



HAL
open science

L'âge du sevrage dans les populations du passé : Estimation à partir de l'étude de l'émail dentaire

Gaëlle Œil

► **To cite this version:**

Gaëlle Œil. L'âge du sevrage dans les populations du passé : Estimation à partir de l'étude de l'émail dentaire. Histoire. COMUE Université Côte d'Azur (2015 - 2019), 2019. Français. NNT : 2019AZUR2031 . tel-03092245

HAL Id: tel-03092245

<https://theses.hal.science/tel-03092245v1>

Submitted on 2 Jan 2021

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 DE DOCTORAT

L'âge du sevrage dans les populations du passé

Estimation à partir de l'étude de l'émail dentaire

Gaëlle ŒIL

CEPAM UMR 7264

**Présentée en vue de l'obtention
du grade de docteur en Histoire et
archéologie des mondes anciens et
médiévaux d'Université Côte d'Azur**

**Dirigée par : Gérald Quatrehomme
Soutenue le : 12 décembre 2019**

Devant le jury, composé de :

Directeur

Pr Gérald QUATREHOMME – Professeur,
Institut Universitaire d'Anthropologie
Médico-Légale, UCA, CNRS, CEPAM

Rapporteurs

Pr Valéry HÉDOUIN – Professeur, Unité de
Taphonomie Médico-Légale de Lille,
Université de Lille II, Lille
Mme Estelle HERRSCHER – Directrice de
Recherche, CNRS, LAMPEA, Aix-Marseille
Université, Aix-en-Provence

Examineurs

Pr Pascal ADALIAN – Professeur, Aix-Marseille Université, CNRS,
ADES, Marseille
Pr Laurence LUPI – Professeur, UCA, Nice
Mr Christophe PECHEYRAN – Ingénieur de Recherche, CNRS,
LCABIE-IPREM, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau

Invité

Mr Luc BUCHET – Ingénieur de Recherche, CNRS, CEPAM, Nice

THÈSE DE DOCTORAT

PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR EN HISTOIRE ET ARCHÉOLOGIE
DES MONDES ANCIENS ET MÉDIÉVAUX DE L'UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR

ÉCOLE DOCTORALE : SOCIÉTÉS, HUMANITÉS, ARTS ET LETTRES (SHAL)

UNITÉ DE RECHERCHE : CULTURES ET ENVIRONNEMENTS. PRÉHISTOIRE, ANTIQUITÉ, MOYEN ÂGE

L'âge du sevrage dans les populations du passé

Estimation à partir de l'étude de l'émail dentaire

Présentée et soutenue publiquement par

Gaëlle Œil
le 12 décembre 2019

Discipline : Histoire et Archéologie
Spécialité : Anthropologie Biologique

Composition du jury

Directeur

Pr Gérald QUATREHOMME – Professeur, Institut
Universitaire d'Anthropologie Médico-Légale, UCA,
CNRS, CEPAM

Rapporteurs

Pr Valéry HÉDOUIN – Professeur, Unité de
Taphonomie Médico-Légale de Lille, Université de Lille
II, Lille

Mme Estelle HERRSCHER – Directrice de Recherche,
CNRS, LAMPEA, Aix-Marseille Université, Aix-en-
Provence

Examinateurs

Pr Pascal ADALIAN – Professeur, Aix-Marseille
Université, CNRS, ADES, Marseille

Pr Laurence LUPI – Professeur, UCA, Nice

Mr Christophe PECHEYRAN – Ingénieur de
Recherche, CNRS, LCABIE-IPREM, Université de Pau
et des Pays de l'Adour, Pau

Invité

Mr Luc BUCHET – Ingénieur de Recherche, CNRS,
CEPAM, Nice

L'âge du sevrage dans les populations du passé Estimation à partir de l'émail dentaire

Résumé

L'alimentation des populations du passé en général, et l'allaitement maternel en particulier, sont des thématiques de recherche importantes en anthropologie biologique car elles sont impliquées dans de nombreuses réflexions socioculturelles, sanitaires et démographiques.

L'allaitement maternel, dont les effets bénéfiques sur la santé de l'enfant sont unanimement admis aujourd'hui, a longtemps été le choix alimentaire laissant les meilleures chances de survie aux jeunes enfants. Dans la plupart des cultures, les nouveau-nés sont allaités, souvent exclusivement dans un premier temps pendant une durée qui peut varier, avant l'introduction d'une alimentation complémentaire, puis l'arrêt complet de l'allaitement maternel. La diversification alimentaire et le sevrage complet constituent des transitions alimentaires critiques pour l'enfant. Les pratiques et les modalités d'allaitement et de sevrage connaissent une grande diversité à travers le temps et l'espace notamment en ce qui concerne la durée, qui s'explique par des facteurs socio-économiques, culturels et environnementaux.

En l'absence de vestiges matériels manufacturés témoignant des pratiques de l'allaitement maternel et de sevrage, les approches anthropobiologiques représentent une alternative prometteuse pour obtenir des informations sur la consommation du lait maternel. La démarche proposée vise à mