-417.
- LE BRAS-GOUDE G.** (2011). Reconstructing past populations' behaviors: diet, bones and isotopes in the Mediterranean. *TÛBA-AR*, 14, 215-229.
- LE MOIGNE A.** (1995). *Biologie du développement*. Masson, Paris, 295 p.
- LEBON M.** (2008). *Caractérisation par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier des ossements chauffés en contexte archéologique - Comparaison entre référentiel moderne et matériel fossile. Implications diagénétiques*. Muséum National d'Histoire Naturelle, 334 p.
- LEBON M., REICHE I., BAHAIN J.J., CHADEFaux C., MOIGNE A.M., FRÖHLICH F., SEMAH F., SCHWARCZ H.P., FALGUERES C.** (2010). New parameters for the characterization of diagenetic alterations and heat-induced changes of fossil bone mineral using Fourier transform infrared spectrometry. *Journal of Archaeological Science*, 37 (9), 2265-2276.
- LEBON M., MULLER K., BAHAIN J.-J., FROHLICH F., FALGUERES C., BERTRAND L., SANDT C., REICHE I.** (2011a). Imaging fossil bone alterations at the microscale by SR-FTIR microspectroscopy. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26 (5), 922-929.
- LEBON M., MÜLLER K., BELLOT-GURLET L., PARIS C., REICHE I.** (2011b). Application des micro-spectrométries infrarouge et Raman à l'étude des processus diagénétiques altérant les ossements paléolithiques. *ArchéoSciences*, 35 (1), 179-190.
- LECLEIRE S.** (2008). Digestion et absorption des nutriments. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 43 (1), 45-50.

- LECOMPTE Y. (2001). Radioécologie et radiotoxicologie du strontium 90. *Pharmaceutique*, 52, 189-213.
- LEE-THORP J. (2002). Two decades of progress towards understanding fossilization processes and isotopic signals in calcified tissue minerals. *Archaeometry*, 44 (3), 435-446.
- LEE-THORP J.A., VAN DER MERWE N.J. (1987). Carbon isotope analysis of fossil bone apatite. *South African Journal of Science*, 83 (1), 72-74.
- LEE-THORP J.A., SEALY J.C., VAN DER MERWE N.J. (1989). Stable carbon isotope ratio differences between bone collagen and bone apatite, and their relationship to diet. *Journal of Archaeological Science*, 16 (6), 585-599.
- LEE-THORP J.A., VAN DER MERWE N.J. (1991). Aspects of the chemistry of modern and fossil biological apatites. *Journal of Archaeological Science*, 18 (3), 343-354.
- LEE-THORP J.A. (2001). Preservation of biogenic carbon isotopic signals in Plio-Pleistocene bone and tooth mineral. In: AMBROSE S.H., and KATZENBERG M.A. (éd.). *Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*, Kluwer Academic, Plenum Publishers, New York, 89-116.
- LEE-THORP J.A. (2008). On isotopes and old bones. *Archaeometry*, 50 (6), 925-950.
- LEE A.P., KLINOWSKI J., MARSEGLIA E.A. (1995). Application of nuclear magnetic resonance spectroscopy to bone diagenesis. *Journal of Archaeological Science*, 22 (2), 257-262.
- LEFEBVRE S., CLÉMENT J.C., PINAY G., THENAIL C., DURAND P., MARMONIER P. (2007). ¹⁵N-Nitrate signature in low-order streams: effects of land cover and agricultural practices. *Ecological Applications*, 17 (8), 2333-2346.
- LEGEROS R.Z. (1981). Apatite in biological systems. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 4 (1), 1-45.
- LEGEROS R.Z. (1991). Calcium phosphates in enamel, dentin and bone. In: MEYER H.M. (éd.). *Calcium phosphates in oral biology and medicine*, Karger, Basel, 108-129.
- LEGROS R., BALMAIN N., BONEL G. (1986). Structure and composition of the mineral phase of periosteal bone. *Journal of chemical research Synopses*, 1 (1), 8-9.
- LENOIR J.L., LIÉGEOIS J.P., KÜSTER D., UTKE A., MATHEIS G., HAIDER A. (1994). Origin and regional significance of late Precambrian and early Palaeozoic granitoids in the Pan-African belt of Somalia. *Geologische Rundschau*, 83 (3), 624-641.
- LEVEAU P. (1978). La situation coloniale de l'Afrique romaine. *Annales Économies, Sociétés, Civilisations*, 33 (1), 89-92.
- LEVIN I., KROMER B., WAGENBACH D., MÜNNICH K.O. (1987). Carbon isotope measurements of atmospheric CO₂ at a coastal station in Antarctica. *Tellus B*, 39B (1-2), 89-95.
- LEVINSON A.A., LUZ B., KOLODNY Y. (1987). Variations in oxygen isotopic compositions of human teeth and urinary stones. *Applied Geochemistry*, 2 (4), 367-371.
- LIDEN K., TAKAHASHI C., NELSON D.E. (1995). The effects of lipids in stable carbon isotope analysis and the effects of NaOH treatment on the composition of extracted bone collagen. *Journal of Archaeological Science*, 22 (2), 321-326.
- LIGHTFOOT E., O'CONNELL T.C., STEVENS R.E., HAMILTON J., HEY G., HEDGES R.E.M. (2009). An investigation into diet at the site of Yarnton, Oxfordshire, using stable carbon and nitrogen isotopes. *Oxford Journal of Archaeology*, 28 (3), 301-322.
- LIGHTFOOT E., ŠLAUS M., O'CONNELL T.C. (2012). Changing cultures, changing cuisines: cultural transitions and dietary change in Iron Age, Roman, and Early Medieval Croatia. *American Journal of Physical Anthropology*, 148 (4), 543-556.
- LIGHTFOOT E., ŠLAUS M., O'CONNELL T.C. (2014). Water consumption in Iron Age, Roman, and early Medieval Croatia. *American Journal of Physical Anthropology*, In press.
- LIU X., WANG G., LI J., WANG Q. (2010). Nitrogen isotope composition characteristics of modern plants and their variations along an altitudinal gradient in Dongling Mountain in Beijing. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 53 (1), 128-140.
- LONGIN R. (1971). New method of collagen extraction for radiocarbon dating. *Nature*, 230 (5291), 241-242.
- LONGINELLI A. (1984). Oxygen isotopes in mammal bone phosphate: a new tool for paleohydrological and paleoclimatological research? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48 (2), 385-390.

- LONGINELLI A., LENAZ R., ORI C., SELMO E.** (2005). Concentrations and $\delta^{13}\text{C}$ values of atmospheric CO_2 from oceanic atmosphere through time: polluted and non-polluted areas. *Tellus B*, 57 (5), 385-390.
- LONGINELLI A., GIGLIO F., LANGONE L., MOGGIO L., ORI C., SELMO E., SGAVETTI M.** (2012). Atmospheric CO_2 concentrations and $\delta^{13}\text{C}$ values between New Zealand and Antarctica, 1998 to 2010: some puzzling results. *Tellus B*, 64, 17472.
- LÖSCH S., GRUPE G., PETERS J.** (2006). Stable isotopes and dietary adaptations in humans and animals at pre-pottery Neolithic Nevalı Çori, Southeast Anatolia. *American Journal of Physical Anthropology*, 131 (2), 181-193.
- LOUSSOUARN G.** (2001). African hair growth parameters. *British Journal of Dermatology*, 145 (2), 294-297.
- LUBELL D., JACKES M., SCHWARCZ H.P., 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.
- LUSTRINO M., WILSON M.** (2007). The circum-Mediterranean anorogenic Cenozoic igneous province. *Earth-Science Reviews*, 81 (1-2), 1-65.
- LUSTRINO M., CUCCINIELLO C., MELLUSO L., TASSINARI C.C.G., DÈ GENNARO R., SERRACINO M.** (2012). Petrogenesis of Cenozoic volcanic rocks in the NW sector of the Gharyan volcanic field, Libya. *Lithos*, 155 (0), 218-235.
- LUZ B., KOLODNY Y., HOROWITZ M.** (1984). Fractionation of oxygen isotopes between mammalian bone-phosphate and environmental drinking water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48 (8), 1689-1693.
- LYKODIS S.P., ARGIRIOU A.A., DOTSIKA E.** (2010). Spatially interpolated time series of $\delta^{18}\text{O}$ in eastern Mediterranean precipitation. *Global and Planetary Change*, 71 (3-4), 150-159.
- MA J.-Y., SUN W., LIU X.-N., CHEN F.-H.** (2012). Variation in the stable carbon and nitrogen isotope composition of plants and soil along a precipitation gradient in Northern China. *PLoS One*, 7 (12), 1-7.
- MADGWICK R., SYKES N., MILLER H., SYMMONS R., MORRIS J., LAMB A.** (2013). Fallow deer (*Dama dama*) management in Roman South-East Britain. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 5 (2), 111-122.
- MALISSARD A.** (2002). *Les Romains et l'eau. Fontaines, salles de bains, thermes, égouts, aqueducs...* Les belles lettres, Paris, 346 p.
- MANCINI M., D'ANASTASIO E., BARBIERI M., DE MARTINI P.M.** (2007). Geomorphological, paleontological and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ isotope analyses of early Pleistocene paleoshorelines to define the uplift of Central Apennines (Italy). *Quaternary Research*, 67 (3), 487-501.
- MANGINI A., SPÖTL C., VERDES P.** (2005). Reconstruction of temperature in the Central Alps during the past 2000 yr from a $\delta^{18}\text{O}$ stalagmite record. *Earth and Planetary Science Letters*, 235 (3-4), 741-751.
- MANN S.** (2001). *Biomineralization: Principles and concepts in bioinorganic materials chemistry*. Oxford University Press, Oxford, 198 p.
- 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.
- MANSILLA J., BOSCH P., MENÉNDEZ M.T., PIJOAN C., FLORES C., DEL CARMEN LÓPEZ M., LIMA E., LEBOREIRO I.** (2011). Archaeological and contemporary human hair composition and morphology. *Chungara, Revista de Antropología Chilena*, 43 (2), 293-302.
- MARINO B.D., MCELROY M.B.** (1991). Isotopic composition of atmospheric CO_2 inferred from carbon in C_4 plant cellulose. *Nature*, 349 (6305), 127-131.
- MARSHALL J.D., BROOKS J.R., LAJTHA K.** (2008). Sources of variation in the stable isotopic composition of plants. In: *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*, Blackwell Publishing Ltd, 22-60.
- MARTELLI M., NUCCIO P.M., STUART F.M., BURGESS R., ELLAM R.M., ITALIANO F.** (2004). Helium-strontium isotope constraints on mantle evolution beneath the Roman Comagmatic Province, Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 224 (3-4), 295-308.

- MATTINGLY D., ALDRETE G.** (2000). The feeding of imperial Rome: the mechanics of the food supply system. In: COULSTON J., and DODGE H. (éd.). *Ancient Rome: the archaeology of the eternal city*, Oxford University School of Archaeology, Oxford, 142-165.
- MAURY R., FOURCADE S., COULON C., EL AZZOUI M.H., BELLON H., COUTELLE A., OUABADI A., SEMROUD B., MEGARTSI M.H., COTTEN J., BELANTEUR O., LOUNI-HACINI A., PIQUÉ A., CAPDEVILA R., HERNANDEZ J., RÉHAULT J.-P.** (2000). Post-collisional Neogene magmatism of the Mediterranean Maghreb margin: a consequence of slab breakoff. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 331 (3), 159-173.
- MAYEWSKI P.A., MEEKER L.D., WHITLOW S., TWICKLER M.S., MORRISON M.C., BLOOMFIELD P., BOND G.C., ALLEY R.B., GOW A.J., MEESE D.A., GROOTES P.M., RAM M., TAYLOR K.C., WUMKES W.** (1994). Changes in atmospheric circulation and ocean ice cover over the North Atlantic during the last 41,000 years. *Science*, 263 (5154), 1747-1751.
- MCARTHUR J.M.** (2001). Strontium isotope stratigraphy: LOWESS version 3: Best fit to the marine Sr-isotope curve for 0–509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age. *The Journal of Geology*, 109 (2), 155-170.
- MCCONNAUGHEY T., MCROY, C.P.,** (1979). Food-Web structure and the fractionation of carbon isotopes in the bering sea. *Marine Biology*, 53 (3), 257-262.
- MCCORMICK M., BÜNTGEN U., CANE M.A., COOK E.R., HARPER K., HUYBERS P., LITT T., MANNING S.W., MAYEWSKI P.A., MORE A.F.M., NICOLUSSI K., TEGEL W.** (2012). Climate change during and after the Roman empire: reconstructing the past from scientific and historical evidence. *Journal of Interdisciplinary History*, 43 (2), 169-220.
- MCCORMICK M., GRIGOLI L., ZAMBOTTI G., ET AL.** (2015). Digital Atlas of Roman and Medieval Civilizations (DARMC) - <http://darmc.harvard.edu/>.
- MCMILLAN C., PARKER P.L., FRY B.** (1980). $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in seagrasses. *Aquatic Botany*, 9 (3), 237-249.
- 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.
- MELKKO J., NIEMI S., RISTELI L., RISTELI J.** (1990). Radioimmunoassay of the carboxyterminal propeptide of human type I procollagen. *Clinical Chemistry*, 36 (7), 1328-1332.
- MENZIES M., MURTHY V.R.** (1980). Nd and Sr isotope geochemistry of hydrous mantle nodules and their host alkali basalts: implications for local heterogeneities in metasomatically veined mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 46 (3), 323-334.
- MERINO MARTÍNEZ E., VILLASECA C., OREJANA D., PÉREZ-SOBA C., BELOUSOVA E., ANDERSEN T.** (2014). Tracing magma sources of three different S-type peraluminous granitoid series by in situ U–Pb geochronology and Hf isotope zircon composition: The Variscan Montes de Toledo batholith (central Spain). *Lithos*, 200–201 (0), 273-298.
- METGES C., KEMPE K., SCHMIDT H.-L.** (1990). Dependence of the carbon-isotope contents of breath carbon dioxide, milk, serum and rumen fermentation products on the $\delta^{13}\text{C}$ value of food in dairy cows. *British Journal of Nutrition*, 63 (02), 187-196.
- METZ G., ZILIOX M., SMITH S.O.** (1996). Towards quantitative CP-MAS NMR. *Solid State Nuclear Magnetic Resonance*, 7 (3), 155-160.
- MILLER E.R., ULLREY D.E.** (1987). The pig as a model for human nutrition. *Annual Review of Nutrition*, 7 (1), 361-382.
- MINAGAWA M., WADA E.** (1984). Stepwise enrichment of ^{15}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.
- MINAGAWA M., KARASAWA K., KABAYA Y.** (1986). Carbon and nitrogen isotope abundances in human feeding ecosystem. *Chikyu-kagaku (Geochemistry)*, 20 (1), 79-88.
- MINAGAWA M.** (1992). Reconstruction of human diet from $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in contemporary Japanese hair: a stochastic method for estimating multi-source contribution by double isotopic tracers. *Applied Geochemistry*, 7 (2), 145-158.

- MINISSALE A., KERRICK D.M., MAGRO G., MURRELL M.T., PALADINI M., RIHS S., STURCHIO N.C., TASSI F., VASELLI O.** (2002). Geochemistry of Quaternary travertines in the region north of Rome (Italy): structural, hydrologic and paleoclimatic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 203 (2), 709-728.
- MINISSALE A., VASELLI O.** (2011). Karst springs as “natural” pluviometers: Constraints on the isotopic composition of rainfall in the Apennines of central Italy. *Applied Geochemistry*, 26 (5), 838-852.
- MOHARRERY A.**, (2007). Effect of docking and energy of diet on carcass fat characteristics in fat-tailed Badghisian sheep. *Small Ruminant Research*, 69 (1-3), 208-216.
- MONTGOMERY J.** (2002). *Lead and strontium isotope compositions of human dental tissues as an indicator of ancient exposure and population dynamics. The application of isotope source-tracing methods to identify migrants among British archaeological burials and a consideration of ante-mortem uptake, tissue stability and post-mortem diagenesis.* University of Bradford, 422 p.
- MONTGOMERY J.** (2010). Passports from the past: Investigating human dispersals using strontium isotope analysis of tooth enamel. *Annals of Human Biology*, 37 (3), 325-346.
- MOOK W.G., GROENEVELD Y.O., NISHIHARA C.** (1974). Analysis of a run-off hydrograph by means of natural ^{18}O . In: *Proceedings of the symposium on isotope techniques in groundwater hydrology*, International Atomic Energy Agency, Vienne, 145-183.
- MOOK W.G.** (2001). Introduction: Theory, methods, review. In: Mook W.G. (éd.). *Environmental isotopes in the hydrological cycle: Principles and applications*, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- MOORE J.W., SEMMENS B.X.** (2008). Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models. *Ecology Letters*, 11 (5), 470-480.
- MOORE K.M., MURRAY M.L., SCHOENINGER M.J.** (1989). Dietary reconstruction from bones treated with preservatives. *Journal of Archaeological Science*, 16 (4), 437-446.
- MOORREES C.F.A., FANNING E.A., HUNT E.E.** (1963). Age variation of formation stages for ten permanent teeth. *Journal of Dental Research*, 42, 1490-1502.
- MOROT-GAUDRY J.F.** (2009). *Biologie végétale. Nutrition et métabolisme.* Dunod, Paris, 224 p.
- MORRISON D.J., DODSON B., SLATER C., PRESTON T.** (2000). ^{13}C natural abundance in the British diet: implications for ^{13}C breath tests. *Rapid communications in mass spectrometry*, 14 (15), 1321-1324.
- MOTTA L.** (2002). Planting the seed of Rome. *Vegetation History and Archaeobotany*, 11 (1-2), 71-78.
- MOUFTI A.M.B., ALI K.A., WHITEHOUSE M.J.** (2013). Geochemistry and petrogenesis of the Ediacaran post-collisional Jabal Al-Hassir ring complex, Southern Arabian Shield, Saudi Arabia. *Chemie der Erde - Geochemistry*, 73 (4), 451-467.
- MOUFTI M.R., MOGHAZI A.M., ALI K.A.** (2012). Geochemistry and Sr–Nd–Pb isotopic composition of the Harrat Al-Madinah Volcanic Field, Saudi Arabia. *Gondwana Research*, 21 (2–3), 670-689.
- MOULARD J.** (1924). Fouilles et découvertes à Utique. *Bulletin archéologique du Comité des travaux historiques et scientifiques*, Année 1924, 141-161.
- MROUE K.H., MACKINNON N., XU J., ZHU P., MCNERNY E., KOHN D.H., MORRIS M.D., RAMAMOORTHY A.** (2012). High-Resolution Structural Insights into Bone: A Solid-State NMR Relaxation Study Utilizing Paramagnetic Doping. *The Journal of Physical Chemistry B*, 116 (38), 11656-11661.
- MÜLDNER G., RICHARDS M.P.** (2007). Stable isotope evidence for 1500 years of human diet at the city of York, UK. *American Journal of Physical Anthropology*, 133 (1), 682-697.
- MÜLDNER G., BRITTON K., ERVYNCK A.** (2014). Inferring animal husbandry strategies in coastal zones through stable isotope analysis: new evidence from the Flemish coastal plain (Belgium, 1st–15th century AD). *Journal of Archaeological Science*, 41 (0), 322-332.
- MUNDY G.R.** (1987). Bone resorption and turnover in health and disease. *Bone*, 8 (Suppl. 1), 9-16.
- MUNRO L.E., LONGSTAFFE F.J., WHITE C.D.** (2007). Burning and boiling of modern deer bone: Effects on crystallinity and oxygen isotope composition of bioapatite phosphate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 249 (1-2), 90-102.

- MURPHY C., THOMPSON G., FULLER D.** (2013). Roman food refuse: urban archaeobotany in Pompeii, Regio VI, Insula 1. *Vegetation History and Archaeobotany*, 22 (5), 409-419.
- MYERS R.J., HAMILTON J.B.** (1951). Regeneration and the rate of growth of hairs in man. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 53 (3), 562-568.
- 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., CHIKARAISHI Y., OHKOUCHI N., YONEDA M.** (2013). 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.
- NAKAMURA K., SCHOELLER D.A., WINKLER F.J., SCHMIDT H.L.**, 1982. Geographical variations in the carbon isotope composition of the diet and hair in contemporary man. *Biological Mass Spectrometry*, 9 (9), 390-394.
- NANCI A.** (1999). Content and distribution of noncollagenous matrix proteins in bone and cementum: relationship to speed of formation and collagen packing density. *Journal of Structural Biology*, 126 (3), 256-269.
- NASIR S., AL-SAYIGH A., ALHARTHY A., AL-LAZKI A.** (2006). Geochemistry and petrology of Tertiary volcanic rocks and related ultramafic xenoliths from the central and eastern Oman Mountains. *Lithos*, 90 (3-4), 249-270.
- NASIR S., STERN R.J.** (2012). Lithospheric petrology of the eastern Arabian Plate: Constraints from Al-Ashkhara (Oman) xenoliths. *Lithos*, 132-133 (0), 98-112.
- NATALI C., BECCALUVA L., BIANCHINI G., ELLAM R.M., SIENA F., STUART F.M.** (2013). Carbonated alkali-silicate metasomatism in the North Africa lithosphere: Evidence from Middle Atlas spinel-lherzolites, Morocco. *Journal of South American Earth Sciences*, 41 (0), 113-121.
- NENCI G.** (1999). Il miglio e il panico nell'alimentazione delle popolazioni mediterranee. In: VERA D. (éd.). *Demografia, sistemi agrari, regimi alimentari*, Edipuglia, Bari, 25-36.
- NICOLUSSI K., KAUFMANN M., MELVIN T.M., VAN DER PLICHT J., SCHIEBLING P., THURNER A.** (2009). A 9111 year long conifer tree-ring chronology for the European Alps: a base for environmental and climatic investigations. *The Holocene*, 19 (6), 909-920.
- NIELSEN-MARSH C.M., HEDGES R.E.M.** (2000). Patterns of diagenesis in bone I: the effects of site environments. *Journal of Archaeological Science*, 27 (12), 1139-1150.
- NIELSEN-MARSH C.M., SMITH C.I., JANS M.M.E., NORD A., KARS H., COLLINS M.J.** (2007). Bone diagenesis in the European Holocene II : taphonomic and environmental considerations. *Journal of Archaeological Science*, 34, 1523-1531.
- NITSCH E.K.** (2012). *Stable isotope evidence for diet change in Roman and Medieval Italy: local, regional and continental perspectives*. University of Oxford, 352 p.
- NIYIBIZI C., EYRE D.R.** (1989). Bone type V collagen: Chain composition and location of a trypsin cleavage site. *Connective Tissue Research*, 20 (1-4), 247-250.
- NIYIBIZI C., EYRE D.R.** (1994). Structural characteristics of cross-linking sites in type V collagen of bone. *European Journal of Biochemistry*, 224 (3), 943-950.
- NOUAR O., HENRY B., LIÉGOIS J.P., DERDER M.E.M., BAYOU B., BRUGUIER O., OUABADI A., AMENNA M., HEMMI A., AYACHE M.** (2011). Eburnean and Pan-African granitoids and the Raghane mega-shear zone evolution: Image analysis, U-Pb zircon age and AMS study in the Arokam Ténére (Tuareg shield, Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, 60 (3), 133-152.
- NUTTO V.** (1995). Galen and the traveller's fare. In: WILKENS J., HARVEY D., and DOBSON M. (éd.). *Food in Antiquity*, University of Exeter Press, Exeter, 359-379.
- O'CONNELL T.C.** (1996). *The isotopic relationship between diet and body proteins: Implications for the study of diet in archaeology*. University of Oxford.
- O'CONNELL T.C., HEDGES R.E.** (1999a). Isotopic comparison of hair and bone: archaeological analyses. *Journal of Archaeological Science*, 26 (6), 661-665.
- O'CONNELL T.C., HEDGES R.E.M.** (1999b). Investigations into the effect of diet on modern human hair isotopic values. *American Journal of Physical Anthropology*, 108 (4), 400-425.

- O'CONNELL T.C., HEDGES R.E., HEALEY M.A., SIMPSON A.H.R. (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.
- OLSEN K.C. (2013). *A multi-isotope investigation of two Medieval German populations: insight into the relationship among diet, disease, and tissue isotopic compositions*. University of Western Ontario, 279 p.
- 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.
- PAGNI G., BURDASSI L. (2004). *Gli inumati nella catacomba dei SS Pietro e Marcellino. Intervento di scavo antropologico*. Excavation report, 10 p.
- PALOMBO M.R., FILIPPI M.L., IACUMIN P., LONGINELLI A., BARBIERI M., MARAS A. (2005). Coupling tooth microwear and stable isotope analyses for palaeodiet reconstruction: the case study of late Middle Pleistocene *Elephas* (*Palaeoloxodon*) antiquus teeth from Central Italy (Rome area). *Quaternary International*, 126 (1), 153-170.
- PALTI D.G., MACHADO M.A., SILVA S.M., ABDO R.C., LIMA J.E. (2008). Evaluation of superficial microhardness in dental enamel with different eruptive ages. *Brazilian Oral Research*, 22 (4), 311-315.
- PANEK J., WARING R. (1997). Stable carbon isotopes as indicators of limitations to forest growth imposed by climate stress. *Ecological Applications*, 7 (3), 854-863.
- PARDO L.H., NADELHOFFER K.J. (2010). Using nitrogen isotope ratios to assess terrestrial ecosystems at regional and global scales. In: WEST J.B., BOWEN G.J., DAWSON T.E., and TU K.P. (éd.). *Isoscapes: Understanding movement, pattern, and process on Earth through isotope mapping*, Springer, Dordrecht, 221-249.
- PARFITT A.M. (1983). The physiologic and clinical significance of bone histomorphometric data. In: RECKER R.R. (éd.). *Bone histomorphometry: Techniques and interpretation*, CRC Press, Boca Raton, 143-223.
- PARFITT A.M. (1994). Osteonal and hemi-osteonal remodeling: The spatial and temporal framework for signal traffic in adult human bone. *Journal of Cellular Biochemistry*, 55 (3), 273-286.
- PARKER PEARSON M. (2000). *The archaeology of death and burial* Texas A&M University Press, College Station, 250 p.
- PARNELL A.C., INGER R., BEARHOP S., JACKSON A.L. (2010). Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation. *PLoS One*, 5 (3).
- PASSEY B.H., ROBINSON T.F., AYLIFFE L.K., CERLING T.E., SPONHEIMER M., DEARING M.D., ROEDER B.L., EHLERINGER J.R. (2005). Carbon isotope fractionation between diet, breath CO_2 , and bioapatite in different mammals. *Journal of Archaeological Science*, 32 (10), 1459-1470.
- PASTERIS J.D., WOPENKA B., FREEMAN J.J., ROGERS K., VALSAMI-JONES E., VAN DER HOUWEN J.A.M., SILVA M.J. (2004). Lack of OH in nanocrystalline apatite as a function of degree of atomic order: implications for bone and biomaterials. *Biomaterials*, 25 (2), 229-238.
- PATE F.D., HUTTON J.T., NORRISH K. (1989). Ionic exchange between soil solution and bone: toward a predictive model. *Applied Geochemistry*, 4 (3), 303-316.
- PAUS R., COTSARELIS G. (1999). The biology of hair follicles. *New England Journal of Medicine*, 341 (7), 491-497.
- PECORARO V., ASTORE I., BARMAN J.M. (1964). Cycle of the scalp hair of the new-born child. *Journal of Investigative Dermatology*, 43 (3), 145-147.
- PEGRAM W.J., REGISTER JR J.K., FULLAGAR P.D., GHUMA M.A., ROGERS J.J.W. (1976). Pan-African ages from a Tibesti Massif batholith, southern Libya. *Earth and Planetary Science Letters*, 30 (1), 123-128.

- PELLEGRINI M., DONAHUE R.E., CHENERY C., EVANS J., LEE-THORP J., MONTGOMERY J., MUSSI M. (2008). Faunal migration in late-glacial central Italy: implications for human resource exploitation. *Rapid communications in mass spectrometry*, 22 (11), 1714-1726.
- PERETZSCHNER H.-U. (2006). Collagen gelatinization: the key to understand early bone-diagenesis. *Palaeontographica Abteilung A*, 278 (1-6), 135-148.
- PÉREZ-LÓPEZ U., ROBREDO A., MIRANDA-APODACA J., LACUESTA M., MUÑOZ-RUEDA A., MENA-PETITE A. (2013). Carbon dioxide enrichment moderates salinity-induced effects on nitrogen acquisition and assimilation and their impact on growth in barley plants. *Environmental and Experimental Botany*, 87 (1), 148-158.
- PERRIER A. (2010). *Ostéoblaste et environnement physico-chimique : effets du degré de minéralisation et des micro-vibrations*. Université Jean Monnet, 213 p.
- PERRY W.L., BASS W.M., RIGGSBY W.S., SIROTKIN K. (1988). The autodegradation of deoxyribonucleic acid (DNA) in human rib bone and its relationship to the time interval since death. *Journal of Forensic Sciences*, 33 (1), 144-153.
- PESTLE W.J., COLVARD M. (2012). Bone collagen preservation in the tropics: a case study from ancient Puerto Rico. *Journal of Archaeological Science*, 39 (7), 2079-2090.
- PETZKE K.J., BOERING H., KLAUS S., METGES C.C. (2005). Carbon and nitrogen stable isotopic composition of hair protein and amino acids can be used as biomarkers for animal-derived dietary protein intake in humans. *Journal of Nutrition*, 135 (6), 1515-1520.
- PHILLIPS D.L., KOCH P.L. (2002). Incorporating concentration dependence in stable isotope mixing models. *Oecologia*, 130 (1), 114-125.
- PHILPOT R. (1991). *Burial practices in Roman Britain, a survey of grave treatment and furnishing (A.D. 43-410)*. Tempus Reparatum, Oxford, 472 p.
- PINKUS F. (1947). The story of a hair root. *Journal of Investigative Dermatology*, 9 (2), 91-93.
- POLET C., KATZENBERG M.A. (2003). Reconstruction of the diet in a mediaeval monastic community from the coast of Belgium. *Journal of Archaeological Science*, 30 (5), 525-533.
- POLLARD A.M., PELLEGRINI M., LEE-THORP J.A. (2011). Some observations on the conversion of dental enamel $\delta^{18}\text{O}_p$ values to $\delta^{18}\text{O}_w$ to determine human mobility. *American Journal of Physical Anthropology*, 145 (3), 499-504.
- POSNER A. (1987). Bone mineral and the mineralisation process. In: PECK W.A. (éd.). *Bone and mineral research*, Elsevier, New York, 65-116.
- POSS J.A., GRATAN S.R., SUAREZ D.L., GRIEVE C.M. (2000). Stable carbon isotope discrimination: an indicator of cumulative salinity and boron stress in *Eucalyptus camaldulensis*. *Tree Physiology*, 20 (16), 1121-1127.
- PRETSCH E., BÜHLMANN P., BADERTSCHER M. (2009). *Structure determination of organic compounds*. Springer, Berlin.
- 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., GRUPE G., SCHRÖTER P. (1994). Reconstruction of migration patterns in the Bell Beaker period by stable strontium isotope analysis. *Applied Geochemistry*, 9 (4), 413-417.
- 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.
- PROWSE T., SCHWARCZ H.P., SAUNDERS S., MACCHIARELLI R., BONDIOLI L. (2004). Isotopic paleodiet studies of skeletons from the Imperial Roman-age cemetery of Isola Sacra, Rome, Italy. *Journal of Archaeological Science*, 31 (3), 259-272.
- PROWSE T.L. (2001). *Isotopic and dental evidence for diet from the necropolis of Isola Sacra (1st-3rd centuries AD), Italy*. McMaster University, 356 p.
- PROWSE T.L., SCHWARCZ H.P., SAUNDERS S., MACCHIARELLI R., BONDIOLI L. (2005). Isotopic evidence for age-related variation in diet from Isola Sacra, Italy. *American Journal of Physical Anthropology*, 128 (1), 2-13.

- PROWSE T.L., SCHWARCZ H.P., GARNSEY P., KNYF M., MACCHIARELLI R., BONDIOLI L.** (2007). Isotopic evidence for age-related immigration to imperial Rome. *American Journal of Physical Anthropology*, 132 (4), 510-519.
- PROWSE T.L., SAUNDERS S.R., SCHWARCZ H.P., GARNSEY P., MACCHIARELLI R., BONDIOLI L.** (2008). Isotopic and dental evidence for infant and young child feeding practices in an Imperial Roman skeletal sample. *American Journal of Physical Anthropology*, 137 (3), 294-308.
- RADAIN A.A., ALI S., NASSEEF A.O., ABDEL-MONEM A.A.** (1987). Rb-Sr geochronology and geochemistry of plutonic rocks from the Wadi Shuqub quadrangle, west-central Arabian Shield. *Journal of African Earth Sciences* (1983), 6 (4), 553-568.
- RADICATI DI BROZOLO F., HUNEKE J.C., PAPANASTASSIOU D.A., WASSERBURG G.J.** (1981). ^{40}Ar - ^{39}Ar and Rb-Sr age determinations on Quaternary volcanic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 53 (3), 445-456.
- RADOSEVICH S.C.** (1993). The six deadly sins of trace element analysis: a case of wishful thinking in science. In: SANDFORD M.K. (éd.). *Investigations of ancient human tissue: Chemical analyses in anthropology*, Gordon & Breach, Amsterdam, 269-332.
- RAILSBACK L.B., HOOD E.C.** (2001). A survey of multi-stage diagenesis and dolomitization of Jurassic limestones along a regional shelf-to-basin transect in the Ziz Valley, Central High Atlas Mountains, Morocco. *Sedimentary Geology*, 139 (3-4), 285-317.
- RAMOS M.G., VILLATORO M.A.A., URQUIAGA S., ALVES B.J.R., BODDEY R.M.** (2001). Quantification of the contribution of biological nitrogen fixation to tropical green manure crops and the residual benefit to a subsequent maize crop using ^{15}N -isotope techniques. *Journal of Biotechnology*, 91 (2-3), 105-115.
- RANDALL V.A., BOTCHKAREVA N.V.** (2009). The biology of hair growth. In: GURPREET S.A. (éd.). *Cosmetics applications of laser & light-based systems*, William Andrew Publishing, Boston, 3-35.
- RAVARY Y., FIGARELLA J.** (1993). *La nutrition*. Lanore, Malakoff, 269 p.
- RAVEN P.H., EVERT R.F., EICHHORN S.E.** (2007). *Biologie végétale*. De Boeck Université, Bruxelles, 733 p.
- REALE O., DIRMEYER P.** (2000). Modeling the effects of vegetation on Mediterranean climate during the Roman Classical period: part I: climate history and model sensitivity. *Global and Planetary Change*, 25 (3-4), 163-184.
- REALE O., SHUKLA J.** (2000). Modeling the effects of vegetation on Mediterranean climate during the Roman Classical Period: Part II. Model simulation. *Global and Planetary Change*, 25 (3-4), 185-214.
- REBILLARD É.** (1997). L'Église de Rome et le développement des catacombes. À propos de l'origine des cimetières chrétiens. *Mélanges de l'Ecole française de Rome Antiquité*, 109 (2), 741-763.
- REBORA A., GUARRERA M.** (2002). Kenogen. A new phase of the hair cycle? *Dermatology*, 205 (2), 108-110.
- REBORA A., GUARRERA M.** (2004). Teloptosis and kenogen: Two new concepts in human trichology. *Archives of Dermatology*, 140 (5), 619-620.
- REITH E.J., BUTCHER E.O.** (1967). Microanatomy and histochemistry of amelogenesis. In: MILES A.E. (éd.). *Structural and chemical organization of teeth*, Academic Press, New York, 371-397.
- REITSEMA L.J.** (2012). *Stable carbon and nitrogen isotope analysis of human diet change in prehistoric and historic Poland*. The Ohio State University, 377 p.
- REITSEMA L.J., KOZŁOWSKI T.** (2013). Diet and society in Poland before the state: stable isotope evidence from a Wielbark population (2nd c. AD). *Anthropological Review*, 76 (1), 1-22.
- REY C., RENUGOPALAKRISHNAN V., SHIMIZU M., COLLINS B., GLIMCHER M.J.** (1991). A resolution-enhanced fourier transform infrared spectroscopic study of the environment of the CO_3^{2-} ion in the mineral phase of enamel during its formation and maturation. *Calcified Tissue International*, 49 (4), 259-268.
- REY C., COMBES C., DROUET C., GLIMCHER M.J.** (2009). Bone mineral: Update on chemical composition and structure. *Osteoporosis International*, 20 (6), 1013-1021.

- RICHARDS M.P., HEDGES R.E.** (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., MAYS S., FULLER B.T.** (2002). Stable carbon and nitrogen isotope values of bone and teeth reflect weaning age at the medieval Wharram Percy Site, Yorkshire, UK. *American Journal of Physical Anthropology*, 119 (3), 205-210.
- RICHARDS M.P., JACOBI R., COOK J., PETTITT P.B., STRINGER C.B.** (2005). Isotope evidence for the intensive use of marine foods by Late Upper Palaeolithic humans. *Journal of Human Evolution*, 49 (3), 390-394.
- RICKMAN G.** (1980). *The corn supply of ancient Rome*. Clarendon Press, Oxford, 290 p.
- ROBBINS C., ROBBINS M.G.** (2003). Scalp hair length. II. Estimating the percentages of adults in the USA and larger populations by hair length. *Journal of Cosmetic Science*, 54 (4), 367-378.
- ROBBINS C.** (2012a). Chemical composition of different hair types. In: ROBBINS C. (éd.). *Chemical and physical behavior of human hair*, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 105-176.
- ROBBINS C.** (2012b). Morphological, macromolecular structure and hair growth. In: ROBBINS C. (éd.). *Chemical and physical behavior of human hair*, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 1-104.
- ROBERTS C.N., ZANCHETTA G., JONES M.D.** (2010). Oxygen isotopes as tracers of Mediterranean climate variability: An introduction. *Global and Planetary Change*, 71 (3-4), 135-140.
- ROBERTS S.B., COWARD W.A., EWING G., SAVAGE J., COLE T.J., LUCAS A.** (1988). Effect of weaning on accuracy of doubly labeled water method in infants. *American Journal of Physiology - Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 254 (4), R622-R627.
- ROBINSON C.** (1995). Chemistry of mature enamel. In: ROBINSON C., KIRKHAM J., and SHORE R.C. (éd.). *Dental enamel: Formation to destruction*, CRC Press, New York, 167-191.
- ROBINSON C., KIRKHAM J., BROOKES S.J., BONASS W.A., SHORE R.C.** (1995). The chemistry of enamel development. *The International Journal of Developmental Biology*, 39 (1), 145-152.
- ROBINSON C., BROOKES S.J., BONASS W.A., SHORE R.C., KIRKHAM J.** (1997). Enamel maturation. *Ciba Foundation Symposium*, 205 (1), 156-170.
- ROBINSON F.A., FODEN J.D., COLLINS A.S.** (2015). Geochemical and isotopic constraints on island arc, synorogenic, post-orogenic and anorogenic granitoids in the Arabian Shield, Saudi Arabia. *Lithos*, 220-223 (0), 97-115.
- RODENBECK J.** (1950). *Das Zoemeterium inter duas lauros in via Labicana*.
- ROGERS G.E., HYND P.I.** (2001). Animal models and culture methods in the study of hair growth. *Clinics in Dermatology*, 19 (2), 105-119.
- ROSSERT J., DE GROMBRUGGHE B.** (1996). Type I collagen : Structure synthesis and regulation. In: BILEZIKIAN J.P., RAISZ L.G., and RODAN G.A. (éd.). *Principles of bone biology*, Academic Press, San Diego, 127-142.
- ROSSIGNOL B., DUROST S.** (2010). Volcanisme global et variations climatiques de courte durée dans l'histoire romaine (Ier s. av. J.-C. - IVème s. ap. J.-C.) : leçons d'une archive glaciaire (GISP2) *Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz*, 54 (2), 395-438.
- ROTTOLI M., CASTIGLIONI E.** (2011). Plant offerings from Roman cremations in northern Italy: a review. *Vegetation History and Archaeobotany*, 20 (5), 495-506.
- ROTTURA A., BARGOSSO G.M., CAIRONI V., DEL MORO A., MACCARRONE E., MACERA P., PAGLIONICO A., PETRINI R., PICCARRETA G., POLI G.** (1990). Petrogenesis of contrasting Hercynian granitoids from the Calabrian Arc, southern Italy. *Lithos*, 24 (2), 97-119.
- ROY D.M., HALL R., MIX A.C., BONNICHSEN R.** (2005). Using stable isotope analysis to obtain dietary profiles from old hair: A case study from Plains Indians. *American Journal of Physical Anthropology*, 128 (2), 444-452.
- ROZANSKI K., ARAGUÁS-ARAGUÁS L., GONFIANTINI R.** (1993). Isotopic patterns in modern global precipitation. In: SWART P.K., LOHMANN K.L., MCKENZIE J., and SAVIN S. (éd.). *Climate Change in Continental Isotopic Records*, AGU, Washington, DC, 1-36.
- RUTGERS L.V.** (2000). *Subterranean Rome: in search of the roots of Christianity in the catacombs of the eternal city*. Peeters, Leuven, 164 p.

- RUTGERS L.V., VAN STRYDONCK M., BOUDIN M., VAN DER LINDE C. (2009). Stable isotope data from the early Christian catacombs of ancient Rome: new insights into the dietary habits of Rome's early Christians. *Journal of Archaeological Science*, 36 (5), 1127–1134.
- SACHAU-CARCEL G. (2012). *Apport de la modélisation tridimensionnelle à la compréhension du fonctionnement des sépultures multiples. L'exemple du secteur central de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin (Rome, Italie). (Ier-milieu IIIe s. ap. J.-C.)*. Université Bordeaux 3, 505 p.
- SACHAU-CARCEL G., CASTEX D., VERGNIEUX R. (2013). Sites à stratification complexe et modélisation tridimensionnelle : vers une nouvelle approche des sépultures multiples. *ArchéoSciences*, 37 (1), 89-104.
- SACHAU-CARCEL G. (2014). From field recording of plural burials to 3D modelling. Evidence from the catacomb of Sts. Peter and Marcellinus, Italy. *Anthropologie (Brno)*, 52 (3), 285-297.
- SACHS H. (1996). Forensic applications of hair analysis. In: KINTZ P. (éd.). *Drug testing in hair*, CRC Press, Boca Raton, 211-222.
- SAITÔ H., TABETA R., SHOJI A., OZAKI T., ANDO I., MIYATA T. (1984). A high-resolution ^{13}C -NMR study of collagenlike polypeptides and collagen fibrils in solid state studied by the cross-polarization–magic angle-spinning method. Manifestation of conformation-dependent ^{13}C chemical shifts and application to conformational characterization. *Biopolymers*, 23 (11), 2279-2297.
- SAITÔ H., YOKOI M. (1992). A ^{13}C NMR study on collagens in the solid state: hydration/dehydration-induced conformational change of collagen and detection of internal motions. *The Journal of Biochemistry*, 111 (3), 376-382.
- SAITOH M., UZUKA M., SAKAMOTO M. (1970). Human hair cycle. *Journal of Investigative Dermatology*, 54 (1), 65-81.
- SALATI E., DALL'OLIO A., MATSUI E., GAT J.R. (1979). Recycling of water in the Amazon Basin: An isotopic study. *Water Resources Research*, 15 (5), 1250-1258.
- SALESSE K., DUFOUR É., CASTEX D., VELEMÍNSKÝ P., SANTOS F., KUČHAŘOVÁ H., JUN L., BRŮŽEK J. (2013). Life history of the individuals buried in the St. Benedict cemetery (Prague, 15th–18th Centuries): insights from ^{14}C dating and stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$) analysis. *American Journal of Physical Anthropology*, 151 (2), 202-214.
- SALIÈGE J.F., PERSON A., PARIS F. (1995). Preservation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ original ratio and ^{14}C dating of the mineral fraction of human bones from Saharan Tombs, Niger. *Journal of Archaeological Science*, 22 (2), 301-312.
- SÁNCHEZ-MORAL S., LUQUE L., CAÑAVERAS J.-C., SOLER V., GARCIA-GUINEA J., APARICIO A. (2005a). Lime–pozzolana mortars in Roman catacombs: composition, structures and restoration. *Cement and Concrete Research*, 35 (8), 1555-1565.
- SÁNCHEZ-MORAL S., LUQUE L., CUEZVA S., SOLER V., BENAVENTE D., LAIZ L., GONZALEZ J.M., SAIZ-JIMENEZ C. (2005b). Deterioration of building materials in Roman catacombs: The influence of visitors. *Science of The Total Environment*, 349 (1–3), 260-276.
- SCHAAF P., MÜLLER-SOHNUS D. (2002). Strontium and neodymium isotopic study of Libyan Desert Glass: Inherited Pan-African age signatures and new evidence for target material. *Meteoritics & Planetary Science*, 37 (4), 565-576.
- SCHANDELMEIER H., DARBYSHIRE F. (1984). Metamorphic and magmatic events in the Uweinat — Bir Safsaf Uplift (Western Desert/Egypt). *Geologische Rundschau*, 73 (2), 819-831.
- SCHIRMER C. (2014). Food and status in ancient Rome: the evidence from literature. *Pithos*, 13 (1), 1-20.
- SCHOELLER D.A., MINAGAWA M., SLATER R., KAPLAN I.R. (1986). Stable isotopes of carbon, nitrogen and hydrogen in the contemporary north American human food web. *Ecology of Food and Nutrition*, 18 (3), 159-170.
- SCHOENINGER M.J., DE NIRO M.J., TAUBER H. (1983). Stable nitrogen isotope ratios of bone collagen reflect marine and terrestrial components of Prehistoric human diet. *Science*, 220 (4604), 1381-1383.
- SCHOENINGER M.J., DE NIRO 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.** (1985). Trophic level effects on $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in bone collagen and strontium levels in bone mineral. *Journal of Human Evolution*, 14 (5), 515-525.
- SCHOENINGER M.J., MOORE K.** (1992). Bone stable isotope studies in archaeology *Journal of World Prehistory*, 6 (2), 247-296.
- SCHOTSMANS E.M.J., FLETCHER J.N., DENTON J., JANAWAY R.C., WILSON A.S.** (2014). Long-term effects of hydrated lime and quicklime on the decay of human remains using pig cadavers as human body analogues: field experiments. *Forensic Science International*.
- SCHROEDER H.A., TIPTON I.H., NASON A.P.** (1972). Trace metals in man: strontium and barium. *Journal of Chronic Diseases*, 25 (9), 491-517.
- SCHULERT A.R., PEETS E.A., LASZLO D., SPENCER H., CHARLES M., SAMACHSON J.** (1959). Comparative metabolism of strontium and calcium in man. *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 4 (3-4), 144-153.
- SCHULTE A., GENTE M., PIEPER K.** (1999). Post-eruptive changes of electrical resistance values in fissure enamel of premolars. *Caries Research*, 33 (3), 242-247.
- SCHULZ M., LIESE A.D., MAYER-DAVIS E.J., D'AGOSTINO R.B.J., FANG F., SPARKS K.C., WOLEVER T.M.** (2005). Nutritional correlates of dietary glycaemic index: new aspects from a population perspective. *British Journal of Nutrition*, 94 (3), 397-406.
- SCHULZE E.D., GEBAUER G., ZIEGLER H., LANGE O.L.** (1991). Estimates of nitrogen fixation by trees on an aridity gradient in Namibia. *Oecologia*, 88 (3), 451-455.
- SCHURR M.R., POWELL M.L.** (2005). The role of changing childhood diets in the prehistoric evolution of food production: an isotopic assessment. *American Journal of Physical Anthropology*, 126 (3), 278-294.
- SCHWARCZ H.P., MELBYE J., KATZENBERG M.A., KNYF M.** (1985). Stable isotopes in human skeletons of southern Ontario: reconstructing palaeodiet. *Journal of Archaeological Science*, 12 (3), 187-206.
- SCHWARCZ H.P.** (1991). Some theoretical aspects of isotope paleodiet studies. *Journal of Archaeological Science*, 18 (3), 261-275.
- SCHWARCZ H.P., GIBB L., KNYF M.** (1991). Oxygen isotopic analysis as an indicator of place of origin. In: PFEIFFER S., and WILLAMSON R. (éd.). *Snake Hill burial: an investigation of military cemetery from the War of 1812*, Dundurn Press, Toronto.
- SCHWARCZ H.P., DUPRAS T.L., FAIRGRIEVE S.I.** (1999). ^{15}N enrichment in the Sahara: In search of a global relationship. *Journal of Archaeological Science*, 26 (6), 629-636.
- SCHWARCZ H.P.** (2000). Some biochemical aspect of carbon isotopic paleodiet studies. In: AMBROSE S.H., and KATZENBERG M.A. (éd.). *Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*, Kluwer Academic, Plenum Publishers, New York, 189-210.
- SCHWARCZ H.P., SCHOENINGER M.J.** (2011). Stable isotopes of carbon and nitrogen as tracers for paleodiet reconstruction In: BASKARAN M. (éd.). *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Springer-Verlag, Berlin, 725-742.
- SCHWEISSING M.M., GRUPE G.** (2003). 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.
- SCHWEITZER M.H.** (2011). Soft tissue preservation in terrestrial Mesozoic vertebrates. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39 (1), 187-216.
- SCIALLANO M.** (1997). *Poissons de l'antiquité*. Musée d'Istres, Istres, 113 p.
- SCOTT J.A., UNTEREINER W.A.** (2004). Determination of keratin degradation by fungi using keratin azure. *Medical Mycology*, 42 (3), 239-246.
- 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.
- SEIBEL M.J.** (2005). Biochemical markers of bone turnover part I : Biochemistry and variability. *The Clinical Biochemist Reviews*, 26 (4), 97-122.

- SEMMENS B.X., WARD E.J., MOORE J.W., DARIMONT C.T.** (2009). Quantifying inter- and intra-population niche variability using hierarchical bayesian stable isotope mixing models. *PLoS One*, 4 (7), e6187.
- SHAGINA N.B., TOLSTYKH E.I., DEGTEVA M.O., ANSPAUGH L.R., NAPIER B.A.** (2012). Cortical bone resorption rate in elderly persons: Estimates from long-term in vivo measurements of ^{90}Sr in the skeleton. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 54 (3), e411-e418.
- SHAW B.J., SUMMERHAYES G.R., BUCKLEY H.R., BAKER J.A.** (2009). The use of strontium isotopes as an indicator of migration in human and pig Lapita populations in the Bismarck Archipelago, Papua New Guinea. *Journal of Archaeological Science*, 36 (4), 1079-1091.
- SHEMESH A.** (1990). Crystallinity and diagenesis of sedimentary apatites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54 (9), 2433-2438.
- SHERWOOD L.** (2006). *Physiologie humaine*. De Boeck, Bruxelles, 629 p.
- SHIN J.Y.** (2011). Stable isotope chemistry of bone collagen and carbonate assessed by bone density fractionation. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 32 (10), 3618-3623.
- SHIN J.Y., HEDGES R.E.M.** (2012). Diagenesis in bone and enamel apatite carbonate; the potential of density separation to assess the original composition. *Journal of Archaeological Science*, 39 (4), 1123-1130.
- SHOLTO-DOUGLAS A.D., FIELD J.G., JAMES A.G., VAN DER MERWE N.J.**, 1991. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ isotope ratios in the southern Benguela ecosystem: indicators of food web relationships among different size-classes of plankton and pelagic fish; differences between fish muscle and bone collagen tissues. *Marine Ecology Progress Series*, 78 (1), 23-31.
- SILLEN A., KAVANAGH M.** (1982). Strontium and paleodietary research: a review. *American Journal of Physical Anthropology*, 25 (S3), 67-90.
- 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. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62 (14), 2463-2473.
- SILVA D.R., MIZUSAKI A.M.P., MILANI E.J., PIMENTEL M.** (2012a). Depositional ages of Paleozoic and Mesozoic pre-rift supersequences of the Recôncavo Basin in northeastern Brazil: A Rb–Sr radiometric study of sedimentary rocks. *Journal of South American Earth Sciences*, 37 (0), 13-24.
- SILVA D.R.A., MIZUSAKI A.M.P., MILANI E.J., PIMENTEL M., KAWASHITA K.** (2012b). Whole-rock geochemistry and Sr-Nd isotopic composition of the pre-rift sequence of the Camamu Basin, northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 39 (1), 59-71.
- SIMMER J.P., FINCHAM A.G.** (1995). Molecular mechanisms of dental enamel formation. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*, 6 (2), 84-108.
- SIRIGNANO C., GRAU SOLOGESTOA I., RICCI P., GARCÍA-COLLADO M.I., ALTIERI S., QUIRÓS CASTILLO J.A., LUBRITTO C.** (2014). Animal husbandry during Early and High Middle Ages in the Basque Country (Spain). *Quaternary International* (0).
- SMITH C.E.** (1998). Cellular and chemical events during enamel maturation. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*, 9 (2), 128-161.
- SMITH C.E., CHONG D.L., BARTLETT J.D., MARGOLIS H.C.** (2005). Mineral acquisition rates in developing enamel on maxillary and mandibular incisors of rats and mice: implications to extracellular acid loading as apatite crystals mature. *Journal of Bone and Mineral Research*, 20 (2), 240-249.
- SMITH C.I., NIELSEN–MARSH C.M., JANS M.M.E., ARTHUR P., NORD A.G., COLLINS M.J.** (2002). The strange case of Apigliano: early ‘fossilization’ of medieval bone in southern Italy. *Archaeometry*, 44 (3), 405-415.
- SMITH E.L., HILL R.L., LEHMAN I.R., LEFKOWITZ R.J., HANDLER P., WHITE A.** (1983). *Principles of biochemistry: Mammalian biochemistry*. McGraw-Hill Book Company, New York, 759 p.
- SØNJU CLASEN A.B., RUYTER I.E.** (1997). Quantitative determination of type A and type B carbonate in human deciduous and permanent enamel by means of Fourier transform infrared spectrometry. *Advances in Dental Research*, 11 (4), 523-527.

- SONNTAG C., MÜNNICH K.O., JACOB H., ROZANSKI K.** (1983). Variations of Deuterium and Oxygen-18 in Continental Precipitation and Groundwater, and Their Causes. In: STREET-PERROTT A., BERAN M., and RATCLIFFE R. (éd.). *Variations in the Global Water Budget*, Springer Netherlands, 107-124.
- SOUISSI F., JEMMALI N., SOUISSI R., DANDURAND J.L.** (2013). REE and isotope (Sr, S, and Pb) geochemistry to constrain the genesis and timing of the F-(Ba-Pb-Zn) ores of the Zaghouan District (NE Tunisia). *Ore Geology Reviews*, 55 (0), 1-12.
- SPANGENBERG J.E., VENNEMANN T.W.** (2008). The stable hydrogen and oxygen isotope variation of water stored in polyethylene terephthalate (PET) bottles. *Rapid communications in mass spectrometry*, 22 (5), 672-676.
- SPONHEIMER M., LEE-THORP J.A.** (1999). Alteration of enamel carbonate environments during fossilization. *Journal of Archaeological Science*, 26 (2), 143-150.
- SPURR M.S.** (1983). The cultivation of millet in Roman Italy. *Papers of the British School at Rome*, 51 (1), 1-15.
- SPURR M.S.** (1986). *Arable cultivation in Roman Italy: c. 200 BC-AD 100*. Society for the Promotion of Roman Studies, London, 173 p.
- STAFFORD J.T.W., HARE P.E., CURRIE L., JULL A.J.T., DONAHUE D.J.** (1991). Accelerator radiocarbon dating at the molecular level. *Journal of Archaeological Science*, 18 (1), 35-72.
- STEELE K.W., DANIEL R.M.** (1978). Fractionation of nitrogen isotopes by animals: a further complication to the use of variations in the natural abundance of ¹⁵N for tracer studies. *The Journal of Agricultural Science*, 90 (1), 7-9.
- STENN K.S., PAUS R.** (2001). Controls of hair follicle cycling. *Physiological Reviews*, 81 (1), 449-494.
- STERN R.J., KRÖNER A., BENDER R., REISCHMANN T., DAWOUD A.S.** (1994). Precambrian basement around Wadi Halfa, Sudan: a new perspective on the evolution of the East Saharan Craton. *Geologische Rundschau*, 83 (3), 564-577.
- STEVENS R.E., LIGHTFOOT E., ALLEN T., HEDGES R.E.M.** (2012). Palaeodiet at Eton College Rowing Course, Buckinghamshire: isotopic changes in human diet in the Neolithic, Bronze Age, Iron Age and Roman periods throughout the British Isles. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 4 (3), 167-184.
- STEVENS R.E., LIGHTFOOT E., HAMILTON J., CUNLIFFE B.W., HEDGES R.E.M.** (2013). One for the master and one for the dame: stable isotope investigations of Iron Age animal husbandry in the Danebury Environs. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 5 (2), 95-109.
- STEWART B.W., CAPO R.C., CHADWICK O.A.** (2001). Effects of rainfall on weathering rate, base cation provenance, and Sr isotope composition of Hawaiian soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65 (7), 1087-1099.
- STEWART G.R., TURNBULL M.H., SCHMIDT S., ERSKINE P.D.** (1995). ¹³C natural abundance in plant communities along a rainfall gradient: A biological integrator of water availability. *Functional Plant Biology*, 22 (1), 51-55.
- STEWART K., ROGERS N.** (1996). Mantle plume and lithosphere contributions to basalts from southern Ethiopia. *Earth and Planetary Science Letters*, 139 (1-2), 195-211.
- STIEFEL A., BINUS W.** (1991). Schmelzreifung und Zahndurchbruch. *Deutsche Stomatologie*, 41 (9), 337-340.
- STINER M.C., KUHN S.L., WEINER S., BAR-YOSEF O.** (1995). Differential burning, recrystallization, and fragmentation of archaeological bone. *Journal of Archaeological Science*, 22 (2), 223-237.
- STINER M.C., KUHN S.L., SUROVELL T.A., GOLDBERG P., MEIGNEN L., WEINER S., BAR-YOSEF O.** (2001). Bone preservation in Hayonim cave (Israel): a macroscopic and mineralogical study. *Journal of Archaeological Science*, 28 (6), 643-659.
- STUART-MACADAM P., DETTWYLER K.** (1995). *Breastfeeding: biocultural perspectives*. Aldine de Gruyter, Hawthorne, New York.
- SUAYAH I.B., ROGERS J.J.W., DABBAGH M.E.** (1991). High-Ti continental tholeiites from the Aznam trough, northwestern Saudi Arabia: evidence of "abortive" rifting in the "embryonic" stage of Red Sea opening. *Tectonophysics*, 191 (1-2), 75-87.

- SUGA S.** (1982). Progressive mineralization pattern of developing enamel during the maturation stage. *Journal of Dental Research*, 61 (Suppl.), 1532-1542.
- SUGA S.** (1983). Comparative histology of the progressive mineralization pattern of developing enamel. In: SUGA S. (éd.). *Mechanisms of tooth enamel formation*, Quintessence Publishing, Tokyo, 167–203.
- SUROVELL T.A.** (2000). Radiocarbon dating of bone apatite by step heating. *Geoarchaeology*, 15 (6), 591-608.
- SUROVELL T.A., STINER M.C.** (2001). Standardizing infra-red measures of bone mineral crystallinity: an experimental approach. *Journal of Archaeological Science*, 28 (6), 633-642.
- SYDNEY-ZAX M., MAYER I., DEUTSCH D.** (1991). Carbonate content in developing human and bovine enamel. *Journal of Dental Research*, 70 (5), 913-916.
- SYKES N.J., BAKER K.H., CARDEN R.F., HIGHAM T.F.G., HOELZEL A.R., STEVENS R.E.** (2011). New evidence for the establishment and management of the European fallow deer (*Dama dama dama*) in Roman Britain. *Journal of Archaeological Science*, 38 (1), 156-165.
- TAFFOREAU P., BENTALEB I., JAEGER J.-J., MARTIN C.** (2007). Nature of laminations and mineralization in rhinoceros enamel using histology and X-ray synchrotron microtomography: Potential implications for palaeoenvironmental isotopic studies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 246 (2–4), 206-227.
- TAJIMA M., HAMADA C., ARAI T., MIYAZAWA M., SHIBATA R., ISHINO A.** (2007). Characteristic features of Japanese women's hair with aging and with progressing hair loss. *Journal of Dermatological Science*, 45 (2), 93-103.
- TAUBER H.** (1981). ¹³C evidence for dietary habits of prehistoric man in Denmark. *Nature*, 292 (5821), 332-333.
- TEN BOSCH J.J., FENNIS-IE Y., VERDENSCHOT E.H.** (2000). Time-dependent decrease and seasonal variation of the porosity of recently erupted sound dental enamel in vivo. *Journal of Dental Research*, 79 (8), 1556-1559.
- TERAKADO Y., NOHDA S.** (1993). Rb/Sr dating of acidic rocks from the middle part of the Inner Zone of southwest Japan: tectonic implications for the migration of the Cretaceous to Paleogene igneous activity. *Chemical Geology*, 109 (1–4), 69-87.
- TERMINE J.D., POSNER A.S.** (1966). Infrared analysis of rat bone: age dependency of amorphous and crystalline mineral fractions. *Science*, 153 (3743), 1523–1525.
- TERMINE J.D.** (1993). Bone matrix proteins and mineralization process. In: FAVUS M.J. (éd.). *Primer on the metabolic bone disorders of mineral metabolism*, Raven Press, New York, 21-25.
- TIESZEN L.L., BOUTTON T.W.** (1989). Stable carbon isotopes in terrestrial ecosystem research. In: RUNDEL P.W., EHLERINGER J.R., and NAGY K.A. (éd.). *Stable Isotopes in Ecological Research*, Springer New York, 167-195.
- 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., FAGRE T.** (1993). Effect of diet quality and composition on the isotopic composition of respiratory CO₂, bone collagen, bioapatite, and soft tissues. In: LAMBERT J.B., and GRUPE G. (éd.). *Prehistoric human bone Archaeology at the molecular level*, Springer, Berlin, 121-155.
- TILTON G.R., SCHREYER W., SCHERTL H.P.** (1989). Pb-Sr-Nd isotopic behavior of deeply subducted crustal rocks from the Dora Maira Massif, Western Alps, Italy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53 (6), 1391-1400.
- TOME D.** (1995). *Des macro-nutriments alimentaires à la santé de l'homme*. Institut Danone, Bruxelles, 106 p.
- TORTORA G.J., DERRICKSON B.** (2007). *Principes d'anatomie et de physiologie*. De Boeck, Bruxelles, 1246 p.
- TOUCHETTE B.W., BURKHOLDER J.M.** (2000). Overview of the physiological ecology of carbon metabolism in seagrasses. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 250 (1-2), 169-205.

- TOUZEAU A., AMIOT R., Blichert-Toft J., Flandrois J.-P., Fourel F., Grossi V., Martineau F., Richardin P., Lécuyer C.** (2014). Diet of ancient Egyptians inferred from stable isotope systematics. *Journal of Archaeological Science*, 46 (1), 114-124.
- TRUEMAN C.N., Privat K., Field J.** (2008). Why do crystallinity values fail to predict the extent of diagenetic alteration of bone mineral? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 266 (3–4), 160-167.
- TSUTAYA T., Sawada J., Dodo Y., Mukai H., Yoneda M.** (2013). Isotopic evidence of dietary variability in subadults at the Usu-moshiri site of the Epi-Jomon culture, Japan. *Journal of Archaeological Science*, 40 (11), 3914-3925.
- TSUTAYA T., YONEDA M.** (2013). WARN: an R package for quantitative reconstruction of weaning ages in archaeological populations using bone collagen nitrogen isotope ratios. *arXiv:13042468 [q-bio.TO]*.
- 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.
- TURNER B.L., Kamenov G.D., Kingston J.D., Armelagos G.J.** (2009). Insights into immigration and social class at Machu Picchu, Peru based on oxygen, strontium, and lead isotopic analysis. *Journal of Archaeological Science*, 36 (2), 317-332.
- TURNER C.H.** (1991). Homeostatic control of bone structure: An application of feedback theory. *Bone*, 12 (3), 203-217.
- TUROSS N., Fogel M.L., Hare P.E.** (1988). Variability in the preservation of the isotopic composition of collagen from fossil bone. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52 (4), 929-935.
- TUROSS N., Behrensmeyer A.K., Eanes E.D.** (1989). Strontium increases and crystallinity changes in taphonomic and archaeological bone. *Journal of Archaeological Science*, 16 (6), 661-672.
- TUROSS N.** (2002). Alterations in fossil collagen. *Archaeometry*, 44 (3), 427-434.
- TÜTKEN T., Vennemann T.W.** (2011). Fossil bones and teeth: Preservation or alteration of biogenic compositions? Preface. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 310 (1-2), 1-8.
- TÜTKEN T., Vennemann T.W., Pfretzschner H.-U.** (2011). Nd and Sr isotope compositions in modern and fossil bones – Proxies for vertebrate provenance and taphonomy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75 (20), 5951-5970.
- TYKOT R.H., Falabella F., Planella M.T., Aspillaga E., Sanhueza L., Becker C.** (2009). Stable isotopes and archaeology in central Chile: methodological insights and interpretative problems for dietary reconstruction. *International Journal of Osteoarchaeology*, 19 (2), 156-170.
- UNDERWOOD E.J.** (1977). *Trace elements in human and animal nutrition*. Academic Press, London, 545 p.
- URZEL V.** (2014). *Apport de la résonance magnétique nucléaire des solides à la caractérisation chimique et à la datation des os en anthropologie médico-légale*. Université de Bordeaux, 420 p.
- VALENTIN J.** (2002). Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values: ICRP Publication 89. *Annals of the ICRP*, 32 (3–4), 1-277.
- VAN DER LINDE C.** (2008). *Roman catacombs and demography: a case study of the Liberian region in the catacombs of St Callixtus in Rome*. Universiteit Utrecht., 232 p.
- VAN DER MERWE N.J.** (1982). Carbon isotopes, photosynthesis, and archaeology. *American Scientist*, 70 (6), 596–606.
- VAN DER MERWE N.J., Lee-Thorp J.A., Thackeray J.F., Hall-Martin A., Kruger F.J., Coetzee H., Bell R.H.V., Lindeque M.** (1990). Source-area determination of elephant ivory by isotopic analysis. *Nature*, 346 (6286), 744-746.
- VAN KLINKEN G.J., Hedges R.E.M.** (1995). Experiments on collagen–humic interactions: speed of humic uptake, and effects of diverse chemical treatments. *Journal of Archaeological Science*, 22 (2), 263-270.
- VAN KLINKEN G.J.** (1999). Bone collagen quality indicators for palaeodietary and radiocarbon measurements. *Journal of Archaeological Science*, 26 (6), 687-695.

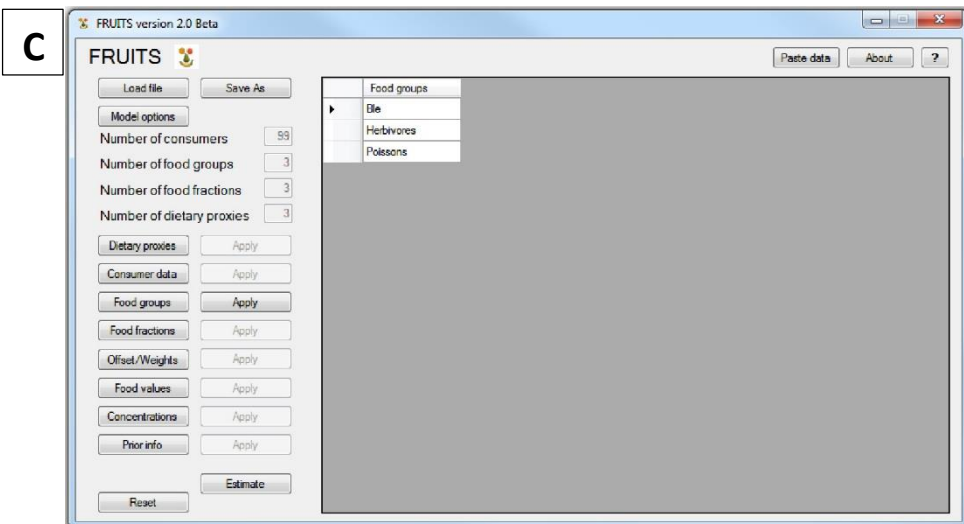
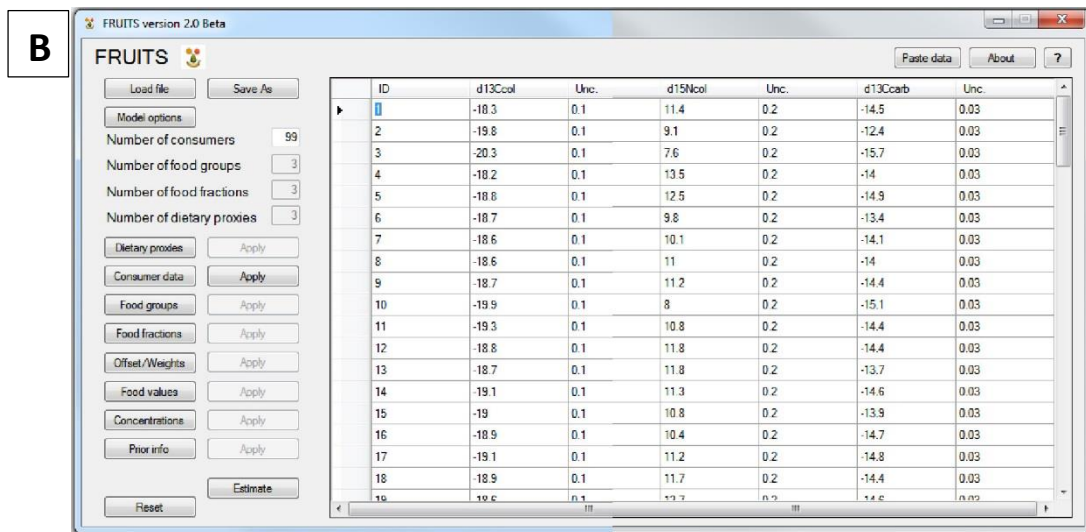
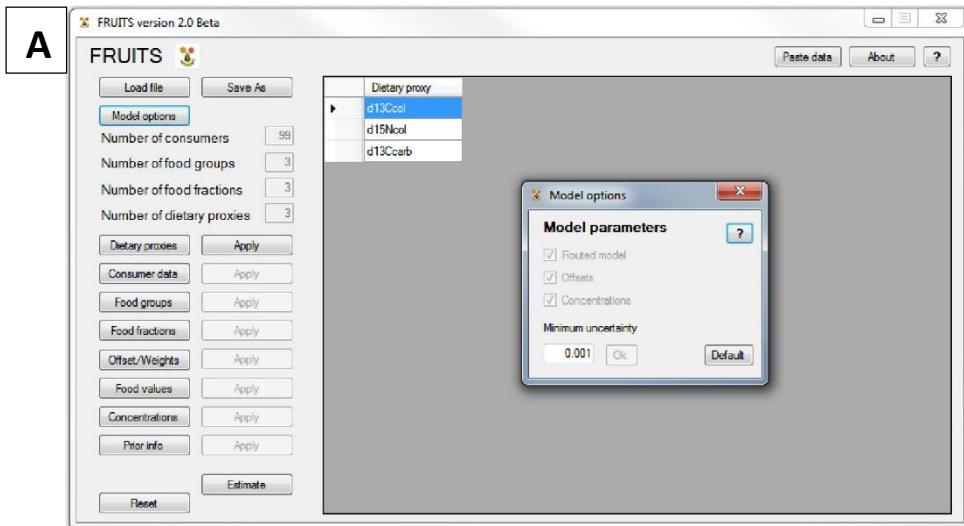
- VAN KLINKEN G.J., RICHARDS M.P., HEDGES R.E.M.** (2000). An overview of causes for stable isotopic variation in past European human populations: environmental, ecophysiological and cultural effects. In: AMBROSE S.H., and KATZENBERG M.A. (éd.). *Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*, Kluwer Academic, Plenum Publishers, New York, 39-64.
- VAN NESTE D.** (2004). Thickness, medullation and growth rate of female scalp hair are subject to significant variation according to pigmentation and scalp location during ageing. *14* (1), 5.
- VAN NESTE D.** (2006). Female patients complaining about hair loss: documentation of defective scalp hair dynamics with contrast-enhanced phototrichogram. *Skin Research and Technology*, *12* (2), 83-88.
- VAN OERS R.F.M., RUIMERMAN R., TANCK E., HILBERS P.A.J., HUISKES R.** (2008). A unified theory for osteonal and hemi-osteonal remodeling. *Bone*, *42* (2), 250-259.
- VAN SCOTT E.J., REINERTSON R.P., STEINMULLER R.** (1957). The growing hair roots of the human scalp and morphologic changes therein following amethopterin therapy. *Journal of Investigative Dermatology*, *29* (3), 197-204.
- VANDEGINSTE V., JOHN C.M., MANNING C.** (2013). Interplay between depositional facies, diagenesis and early fractures in the Early Cretaceous Habshan Formation, Jebel Madar, Oman. *Marine and Petroleum Geology*, *43* (0), 489-503.
- VASS A.A., BARSHICK S.-A., SEGA G., CATON J., SKEEN J.T., LOVE J.C., SYNSTELIEN J.A.** (2002). Decomposition chemistry of human remains: a new methodology for determining the postmortem interval. *Journal of Forensic Sciences*, *47* (3), 542-553.
- VEENINGEN R., RICE A.H.N., SCHNEIDER D.A., GRASEMANN B.** (2015). Thermochronology and geochemistry of the Pan-African basement below the Sab'atayn Basin, Yemen. *Journal of African Earth Sciences*, *102* (0), 131-148.
- VIDAL P., DENIEL C., VELLUTINI P.J., PIGUET P., COULON C., VINCENT J., AUDIN J.** (1991). Changes of mantle sources in the course of a rift evolution: The Afar Case. *Geophysical Research Letters*, *18* (10), 1913-1916.
- VIERO A.** (2014). *Utilisation de substances blanches dans le monde romain (Ier siècle a.C. – V^e siècle p.C.) : Identification et interprétation en contexte funéraire de traitements spécifiques*. Université Bordeaux Montaigne, 232 p.
- VIGUET-CARRIN S., GARNERO P., DELMAS P.D.** (2006). The role of collagen in bone strength. *Osteoporosis International*, *17* (3), 319-336.
- VIKA E., THEODOROPOULOU T.** (2012). Re-investigating fish consumption in Greek antiquity: results from delta $\delta^{13}\text{C}$ and delta $\delta^{15}\text{N}$ analysis from fish bone collagen. *Journal of Archaeological Science*, *39* (5), 1618-1627.
- VILLASECA C., MERINO E., OYARZUN R., OREJANA D., PÉREZ-SOBA C., CHICHARRO E.** (2014). Contrasting chemical and isotopic signatures from Neoproterozoic metasedimentary rocks in the Central Iberian Zone (Spain) of pre-Variscan Europe: Implications for terrane analysis and Early Ordovician magmatic belts. *Precambrian Research*, *245* (0), 131-145.
- VIRLOUVET C.** (1995a). *Tessera frumentaria : les procédures de la distribution de blé public à Rome*. École française de Rome, Rome.
- VIRLOUVET C.** (1995b). La consommation de céréales dans la Rome du Haut-Empire. Les difficultés d'une approche quantitative. *Histoire & Mesure*, *10* (3-4), 261-275.
- VOET D., VOET J.G.** (2005). *Biochimie*. De Boeck Université, Bruxelles, 1600 p.
- VOGEL E.R., CROWLEY B.E., KNOTT C.D., BLAKELY M.D., LARSEN M.D., DOMINY N.J.** (2012). A noninvasive method for estimating nitrogen balance in free-ranging primates. *International Journal of Primatology*, *33* (3), 567-587.
- VOGEL J.C., VAN DER MERWE N.J.** (1977). Isotopic evidence for early maize cultivation in New York State. *American Antiquity*, *42* (2), 238-242.
- VOGEL J.C.**, (1978). Isotopic assessment of the dietary habits of ungulates. *South African Journal of Science*, *74* (8), 298-301.
- VOGEL J.C., EGLINGTON B., AURET J.M.** (1990). Isotope fingerprints in elephant bone and ivory. *Nature*, *346* (6286), 747-749.

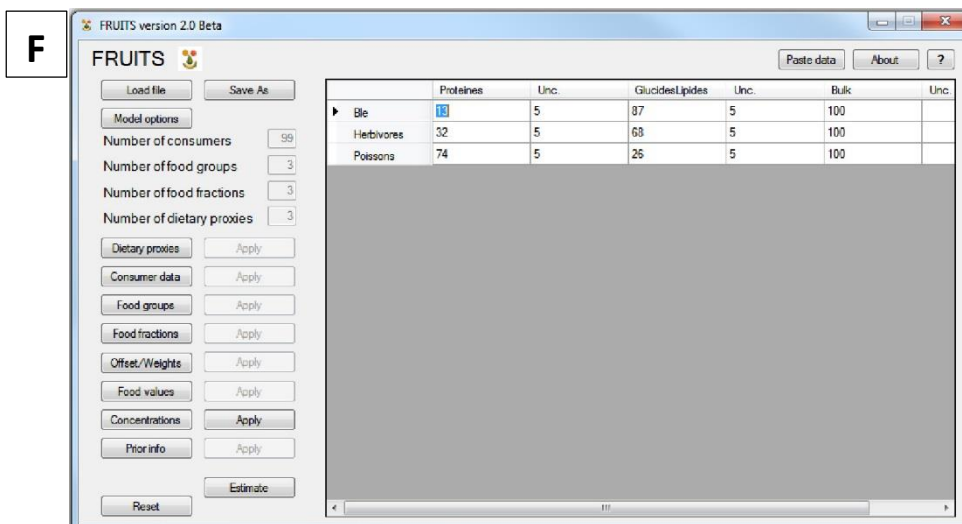
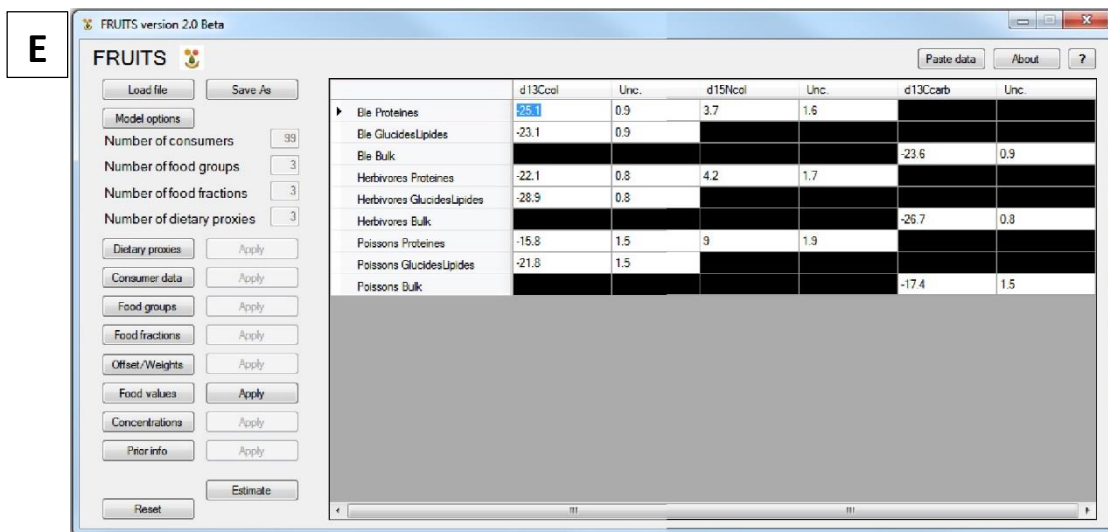
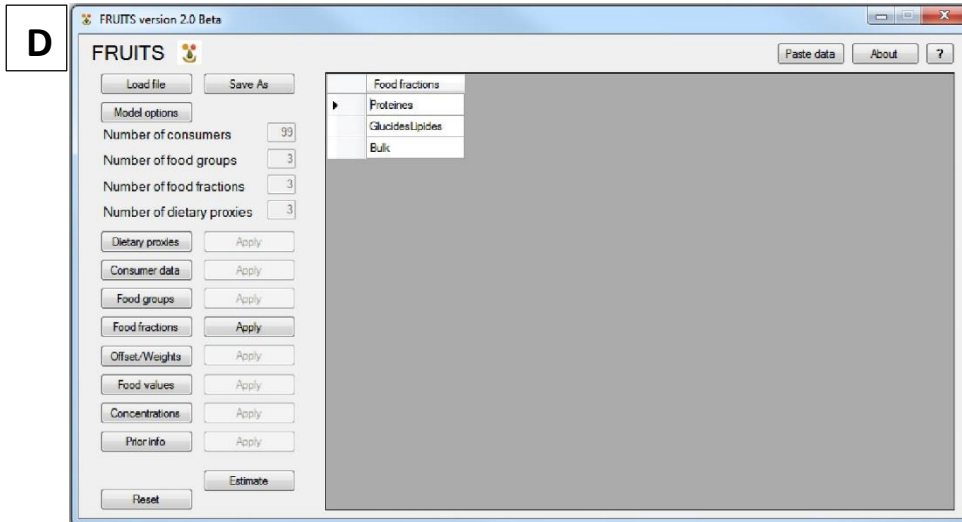
- VOLKER F., ALTHERR R., JOCHUM K.-P., MCCULLOCH M.T.** (1997). Quaternary volcanic activity of the southern Red Sea: new data and assessment of models on magma sources and Afar plume-lithosphere interaction. *Tectonophysics*, 278 (1–4), 15-29.
- VOLLMER R.** (1976). Rb-Sr and U-Th-Pb systematics of alkaline rocks: the alkaline rocks from Italy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40 (3), 283-295.
- WANG L., SCHJOERRING J.K.** (2012). Seasonal variation in nitrogen pools and ¹⁵N/¹³C natural abundances in different tissues of grassland plants. *Biogeosciences*, 9 (5), 1583-1595.
- WANG Y.** (2012). *Élaboration de modèles collagène/apatite pour l'étude de la biominéralisation du tissu osseux*. Université Pierre et Marie Curie, 223 p.
- WANG Y., VON EUW S., FERNANDES F.M., CASSAIGNON S., SELMANE M., LAURENT G., PEHAU-ARNAUDET G., COELHO C., BONHOMME-COURY L., GIRAUD-GUILLE M.-M., BABONNEAU F., AZAÏS T., NASSIF N.** (2013). Water-mediated structuring of bone apatite. *Nat Mater*, 12 (12), 1144-1153.
- WANNER H., SOLOMINA O., GROSJEAN M., RITZ S.P., JETEL M.** (2011). Structure and origin of Holocene cold events. *Quaternary Science Reviews*, 30 (21–22), 3109-3123.
- WARD W.H., LUNDGREN H.P.** (1954). The formation, composition, and properties of the keratins. *Advances in protein chemistry*, 9 (1), 243-297.
- 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.
- WATERS-RIST A.L., KATZENBERG M.A.** (2009). The effect of growth on stable nitrogen isotope ratios in subadult bone collagen. *International Journal of Osteoarchaeology*.
- 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.
- WAWRZENITZ N., ROMER R.L., OBERHÄNSLI R., DONG S.** (2006). Dating of subduction and differential exhumation of UHP rocks from the Central Dabie Complex (E-China): Constraints from microfabrics, Rb–Sr and U–Pb isotope systems. *Lithos*, 89 (1–2), 174-201.
- WEBB E., WHITE C., LONGSTAFFE F.** (2013). Dietary shifting in the Nasca Region as inferred from the carbon- and nitrogen-isotope compositions of archaeological hair and bone. *Journal of Archaeological Science*, 40 (1), 129-139.
- WEBB E.C., WHITE C.D., LONGSTAFFE F.J.** (2014). Investigating inherent differences in isotopic composition between human bone and enamel bioapatite: implications for reconstructing residential histories. *Journal of Archaeological Science*, 50 (0), 97-107.
- WEINER S., BAR-YOSEF O.** (1990). States of preservation of bones from prehistoric sites in the Near East: A survey. *Journal of Archaeological Science*, 17 (2), 187-196.
- WELKER J.M., WOOKEY P.A., PARSONS A.N., PRESS M.C., CALLAGHAN T.V., LEE J.A.** (1993). Leaf carbon isotope discrimination and vegetative responses of *Dryas octopetala* to temperature and water manipulations in a High Arctic polar semi-desert, Svalbard. *Oecologia*, 95 (4), 463-469.
- WENTWORTH RINNE K.** (2015). *Aquae Urbis Romae: the waters of the city of Rome* - <http://www3.iath.virginia.edu/waters/>.
- WESTGATE G.E., BOTCHKAREVA N.V., TOBIN D.J.** (2013). The biology of hair diversity. *International Journal of Cosmetic Science*, n/a-n/a.
- WHITE C.D., SCHWARCZ H.P.** (1994). Temporal trends in stable isotope for Nubian mummy tissues. *American Journal of Physical Anthropology*, 93 (2), 165-187.
- WHITE C.D., ARMELAGOS G.J.** (1997). Osteopenia and stable isotope ratios in bone collagen of Nubian female mummies. *American Journal of Physical Anthropology*, 103 (2), 185-199.
- WHITE C.D., SPENCE M.W., STUART-WILLIAMS H.L., SCHWARCZ H.P.** (1998). Oxygen isotopes and the identification of geographical origins: the valley of Oaxaca versus the valley of Mexico. *Journal of Archaeological Science*, 25 (7), 643-655.

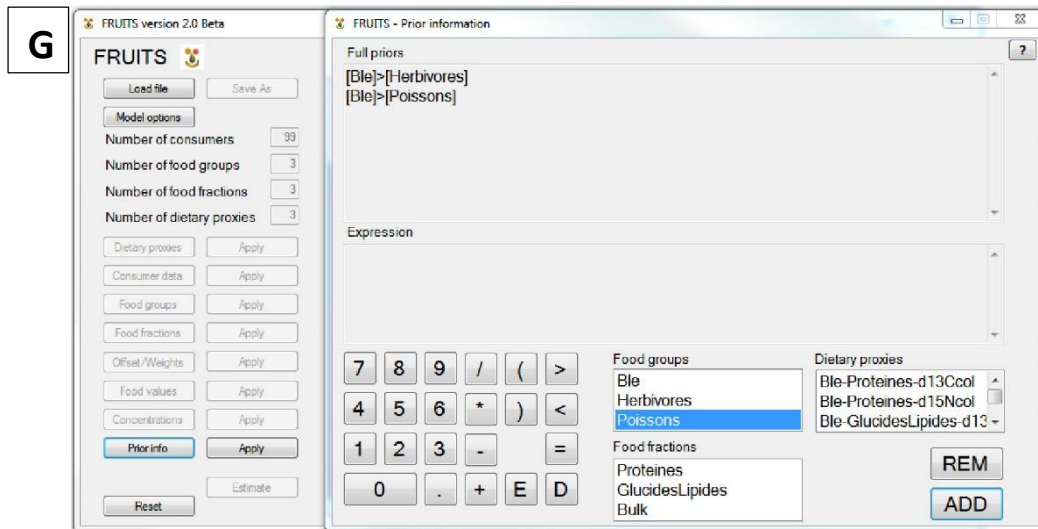
- WHITE C.D., LONGSTAFFE F.J., LAW K.R.** (2004). Exploring the effects of environment, physiology and diet on oxygen isotope ratios in ancient Nubian bones and teeth. *Journal of Archaeological Science*, 31 (2), 233-250.
- WHITE W.M., HOFMANN A.W.** (1982). Sr and Nd isotope geochemistry of oceanic basalts and mantle evolution. *Nature*, 296 (5860), 821-825.
- WILKINS J.M.** (1993). Social status and fish in Greece and Rome. In: MARS G., and MARS V. (éd.). *Food culture and history: proceedings of the London food seminar I*, London Food Seminar, London, 191-203.
- WILLIAMS D.G., GEMPKO V., FRAVOLINI A., LEAVITT S.W., WALL G.W., KIMBALL B.A., PINTER P.J., LAMORTE R., OTTMAN M.** (2001). Carbon isotope discrimination by *Sorghum bicolor* under CO₂ enrichment and drought. *New Phytologist*, 150 (2), 285-293.
- WILLIAMS J.S., WHITE C.D., LONGSTAFFE F.J.** (2005). Trophic level and macronutrient shift effects associated with the weaning process in the postclassic Maya. *American Journal of Physical Anthropology*, 128 (4), 781-790.
- WILLIAMS L.J.** (2008). *Investigating seasonality of death at Kellis 2 cemetery using solar alignment and isotopic analysis of mummified tissues*. The University of Western Ontario, 286 p.
- WILLIAMS L.J., WHITE C.D., LONGSTAFFE F.J.** (2011). Improving stable isotopic interpretations made from human hair through reduction of growth cycle error. *American Journal of Physical Anthropology*, 145 (1), 125-136.
- WILSON A.S., DIXON R.A., EDWARDS H.G.M., FARWELL D.W., JANAWAY R.C., POLLARD A.M., TOBIN D.J.** (2001). Towards an understanding of the interaction of hair with the depositional environment. *Chungara, Revista de Antropología Chilena*, 33 (2), 293-296.
- WILSON A.S., DODSON H.I., JANAWAY R.C., POLLARD A.M., TOBIN D.J.** (2007). Selective biodegradation in hair shafts derived from archaeological, forensic and experimental contexts. *British Journal of Dermatology*, 157 (3), 450-457.
- WILSON A.S., TOBIN D.J.** (2010). Hair after death. In: TRÜEB R.M., and TOBIN D.J. (éd.). *Aging hair*, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 249-261.
- WINKLER F.J., WIRTH E., LATZKO E., SCHMIDT H.L., HOPPE W., WIMMER P.**, (1978). Influence of growth conditions and development values in different organs and constituents of wheat, oat, and maize. *Pflanzenphysiologisches Bd*, 87 (1), 255-263.
- WÖLTGENS J.H., BERVOETS T.J., WITJES F., DRIESSENS F.C.** (1981). Changes in the composition of the enamel of human premolar teeth shortly after eruption. *Archives of Oral Biology*, 26 (9), 717-719.
- WÖLTGENS J.H.M., VINGERLING P.A., WITJES F.** (1980). Chemical evidence of two separate apatite phases in human enamel. *Archives of Oral Biology*, 25 (6), 435-436.
- WONG V.N.L., DALAL R.C., GREENE R.S.B.** (2009). Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: A laboratory incubation. *Applied Soil Ecology*, 41 (1), 29-40.
- WOTTE T., ÁLVARO J.J., SHIELDS G.A., BROWN B., BRASIER M.D., VEIZER J.** (2007). C-, O- and Sr-isotope stratigraphy across the Lower–Middle Cambrian transition of the Cantabrian Zone (Spain) and the Montagne Noire (France), West Gondwana. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 256 (1–2), 47-70.
- WRIGHT L.E., SCHWARCZ H.P.** (1996). Infrared and isotopic evidence for diagenesis of bone apatite at Dos Pilas, Guatemala: palaeodietary implications. *Journal of Archaeological Science*, 23 (6), 933-944.
- WRIGHT L.E., SCHWARCZ H.P.** (1998). Stable carbon and oxygen isotopes in human tooth enamel: identifying breastfeeding and weaning in Prehistory. *American Journal of Physical Anthropology*, 106 (1), 1-18.
- WRIGHT L.E., SCHWARCZ H.P.** (1999). Correspondence between stable carbon, oxygen and nitrogen isotopes in human tooth enamel and dentine: infant diets at Kaminaljuyú. *Journal of Archaeological Science*, 26 (9), 1159-1170.
- 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.

- YANAGI T. (2011). *Arc volcano of Japan: generation of continental crust from the mantle*. Springer, Heidelberg, 123 p.
- 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 Biomaterialia*, 5 (6), 2169-2177.
- YODER C.J., BARTELINK E.J. (2010). Effects of different sample preparation methods on stable carbon and oxygen isotope values of bone apatite: a comparison of two treatment protocols. *Archaeometry*, 52 (1), 115 - 130.
- 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.
- YUN S.-I., RO H.-M. (2009). Natural ^{15}N abundance of plant and soil inorganic-N as evidence for over-fertilization with compost. *Soil Biology and Biochemistry*, 41 (7), 1541-1547.
- YURTSEVER Y., GAT J.R. (1981). Atmospheric waters. In: GAT J.R., and GONFIANTINI R. (éd.). *Stable isotope hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle* International Atomic Energy Agency, Vienne, 103-142.
- ZANOLLI C., BONDIOLI L., MANNI F., ROSSI P., MACCHIARELLI R. (2011). Gestation length, mode of delivery, and neonatal line-thickness variation. *Human Biology*, 83 (6), 695-713.
- ZAZZO A. (2001). *Validation méthodologique de l'utilisation des compositions isotopiques (^{13}C , ^{18}O) des bioapatites fossiles pour la reconstitution des paléoenvironnements continentaux*. Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- ZAZZO A., LECUYER C., MARIOTTI A. (2004a). Experimentally-controlled carbon and oxygen isotope exchange between bioapatites and water under inorganic and microbially-mediated conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68 (1), 1-12.
- ZAZZO A., LÉCUYER C., SHEPPARD S.M., GRANDJEAN P., MARIOTTI A. (2004b). Diagenesis and the reconstruction of paleoenvironments: a method to restore original $\delta^{18}\text{O}$ values of carbonate and phosphate from fossil tooth enamel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68 (10), 2245-2258.
- 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., BALASSE M., PATTERSON W.P. (2006). The reconstruction of mammal individual history: refining high-resolution isotope record in bovine tooth dentine. *Journal of Archaeological Science*, 33 (8), 1177-1187.
- ZAZZO A., BALASSE M., PASSEY B.H., MOLONEY A.P., MONAHAN F.J., SCHMIDT O. (2010). The isotope record of short- and long-term dietary changes in sheep tooth enamel: implications for quantitative reconstruction of paleodiets. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74 (12), 3571-3586.
- ZAZZO A. (2014). Bone and enamel carbonate diagenesis: a radiocarbon prospective. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 416, 168-178.
- ZHU P., XU J., SAHAR N., MORRIS M.D., KOHN D.H., RAMAMOORTHY A. (2009). Time-resolved dehydration-induced structural changes in an intact bovine cortical bone revealed by solid-state NMR spectroscopy. *Journal of the American Chemical Society*, 131 (47), 17064-17065.
- ZIMMERMAN J., EHLERINGER J. (1990). Carbon isotope ratios are correlated with irradiance levels in the Panamanian orchid *Catasetum viridiflavum*. *Oecologia*, 83 (2), 247-249.
- ZINDLER A., HART S. (1986). Chemical Geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14 (1), 493-571.
- ZITELLI F. (2013). *Étude de la cinétique de dépôt de corps par analyses physico-chimiques des parois de tombes. Cas de la catacombe des Saints Pierre et Marcellin (Rome Ier-IIIème s. ap. J.-C.)*. Université Bordeaux Montaigne, 30 p.

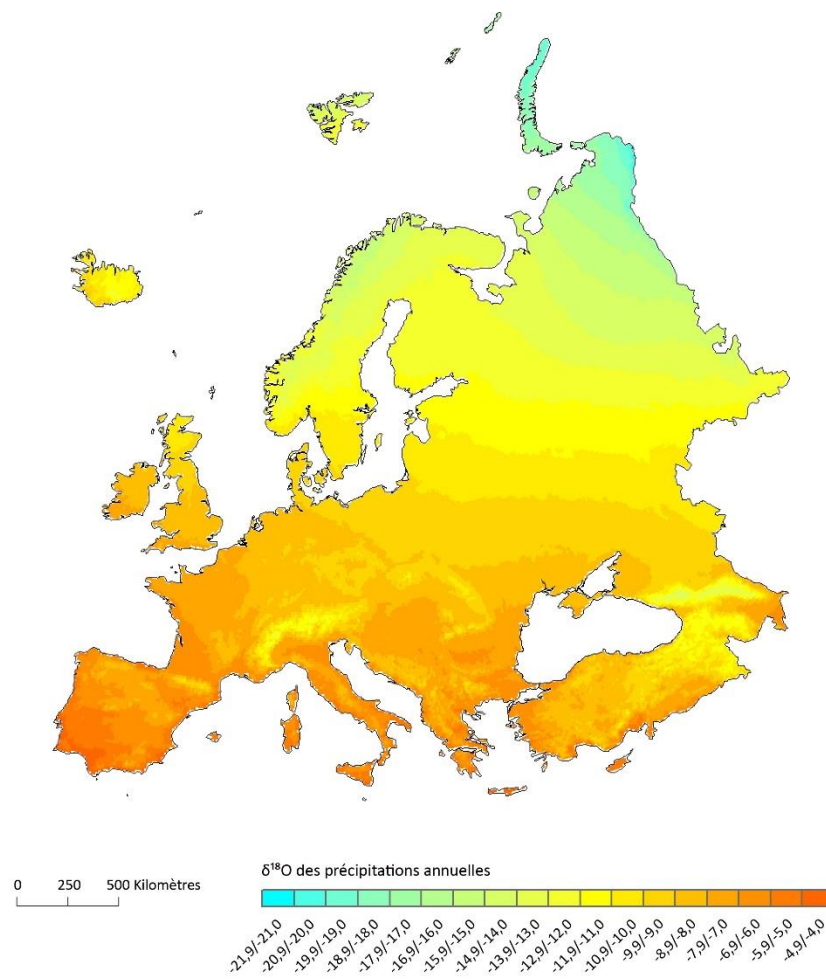
ANNEXES





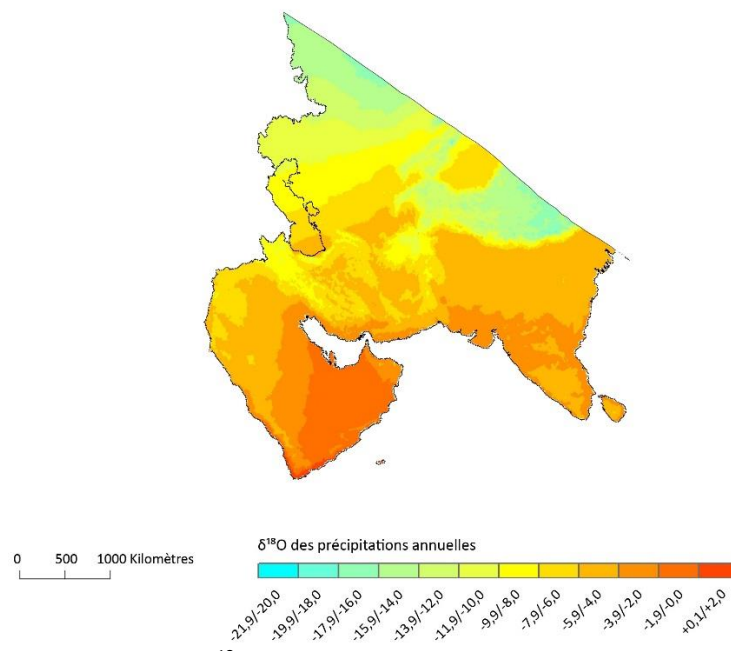


Annexe 1. Captures d'écran du logiciel FRUITS développé par R. Fernandes et al. (2014) et utilisé dans le cadre de ce travail-ci pour réaliser nos approches bayésiennes. De A à G : Exemples de la procédure suivie et des paramètres utilisés pour tester le scénario 1 avec hiérarchisation en amont des ressources alimentaires entre elles.



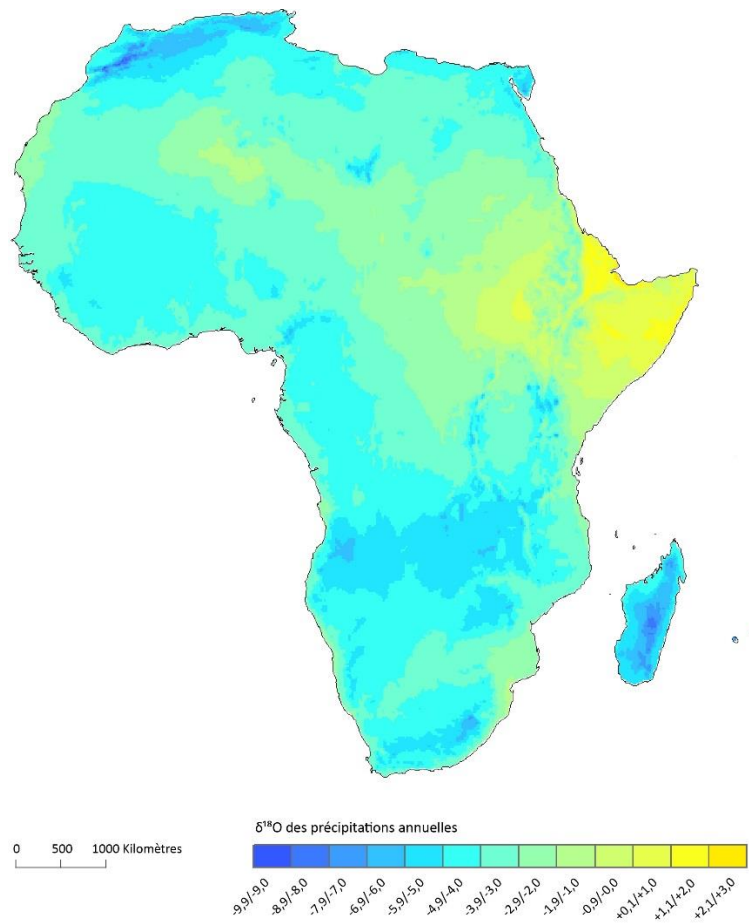
Annexe 2. Distribution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations annuelles modernes en Europe d'après Bowen et Revenaugh (2003) et Bowen *et al.* (2005).

Source : <http://waterisotopes.org>



Annexe 3. Distribution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations annuelles modernes au Moyen-Orient d'après Bowen et Revenaugh (2003) et Bowen *et al.* (2005).

Source : <http://waterisotopes.org>



Annexe 4. Distribution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations annuelles modernes en Afrique d'après Bowen et Revenaugh (2003) et Bowen *et al.* (2005).

Source : <http://waterisotopes.org>

Annexe 5. Présentation des vestiges humains prélevés ainsi que des données bioarchéologiques associées

Salle	Identifiant	Niveau de dépôt	Données biologiques		Os							Email			Cheveu		Artefact
			Sexe	Âge	Type	Conservation macroscopique	$\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	^{14}C	RMN	IRTF	Type	$\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Prélèvement	$\delta^{13}\text{C}_{\text{kér}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{kér}}$	Plâtre
X78/T15	Ind 4.b Mand1	-	I	**18-20	Mandibule	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	-
	LivelloXII-n°42-44	-	I	*5+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	Oui	-	-	-
X80/T16	Sq003	8	I	15+	Humérus	Bonne	Oui	-	-	-	Oui	M ₂ D	Oui	Oui	-	-	Présence
	Sq004	7	I	20+	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Absence
	Sq009	7	I	20+	Humérus	Bonne	Oui	-	-	-	Oui	M ₂ G	Oui	Oui	-	-	Absence
	Sq024	5	I	20+	Fémur	Bonne	Oui	Oui	Oui	-	Oui	M ₂ D	Oui	Oui	-	-	Présence
	Sq025	5	I	20+ (?)	Fémur	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq027	5	I	20+	Maxillaire	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ² G	Oui	-	-	-	Absence
	Sq030	4	I	15+	Tibia	Mauvaise	Oui	-	-	-	Oui	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq039	4	I	20+	Tibia	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Présence
	Sq041	3	I	20+	Maxillaire	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ² D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq042	3	I	20+	Coxal	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Présence
	Sq044	3	I	20+	Radius	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq045	3	I	20+	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	Oui	M ² D	Oui	Oui	-	-	Présence
	Sq046	3	I	20+	Mandibule	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq048	3	I	20+	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Absence
	Sq054	3	I	20+	Fémur	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ² D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq055	3	I	20+	Tibia	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Présence
	Sq056	3	I	20+	Côte	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq057=059	3	I	20+	Fémur	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Présence
Sq060	3	I	20+	Radius	Bonne	Oui	-	-	-	Oui	M ₃ G	Oui	Oui	-	-	Absence	
Sq065	2	I	20+	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Absence	

X80/T16	Sq067	2	I	20+	Fémur	Moyenne	Oui	-	-	-	Oui	M ₂ D	Oui	Oui	-	-	Présence
	Sq068	2	I	20+	Tibia	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq069	2	I	20+	Fémur	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ₁ D	Oui	-	-	-	Absence
	Sq070	2	I	20+	Fémur	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq072	2	I	20+	Fémur	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq073	1	I	20+	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Absence
	Sq075	1	I	15+	Humérus	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	Oui	-	-	Présence
	Sq076	2	I	20+	Ulna	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq077	1	I	20+	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq078	1	I	20+	Calcaneus	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ² G	Oui	-	-	-	Présence
Sq079	1	I	20+	Humérus	Mauvaise	Oui	-	Oui	-	Oui	M ₂ D	Oui	Oui	-	-	Présence	
X81	n°08 Mand1	-	I	*5+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	-
	n°13 Mand1	-	I	*11,8+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	Oui	-	-	-
	n°14 Mand1	-	I	*9,6+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	Oui	-	M ₂ G	Oui	Oui	-	-	-
	n°14 Mand2	-	I	*16,4+	Mandibule	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	-
	n°15 Mand1	-	I	*11,8+	Mandibule	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	-
	n°15 Voûte	-	I	-	Voûte	Moyenne	Oui	-	-	-	-	-	Oui	-	Oui	Oui	-
	n°16 Mand1	-	I	*11,8+	Mandibule	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	-
	n°16 Mand2	-	I	*11,8+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	-
	n°16 Cheveux	-	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Oui	-	Oui	Oui	-
	Sepulture campioni 15/02/06	-	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Oui	-	Oui	Oui	-
Sepulture 15/02/06	-	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Oui	-	Oui	Oui	-	
X82/T18	Sq007	10	I	15+	Fémur	Mauvaise	Oui	-	-	-	Oui	M ₂ D	Oui	Oui	-	-	Présence
	Sq011	10	I	20+	Métacarpe	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	Oui	-	-	Absence
	Sq012	9	I	15+	Fémur	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	Oui	-	-	Présence
	Sq015	9	I	15+	Divers	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ² G	Oui	-	-	-	Absence
	Sq019	9	I	20+	Mandibule	Mauvaise	Oui	-	-	-	Oui	M ₂ G	Oui	Oui	-	-	Présence

X82/T18	Sq020	9	I	15+	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Présence
	Sq022	8	I	15+	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Présence
	Sq023	7	I	20-29	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Présence
	Sq026	6	I	20+	Voûte	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ¹ G	Oui	-	-	-	Absence
	Sq031	7	I	20+	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ² D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq032	7	I	15+	Voûte	Bonne	Oui	Oui	Oui	-	Oui	M ² D	Oui	Oui	-	-	Présence
	Sq034	7	I	15+	Divers	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq037	7	I	20+	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	Oui	M ² D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq041	6	I	15+	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Présence
	Sq046	6	I	20+	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ² G	Oui	-	-	-	Présence
	Sq049	5	I	20+	Tibia	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	Oui	-	-	Présence
	Sq051	5	I	15+	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq052	5	I	15+	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Absence
	Sq055	5	I	15+	Mandibule	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Présence
	Sq057	5	I	15+	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Présence
	Sq058	4	I	20+	Tibia	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ² D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq060	4	I	20+	Fémur	Mauvaise	Oui	-	-	-	Oui	M ² D	Oui	Oui	-	-	Présence
	Sq062	4	I	20+	Fémur	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq063	4	I	20+	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq064	3	I	15+	Tibia	Mauvaise	Oui	Oui	Oui	-	Oui	M ² G	Oui	Oui	-	-	Présence
	Sq065	2	I	20+	Fémur	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ¹ G	Oui	-	-	-	Présence
	Sq067	1	I	15+	Divers	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq068	4	I	15-19	Divers	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Absence
	Sq069	3	I	15-19	Radius	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ² D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq070	3	I	15+	Mandibule	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Absence
	Sq071	2	I	15+	Humérus	Mauvaise	Oui	-	-	-	Oui	M ² D, M ₁ D, M ₂ D, M ₃ D	Oui	Oui	-	-	-
Sq073	2	I	20+ (?)	Mandibule	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ² D	Oui	-	-	-	-	

X82/T18	Sq074	1	I	15+	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Absence	
	Sq075	2	I	20+	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Présence	
	Sq076	1	I	20+	Divers	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ² D	Oui	-	-	-	Absence	
	Sq077	1	I	20+	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Absence	
	Sq078	1	I	20+	Fibula	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ² D	Oui	-	-	-	-	
	Sq079	1	I	15+	Ulna	Bonne	Oui	Oui	-	-	Oui	M ² D	Oui	Oui	-	-	-	Absence
X83	Sq012	-	I	15+	Voûte	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence	
	Sq093=113=115	-	I	20+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	-	Oui	M ₂ D	Oui	Oui	-	-	-	Absence
	Sq094	-	I	20-29	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Présence	
	Sq096	-	I	20+	Humérus	Bonne	Oui	-	-	-	Oui	-	Oui	-	Oui	Oui	Absence	
	Sq108	-	F	15-19	Fémur	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ² D	Oui	-	-	-	-	
	Sq109	-	I	20+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Présence	
	Sq122	-	I	20+ (?)	Voûte	Moyenne	Oui	-	-	-	Oui	M ² D	Oui	-	-	-	Absence	
	Sq128=145	-	I	20+	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	Oui	-	-	Présence	
	Sq141	-	F	20-39	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	Oui	-	-	Absence	
	Sq152	-	I	20+	Mandibule	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Absence	
	Sq156	-	I	20+ (?)	Maxillaire	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ² D	Oui	-	-	-	Absence	
	Sq164	-	F	20+	Fémur	Moyenne	Oui	-	-	-	-	-	Oui	Oui	Oui	Oui	Présence	
	Sq169	-	I	20+	Ulna	Bonne	Oui	-	-	-	-	-	Oui	-	Oui	Oui	Présence	
	US212 Mand1	-	I	*8,7+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	-	Oui	M ₂ D	Oui	Oui	-	-	-	
	US215 Cranio con capelli taglio sepolture	-	I	-	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	-	Oui	-	Oui	Oui	-	
	US215 Mand1	-	I	*16,4+	Mandibule	Mauvaise	Oui	-	-	-	Oui	M ₁ D, M ₂ D, M ₃ D	Oui	Oui	-	-	-	
	US215 Mand2	-	I	*16,4+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	-	
US215 Mand3	-	I	*16,4+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	-		
US216 Mand1	-	I	*14,8+	Mandibule	Bonne	Oui	Oui	Oui	-	Oui	M ₂ D	Oui	Oui	-	-	-		
US216 Mand2	-	I	*16,4+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	-	Oui	M ₂ D	Oui	-	-	-	-		

X83	US216 Mand3	-	I	*11,8+	Mandibule	Moyenne	Oui	-	-	-	Oui	M ₂ D	Oui	-	-	-	-
	US216 Mand4	-	I	*16,4+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	-
	US216 Mand5	-	I	*16,4+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	-
	US216 Mand6	-	I	*9,8+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	Oui	Oui	Oui	-
	US216 Cranio con capelli	-	I	-	Voûte	Bonne	Oui	-	-	-	-	-	Oui	-	Oui	Oui	-
	US217 Mand1	-	I	*16,4+	Mandibule	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	-
	US217 Mand2	-	I	*11,8+	Mandibule	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	-
	US218 Frag. di cranio con capelli	-	I	-	Voûte	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	-	Oui	-	Oui	Oui	-
	US219 Mand1	-	I	*16,4+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	Oui	-	M ₂ D	Oui	Oui	-	-	-
	US219 Mand2	-	I	*11,8+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	Oui	-	M ₂ D	Oui	Oui	-	-	-
n°2 Cheveux	-	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Oui	-	Oui	Oui	-	
X84	Sq001	-	I	20+	Humérus	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq028	-	I	20+	Mandibule	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ² G	Oui	-	-	-	Présence
	Sq049	-	M	20+	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	Oui	-	-	Présence
	Sq071	-	I	20+	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq077	-	F	20-29	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq079	-	I	-	-	-	Oui	-	-	-	-	-	Oui	-	Oui	Oui	-
	Sq080	-	F	30+	Fémur	Moyenne	Oui	-	-	-	-	-	Oui	-	Oui	Oui	Présence
	Sq123	-	F	20+	Voûte	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	Oui	Oui	Présence
	Sq140	-	I	30+	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	-	Oui	M ₂ D	Oui	Oui	-	-	Absence
	Sq141	-	I	20+	Maxillaire	Moyenne	Oui	-	-	Oui	-	M ₂ G	Oui	Oui	Oui	Oui	Présence
	Sq163	-	I	20+	Fémur	Mauvaise	Oui	-	-	-	-	M ² G	Oui	-	-	-	Présence
	Sq167	-	I	30+	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	-	-	Oui	-	Oui	Oui	Présence
	Sq173	-	I	5-9	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ² D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq178	-	F	20-29	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	Oui	M ₂ G	Oui	-	Oui	Oui	Présence
	Sq179=197	-	F	20-49	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	Oui	M ² D	Oui	-	-	-	Présence
Sq180	-	I	20+	Radius	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ² D	Oui	Oui	Oui	Oui	Absence	

X84	Sq187	-	I	15-19	Mandibule	Bonne	Oui	-	-	Oui	-	M ₂ G	Oui	Oui	-	-	Présence
	Sq199	-	I	20-29	Humérus	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ D	Oui	-	-	-	Présence
	Sq201	-	I	10-19	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	Absence
	Sq203	-	F	20-29	Fémur	Bonne	Oui	-	-	-	Oui	M ² D	Oui	Oui	-	-	Présence
	Sq204	-	I	30+	Mandibule	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	-
	Sq205	-	I	*16,4+	Maxillaire	Moyenne	Oui	-	-	-	Oui	M ² G	Oui	-	-	-	-
	Sq206	-	I	20+	Voûte	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ₂ G	Oui	-	-	-	-
	Sq207	-	I	*16,4+	Voûte	Moyenne	Oui	-	-	-	-	M ² G	Oui	-	-	-	-
	Sq208	-	I	*16,4+	Voûte	Moyenne	Oui	-	-	-	Oui	M ² G	Oui	Oui	-	-	-
	US579 ; Tessuto, 2 strati ossa cranio con capelli	-	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Oui	-	Oui	Oui	-
Refus de tamis	-	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Oui	-	Oui	Oui	-	

Note : En gris : Individus non-identifiés pour lesquels des cheveux ont été prélevés et pouvant potentiellement être des doublons des individus identifiés. *Âge dentaire minimum déterminé par nos soins en l'absence d'autres données relatives à ce sujet via la méthode proposée par Moorrees *et al.* (1963). **Âge déterminé par Pagni et Burdassi (2004) sans explicitation de la méthode employée. Les points d'interrogation représentent des incertitudes concernant les faits énoncés.

Annexe 6. Présentation des différences de valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ et de $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$ à T0, T1, T2 et T2/Bis mesurées sur 5 échantillons de la catacombe SSPM et 5 autres du cimetière Saint-Benoît

Série	Identifiant	Différence $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$						Différence $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb (os)}}$					
		T1-T0	T2-T0	T2/Bis-T0	T2-T1	T2/Bis-T1	T2/Bis-T2	T1-T0	T2-T0	T2/Bis-T0	T2-T1	T2/Bis-T1	T2/Bis-T2
SSPM	X81 n°14	2,1	0,1	0,3	-2,0	-1,8	-0,2	-2,3	-1,4	-2,2	0,9	0,0	0,8
	X83 US219	1,4	-0,1	0,1	-1,5	-1,3	-0,2	-2,9	-1,5	-1,9	1,4	1,0	0,4
	X83 US219	1,4	-0,2	0,0	-1,6	-1,5	-0,2	-2,5	-1,4	-1,9	1,1	0,6	0,5
	X84 Sq141	2,0	0,0	0,2	-2,1	-1,8	-0,3	-0,9	-0,1	-0,6	0,8	0,3	0,5
	X84 Sq187	1,6	0,0	0,2	-1,6	-1,4	-0,2	-2,8	-1,5	-1,9	1,3	0,8	0,5
	Moyenne	1,7	0,0	0,2	-1,8	-1,6	-0,2	-2,2	-1,2	-1,7	1,1	0,5	0,5
	σ	0,3	0,1	0,1	0,3	0,2	0,0	0,8	0,6	0,6	0,3	0,4	0,2
Saint-Benoît	H60	1,1	-0,7	-0,3	-1,9	-1,5	-0,4	-1,2	-0,9	-1,0	0,3	0,2	0,2
	H62	0,9	-1,7	-1,2	-2,6	-2,0	-0,5	-1,7	-0,5	-1,0	1,2	0,8	0,5
	H63	1,8	-0,3	0,4	-2,1	-1,4	-0,8	-1,5	-1,2	-1,3	0,3	0,2	0,1
	H75	1,6	0,0	0,2	-1,6	-1,4	-0,1	-1,1	-1,1	-1,3	0,0	-0,2	0,1
	H77	-0,2	-2,5	-1,5	-2,3	-1,3	-1,0	-0,2	-0,9	-0,5	-0,7	-0,4	-0,4
	Moyenne	1,0	-1,1	-0,5	-2,1	-1,5	-0,6	-1,1	-0,9	-1,0	0,2	0,1	0,1
	σ	0,8	1,0	0,8	0,4	0,3	0,3	0,6	0,3	0,3	0,7	0,4	0,3

Annexe 7. Résultats des analyses isotopiques réalisées sur le collagène de l'os, la phase carbonatée de l'os et celle de l'émail

Salle	Identifiant	Os												Émail					
		Phase collagénique						Phase carbonatée						Phase carbonatée					
		%Col	%C _{col}	%N _{col}	C:N	δ ¹³ C (‰ VPDB)	δ ¹⁵ N (‰ AIR)	PCO ₂ (μbar)	PCO ₂ / Masse	δ ¹³ C (‰ VPDB)	δ ¹⁸ O (‰ VPDB)	Sr (ppm)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	PCO ₂ (μbar)	PCO ₂ / Masse	δ ¹³ C (‰ VPDB)	δ ¹⁸ O (‰ VPDB)	Sr (ppm)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
X78/T15	Ind 4.b Mand1	28,6	23,4	8,8	3,1	-18,3	11,4	624	0,7	-14,5	-2,4	-	-	662	1,1	-13,5	-2,7	-	-
	LivelloXII- n°42-44	173,4	43,5	15,0	3,4	-19,8	9,1	925	1,5	-12,4	-4,8	-	-	846	1,4	-13,6	-5,0	130	0,711996
X80/T16	Sq003	68,2	42,7	15,7	3,2	-20,3	7,6	831	1,4	-15,7	-3,9	-	-	819	1,4	-14,2	-3,3	163	0,709700
	Sq004	92,1	40,6	14,6	3,2	-18,2	13,5	843	1,4	-14,0	-2,5	-	-	716	1,2	-12,2	-3,8	-	-
	Sq009	106,8	41,2	14,9	3,2	-18,8	12,5	821	1,4	-14,9	-3,6	-	-	824	1,4	-13,6	-2,9	352	0,709358
	Sq024	174,4	43,4	15,2	3,3	-18,7	9,8	809	1,4	-13,4	-4,8	477	0,709860	860	1,5	-10,6	-5,4	371	0,708500
	Sq025	150,2	40,0	15,0	3,1	-18,6	10,1	799	1,3	-14,1	-4,3	-	-	846	1,4	-12,3	-5,1	-	-
	Sq027	159,2	46,7	17,2	3,2	-18,6	11,0	892	1,5	-14,0	-3,8	-	-	733	1,4	-11,9	-4,6	-	-
	Sq030	-	-	-	-	-	-	880	1,4	-14,8	-3,4	-	-	799	1,4	-13,6	-4,0	-	-
	Sq039	151,6	43,0	15,9	3,2	-18,7	11,2	794	1,3	-14,4	-3,4	-	-	846	1,4	-12,2	-4,8	-	-
	Sq041	147,5	45,9	17,0	3,2	-19,9	8,0	777	1,3	-15,1	-3,6	-	-	596	1,4	-13,8	-3,7	-	-
	Sq042	5,3	13,2	4,8	3,2	-18,7	11,2	889	1,5	-15,2	-3,0	-	-	848	1,4	-12,3	-5,2	-	-
	Sq044	97,9	45,4	16,9	3,1	-19,3	10,8	804	1,4	-14,4	-3,9	-	-	811	1,4	-13,1	-3,1	-	-
	Sq045	3,1	27,6	9,9	3,3	-19,7	8,4	750	1,2	-14,3	-3,1	-	-	811	1,3	-13,5	-1,6	520	0,710090
	Sq046	26,7	39,6	14,7	3,1	-18,8	11,8	733	1,3	-14,4	-3,0	-	-	811	1,4	-12,9	-3,8	-	-
	Sq048	21,2	40,5	13,8	3,4	-18,7	11,8	767	1,3	-13,7	-3,5	-	-	821	1,4	-13,1	-2,5	-	-
	Sq054	26,7	42,9	15,6	3,2	-19,1	11,3	828	1,4	-14,6	-3,8	-	-	865	1,4	-14,6	-5,9	-	-
	Sq055	99,2	42,9	15,2	3,3	-19,0	10,8	741	1,3	-13,9	-3,4	-	-	828	1,5	-12,9	-4,2	-	-
	Sq056	146,6	41,0	14,8	3,2	-18,9	10,4	833	1,4	-14,7	-3,7	-	-	831	1,4	-12,8	-5,3	-	-
	Sq057=059	11,7	33,7	10,1	3,9	-18,8	11,2	650	1,0	-14,2	-5,5	-	-	794	1,4	-13,4	-4,0	-	-
	Sq060	151,9	43,2	15,1	3,3	-19,1	11,2	706	1,2	-14,8	-4,3	-	-	868	1,4	-13,7	-4,7	232	0,710105
Sq065	84,6	41,1	14,8	3,2	-18,9	11,7	794	1,3	-14,4	-4,4	-	-	850	1,4	-12,6	-4,1	-	-	
Sq067	120,3	43,8	15,5	3,3	-18,6	12,7	872	1,4	-14,6	-4,3	-	-	841	1,4	-12,5	-3,8	402	0,709420	
Sq068	84	41,6	15,2	3,2	-19,0	11,6	821	1,3	-14,5	-4,1	-	-	865	1,4	-12,8	-2,2	-	-	
Sq069	72,7	38,9	13,8	3,3	-19,0	12,1	797	1,3	-14,6	-3,5	-	-	745	1,2	-12,1	-1,6	-	-	

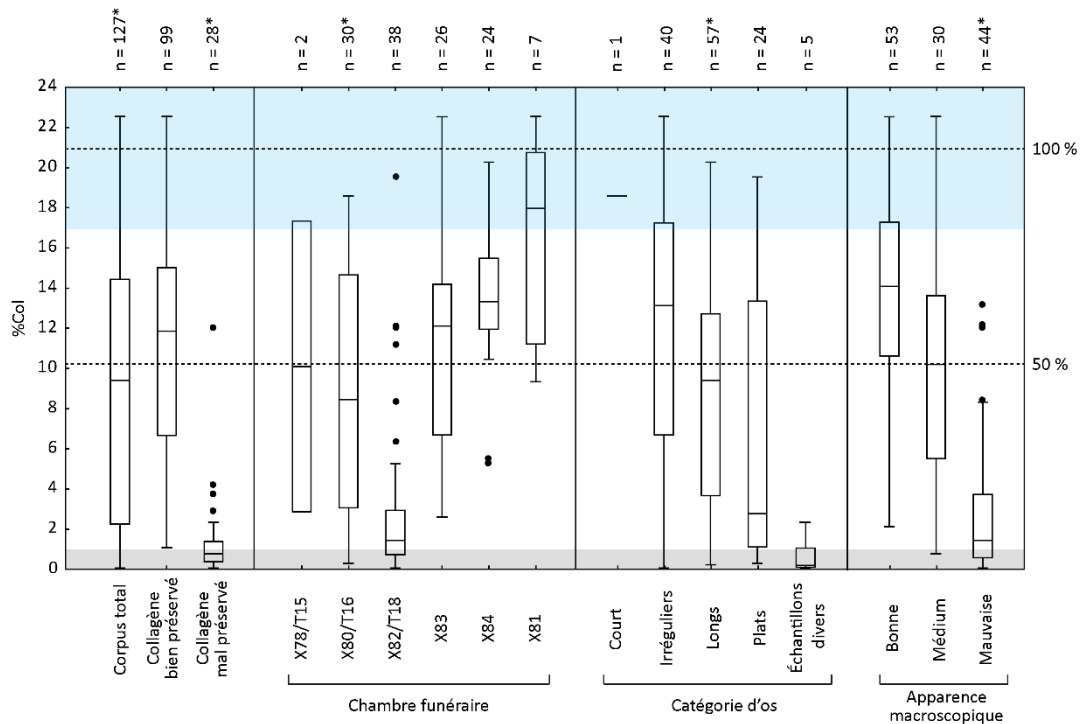
X80/T16	Sq070	4,3	25,9	7,9	3,8	-18,5	12,5	809	1,4	-14,4	-4,3	-	-	850	1,4	-12,3	-3,4	-	-	
	Sq072	57,2	40,3	14,2	3,3	-18,9	11,8	755	1,2	-14,3	-3,7	-	-	863	1,4	-13,3	-2,9	-	-	
	Sq073	81,2	38,1	13,9	3,2	-18,7	11,1	653	1,1	-14,1	-3,2	-	-	858	1,4	-13,1	-2,6	-	-	
	Sq075	94,1	40,9	14,8	3,2	-18,7	11,8	865	1,4	-14,6	-3,4	-	-	843	1,3	-13,2	-3,4	368	0,709540	
	Sq076	84,6	41,3	14,8	3,3	-19,0	11,9	880	1,4	-14,6	-4,2	-	-	828	1,4	-12,4	-4,9	-	-	
	Sq077	30,6	41,0	14,0	3,4	-18,9	11,0	814	1,4	-14,0	-4,7	-	-	826	1,4	-11,7	-3,4	-	-	
	Sq078	185,9	45,6	16,8	3,2	-19,6	9,1	970	1,6	-14,5	-2,6	-	-	819	1,4	-11,7	-4,1	-	-	
	Sq079	36,7	34,4	12,8	3,1	-18,6	11,5	826	1,4	-14,6	-3,3	-	-	731	1,2	-12,7	-4,3	160	0,713875	
X81	n°08 Mand1	93,4	43,1	15,0	3,4	-18,7	9,7	914	1,5	-14,1	-2,6	-	-	824	1,4	-12,4	-2,6	-	-	
	n°13 Mand1	207,6	42,2	15,0	3,3	-18,4	14,9	894	1,5	-12,7	-2,1	-	-	799	1,4	-11,9	-1,0	728	0,707829	
	n°14 Mand1	175,7	41,8	14,8	3,3	-19,1	11,9	821	1,4	-13,3	-3,2	-	-	863	1,4	-13,5	-4,3	282	0,709310	
	n°14 Mand2	225,5	42,3	14,6	3,4	-19,2	9,9	924	1,5	-14,2	-3,3	-	-	843	1,4	-13,0	-2,4	-	-	
	n°15 Mand1	179,7	41,2	14,2	3,4	-19,0	10,9	938	1,6	-14,2	-3,7	-	-	816	1,3	-12,5	-3,9	-	-	
	n°15 Voûte	166,3	45,2	16,4	3,2	-19,0	10,7	946	1,6	-13,6	-3,4	-	-	-	-	-	-	-	-	
	n°16 Mand1	112,2	41,7	14,3	3,4	-19,0	11,3	868	1,4	-14,5	-3,9	-	-	833	1,4	-13,5	-4,7	-	-	
	n°16 Mand2	182,2	39,4	14,0	3,3	-19,0	11,1	777	1,3	-13,7	-3,8	-	-	828	1,4	-12,9	-4,0	-	-	
	n°16 Cheveux	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sepulture campioni 15/02/06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sepulture 15/02/06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
X82/T18	Sq007	5,1	13,3	2,9	5,4	-19,4	11,1	621	1,0	-14,4	-4,8	-	-	843	1,4	-12,1	-4,7	340	0,709915	
	Sq011	52,5	36,6	13,0	3,3	-18,2	13,0	741	1,3	-13,4	-3,0	-	-	750	1,3	-12,6	-3,1	233	0,709305	
	Sq012	10,7	21,6	7,7	3,3	-18,7	12,0	748	1,2	-15,2	-3,9	-	-	797	1,3	-13,9	-3,0	152	0,709545	
	Sq015	10,6	4,1	2,1	2,3	-18,9	8,6	780	1,2	-15,5	-2,5	-	-	806	1,3	-12,2	-4,3	-	-	
	Sq019	8,7	24,5	9,8	2,9	-19,5	7,4	770	1,3	-15,4	-3,2	-	-	794	1,3	-12,4	-4,8	154	0,709201	
	Sq020	120,3	1,5	0,0	-	-	-	838	1,4	-14,7	-2,6	-	-	684,5	0,9	-13,5	-3,3	-	-	
	Sq022	11,7	28,9	12,3	2,7	-19,7	6,0	777	1,3	-14,2	-3,3	-	-	824	1,4	-12,5	-4,2	-	-	
	Sq023	21,8	23,3	9,0	3,0	-18,5	11,9	574	0,7	-15,0	-3,6	-	-	794	1,4	-12,8	-4,3	-	-	
	Sq026	22,5	37,0	13,8	3,1	-19,0	11,1	692,0	0,8	-14,6	-2,7	-	-	689	1,2	-12,7	-2,0	-	-	
	Sq031	42,5	7,5	3,6	2,4	-17,7	10,8	667	1,1	-14,9	-3,6	-	-	814	1,3	-11,6	-1,6	-	-	

X82/T18	Sq032	195,3	45,4	16,4	3,2	-19,0	11,0	960	1,6	-12,8	-3,0	733	0,710063	853	1,4	-11,6	-4,6	209	0,708511
	Sq034	23,4	8,9	4,5	2,3	-17,5	11,1	773	0,9	-15,3	-3,5	-	-	716	1,1	-13,7	-2,9	-	-
	Sq037	112,2	43,1	15,3	3,3	-18,9	11,6	816	1,4	-14,0	-3,3	-	-	806	1,3	-12,6	-4,1	-	-
	Sq041	15,1	25,0	9,8	3,0	-19,0	10,3	592	1,0	-15,2	-3,5	-	-	843	1,4	-13,0	-3,7	-	-
	Sq046	29,4	14,1	6,1	2,7	-18,1	11,4	589,8	0,7	-14,8	-2,8	-	-	789	1,4	-13,5	-2,8	-	-
	Sq049	20,4	19,6	7,2	3,2	-18,7	11,5	611	1,0	-15,2	-3,4	-	-	875	1,4	-13,0	-2,4	262	0,709109
	Sq051	14,3	20,3	7,9	3,0	-19,1	12,5	572	1,0	-14,4	-3,4	-	-	853	1,4	-11,9	-3,0	-	-
	Sq052	6,3	8,5	3,7	2,7	-18,4	9,9	640	1,1	-14,0	-3,1	-	-	753	1,4	-12,7	-2,6	-	-
	Sq055	1,7	22,6	6,9	3,8	-18,9	12,9	721	0,9	-14,8	-3,8	-	-	797	1,3	-11,2	-4,7	-	-
	Sq057	7,7	1,6	1,3	1,4	-	-	492	0,6	-14,6	-3,6	-	-	676	0,9	-12,4	-3,6	-	-
	Sq058	20,6	5,9	2,8	2,5	-17,1	8,6	638	1,1	-14,5	-3,1	-	-	824	1,3	-13,1	-3,0	-	-
	Sq060	121,6	40,3	15,7	3,0	-18,7	11,0	782	1,3	-14,5	-2,5	-	-	816	1,4	-12,9	-2,7	306	0,709294
	Sq062	7,3	3,2	2,1	1,8	-17,7	9,4	804	1,4	-15,2	-2,6	-	-	824	1,4	-12,5	-4,3	-	-
	Sq063	37,9	13,6	5,8	2,7	-18,2	11,3	587	0,7	-15,5	-3,8	-	-	841	1,4	-12,7	-4,7	-	-
	Sq064	15,3	24,5	9,5	3,0	-17,8	10,1	675	1,1	-14,4	-4,1	1207	0,710131	841	1,3	-10,8	-5,5	254	0,709200
	Sq065	14,7	30,9	12,6	2,9	-19,2	9,9	611	1,0	-14,3	-3,1	-	-	824	1,3	-12,3	-2,9	-	-
	Sq067	1	3,1	2,0	1,8	-18,7	-	736	1,2	-14,5	-2,6	-	-	819	1,3	-12,8	-3,6	-	-
	Sq068	0,8	24,2	9,5	3,0	-19,2	9,7	872	1,4	-15,5	-2,3	-	-	733	1,3	-13,2	-2,7	-	-
	Sq069	16,1	2,5	1,9	1,5	-	-	618	1,0	-13,5	-3,8	-	-	828	1,4	-12,0	-4,3	-	-
	Sq070	7,9	19,9	8,8	2,6	-20,2	7,0	592	1,0	-14,6	-2,7	-	-	753	1,2	-13,1	-3,6	-	-
Sq071	2,3	1,1	0,7	1,8	-	-	716	1,1	-13,9	-3,5	-	-	826	1,4	-7,7	-6,1	236	0,710256	
Sq073	0,7	13,4	6,2	2,5	-19,5	4,8	579	1,0	-13,3	-2,5	-	-	843	1,4	-12,1	-3,3	-	-	
Sq074	10,7	6,0	4,1	1,7	-22,4	6,2	577	0,9	-13,6	-1,6	-	-	853	1,4	-13,1	-3,9	-	-	
Sq075	9,3	2,4	1,9	1,5	-	-	711	1,1	-16,1	-2,9	-	-	784	1,3	-13,9	-3,5	-	-	
Sq076	2	23,9	10,5	2,7	-19,3	9,1	787	1,3	-14,4	-2,3	-	-	828	1,4	-11,4	-2,3	-	-	
Sq077	4,3	0,7	0,5	1,6	-	-	763	1,2	-14,7	-3,8	-	-	625	0,8	-12,0	-4,4	-	-	
Sq078	63,4	42,5	14,9	3,3	-19,3	9,4	626	0,8	-14,6	-3,2	-	-	885	1,4	-12,4	-4,7	-	-	
Sq079	83,7	43,8	15,8	3,2	-19,0	11,5	859	1,4	-10,2	-2,6	628	0,709954	850	1,4	-11,3	-3,3	270	0,710549	
X83	Sq012	172,5	42,0	15,5	3,2	-18,9	10,7	877	1,5	-14,2	-3,7	-	-	799	1,3	-12,4	-4,1	-	-
	Sq094	106,3	40,9	15,0	3,2	-19,2	11,9	887	1,4	-14,2	-3,4	-	-	850	1,4	-13,4	-3,0	-	-
	Sq096	55,8	43,6	16,0	3,2	-18,7	11,7	977	1,6	-15,6	-3,3	-	-	-	-	-	-	-	-

X83	Sq108	162,1	42,9	15,3	3,3	-18,5	11,8	889	1,5	-12,7	-2,6			687	1,1	-11,5	-1,6	-	-
	Sq109	138,2	42,4	15,2	3,3	-19,5	11,0	897	1,4	-14,1	-4,2			858	1,4	-12,9	-3,4	-	-
	Sq093=113=115	43,2	38,3	13,3	3,4	-19,1	11,0	853	1,5	-13,6	-4,7			836	1,4	-11,7	-6,3	201	0,706902
	Sq122	26,1	35,0	11,9	3,4	-19,3	10,7	921	1,5	-15,0	-3,5			826	1,4	-13,2	-3,6	-	-
	Sq128=145	128,2	42,3	15,1	3,3	-18,9	11,3	843	1,4	-14,8	-4,3			811	1,3	-11,7	-5,2	320	0,708170
	Sq141	114,3	44,5	16,5	3,1	-19,3	9,8	941	1,6	-14,4	-4,0			819	1,4	-12,5	-2,1	148	0,709862
	Sq152	95,4	41,2	15,3	3,1	-18,9	11,9	892	1,4	-15,0	-2,8			819	1,3	-13,3	-1,9	-	-
	Sq156	136,2	41,0	13,7	3,5	-19,0	12,5	887	1,5	-15,0	-2,9			828	1,3	-13,0	-3,0	336	0,709442
	Sq164	98,2	46,5	17,1	3,2	-18,9	11,2	858	1,5	-14,1	-3,4			-	-	-	-	-	-
	Sq169	137,1	45,5	16,9	3,1	-19,1	11,5	951	1,6	-15,4	-2,7			-	-	-	-	-	-
	US212 Mand1	225,4	41,8	15,4	3,2	-19,0	10,1	885	1,5	-13,8	-3,8			853	1,4	-12,8	-5,4	165	0,710237
	US215 Cranio con capelli taglio sepolture	25,3	41,9	15,4	3,2	-19,0	10,7	933	1,6	-14,8	-3,3			-	-	-	-	-	-
	US215 Mand1	66,8	38,5	13,6	3,3	-19,0	12,5	902	1,5	-13,9	-3,0			819	1,4	-12,5	2,3	-	-
	US215 Mand2	66,9	40,6	14,4	3,3	-19,0	12,4	894	1,5	-13,9	-4,2			850	1,4	-12,7	-4,4	123	0,708589
	US215 Mand3	63,4	40,0	13,9	3,4	-19,1	11,8	826	1,3	-14,4	-3,7			833	1,3	-13,0	-3,3	-	-
	US216 Cranio con capelli	146,4	45,7	16,5	3,2	-19,3	11,0	960	1,6	-14,2	-3,9			765	1,3	-13,3	-3,2	-	-
	US216 Mand1	64,7	39,6	14,1	3,3	-19,1	11,6	865	1,4	-13,4	-4,1	565	0,709841	765	1,3	-13,3	-3,2	68	0,709510
	US216 Mand2	140,9	41,8	14,5	3,4	-19,2	10,6	882	1,5	-14,0	-2,9			821	1,3	-13,0	-2,2	-	-
	US216 Mand3	141,9	41,0	14,0	3,4	-18,9	11,5	948	1,5	-14,8	-2,9			748	1,2	-13,3	-3,6	-	-
	US216 Mand4	112,3	41,6	14,6	3,3	-19,2	11,8	977	1,6	-14,4	-3,8			819	1,3	-11,9	-3,9	-	-
	US216 Mand5	172,8	42,9	15,0	3,3	-19,4	11,0	943	1,6	-14,6	-3,1			802	1,4	-14,0	-2,9	-	-
	US216 Mand6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			831	1,3	-13,4	-2,9	165	0,709111
	US217 Mand1	131,9	41,5	15,2	3,2	-18,9	12,8	911	1,5	-13,2	-3,2			821	1,3	-11,8	-5,7	-	-
	US217 Mand2	83,2	38,9	14,3	3,2	-19,4	12,6	855	1,4	-14,4	-3,2			855	1,5	-13,4	-3,9	-	-
	US218 Frag. di cranio con capelli	3	26,5	8,2	3,8	-19,9	12,7	968	1,6	-13,5	-2,8	-	-	-	-	-	-	-	-
	US219 Mand1	144,4	41,4	15,3	3,2	-18,6	9,5	894	1,4	-13,7	-1,8	-	-	836	1,4	-12,2	-1,8	133	0,708333
	US219 Mand2	172,2	42,5	14,9	3,3	-19,4	11,2	899	1,5	-14,4	-3,1	-	-	850	1,4	-12,2	-1,7	156	0,709904
	n°2 Cheveux	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

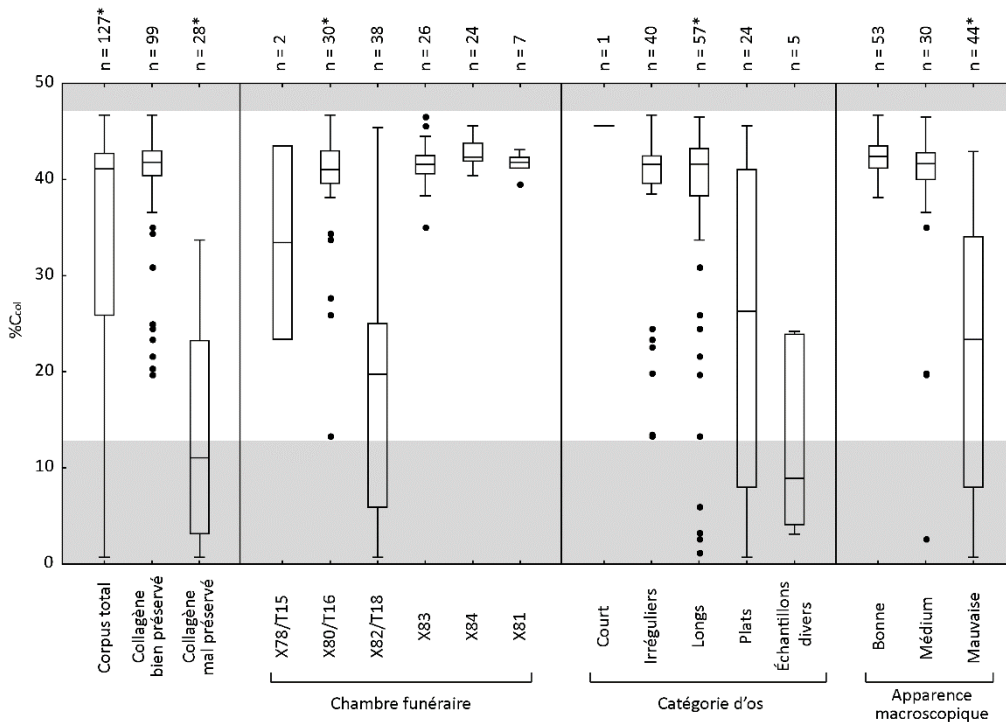
X84	Sq001	147,7	45,1	16,6	3,2	-19,0	10,6	889	1,5	-14,7	-3,8	-	-	650	1,1	-12,8	-2,3	-	-	
	Sq028	113,9	42,8	14,6	3,4	-19,0	10,7	929	1,5	-13,6	-3,8	-	-	860	1,4	-12,4	-2,3	-	-	
	Sq049	155,5	43,6	15,0	3,4	-19,0	10,0	870	1,5	-13,9	-3,2	-	-	782	1,3	-12,3	-3,7	121	0,709216	
	Sq071	148,1	44,0	15,6	3,3	-19,2	11,0	877	1,5	-14,2	-3,9	-	-	841	1,3	-12,3	-4,0	-	-	
	Sq077	202,7	41,6	14,8	3,3	-19,1	10,9	889	1,5	-14,2	-4,1	-	-	811	1,4	-12,7	-5,0	-	-	
	Sq079	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sq080	55,1	44,3	16,1	3,2	-18,6	12,0	875	1,4	-14,9	-3,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sq123	146,7	45,6	16,7	3,2	-18,8	11,9	872	1,5	-15,4	-3,4	-	-	819	1,3	-13,1	-3,3	-	-	
	Sq140	201	42,4	15,4	3,2	-18,9	11,4	948	1,6	-14,7	-3,2	-	-	828	1,4	-11,7	-3,1	273	0,712022	
	Sq141	126	41,1	14,1	3,4	-19,0	11,1	948	1,6	-15,1	-3,5	-	-	828	1,4	-12,9	-4,8	225	0,708946	
	Sq163	122	41,8	15,4	3,2	-19,3	11,5	880	1,4	-14,0	-4,0	-	-	843	1,4	-12,0	-3,4	-	-	
	Sq167	129,1	44,8	16,5	3,2	-19,0	11,3	914	1,6	-15,5	-2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Sq173	184,1	42,2	15,5	3,2	-19,1	10,6	870	1,4	-14,0	-3,8	-	-	836	1,4	-12,9	-4,0	-	-	
	Sq178	195,5	43,5	15,2	3,3	-19,2	11,4	899	1,5	-13,6	-3,9	-	-	792	1,3	-12,5	-4,0	-	-	
	Sq179=197	120	42,7	15,4	3,2	-18,4	9,8	951	1,5	-13,5	-3,5	-	-	787	1,4	-11,0	-4,7	-	-	
	Sq180	127,3	42,3	15,0	3,3	-19,0	11,4	931	1,6	-14,4	-3,4	-	-	797	1,4	-13,8	-4,2	469	0,709241	
	Sq187	196,9	45,3	15,6	3,4	-19,4	11,4	841	1,4	-14,1	-3,3	-	-	838	1,3	-13,1	-3,6	597	0,709312	
	Sq199	118,6	42,1	15,2	3,2	-19,2	11,5	860	1,4	-14,2	-3,2	-	-	838	1,4	-13,7	-4,8	-	-	
	Sq201	135,7	41,9	14,6	3,3	-19,1	10,9	846	1,4	-13,9	-4,4	-	-	760	1,3	-12,3	-4,7	-	-	
	Sq203	119,1	40,8	15,0	3,2	-19,0	12,0	899	1,5	-13,8	-4,3	-	-	789	1,3	-12,9	-4,3	315	0,709233	
	Sq204	130,8	42,8	15,0	3,3	-19,0	12,7	933	1,6	-14,1	-3,1	-	-	765	1,3	-11,5	-3,4	-	-	
	Sq205	104,7	42,3	14,7	3,4	-19,2	11,7	980	1,6	-14,5	-3,2	-	-	821	1,4	-13,0	-3,5	-	-	
	Sq206	147,2	41,9	15,0	3,3	-18,7	11,0	951	1,5	-14,9	-3,1	-	-	819	1,3	-12,0	-4,8	-	-	
	Sq207	154,3	42,1	15,7	3,1	-18,8	11,2	946	1,6	-15,4	-3,4	-	-	699	1,2	-13,8	-3,2	-	-	
Sq208	53	40,4	15,1	3,1	-18,7	11,1	902	1,5	-14,6	-3,9	-	-	872	1,4	-12,5	-4,4	298	0,709479		
US579 ; Tessuto, 2 strati ossa cranio con capelli	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Refus de tamis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Note : En rouge : échantillons biochimiquement mal préservés. Surligné en gris : individus non-identifiés pour lesquels des cheveux ont été prélevés et pouvant potentiellement être des doublons des individus individualisés.



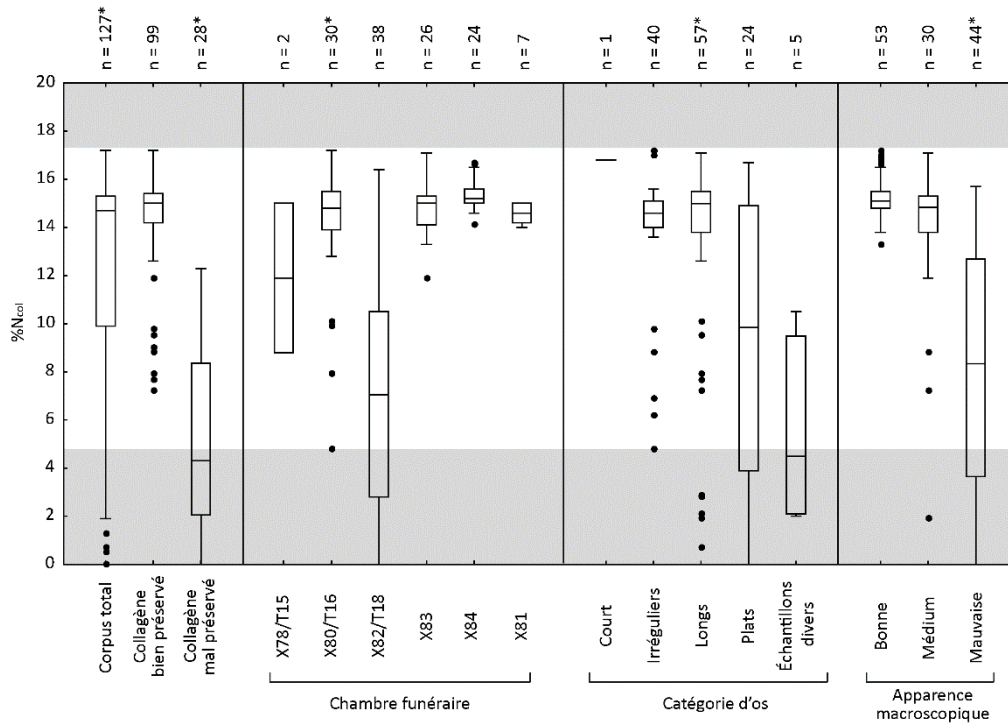
Annexe 8. %Col à l'échelle du site ainsi qu'en fonction des chambres funéraires, des catégories d'os prélevés et des apparences macroscopiques des os

Note : La zone bleutée correspond à la variabilité des rendements d'extraction du collagène pour des échantillons modernes (1 σ) (d'après Bocherens et al. 1991). La zone grisée correspond aux valeurs à partir desquelles un échantillon est considéré comme mal préservé. *Un ou plusieurs échantillon(s) n'a/n'ont pas fourni de valeur dans ce groupe



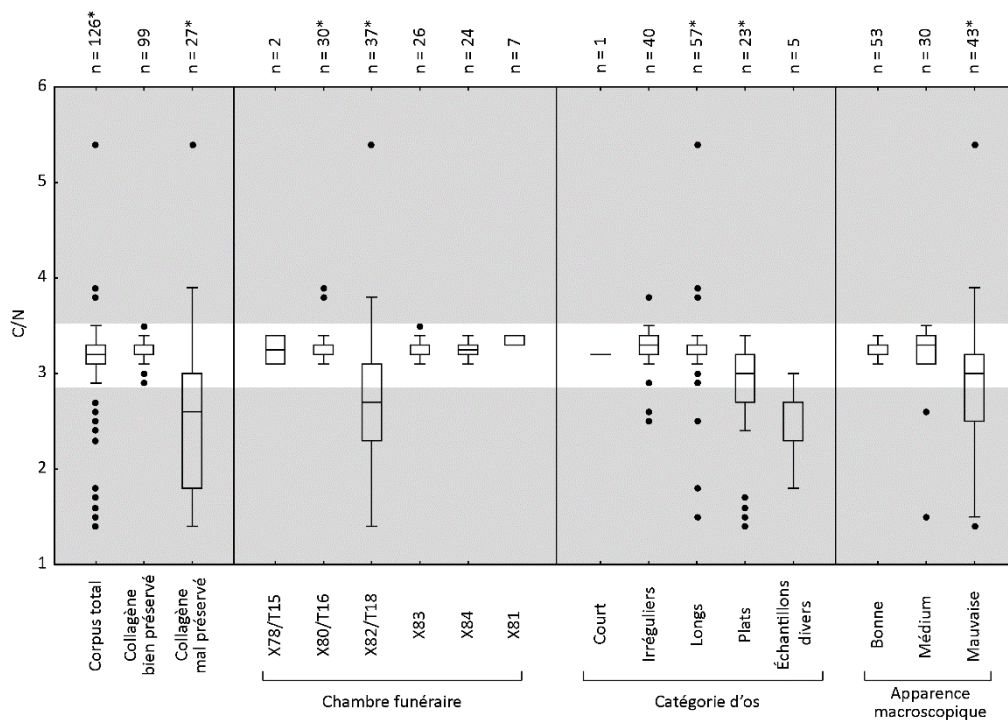
Annexe 9. %Ccol à l'échelle du site ainsi qu'en fonction des chambres funéraires, des catégories d'os prélevés et des apparences macroscopiques des os

Note : Les zones grisées correspondent aux valeurs à partir desquelles un échantillon est comme mal préservé



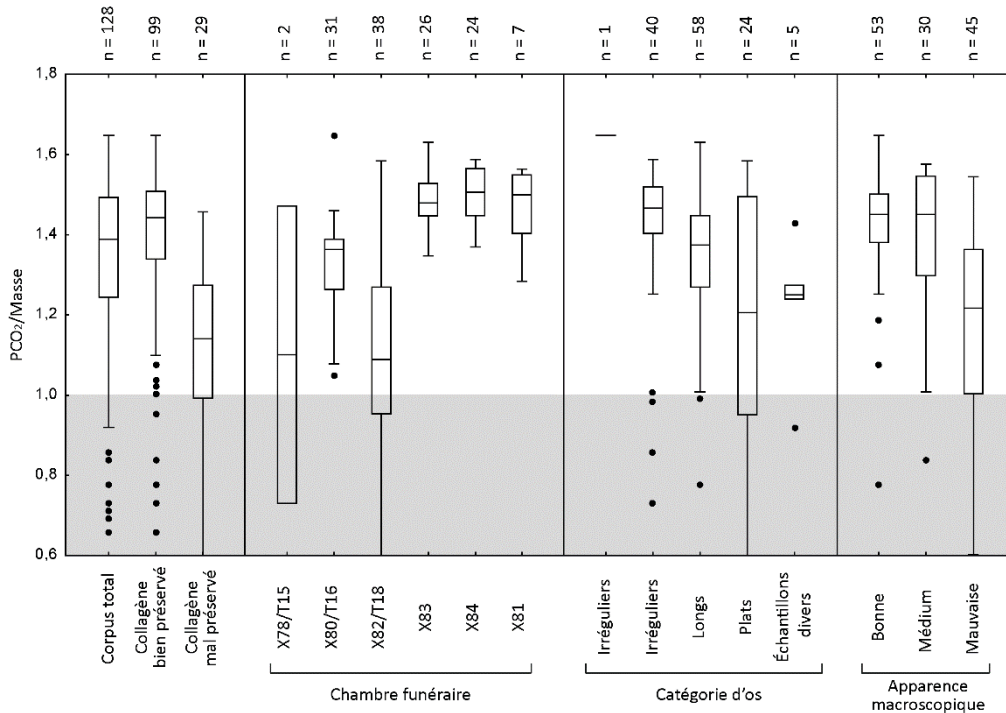
Annexe 10. %N_{col} à l'échelle du site ainsi qu'en fonction des chambres funéraires, des catégories d'os prélevés et des apparences macroscopiques des os

Note : Les zones grisées correspondent aux valeurs à partir desquelles un échantillon est comme mal préservé



Annexe 11. Rapports C/N à l'échelle du site ainsi qu'en fonction des chambres funéraires, des catégories d'os prélevés et des apparences macroscopiques des os

Note : Les zones grisées correspondent aux valeurs à partir desquelles un échantillon est comme mal préservé



Annexe 12. Rapports PCO₂/Masse des échantillons d'os à l'échelle du site ainsi qu'en fonction des chambres funéraires, des catégories d'os prélevés et des apparences macroscopiques des os

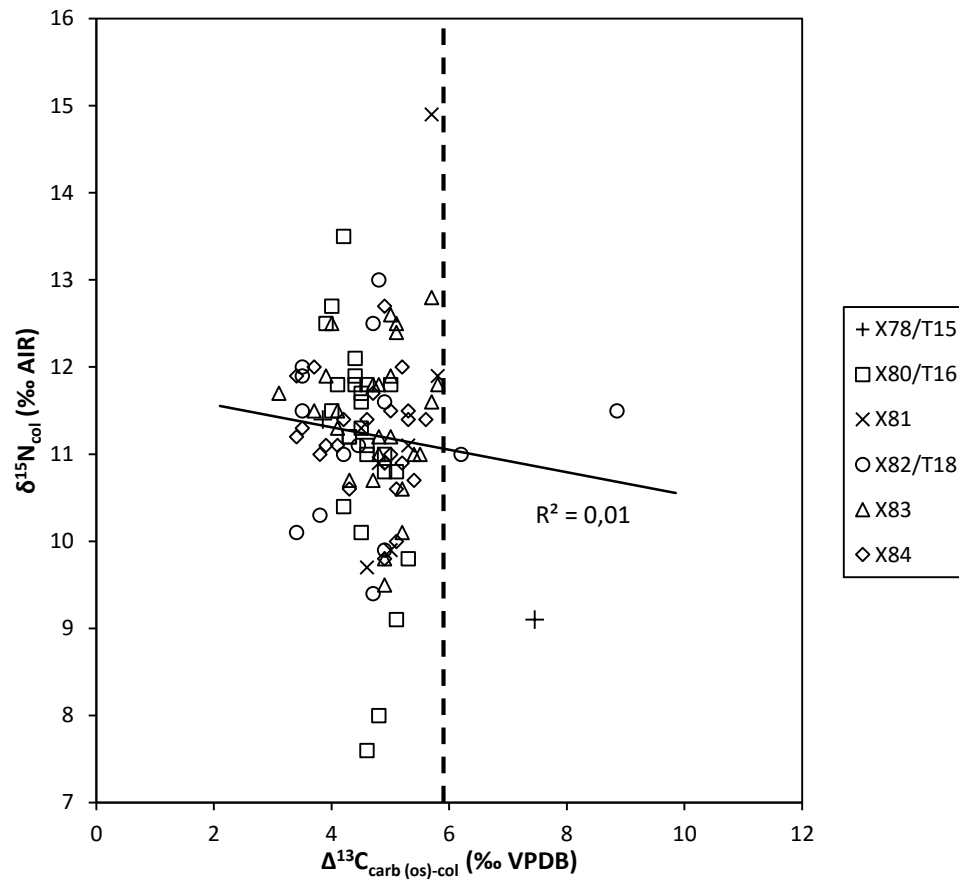
Note : La zone grisée correspond aux valeurs à partir desquelles un échantillon est comme mal préservé

Annexe 13. Résultats des analyses isotopiques réalisées sur la phase kératinique des cheveux

Salle	Identifiant	Prélèvements	%C _{kér}	%N _{kér}	C/N	δ ¹³ C (‰VPDB)	δ ¹⁵ N (‰AIR)
X81	n°15	P19	45,3	11,9	4,4	-21,1	14,7
	n°16	P38	38,1	9,4	4,7	-21,0	13,6
	Sepulture campioni 15/02/06	P11	47,9	14,1	4,0	-19,4	11,8
	Sepulture 15/02/06	P14/Moyenne	45,7	12,2	4,4	-19,0	10,6
X83	n°2	P23	45,7	13,5	3,9	-20,3	13,5
	Sq169	P41	48,2	13,2	4,3	-21,0	11,3
	Sq96	P15	46,0	13,9	3,9	-20,3	12,9
	US215 Cranio con capelli taglio sepulture	P08	48,4	14,7	3,8	-20,4	13,6
	US216 Mand6	P02	46,5	13,4	4,0	-19,0	11,8
	US216 Cranio con capelli	P05	46,0	14,2	3,8	-20,5	13,6
	US218 Frag. di cranio con capelli	P03	47,4	13,2	4,2	-21,4	13,9
X84	Sq123	P26	47,3	14,4	3,8	-20,3	11,7
	Sq178	P24	44,0	13,8	3,7	-20,2	11,8
	Sq180	P40	47,7	13,1	4,2	-20,7	11,1
	Sq79	P42	45,9	11,9	4,5	-20,9	12,3
	Sq80	P39	46,0	12,0	4,5	-21,5	12,4
	Refus de tamis	P25	45,2	13,3	4,0	-20,1	11,2

Annexe 14. Présentation des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$ des individus (n = 99)

Salle	Identifiant	$\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$	Salle	Identifiant	$\Delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)-col}}$
X78/T15	Ind 4.b Mand1	3,9	X83	Sq012	4,7
	LivelloXII-n°42-44	7,5		Sq094	5,0
X80/T16	Sq003	4,6		Sq096	3,1
	Sq004	4,2		Sq108	5,8
	Sq009	3,9		Sq109	5,4
	Sq024	5,3		Sq093=113=115	5,5
	Sq025	4,5		Sq122	4,3
	Sq027	4,6		Sq128=145	4,1
	Sq039	4,3		Sq141	4,9
	Sq041	4,8		Sq152	3,9
	Sq044	4,9		Sq156	4,0
	Sq046	4,4		Sq164	4,8
	Sq048	5,0		Sq169	3,7
	Sq054	4,5		US212 Mand1	5,2
	Sq055	5,1		US215 Mand1	5,1
	Sq056	4,2		US215 Mand2	5,1
	Sq060	4,3		US215 Mand3	4,7
	Sq065	4,5		US216 Mand1	5,7
	Sq067	4,0		US216 Mand2	5,2
	Sq068	4,5		US216 Mand3	4,1
	Sq069	4,4		US216 Mand4	4,8
	Sq072	4,6		US216 Mand5	4,8
	Sq073	4,6		US217 Mand1	5,7
	Sq075	4,1		US217 Mand2	5,0
	Sq076	4,4		US219 Mand1	4,9
	Sq077	4,9		US219 Mand2	5,0
	Sq078	5,1		X84	Sq001
Sq079	4,0	Sq028	5,4		
X81	n°08 Mand1	4,6	Sq049		5,1
	n°13 Mand1	5,7	Sq071		5,0
	n°14 Mand1	5,8	Sq077		4,9
	n°14 Mand2	5,0	Sq080		3,7
	n°15 Mand1	4,8	Sq123		3,4
	n°16 Mand1	4,5	Sq140		4,2
	n°16 Mand2	5,3	Sq141		3,9
X82/T18	Sq011	4,8	Sq163		5,3
	Sq012	3,5	Sq167		3,5
	Sq023	3,5	Sq173		5,1
	Sq026	4,5	Sq178		5,6
	Sq032	6,2	Sq179=197		4,9
	Sq037	4,9	Sq180		4,6
	Sq041	3,8	Sq187		5,3
	Sq049	3,5	Sq199	5,0	
	Sq051	4,7	Sq201	5,2	
	Sq060	4,2	Sq203	5,2	
	Sq064	3,4	Sq204	4,9	
	Sq065	4,9	Sq205	4,7	
	Sq078	4,7	Sq206	3,8	
	Sq079	8,9	Sq207	3,4	
			Sq208	4,1	



Annexe 15. Projection des valeurs de $\delta^{15}N_{\text{col}}$ et de $\Delta^{13}C_{\text{carb (os)-col}}$ des échantillons de collagène bien préservé (n = 99).

Salle	Identifiant	Types de ressources alimentaires consommées (%)			Type de macronutriments ingérés (%)		
		Herbivores (C ₃) d'Italie	Blé (C ₃) d'Italie	Poissons de Méditerranée	Protéines	Glucides & lipides	Bulk
X78/T15	Ind 4.b Mand1	0,49 ± 0,23	0,38 ± 0,25	0,14 ± 0,05	0,16 ± 0,03	0,34 ± 0,04	0,51 ± 0
	LivelloXII-n°42-44	0,36 ± 0,19	0,61 ± 0,21	0,04 ± 0,03	0,11 ± 0,03	0,39 ± 0,03	0,5 ± 0
X80/T16	Sq003	0,79 ± 0,16	0,19 ± 0,16	0,02 ± 0,02	0,15 ± 0,02	0,34 ± 0,02	0,51 ± 0
	Sq004	0,62 ± 0,2	0,23 ± 0,22	0,15 ± 0,05	0,18 ± 0,03	0,31 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq009	0,72 ± 0,13	0,19 ± 0,14	0,09 ± 0,04	0,17 ± 0,02	0,32 ± 0,02	0,51 ± 0
	Sq024	0,61 ± 0,17	0,31 ± 0,18	0,08 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq025	0,49 ± 0,25	0,42 ± 0,27	0,09 ± 0,04	0,14 ± 0,04	0,35 ± 0,04	0,51 ± 0
	Sq027	0,45 ± 0,24	0,46 ± 0,25	0,09 ± 0,05	0,14 ± 0,03	0,36 ± 0,04	0,51 ± 0
	Sq039	0,55 ± 0,22	0,37 ± 0,23	0,09 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,35 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq041	0,65 ± 0,3	0,32 ± 0,3	0,03 ± 0,02	0,14 ± 0,03	0,35 ± 0,04	0,51 ± 0
	Sq044	0,56 ± 0,24	0,38 ± 0,25	0,05 ± 0,03	0,14 ± 0,03	0,35 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq046	0,62 ± 0,21	0,29 ± 0,21	0,09 ± 0,05	0,16 ± 0,03	0,33 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq048	0,63 ± 0,19	0,27 ± 0,21	0,1 ± 0,05	0,16 ± 0,03	0,33 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq054	0,69 ± 0,17	0,25 ± 0,18	0,07 ± 0,05	0,16 ± 0,02	0,33 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq055	0,52 ± 0,25	0,41 ± 0,26	0,07 ± 0,04	0,14 ± 0,03	0,35 ± 0,04	0,51 ± 0
	Sq056	0,57 ± 0,18	0,37 ± 0,19	0,06 ± 0,04	0,14 ± 0,02	0,35 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq060	0,72 ± 0,15	0,21 ± 0,15	0,07 ± 0,05	0,16 ± 0,02	0,33 ± 0,02	0,51 ± 0
	Sq065	0,71 ± 0,12	0,2 ± 0,13	0,1 ± 0,04	0,17 ± 0,02	0,32 ± 0,02	0,51 ± 0
	Sq067	0,57 ± 0,26	0,31 ± 0,26	0,12 ± 0,05	0,16 ± 0,03	0,33 ± 0,04	0,51 ± 0
	Sq068	0,68 ± 0,18	0,25 ± 0,18	0,07 ± 0,04	0,16 ± 0,02	0,33 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq069	0,44 ± 0,26	0,48 ± 0,26	0,07 ± 0,04	0,13 ± 0,03	0,36 ± 0,04	0,51 ± 0
	Sq072	0,4 ± 0,21	0,5 ± 0,24	0,1 ± 0,05	0,14 ± 0,03	0,36 ± 0,04	0,5 ± 0
Sq073	0,54 ± 0,21	0,37 ± 0,22	0,09 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0	
Sq075	0,53 ± 0,27	0,38 ± 0,28	0,09 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,35 ± 0,04	0,51 ± 0	
Sq076	0,65 ± 0,25	0,27 ± 0,26	0,08 ± 0,04	0,16 ± 0,03	0,34 ± 0,04	0,51 ± 0	
Sq077	0,59 ± 0,23	0,33 ± 0,23	0,08 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0	
Sq078	0,48 ± 0,22	0,47 ± 0,24	0,04 ± 0,03	0,13 ± 0,03	0,37 ± 0,03	0,51 ± 0	
Sq079	0,64 ± 0,22	0,26 ± 0,23	0,1 ± 0,05	0,16 ± 0,03	0,33 ± 0,03	0,51 ± 0	
X81	n°08 Mand1	0,47 ± 0,22	0,45 ± 0,25	0,08 ± 0,04	0,14 ± 0,03	0,36 ± 0,04	0,51 ± 0
	n°13 Mand1	0,6 ± 0,17	0,21 ± 0,17	0,19 ± 0,06	0,19 ± 0,03	0,3 ± 0,03	0,51 ± 0
	n°14 Mand1	0,65 ± 0,18	0,28 ± 0,18	0,07 ± 0,04	0,15 ± 0,02	0,34 ± 0,02	0,51 ± 0
	n°14 Mand2	0,64 ± 0,17	0,3 ± 0,19	0,06 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	n°15 Mand1	0,51 ± 0,23	0,42 ± 0,24	0,07 ± 0,04	0,14 ± 0,03	0,36 ± 0,03	0,51 ± 0
	n°16 Mand1	0,64 ± 0,16	0,28 ± 0,17	0,08 ± 0,05	0,16 ± 0,02	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	n°16 Mand2	0,56 ± 0,27	0,37 ± 0,28	0,08 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,35 ± 0,04	0,51 ± 0
X82/T18	Sq011	0,5 ± 0,23	0,32 ± 0,24	0,18 ± 0,06	0,17 ± 0,03	0,32 ± 0,04	0,51 ± 0
	Sq012	0,63 ± 0,18	0,27 ± 0,18	0,1 ± 0,05	0,16 ± 0,02	0,33 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq023	0,43 ± 0,24	0,45 ± 0,26	0,12 ± 0,05	0,15 ± 0,04	0,35 ± 0,04	0,51 ± 0
	Sq026	0,64 ± 0,16	0,27 ± 0,18	0,08 ± 0,05	0,16 ± 0,03	0,33 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq032	0,32 ± 0,31	0,61 ± 0,33	0,07 ± 0,04	0,12 ± 0,04	0,38 ± 0,04	0,5 ± 0,01
	Sq037	0,63 ± 0,18	0,28 ± 0,2	0,08 ± 0,04	0,16 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq041	0,66 ± 0,21	0,27 ± 0,22	0,06 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq049	0,59 ± 0,24	0,33 ± 0,25	0,09 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,04	0,51 ± 0
	Sq051	0,75 ± 0,13	0,17 ± 0,14	0,08 ± 0,05	0,17 ± 0,02	0,32 ± 0,02	0,51 ± 0
	Sq060	0,7 ± 0,14	0,2 ± 0,14	0,1 ± 0,04	0,17 ± 0,02	0,32 ± 0,02	0,51 ± 0
	Sq064	0,53 ± 0,2	0,31 ± 0,22	0,16 ± 0,05	0,17 ± 0,03	0,32 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq065	0,41 ± 0,29	0,53 ± 0,3	0,06 ± 0,04	0,12 ± 0,04	0,37 ± 0,04	0,5 ± 0
	Sq078	0,72 ± 0,16	0,23 ± 0,16	0,05 ± 0,03	0,16 ± 0,02	0,33 ± 0,02	0,51 ± 0
	Sq079	0,14 ± 0,14	0,78 ± 0,16	0,08 ± 0,05	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0
X83	Sq012	0,36 ± 0,17	0,57 ± 0,19	0,07 ± 0,04	0,12 ± 0,03	0,37 ± 0,03	0,5 ± 0
	Sq094	0,57 ± 0,16	0,36 ± 0,18	0,07 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,35 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq096	0,64 ± 0,17	0,24 ± 0,18	0,11 ± 0,06	0,17 ± 0,03	0,32 ± 0,03	0,51 ± 0

...Suite du tableau...							
X83	Sq108	0,44 ± 0,24	0,44 ± 0,25	0,12 ± 0,07	0,15 ± 0,03	0,35 ± 0,04	0,51 ± 0
	Sq109	0,65 ± 0,21	0,3 ± 0,22	0,05 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq093=113=115	0,7 ± 0,17	0,23 ± 0,17	0,07 ± 0,04	0,16 ± 0,02	0,33 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq122	0,77 ± 0,13	0,18 ± 0,14	0,05 ± 0,03	0,16 ± 0,02	0,33 ± 0,02	0,51 ± 0
	Sq128=145	0,45 ± 0,21	0,47 ± 0,23	0,08 ± 0,05	0,13 ± 0,03	0,36 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq141	0,69 ± 0,18	0,26 ± 0,19	0,05 ± 0,03	0,15 ± 0,02	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq152	0,68 ± 0,13	0,23 ± 0,14	0,09 ± 0,05	0,16 ± 0,02	0,33 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq156	0,68 ± 0,14	0,22 ± 0,15	0,1 ± 0,05	0,17 ± 0,02	0,32 ± 0,02	0,51 ± 0
	Sq164	0,5 ± 0,23	0,42 ± 0,24	0,08 ± 0,04	0,14 ± 0,03	0,35 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq169	0,64 ± 0,22	0,29 ± 0,23	0,07 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	US212 Mand1	0,43 ± 0,26	0,5 ± 0,28	0,07 ± 0,04	0,13 ± 0,03	0,37 ± 0,04	0,5 ± 0
	US215 Mand1	0,7 ± 0,17	0,2 ± 0,17	0,1 ± 0,06	0,17 ± 0,02	0,32 ± 0,03	0,51 ± 0
	US215 Mand2	0,62 ± 0,17	0,3 ± 0,18	0,08 ± 0,05	0,15 ± 0,02	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	US215 Mand3	0,59 ± 0,19	0,31 ± 0,22	0,09 ± 0,05	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	US216 Mand1	0,44 ± 0,31	0,5 ± 0,31	0,07 ± 0,04	0,13 ± 0,04	0,37 ± 0,04	0,5 ± 0
	US216 Mand2	0,54 ± 0,23	0,39 ± 0,24	0,07 ± 0,04	0,14 ± 0,03	0,35 ± 0,03	0,51 ± 0
	US216 Mand3	0,46 ± 0,24	0,46 ± 0,25	0,08 ± 0,04	0,13 ± 0,03	0,36 ± 0,04	0,51 ± 0
	US216 Mand4	0,73 ± 0,15	0,21 ± 0,16	0,06 ± 0,04	0,16 ± 0,02	0,33 ± 0,02	0,51 ± 0
	US216 Mand5	0,75 ± 0,16	0,2 ± 0,16	0,05 ± 0,03	0,16 ± 0,02	0,33 ± 0,02	0,51 ± 0
	US217 Mand1	0,35 ± 0,24	0,53 ± 0,28	0,12 ± 0,07	0,13 ± 0,04	0,36 ± 0,04	0,5 ± 0
US217 Mand2	0,74 ± 0,14	0,21 ± 0,14	0,06 ± 0,04	0,16 ± 0,02	0,33 ± 0,02	0,51 ± 0	
US219 Mand1	0,5 ± 0,18	0,41 ± 0,2	0,09 ± 0,05	0,14 ± 0,03	0,35 ± 0,03	0,51 ± 0	
US219 Mand2	0,79 ± 0,12	0,15 ± 0,13	0,06 ± 0,04	0,17 ± 0,02	0,32 ± 0,02	0,51 ± 0	
X84	Sq001	0,63 ± 0,19	0,3 ± 0,21	0,07 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq028	0,5 ± 0,27	0,44 ± 0,28	0,06 ± 0,04	0,14 ± 0,03	0,36 ± 0,04	0,51 ± 0
	Sq049	0,54 ± 0,23	0,4 ± 0,24	0,06 ± 0,03	0,14 ± 0,03	0,35 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq071	0,58 ± 0,22	0,35 ± 0,24	0,07 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,35 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq077	0,62 ± 0,19	0,3 ± 0,21	0,07 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq080	0,57 ± 0,22	0,32 ± 0,24	0,12 ± 0,05	0,16 ± 0,03	0,33 ± 0,04	0,51 ± 0
	Sq123	0,73 ± 0,14	0,19 ± 0,15	0,08 ± 0,04	0,17 ± 0,02	0,32 ± 0,02	0,51 ± 0
	Sq140	0,65 ± 0,15	0,27 ± 0,16	0,09 ± 0,04	0,16 ± 0,02	0,33 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq141	0,59 ± 0,19	0,33 ± 0,21	0,08 ± 0,05	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq163	0,64 ± 0,14	0,29 ± 0,15	0,07 ± 0,05	0,15 ± 0,02	0,34 ± 0,02	0,51 ± 0
	Sq167	0,53 ± 0,22	0,39 ± 0,25	0,07 ± 0,04	0,14 ± 0,03	0,35 ± 0,04	0,51 ± 0
	Sq173	0,52 ± 0,23	0,43 ± 0,24	0,06 ± 0,04	0,14 ± 0,03	0,36 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq178	0,67 ± 0,19	0,27 ± 0,2	0,06 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq179=197	0,58 ± 0,18	0,32 ± 0,2	0,1 ± 0,05	0,16 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq180	0,57 ± 0,21	0,35 ± 0,22	0,07 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,35 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq187	0,67 ± 0,2	0,27 ± 0,2	0,06 ± 0,03	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq199	0,63 ± 0,14	0,3 ± 0,17	0,07 ± 0,04	0,15 ± 0,02	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0
	Sq201	0,43 ± 0,27	0,5 ± 0,29	0,06 ± 0,04	0,13 ± 0,04	0,37 ± 0,04	0,5 ± 0
	Sq203	0,5 ± 0,27	0,42 ± 0,28	0,08 ± 0,05	0,14 ± 0,04	0,35 ± 0,04	0,51 ± 0
	Sq204	0,66 ± 0,15	0,26 ± 0,17	0,08 ± 0,05	0,16 ± 0,02	0,33 ± 0,03	0,51 ± 0
Sq205	0,61 ± 0,26	0,33 ± 0,27	0,06 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,35 ± 0,04	0,51 ± 0	
Sq206	0,56 ± 0,23	0,35 ± 0,25	0,09 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,04	0,51 ± 0	
Sq207	0,57 ± 0,24	0,34 ± 0,26	0,09 ± 0,04	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,04	0,51 ± 0	
Sq208	0,58 ± 0,22	0,33 ± 0,23	0,09 ± 0,05	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0	

Annexe 16. Estimations de la part relative que représente chaque ressource alimentaire consommée dans le régime alimentaire et de la quantité de protéines et de glucides/lipides ingérés par les individus de la catacombe SSPM.

Note : Ces résultats ont été obtenus en sortie des simulations stochastiques réalisées par procédures MCMC dans FRUITS. Modélisation réalisée **sans hiérarchisation** préalable des ressources alimentaires entre elles.

Scénario testé : Alimentation composée de blé cultivé dans la péninsule italienne, de viande dérivée d'herbivores C₃ provenant d'Italie et de poissons pêchés en mer Méditerranée. Données isotopiques utilisées : valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ mesurées sur chaque individu.

Salle	Identifiant	Types de ressources alimentaires consommées (%)			Type de macronutriments ingérés (%)		
		Herbivores (C ₃) d'Italie	Blé (C ₃) d'Italie	Poissons de Méditerranée	Protéines	Glucides & lipides	Bulk
X78/T15	Ind 4.b Mand1	0,25 ± 0,12	0,65 ± 0,14	0,1 ± 0,05	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	LivelloXII-n°42-44	0,24 ± 0,13	0,73 ± 0,13	0,03 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0
X80/T16	Sq003	0,35 ± 0,12	0,64 ± 0,12	0,01 ± 0,01	0,1 ± 0,01	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq004	0,22 ± 0,12	0,62 ± 0,14	0,16 ± 0,05	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,03	0,5 ± 0
	Sq009	0,2 ± 0,14	0,71 ± 0,15	0,08 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq024	0,3 ± 0,12	0,64 ± 0,13	0,06 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq025	0,23 ± 0,13	0,7 ± 0,14	0,07 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq027	0,23 ± 0,13	0,69 ± 0,15	0,08 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq039	0,3 ± 0,11	0,63 ± 0,12	0,07 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq041	0,23 ± 0,13	0,75 ± 0,14	0,02 ± 0,02	0,09 ± 0,02	0,41 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq044	0,33 ± 0,13	0,63 ± 0,13	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq046	0,28 ± 0,14	0,65 ± 0,15	0,08 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq048	0,24 ± 0,13	0,67 ± 0,15	0,08 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq054	0,3 ± 0,12	0,64 ± 0,12	0,06 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq055	0,35 ± 0,11	0,6 ± 0,12	0,05 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq056	0,27 ± 0,14	0,68 ± 0,14	0,06 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq060	0,22 ± 0,14	0,72 ± 0,14	0,05 ± 0,03	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq065	0,23 ± 0,14	0,69 ± 0,15	0,08 ± 0,05	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq067	0,21 ± 0,13	0,68 ± 0,15	0,11 ± 0,05	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,03	0,5 ± 0
	Sq068	0,31 ± 0,13	0,63 ± 0,14	0,06 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq069	0,3 ± 0,13	0,64 ± 0,14	0,06 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq072	0,29 ± 0,14	0,64 ± 0,14	0,07 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
Sq073	0,26 ± 0,14	0,66 ± 0,15	0,08 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq075	0,29 ± 0,14	0,63 ± 0,15	0,08 ± 0,04	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq076	0,31 ± 0,13	0,63 ± 0,14	0,06 ± 0,05	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq077	0,26 ± 0,14	0,68 ± 0,14	0,05 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq078	0,28 ± 0,15	0,69 ± 0,15	0,02 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq079	0,3 ± 0,12	0,63 ± 0,13	0,08 ± 0,04	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0	
X81	n°08 Mand1	0,28 ± 0,14	0,66 ± 0,14	0,06 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	n°13 Mand1	0,17 ± 0,13	0,66 ± 0,16	0,17 ± 0,07	0,13 ± 0,03	0,37 ± 0,03	0,5 ± 0
	n°14 Mand1	0,24 ± 0,15	0,7 ± 0,16	0,06 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	n°14 Mand2	0,34 ± 0,12	0,62 ± 0,12	0,04 ± 0,02	0,11 ± 0,01	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	n°15 Mand1	0,24 ± 0,14	0,69 ± 0,14	0,07 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	n°16 Mand1	0,27 ± 0,15	0,67 ± 0,15	0,06 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	n°16 Mand2	0,32 ± 0,14	0,62 ± 0,14	0,06 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
X82/T18	Sq011	0,29 ± 0,11	0,57 ± 0,13	0,14 ± 0,05	0,14 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq012	0,29 ± 0,12	0,63 ± 0,13	0,08 ± 0,04	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq023	0,27 ± 0,11	0,64 ± 0,12	0,09 ± 0,04	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq026	0,29 ± 0,13	0,66 ± 0,14	0,05 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq032	0,2 ± 0,12	0,74 ± 0,13	0,06 ± 0,04	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq037	0,27 ± 0,15	0,66 ± 0,14	0,07 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq041	0,3 ± 0,14	0,66 ± 0,14	0,05 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq049	0,27 ± 0,15	0,64 ± 0,15	0,09 ± 0,04	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq051	0,26 ± 0,15	0,69 ± 0,15	0,06 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq060	0,26 ± 0,13	0,67 ± 0,14	0,07 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq064	0,26 ± 0,13	0,62 ± 0,14	0,12 ± 0,05	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq065	0,29 ± 0,13	0,67 ± 0,13	0,04 ± 0,03	0,1 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq078	0,27 ± 0,13	0,7 ± 0,13	0,03 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq079	0,11 ± 0,1	0,82 ± 0,11	0,07 ± 0,04	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0
X83	Sq012	0,33 ± 0,12	0,62 ± 0,12	0,05 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq094	0,34 ± 0,12	0,61 ± 0,13	0,06 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq096	0,31 ± 0,13	0,62 ± 0,13	0,08 ± 0,04	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0

...Suite du tableau...							
X83	Sq108	0,27 ± 0,12	0,61 ± 0,12	0,13 ± 0,06	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq109	0,28 ± 0,15	0,68 ± 0,15	0,04 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq093=113=115	0,29 ± 0,12	0,65 ± 0,12	0,06 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq122	0,34 ± 0,11	0,62 ± 0,11	0,04 ± 0,03	0,11 ± 0,01	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq128=145	0,29 ± 0,13	0,64 ± 0,14	0,07 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq141	0,33 ± 0,12	0,64 ± 0,12	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq152	0,27 ± 0,14	0,66 ± 0,14	0,07 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq156	0,29 ± 0,14	0,63 ± 0,14	0,08 ± 0,04	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq164	0,28 ± 0,13	0,65 ± 0,14	0,06 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq169	0,29 ± 0,13	0,66 ± 0,13	0,05 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	US212 Mand1	0,39 ± 0,06	0,57 ± 0,07	0,05 ± 0,03	0,12 ± 0,01	0,38 ± 0,01	0,5 ± 0
	US215 Mand1	0,33 ± 0,11	0,59 ± 0,1	0,07 ± 0,04	0,12 ± 0,01	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	US215 Mand2	0,25 ± 0,15	0,68 ± 0,16	0,08 ± 0,05	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	US215 Mand3	0,26 ± 0,14	0,67 ± 0,14	0,06 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	US216 Mand1	0,2 ± 0,14	0,75 ± 0,15	0,06 ± 0,03	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0
	US216 Mand2	0,36 ± 0,09	0,6 ± 0,09	0,04 ± 0,03	0,11 ± 0,01	0,38 ± 0,01	0,5 ± 0
	US216 Mand3	0,29 ± 0,16	0,65 ± 0,16	0,06 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	US216 Mand4	0,33 ± 0,12	0,62 ± 0,12	0,05 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	US216 Mand5	0,36 ± 0,1	0,6 ± 0,1	0,04 ± 0,03	0,11 ± 0,01	0,38 ± 0,01	0,5 ± 0
	US217 Mand1	0,21 ± 0,14	0,69 ± 0,15	0,1 ± 0,06	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,03	0,5 ± 0
US217 Mand2	0,35 ± 0,1	0,6 ± 0,1	0,05 ± 0,03	0,11 ± 0,01	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0	
US219 Mand1	0,28 ± 0,12	0,66 ± 0,13	0,07 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0	
US219 Mand2	0,36 ± 0,11	0,6 ± 0,11	0,04 ± 0,03	0,11 ± 0,01	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0	
X84	Sq001	0,35 ± 0,1	0,59 ± 0,1	0,05 ± 0,03	0,12 ± 0,01	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq028	0,33 ± 0,11	0,62 ± 0,11	0,06 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq049	0,27 ± 0,13	0,68 ± 0,14	0,05 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq071	0,33 ± 0,11	0,62 ± 0,12	0,05 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq077	0,3 ± 0,13	0,66 ± 0,14	0,04 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq080	0,33 ± 0,1	0,57 ± 0,11	0,09 ± 0,05	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq123	0,25 ± 0,13	0,67 ± 0,15	0,08 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq140	0,29 ± 0,12	0,65 ± 0,13	0,06 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq141	0,22 ± 0,14	0,73 ± 0,15	0,05 ± 0,03	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq163	0,32 ± 0,12	0,63 ± 0,12	0,05 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq167	0,33 ± 0,11	0,61 ± 0,11	0,06 ± 0,03	0,11 ± 0,01	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq173	0,22 ± 0,13	0,72 ± 0,13	0,06 ± 0,04	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq178	0,26 ± 0,15	0,68 ± 0,15	0,06 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq179=197	0,23 ± 0,12	0,68 ± 0,15	0,09 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq180	0,26 ± 0,14	0,68 ± 0,15	0,07 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq187	0,37 ± 0,11	0,59 ± 0,1	0,04 ± 0,03	0,11 ± 0,01	0,38 ± 0,01	0,5 ± 0
	Sq199	0,33 ± 0,12	0,61 ± 0,13	0,06 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq201	0,22 ± 0,14	0,72 ± 0,14	0,06 ± 0,03	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq203	0,29 ± 0,13	0,65 ± 0,13	0,06 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq204	0,3 ± 0,13	0,62 ± 0,13	0,08 ± 0,04	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
Sq205	0,29 ± 0,13	0,65 ± 0,14	0,05 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq206	0,32 ± 0,12	0,61 ± 0,12	0,07 ± 0,03	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq207	0,21 ± 0,13	0,71 ± 0,14	0,08 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq208	0,26 ± 0,13	0,67 ± 0,13	0,07 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0	

Annexe 17. Estimations de la part relative que représente chaque ressource alimentaire consommée dans le régime alimentaire et de la quantité de protéines et de glucides/lipides ingérés par les individus de la catacombe SSPM.

Note : Ces résultats ont été obtenues en sortie des simulations stochastiques réalisées par procédures MCMC dans FRUITS. Modélisation réalisée avec hiérarchisation préalable des ressources alimentaires entre elles.

Scénario testé : Alimentation composée de blé cultivé dans la péninsule italienne, de viande dérivée d'herbivores C₃ provenant d'Italie et de poissons pêchés en mer Méditerranée. Données isotopiques utilisées : valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ mesurées sur chaque individu.

Salle	Identifiant	Types de ressources alimentaires consommées (%)				Type de macronutriments ingérés (%)		
		Herbivores (C ₃) d'Italie	Blé (C ₃) d'Italie	Poissons de Méditerranée	Millet (C ₄) d'Égypte	Protéines	Glucides & lipides	Bulk
X78/T15	Ind 4.b Mand1	0,29 ± 0,13	0,61 ± 0,14	0,08 ± 0,04	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,03	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	LivelloXII-n°42-44	0,36 ± 0,1	0,6 ± 0,1	0,02 ± 0,02	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
X80/T16	Sq003	0,39 ± 0,08	0,58 ± 0,08	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,01	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,01	0,5 ± 0,01
	Sq004	0,16 ± 0,13	0,69 ± 0,16	0,12 ± 0,06	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,03	0,39 ± 0,03	0,5 ± 0,01
	Sq009	0,28 ± 0,13	0,63 ± 0,14	0,06 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq024	0,24 ± 0,13	0,68 ± 0,14	0,05 ± 0,03	0,03 ± 0,03	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq025	0,25 ± 0,12	0,66 ± 0,13	0,06 ± 0,04	0,03 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq027	0,31 ± 0,1	0,59 ± 0,11	0,07 ± 0,04	0,04 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq039	0,33 ± 0,1	0,58 ± 0,11	0,07 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq041	0,33 ± 0,12	0,63 ± 0,12	0,02 ± 0,02	0,02 ± 0,01	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq044	0,28 ± 0,14	0,66 ± 0,14	0,04 ± 0,03	0,03 ± 0,03	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq046	0,35 ± 0,1	0,56 ± 0,11	0,07 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq048	0,29 ± 0,12	0,61 ± 0,12	0,07 ± 0,04	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq054	0,26 ± 0,13	0,67 ± 0,14	0,05 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq055	0,24 ± 0,14	0,69 ± 0,15	0,04 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq056	0,23 ± 0,14	0,7 ± 0,15	0,05 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq060	0,36 ± 0,1	0,57 ± 0,1	0,04 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq065	0,3 ± 0,12	0,61 ± 0,13	0,06 ± 0,04	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq067	0,25 ± 0,14	0,65 ± 0,15	0,08 ± 0,05	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,03	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq068	0,32 ± 0,13	0,6 ± 0,13	0,05 ± 0,03	0,03 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq069	0,32 ± 0,12	0,6 ± 0,13	0,05 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq072	0,26 ± 0,14	0,65 ± 0,15	0,06 ± 0,04	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
Sq073	0,24 ± 0,14	0,67 ± 0,15	0,05 ± 0,04	0,03 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01	
Sq075	0,33 ± 0,1	0,57 ± 0,11	0,07 ± 0,04	0,02 ± 0,03	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0,01	
Sq076	0,3 ± 0,12	0,62 ± 0,13	0,06 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01	
Sq077	0,33 ± 0,1	0,6 ± 0,11	0,05 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01	
Sq078	0,29 ± 0,13	0,67 ± 0,13	0,02 ± 0,02	0,02 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01	
Sq079	0,2 ± 0,14	0,71 ± 0,15	0,06 ± 0,04	0,03 ± 0,02	0,1 ± 0,03	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01	
X81	n°08 Mand1	0,3 ± 0,12	0,62 ± 0,13	0,05 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	n°13 Mand1	0,15 ± 0,11	0,65 ± 0,14	0,17 ± 0,09	0,02 ± 0,03	0,12 ± 0,04	0,38 ± 0,04	0,51 ± 0,01
	n°14 Mand1	0,33 ± 0,11	0,59 ± 0,12	0,05 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	n°14 Mand2	0,36 ± 0,09	0,58 ± 0,09	0,03 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	n°15 Mand1	0,33 ± 0,13	0,59 ± 0,13	0,05 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	n°16 Mand1	0,27 ± 0,13	0,65 ± 0,14	0,05 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	n°16 Mand2	0,23 ± 0,14	0,69 ± 0,15	0,06 ± 0,04	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,03	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
X82/T18	Sq011	0,32 ± 0,12	0,56 ± 0,12	0,1 ± 0,05	0,02 ± 0,02	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq012	0,35 ± 0,1	0,57 ± 0,1	0,06 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq023	0,29 ± 0,12	0,6 ± 0,12	0,08 ± 0,05	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq026	0,28 ± 0,14	0,65 ± 0,15	0,05 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq032	0,26 ± 0,15	0,65 ± 0,14	0,06 ± 0,04	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq037	0,2 ± 0,13	0,71 ± 0,14	0,06 ± 0,04	0,02 ± 0,03	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq041	0,29 ± 0,12	0,64 ± 0,13	0,04 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq049	0,31 ± 0,14	0,6 ± 0,14	0,06 ± 0,04	0,03 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq051	0,3 ± 0,14	0,61 ± 0,13	0,06 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq060	0,27 ± 0,12	0,64 ± 0,13	0,06 ± 0,04	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq064	0,25 ± 0,11	0,59 ± 0,13	0,09 ± 0,05	0,06 ± 0,05	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq065	0,32 ± 0,13	0,62 ± 0,13	0,04 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq078	0,35 ± 0,09	0,59 ± 0,09	0,03 ± 0,02	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq079	0,23 ± 0,13	0,68 ± 0,15	0,05 ± 0,04	0,03 ± 0,03	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
X83	Sq012	0,31 ± 0,12	0,62 ± 0,13	0,05 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq094	0,23 ± 0,12	0,69 ± 0,13	0,06 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,1 ± 0,03	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq096	0,24 ± 0,14	0,64 ± 0,14	0,09 ± 0,05	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01

...Suite du tableau...								
X83	Sq108	0,29 ± 0,13	0,6 ± 0,14	0,08 ± 0,04	0,03 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq109	0,38 ± 0,06	0,55 ± 0,07	0,04 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,01	0,5 ± 0,01
	Sq093=113=115	0,2 ± 0,13	0,72 ± 0,13	0,05 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq122	0,33 ± 0,13	0,61 ± 0,13	0,04 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq128=145	0,28 ± 0,12	0,65 ± 0,13	0,06 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq141	0,34 ± 0,1	0,6 ± 0,11	0,03 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq152	0,34 ± 0,12	0,59 ± 0,12	0,05 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq156	0,3 ± 0,13	0,63 ± 0,13	0,06 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq164	0,25 ± 0,14	0,67 ± 0,15	0,06 ± 0,04	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,03	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq169	0,28 ± 0,14	0,65 ± 0,14	0,05 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	US212 Mand1	0,31 ± 0,11	0,61 ± 0,12	0,05 ± 0,04	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	US215 Mand1	0,27 ± 0,15	0,65 ± 0,16	0,06 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	US215 Mand2	0,32 ± 0,11	0,58 ± 0,12	0,07 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	US215 Mand3	0,31 ± 0,12	0,61 ± 0,13	0,05 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	US216 Mand1	0,2 ± 0,13	0,72 ± 0,15	0,06 ± 0,04	0,03 ± 0,02	0,1 ± 0,03	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	US216 Mand2	0,3 ± 0,13	0,63 ± 0,14	0,04 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	US216 Mand3	0,31 ± 0,11	0,6 ± 0,11	0,06 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	US216 Mand4	0,27 ± 0,12	0,67 ± 0,13	0,04 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	US216 Mand5	0,35 ± 0,11	0,59 ± 0,11	0,04 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	US217 Mand1	0,24 ± 0,15	0,67 ± 0,17	0,07 ± 0,05	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,03	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
US217 Mand2	0,3 ± 0,15	0,65 ± 0,14	0,04 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01	
US219 Mand1	0,24 ± 0,12	0,67 ± 0,14	0,05 ± 0,03	0,04 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01	
US219 Mand2	0,28 ± 0,14	0,66 ± 0,14	0,03 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01	
X84	Sq001	0,33 ± 0,1	0,61 ± 0,11	0,04 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq028	0,31 ± 0,12	0,62 ± 0,12	0,04 ± 0,03	0,03 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq049	0,26 ± 0,14	0,66 ± 0,15	0,04 ± 0,03	0,03 ± 0,03	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq071	0,25 ± 0,13	0,69 ± 0,14	0,04 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq077	0,29 ± 0,12	0,65 ± 0,13	0,04 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq080	0,29 ± 0,13	0,61 ± 0,13	0,07 ± 0,04	0,03 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq123	0,37 ± 0,07	0,55 ± 0,08	0,06 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq140	0,32 ± 0,12	0,61 ± 0,13	0,05 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq141	0,32 ± 0,12	0,61 ± 0,13	0,05 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq163	0,27 ± 0,16	0,67 ± 0,16	0,04 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq167	0,39 ± 0,06	0,54 ± 0,06	0,05 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq173	0,31 ± 0,12	0,61 ± 0,12	0,05 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq178	0,19 ± 0,15	0,74 ± 0,16	0,05 ± 0,04	0,03 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq179=197	0,26 ± 0,12	0,63 ± 0,13	0,06 ± 0,04	0,05 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq180	0,29 ± 0,13	0,63 ± 0,14	0,05 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq187	0,22 ± 0,15	0,72 ± 0,16	0,04 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq199	0,27 ± 0,15	0,67 ± 0,15	0,04 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq201	0,24 ± 0,14	0,69 ± 0,14	0,04 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq203	0,36 ± 0,09	0,57 ± 0,1	0,05 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01
	Sq204	0,18 ± 0,15	0,73 ± 0,16	0,06 ± 0,05	0,02 ± 0,02	0,1 ± 0,03	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01
Sq205	0,31 ± 0,12	0,62 ± 0,12	0,04 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01	
Sq206	0,25 ± 0,12	0,66 ± 0,12	0,06 ± 0,04	0,04 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01	
Sq207	0,33 ± 0,1	0,59 ± 0,11	0,06 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,5 ± 0,01	
Sq208	0,25 ± 0,13	0,67 ± 0,14	0,06 ± 0,04	0,03 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,5 ± 0,01	

Annexe 18. Estimations de la part relative que représente chaque ressource alimentaire consommée dans le régime alimentaire et de la quantité de protéines et de glucides/lipides ingérés par les individus de la catacombe SSPM.

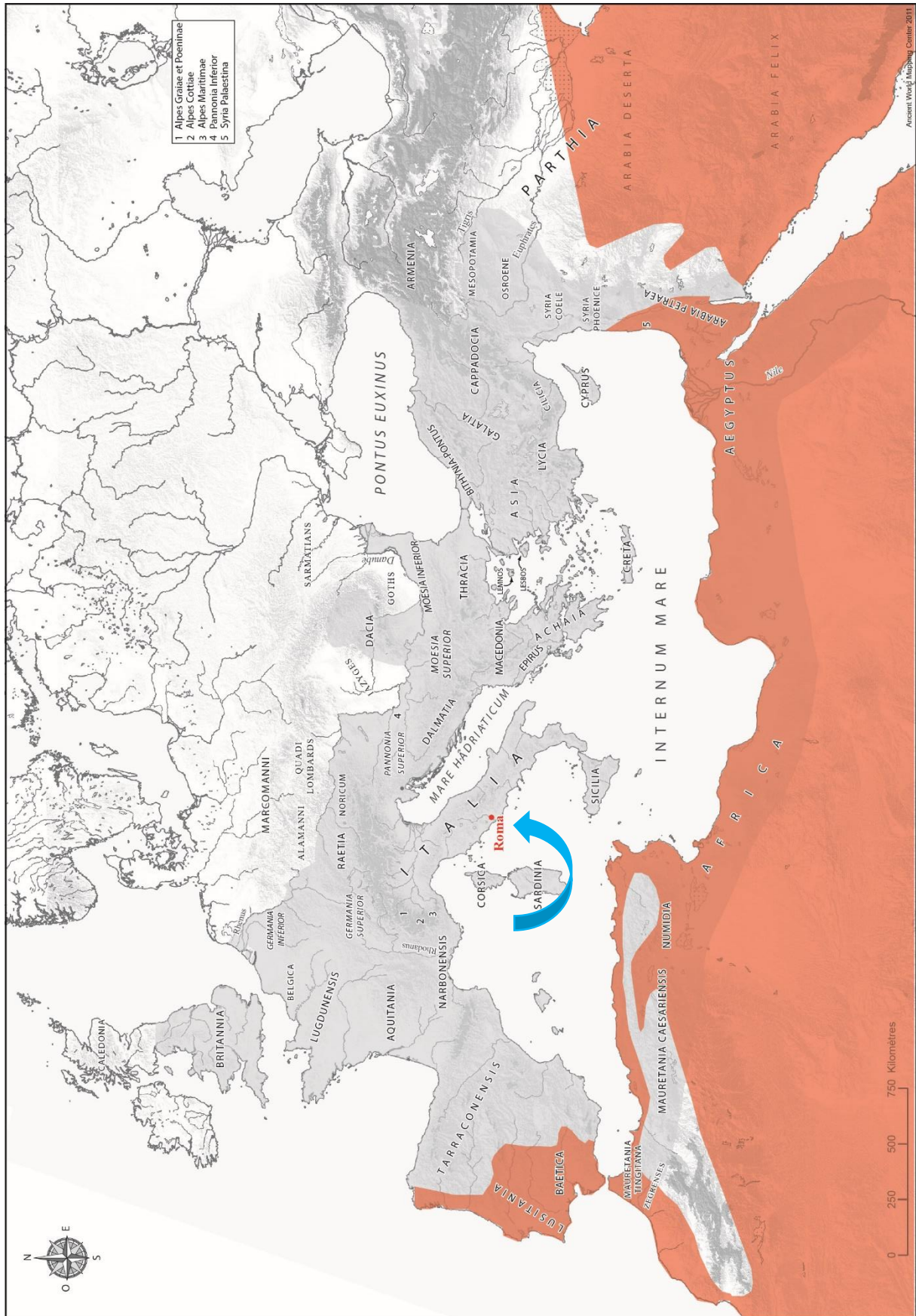
Note : Ces résultats ont été obtenus en sortie des simulations stochastiques réalisées par procédures MCMC dans FRUITS. Modélisation réalisée avec hiérarchisation préalable des ressources alimentaires entre elles. Scénario testé : Alimentation composée de blé cultivé dans la péninsule italienne, de millet cultivé en Égypte, de viande dérivée d'herbivores C₃ provenant d'Italie et de poissons pêchés en mer Méditerranée. Données isotopiques utilisées : valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ mesurées sur chaque individu.

Salle	Identifiant	Types de ressources alimentaires consommées (%)			Type de macronutriments ingérés (%)		
		Herbivores (C ₃) d'Italie	Blé (C ₃) d'Égypte	Poissons de Méditerranée	Protéines	Glucides & lipides	Bulk
X78/T15	Ind 4.b Mand1	0,3 ± 0,1	0,58 ± 0,1	0,12 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	LivelloXII-n°42-44	0,3 ± 0,08	0,6 ± 0,1	0,09 ± 0,07	0,12 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
X80/T16	Sq003	0,3 ± 0,13	0,63 ± 0,1	0,06 ± 0,05	0,11 ± 0,01	0,38 ± 0,01	0,5 ± 0
	Sq004	0,16 ± 0,11	0,67 ± 0,13	0,17 ± 0,11	0,13 ± 0,03	0,37 ± 0,03	0,5 ± 0
	Sq009	0,23 ± 0,11	0,62 ± 0,1	0,15 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq024	0,33 ± 0,1	0,55 ± 0,09	0,11 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq025	0,23 ± 0,12	0,63 ± 0,14	0,15 ± 0,08	0,13 ± 0,03	0,37 ± 0,03	0,5 ± 0
	Sq027	0,29 ± 0,12	0,6 ± 0,12	0,11 ± 0,06	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq039	0,33 ± 0,1	0,56 ± 0,08	0,11 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq041	0,36 ± 0,11	0,58 ± 0,11	0,06 ± 0,04	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq044	0,27 ± 0,12	0,61 ± 0,12	0,12 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq046	0,3 ± 0,11	0,57 ± 0,1	0,13 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq048	0,3 ± 0,08	0,52 ± 0,1	0,18 ± 0,07	0,15 ± 0,02	0,35 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq054	0,36 ± 0,08	0,54 ± 0,07	0,1 ± 0,06	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq055	0,29 ± 0,12	0,62 ± 0,13	0,09 ± 0,06	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq056	0,34 ± 0,08	0,54 ± 0,08	0,12 ± 0,06	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq060	0,3 ± 0,11	0,6 ± 0,11	0,11 ± 0,05	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq065	0,3 ± 0,12	0,59 ± 0,11	0,11 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq067	0,28 ± 0,12	0,57 ± 0,11	0,15 ± 0,09	0,14 ± 0,03	0,36 ± 0,03	0,5 ± 0
	Sq068	0,28 ± 0,12	0,62 ± 0,1	0,11 ± 0,07	0,12 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq069	0,24 ± 0,11	0,6 ± 0,09	0,16 ± 0,08	0,14 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq072	0,23 ± 0,12	0,63 ± 0,12	0,14 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
Sq073	0,28 ± 0,11	0,6 ± 0,11	0,13 ± 0,06	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq075	0,24 ± 0,12	0,64 ± 0,12	0,12 ± 0,06	0,12 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq076	0,3 ± 0,1	0,58 ± 0,1	0,12 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq077	0,27 ± 0,12	0,57 ± 0,11	0,16 ± 0,07	0,14 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq078	0,34 ± 0,11	0,59 ± 0,11	0,07 ± 0,05	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq079	0,24 ± 0,12	0,62 ± 0,12	0,14 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,03	0,5 ± 0	
X81	n°08 Mand1	0,34 ± 0,09	0,56 ± 0,11	0,1 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	n°13 Mand1	0,13 ± 0,1	0,66 ± 0,13	0,21 ± 0,12	0,14 ± 0,04	0,36 ± 0,04	0,5 ± 0
	n°14 Mand1	0,35 ± 0,09	0,55 ± 0,08	0,1 ± 0,06	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	n°14 Mand2	0,23 ± 0,13	0,65 ± 0,14	0,12 ± 0,07	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,03	0,5 ± 0
	n°15 Mand1	0,31 ± 0,1	0,56 ± 0,12	0,13 ± 0,09	0,13 ± 0,03	0,36 ± 0,03	0,5 ± 0
	n°16 Mand1	0,24 ± 0,13	0,64 ± 0,12	0,12 ± 0,07	0,12 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	n°16 Mand2	0,25 ± 0,13	0,63 ± 0,13	0,12 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,03	0,5 ± 0
X82/T18	Sq011	0,22 ± 0,12	0,56 ± 0,15	0,23 ± 0,1	0,15 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,5 ± 0
	Sq012	0,31 ± 0,09	0,6 ± 0,1	0,09 ± 0,05	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq023	0,28 ± 0,11	0,56 ± 0,11	0,15 ± 0,07	0,14 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq026	0,3 ± 0,11	0,59 ± 0,11	0,11 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq032	0,27 ± 0,09	0,58 ± 0,11	0,15 ± 0,09	0,14 ± 0,03	0,36 ± 0,03	0,5 ± 0
	Sq037	0,26 ± 0,12	0,57 ± 0,1	0,17 ± 0,07	0,14 ± 0,02	0,35 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq041	0,33 ± 0,09	0,55 ± 0,1	0,12 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq049	0,24 ± 0,12	0,61 ± 0,11	0,15 ± 0,06	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq051	0,26 ± 0,11	0,62 ± 0,11	0,12 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq060	0,24 ± 0,11	0,65 ± 0,13	0,11 ± 0,07	0,12 ± 0,03	0,38 ± 0,03	0,5 ± 0
	Sq064	0,29 ± 0,12	0,57 ± 0,13	0,14 ± 0,09	0,13 ± 0,03	0,36 ± 0,03	0,5 ± 0
	Sq065	0,26 ± 0,14	0,63 ± 0,12	0,11 ± 0,09	0,12 ± 0,02	0,37 ± 0,03	0,5 ± 0
	Sq078	0,31 ± 0,12	0,6 ± 0,13	0,09 ± 0,06	0,12 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq079	0,21 ± 0,1	0,62 ± 0,11	0,18 ± 0,08	0,14 ± 0,02	0,36 ± 0,03	0,5 ± 0
X83	Sq012	0,29 ± 0,12	0,58 ± 0,13	0,13 ± 0,06	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq094	0,29 ± 0,13	0,59 ± 0,1	0,12 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq096	0,23 ± 0,12	0,57 ± 0,11	0,2 ± 0,1	0,15 ± 0,03	0,35 ± 0,03	0,5 ± 0

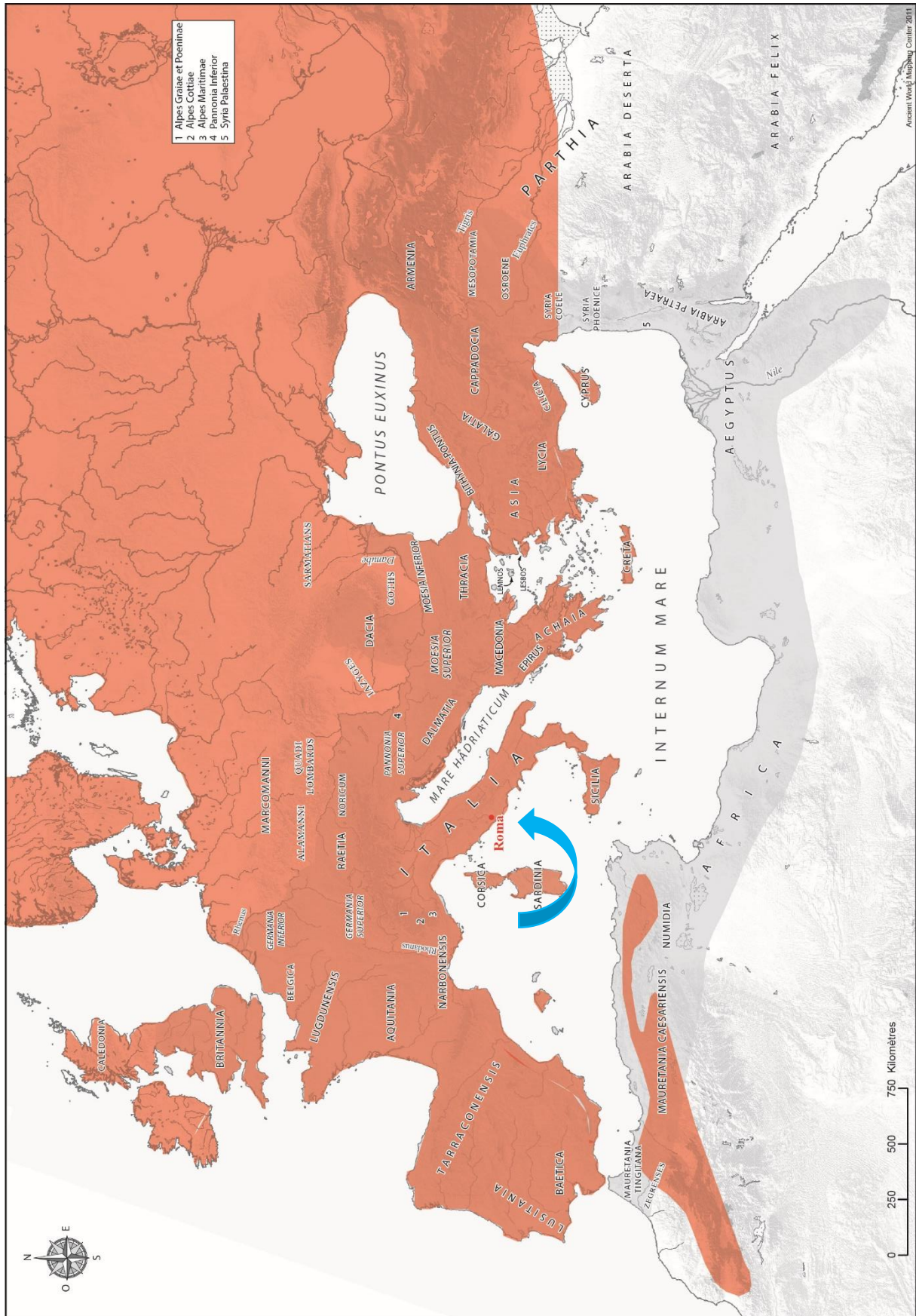
...Suite du tableau...							
X83	Sq108	0,25 ± 0,11	0,6 ± 0,11	0,15 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq109	0,31 ± 0,12	0,57 ± 0,1	0,12 ± 0,06	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq093=113=115	0,29 ± 0,12	0,6 ± 0,11	0,11 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq122	0,31 ± 0,11	0,57 ± 0,09	0,12 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq128=145	0,28 ± 0,12	0,64 ± 0,12	0,08 ± 0,05	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq141	0,31 ± 0,11	0,59 ± 0,11	0,1 ± 0,06	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq152	0,29 ± 0,1	0,58 ± 0,09	0,13 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq156	0,31 ± 0,14	0,59 ± 0,12	0,1 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq164	0,24 ± 0,12	0,63 ± 0,13	0,14 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq169	0,22 ± 0,13	0,66 ± 0,12	0,11 ± 0,07	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	US212 Mand1	0,35 ± 0,1	0,58 ± 0,1	0,07 ± 0,05	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	US215 Mand1	0,26 ± 0,12	0,62 ± 0,12	0,12 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	US215 Mand2	0,25 ± 0,13	0,63 ± 0,13	0,12 ± 0,06	0,12 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	US215 Mand3	0,31 ± 0,1	0,59 ± 0,11	0,11 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	US216 Mand1	0,26 ± 0,11	0,62 ± 0,11	0,12 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	US216 Mand2	0,34 ± 0,11	0,57 ± 0,11	0,1 ± 0,06	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	US216 Mand3	0,28 ± 0,12	0,58 ± 0,11	0,14 ± 0,09	0,13 ± 0,03	0,36 ± 0,03	0,5 ± 0
	US216 Mand4	0,27 ± 0,12	0,6 ± 0,13	0,13 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,03	0,5 ± 0
	US216 Mand5	0,32 ± 0,12	0,59 ± 0,1	0,09 ± 0,07	0,12 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	US217 Mand1	0,23 ± 0,12	0,68 ± 0,13	0,09 ± 0,05	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
US217 Mand2	0,22 ± 0,11	0,64 ± 0,13	0,14 ± 0,09	0,13 ± 0,03	0,37 ± 0,03	0,5 ± 0	
US219 Mand1	0,34 ± 0,1	0,55 ± 0,1	0,1 ± 0,05	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0	
US219 Mand2	0,31 ± 0,11	0,6 ± 0,11	0,09 ± 0,06	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0	
X84	Sq001	0,28 ± 0,13	0,62 ± 0,13	0,1 ± 0,06	0,12 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq028	0,32 ± 0,1	0,56 ± 0,09	0,12 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq049	0,3 ± 0,13	0,6 ± 0,12	0,09 ± 0,06	0,12 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq071	0,3 ± 0,12	0,6 ± 0,11	0,09 ± 0,07	0,12 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq077	0,3 ± 0,12	0,59 ± 0,09	0,1 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq080	0,27 ± 0,14	0,6 ± 0,12	0,13 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq123	0,21 ± 0,12	0,64 ± 0,12	0,15 ± 0,09	0,13 ± 0,03	0,37 ± 0,03	0,5 ± 0
	Sq140	0,22 ± 0,14	0,62 ± 0,11	0,16 ± 0,1	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,03	0,5 ± 0
	Sq141	0,32 ± 0,1	0,56 ± 0,1	0,12 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq163	0,33 ± 0,1	0,61 ± 0,1	0,06 ± 0,04	0,11 ± 0,01	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq167	0,31 ± 0,12	0,56 ± 0,1	0,13 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq173	0,26 ± 0,16	0,58 ± 0,11	0,16 ± 0,12	0,14 ± 0,03	0,36 ± 0,03	0,5 ± 0
	Sq178	0,34 ± 0,09	0,56 ± 0,11	0,1 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq179=197	0,32 ± 0,1	0,55 ± 0,09	0,12 ± 0,07	0,13 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq180	0,29 ± 0,12	0,58 ± 0,11	0,13 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq187	0,31 ± 0,1	0,58 ± 0,11	0,11 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq199	0,33 ± 0,1	0,56 ± 0,11	0,11 ± 0,06	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq201	0,23 ± 0,11	0,64 ± 0,14	0,13 ± 0,07	0,12 ± 0,03	0,37 ± 0,03	0,5 ± 0
	Sq203	0,27 ± 0,14	0,63 ± 0,14	0,1 ± 0,05	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0
	Sq204	0,25 ± 0,11	0,6 ± 0,1	0,14 ± 0,09	0,13 ± 0,03	0,36 ± 0,03	0,5 ± 0
Sq205	0,25 ± 0,11	0,65 ± 0,12	0,1 ± 0,05	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq206	0,29 ± 0,13	0,62 ± 0,13	0,09 ± 0,06	0,12 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq207	0,28 ± 0,11	0,61 ± 0,12	0,11 ± 0,06	0,12 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0	
Sq208	0,26 ± 0,13	0,6 ± 0,12	0,14 ± 0,08	0,13 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,5 ± 0	

Annexe 19. Estimations de la part relative que représente chaque ressource alimentaire consommée dans le régime alimentaire et de la quantité de protéines et de glucides/lipides ingérés par les individus de la catacombe SSPM.

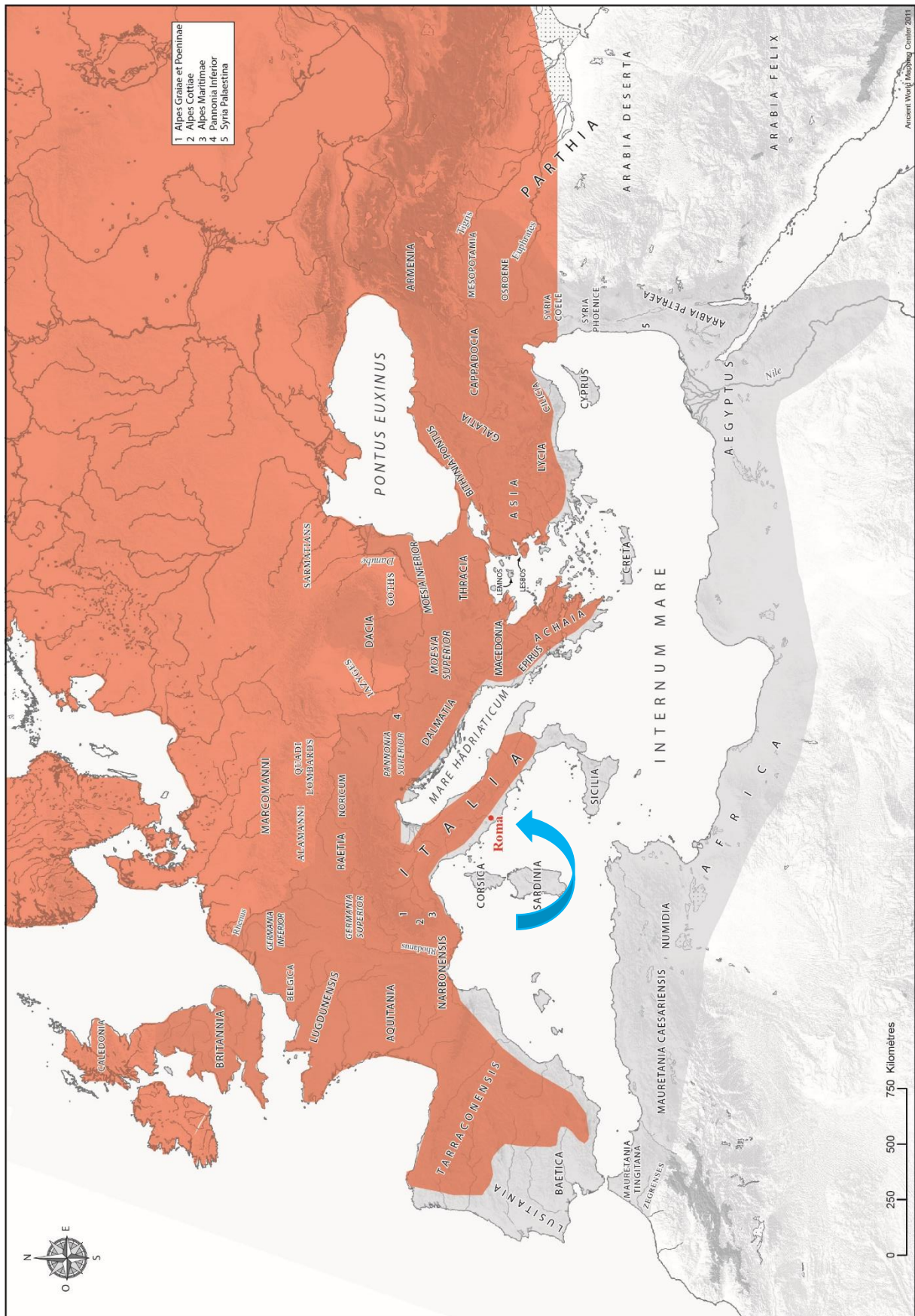
Note : Ces résultats ont été obtenus en sortie des simulations stochastiques réalisées par procédures MCMC dans FRUITS. Modélisation réalisée avec hiérarchisation préalable des ressources alimentaires entre elles. Scénario testé : Alimentation composée de blé cultivé en Égypte, de viande dérivée d'herbivores C₃ provenant d'Italie et de poissons pêchés en mer Méditerranée. Données isotopiques utilisées : valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$, de $\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$ et de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb (os)}}$ mesurées sur chaque individu.



Annexe 20. Régions extra-romaines d'où seraient originaires les 8 sujets ayant eu un schéma de mobilité de type I ou I-Bis présentés dans la Section V, 4.2.1, a.
 Note : Carte construite à partir de la Figure 20.

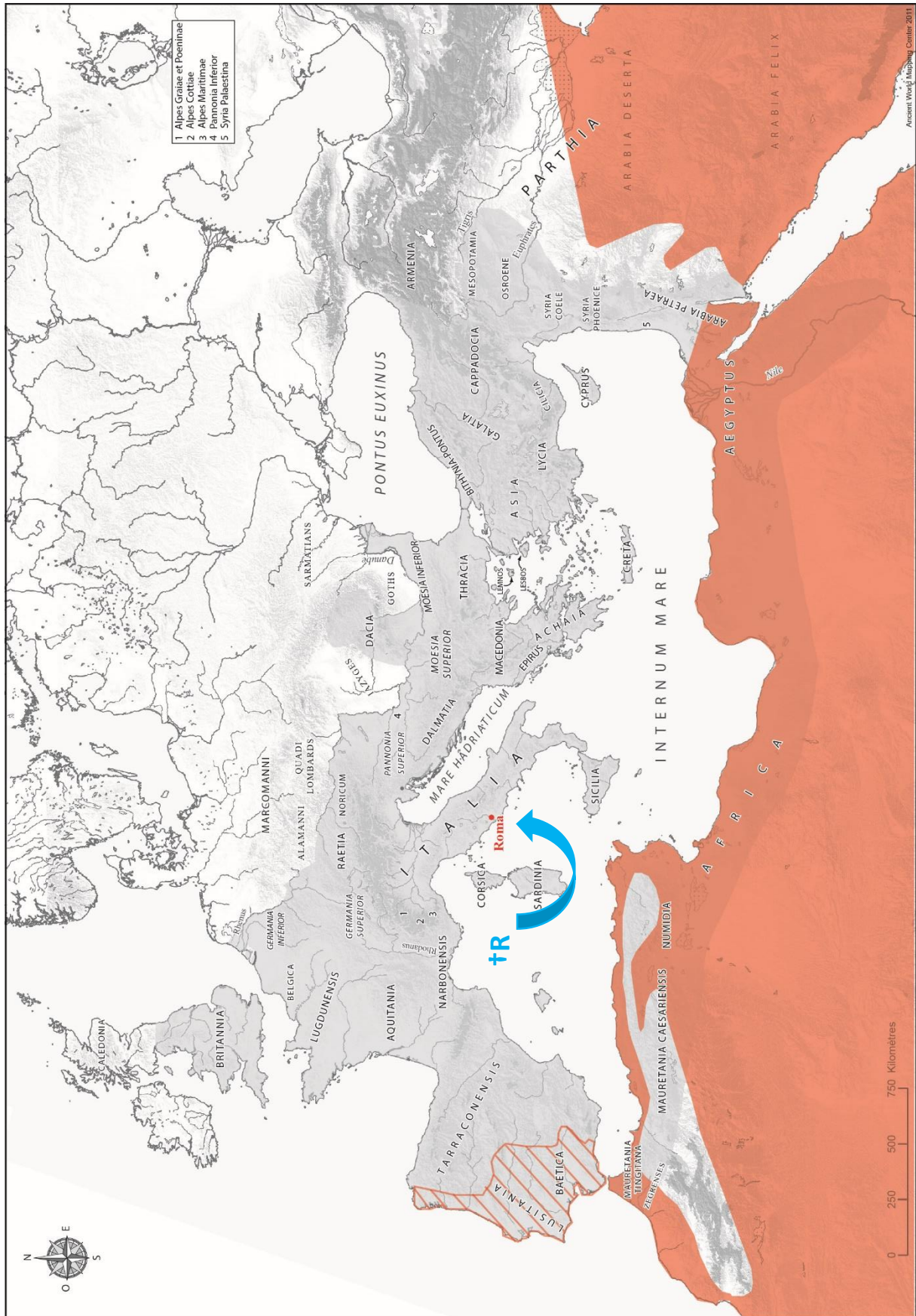


Annexe 22. Régions extra-romaines d'où seraient originaires les 3 sujets ayant eu un schéma de mobilité de type I ou I-Bis présentés dans la Section V, 4.2.1, c.
 Note : Carte construite à partir de la Figure 20.



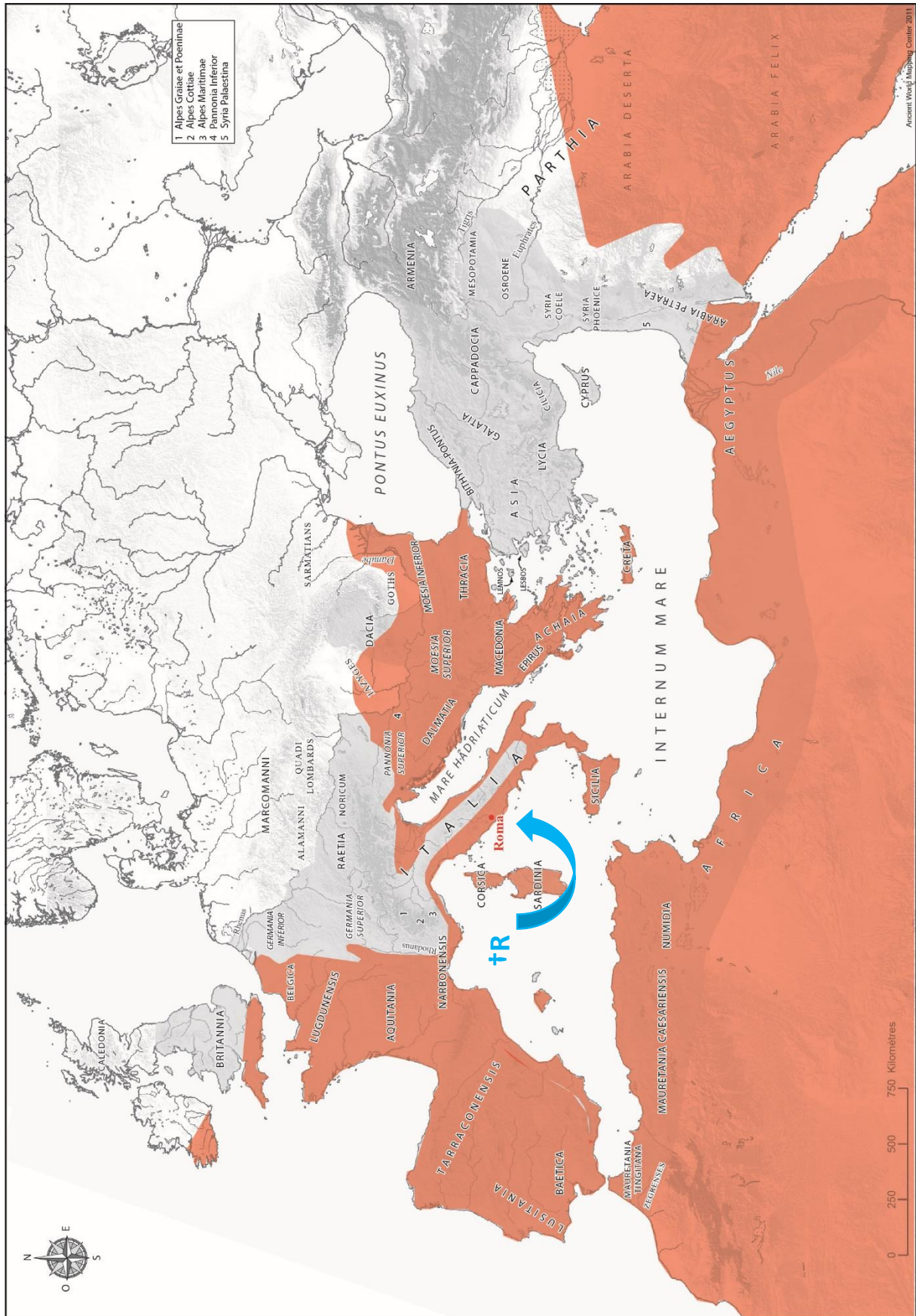
Annexe 23. Régions extra-romaines d'où seraient originaires les 4 sujets ayant eu un schéma de mobilité de type I ou I-Bis présentés dans la Section V, 4.2.1, d.

Note : Carte construite à partir de la Figure 20.



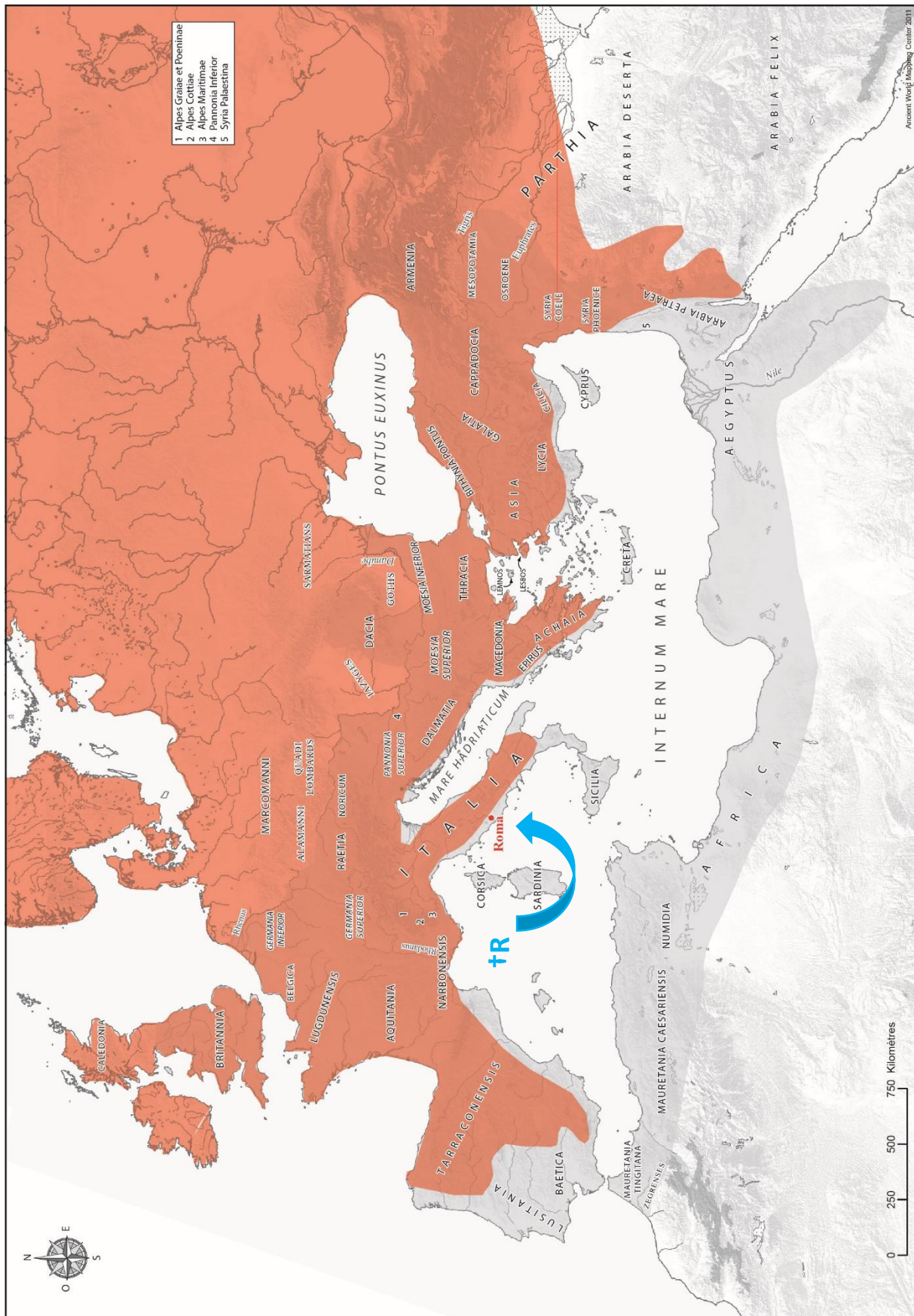
Annexe 24. Régions extra-romaines où auraient vécu les 2 sujets ayant eu un schéma de mobilité de type II ou II-Bis présentés dans la Section V, 4.2.2, a.

Note : Carte construite à partir de la Figure 20. « † » correspond au lieu de mort. « R » correspond à Rome.



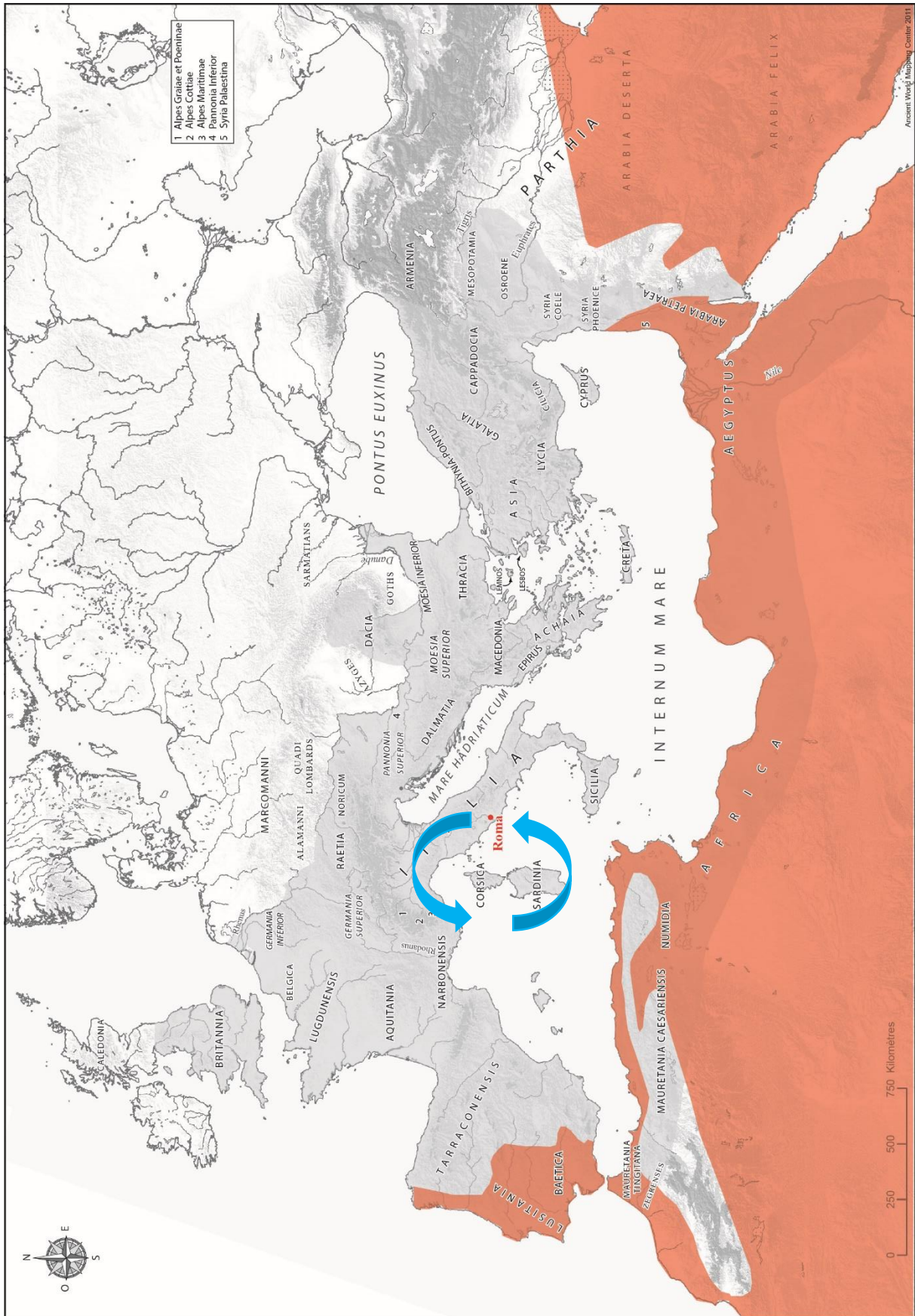
Annexe 25. Régions extra-romaines où aurait vécu le sujet ayant eu un schéma de mobilité de type II ou II-Bis présenté dans la Section V, 4.2.2, b.

Note : Carte construite à partir de la Figure 20. « † » correspond au lieu de mort. « R » correspond à Rome.



Annexe 26. Régions extra-romaines où auraient vécu les 2 sujets ayant eu un schéma de mobilité de type II ou II-Bis présentés dans la Section V, 4.2.2, c.

Note : Carte construite à partir de la Figure 20. « † » correspond au lieu de mort. « R » correspond à Rome.



Annexe 27. Régions extra-romaines où aurait vécu temporairement le sujet ayant eu un schéma de mobilité de type III ou III-Bis présenté dans la Section V, 4.2.3, a.

Note : Carte construite à partir de la Figure 20.

Cyrano. – *(est secoué d'un grand frisson et se lève brusquement)*
Pas là ! non ! pas dans ce fauteuil ! *(On veut s'élaner vers lui)*
Ne me soutenez pas ! Personne ! *(Il va s'adosser à l'arbre)*
Rien que l'arbre ! *(Silence)*
Elle vient. Je me sens déjà botté de marbre,
Ganté de plomb ! *(Il se raidit)*
Oh ! mais !... puisqu'elle est en chemin,
Je l'attendrai debout, *(Il tire l'épée)*
et l'épée à la main !

Le Bret. –
Cyrano !

Roxane. – *(défaillante)*
Cyrano ! *(Tous reculent épouvantés)*

Cyrano. –
Je crois qu'elle regarde...
Qu'elle ose regarder mon nez, cette Camarde !
Il lève son épée.
Que dites-vous ?... C'est inutile ?... Je le sais !
Mais on ne se bat pas dans l'espoir du succès !
Non ! non, c'est bien plus beau lorsque c'est inutile !
Qu'est-ce que c'est que tous ceux-là ! - Vous êtes mille ?
Ah ! je vous reconnais, tous mes vieux ennemis !
Le Mensonge ? *(Il frappe de son épée le vide)*
Tiens, tiens ! -Ha ! ha ! les Compromis,
Les Préjugés, les Lâchetés !... *(Il frappe)*
Que je pactise ?
Jamais, jamais ! -Ah ! te voilà, toi, la Sottise !
Je sais bien qu'à la fin vous me mettez à bas ;
N'importe : je me bats ! je me bats ! je me bats !
(Il fait des moulinets immenses et s'arrête haletant)
Oui, vous m'arrachez tout, le laurier et la rose !
Arrachez ! Il y a malgré vous quelque chose
Que j'emporte, et ce soir, quand j'entrerai chez Dieu,
Mon salut balaiera largement le seuil bleu,
Quelque chose que sans un pli, sans une tache,
J'emporte malgré vous, *(Il s'élanche l'épée haute)*
et c'est... *(L'épée s'échappe de ses mains, il chancelle,*
tombe dans les bras de Le Bret et de Ragueneau)

Roxane. – *(se penchant sur lui et lui baisant le front)*
C'est ?...

Cyrano. – *(rouvre les yeux, la reconnaît et dit en souriant)*
Mon panache.

Rostand E., *Cyrano de Bergerac*, Acte V, Scène 6, Livre de Poche.

RIDEAU

Titre : Archéo-biogéochimie isotopique, reconstitutions des régimes alimentaires et des schémas de mobilité, et interactions bio-culturelles. Les sépultures plurielles de la région X de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin (Rome, I^{er}-III^e s. ap. J.-C.)

Résumé : Entre 2003 et 2010, dans la région centrale nommée X de la catacombe des Saints Pierre-et-Marcellin à Rome, a été découvert et en partie fouillé un ensemble de sépultures plurielles inédites (I^{er}-III^e s. ap. J.-C.) contenant plusieurs centaines d'individus, lesquels ont été inhumés selon des pratiques funéraires singulières à la suite d'un épisode de surmortalité de nature probablement épidémique. Pour appréhender l'histoire de vie (alimentation et mobilité) de ces défunts et rediscuter sur la base d'éléments nouveaux certaines hypothèses préalablement établies, nous avons mené dans le cadre de ce travail une approche archéo-biogéochimie multi-proxy (^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et multi-tissulaire (émail, os, cheveu) sur un échantillon de 130 individus issus de six différentes chambres. Nous avons dans un premier temps vérifié l'intégrité biochimique et isotopique des fractions minérales (phases carbonatées) et organiques (phases collagénique et kératinique) des échantillons à partir d'indicateurs classiques mesurés en routine (%Col, %C, %N, C/N, PCO_2 et $\text{PCO}_2/\text{Masse}$) et par spectroscopie IRTF (IRSF, CO_3/PO_4 et Amidel/ PO_4) et par une approche innovante consistant en des datations ^{14}C sur couples collagène-apatite pour valider le signal isotopique des fractions minérales. Nos résultats mettent en évidence des différences extrêmes de préservation de toutes les phases. La trajectoire diagénétique des échantillons n'est toutefois pas aléatoire mais dépendante des conditions environnementales et taphonomiques différant entre les petites et les grandes chambres. En outre, nous avons pu démontrer qu'en dépit de fortes recristallisations et d'échanges isotopiques avec l'environnement sépulchral, les phases carbonatées possèdent un signal isotopique biogénique non altéré. Nous avons dans un second temps reconstruit les régimes alimentaires des individus en nous appuyant sur des référentiels de comparaisons robustes ainsi que divers modèles interprétatifs (mono-proxys versus multi-proxys ; qualitatifs versus quantitatifs), lesquels ont été dans certains cas adaptés au besoin de notre étude. D'une façon générale, nos résultats montrent que l'essentiel des individus a eu accès à un régime alimentaire type fondé sur la triade Céréales C_3 /Viande C_3 /Poisson marin. Ce régime alimentaire type n'est toutefois pas exclusif, certains individus ($n = 13$) ayant consommé de façon occasionnelle d'autres catégories de ressources tels que du poisson dulcicole ou des céréales C_4 . Nos résultats révèlent que les changements d'alimentation au cours de la vie sont relativement limités. Par ailleurs, cette population se singularise sur un plan strictement alimentaire au regard des autres populations contemporaines romaines pour lesquelles des valeurs isotopiques sont publiées. Nous avons dans un troisième temps étudié les schémas de mobilité des individus en nous fondant sur une approche rigoureuse de nos données et sur des référentiels de comparaison les plus exhaustifs possible ainsi qu'en tenant compte de biais ordinairement éludés (faits culturels, influence du climat et erreurs associées aux équations de conversion). Nos résultats mettent en lumière qu'à minima 23 % ($n = 30$) des individus étudiés sont migrants. Ces derniers ne se distinguent toutefois pas de par leur alimentation des résidents romains. Nous avons pu montrer en outre que ces migrants ont eu des trajectoires de vie complexes et hétérogènes et que trois schémas de mobilité distincts les caractérisent. Notre population ne se différencie pas en termes de taux de migrants des autres populations romaines pour lesquelles des données isotopiques sont disponibles. Elle se distingue en revanche par son cosmopolitisme avec des origines pour les migrants des plus diverses : Europe, Afrique, Arabie et Asie mineure. Enfin, nous avons pu démontrer en nous appuyant sur nos interprétations alimentaires et sur diverses données historiques que cette population n'est pas homogène sur un plan socio-économique. De même, au regard de notre étude de la mobilité et des données archéologiques, nous avons pu avancer l'hypothèse que certains aspects des pratiques funéraires mises en évidence sur le site pouvaient déjà être utilisés à Rome avant l'arrivée des migrants. En outre, nous avons pu rediscuter de l'antériorité supposée des sépultures en nous fondant sur les nouvelles datations ^{14}C et la mise en évidence d'une consommation non négligeable de poisson. Sur la base de tous ces éléments, nous avons pu proposer l'existence d'un lien mystique (i.e. religieux) reliant ces individus.

Mots-clés : Isotopes stables et radioactifs, collagène, apatite, kératine, alimentation, migration, époque romaine, Italie

Title: Isotopic archeo-biogeochimie, 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)

Abstract: An assembly of unpublished complex plural burials (1st-3rd cent. AD.) was discovered and partially excavated, between 2003 and 2010 in the central region called X of the catacomb of Saints Peter and Marcellinus in Rome. It contains several hundred individuals which were buried according to uncommon funeral practices following a mortality episode of likely epidemic nature. To understand the life history (diet and mobility patterns) of these deceased and to discuss again certain assumptions previously established on the basis of new evidences, we have as part of this work conducted an archaeo-biogeochimie multi-proxy (^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and multi-tissue (enamel, bones, hair) approach on a sub-sample of 130 individuals coming from six different chambers. At the outset, we tested the biochemical and isotopic integrity of mineral (carbonate phases) and organic fractions (collagen and keratin phases) samples from conventional indicators measured in routine (%Col, %C, %N, C/N, PCO_2 et PCO_2/Mass), by FTIR spectroscopy (IRSF, CO_3/PO_4 and Amidel/ PO_4) and by an innovative approach consisting of ^{14}C dating on collagen-apatite to validate the isotopic signal of mineral fractions. Our results highlight extreme differences of preservation of all phases. Diagenetic trajectory of samples is however not random but dependent on environmental and taphonomical conditions which differ between small and large chambers. Furthermore, we have been able to demonstrate that, despite strong recrystallization and isotopic exchanges with the sepulchral environment, carbonated phases have an unaltered biogenic isotopic signal. Secondly, we rebuilt the diets of individuals based on robust comparisons repositories and various interpretative models (mono-proxy versus multi-proxies; qualitative versus quantitative) which were, in some cases, adapted to the needs of our study. In general, our results show that most of the individuals had access to such a type diet based on the triad Cereals C_3 /Meat C_3 /Marine fish. This type diet would however not be exclusive, some individuals ($n = 13$) would have indeed occasionally consumed other resources such as freshwater fish or C_4 cereals. Our results indicate that changes of diet during the life history are relatively limited. Besides, with regard to consumed food, this population is distinguished from other contemporary Roman populations for whom isotopic values are published. In the third place, we studied individual's mobility patterns based on a rigorous approach to our data and on a comparison of the most comprehensive repositories as possible with taking into account the bias usually evaded (cultural facts, influence of climate and errors associated with conversion equations). Our results highlight that a minimum of 23% ($n = 30$) of the studied individuals are migrants. These, however, are not distinguished from Roman residents through their diet. We were able to show further that these migrants had complex and heterogeneous trajectories during their life within three distinct mobility patterns characterizing them. In terms of migrant's rates, our population does not differ from other Roman populations for which the isotopic data are available. It differs however by its cosmopolitanism with origins for more diverse migrants: Europe, Africa, Arabia and Asia Minor. To conclude, we demonstrated, relying on our interpretations of diet and on various historical data, that this population is not homogeneous according to a socio-economic plan. Similarly, with regard to both our study of mobility and archaeological data, we were able to speculate that some aspects of funeral practices could already have been used in Rome before the arrival of migrants. In addition, we were able to realign the supposed priority of graves based on the new ^{14}C dating and the identification of a significant consumption of fish. Based on all this, we have proposed the existence of a mystical relation (i.e. religious) connecting these individuals.

Keywords: Stable and radiogenic isotopes, collagen, apatite, keratin, diet, migration, Roman period, Italy

Titolo: Archeobiochimica isotopica, ricostituzione dei regimi alimentari e degli schemi di mobilità, e interazioni bio-culturali. Le sepolture plurime della regione X della catacomba dei Santi Pietro e Marcellino (Roma, I-III sec. D. C.)

Riassunto: Tra il 2003 e il 2010, nella regione centrale chiamata X della catacomba dei Santi Pietro e Marcellino a Roma, è stato scoperto e parzialmente scavato un insieme di sepolture plurime inedite (I-III sec. D.C.) contenente diverse centinaia di individui, i quali sono stati inumati secondo le pratiche funerarie singolari in seguito ad un episodio di sovramortalità di natura probabilmente epidemica. Per comprendere la storia di vita (alimentazione e mobilità) di questi defunti e ridiscutere, sulla base di nuovi elementi, alcune ipotesi precedentemente formulate, abbiamo condotto, nel quadro di questo lavoro, un approccio archeo-biogeochimico multi-proxys (^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) e multi-tessuto (smalto, ossa, capelli) su un campione di 130 individui da sei stanze diverse. Abbiamo inizialmente verificato l'integrità biochimica e isotopica delle frazioni minerali (fasi carbonatiche) ed organiche (fasi collageniche e cheratiniche) dei campioni provenienti da indicatori classici misurati in routine (%Col, %C, %N, C/N, PCO₂ e PCO₂/Massa) e per spettroscopia FTIR (IRSF, CO₃/PO₄ e Ammidel/PO₄) ed un approccio innovativo costituito da datazione ^{14}C su coppie collagene-apatite per validare il segnale isotopico delle frazioni minerali. I nostri risultati mettono in evidenza delle differenze estreme di preservazione di tutte le fasi. La traiettoria diagenetica dei campioni non è però aleatoria, ma dipendente dalle condizioni ambientali e tafonomiche che differiscono tra camere piccole e grandi. Inoltre, abbiamo potuto dimostrare che nonostante delle forti ricristallizzazioni e degli scambi isotopici con l'ambiente sepolcrale, le fasi carbonatiche hanno un segnale isotopico biogenetico inalterato. Abbiamo in un secondo tempo ricostruito i regimi alimentari degli individui basandoci su riferimenti di confronto robusti e vari modelli interpretativi (mono-proxys versus multi-proxys, qualitativi versus quantitativi), i quali sono stati in alcuni casi, adattati alle esigenze del nostro studio. In generale, i nostri risultati mostrano che la maggior parte degli individui ha avuto accesso ad un regime alimentare tipo basato sulla triade Cereali C3/Carne C3/Pesci marini. Questo regime alimentare non è tuttavia esclusivo, avendo certi individui (n = 13) consumato casualmente altre categorie di risorse come il pesce dulciacquicolo o dei cereali C4. I nostri risultati indicano che i cambiamenti di alimentazione nel corso della vita sono relativamente limitati. Inoltre, questa popolazione si distingue da un piano strettamente alimentare rispetto alle altre popolazioni contemporanee romane per le quali dei valori isotopici sono pubblicati. Abbiamo in un terzo tempo studiato gli schemi di mobilità degli individui basandoci su un approccio rigoroso dei nostri dati e su riferimenti di confronto i più esaustivi possibile, e anche tenendo conto di punti di vista solitamente elusi (fatti culturali, influenza del clima e errori associati alle equazioni di conversione). I nostri risultati mettono in luce che a minima 23% (n = 30) degli individui studiati sono migranti. Questi ultimi, tuttavia, non si distinguono per la loro alimentazione dai residenti romani. Abbiamo potuto mostrare, inoltre, che questi migranti hanno avuto percorsi di vita complessi ed eterogenei e che tre schemi di mobilità distinti li caratterizzano. Nostra popolazione non si differenzia in termini di tasso di migranti da altre popolazioni romane per le quali sono disponibili dei dati isotopici. Essa si distingue tuttavia per il suo cosmopolitismo con delle origini per i migranti delle più diverse: Europa, Africa, Arabia e Asia Minore. Infine, abbiamo potuto dimostrare, basandoci sulle nostre interpretazioni alimentari e su diversi dati storici che questa popolazione non è omogenea su un piano socio-economico. Allo stesso modo, per quanto riguarda il nostro studio della mobilità e dei dati archeologici, abbiamo potuto avanzare l'ipotesi che alcuni aspetti delle pratiche funerarie messe in evidenza sul sito, potevano già essere utilizzate a Roma prima dell'arrivo di migranti. Inoltre, abbiamo potuto ridiscutere dell'antiorità supposta delle sepolture, basandoci sulle nuove datazioni ^{14}C e la messa in evidenza di una consumazione non trascurabile di pesce. Sulla base di tutti questi elementi, abbiamo potuto proporre l'esistenza di un legame mistico (i.e. religioso) che unisce questi individui.

Parole chiave: Isotopi stabili e radioattivi, collagene, apatite, cheratina, alimentazione, migrazione, epoca romano, Italia

Thèse effectuée au sein de l'UMR 5199 PACEA, Équipe A3P, Université de Bordeaux,
Bâtiment B8, Allée Geoffroy Saint-Hilaire, CS 50023, 33615 Pessac Cedex, France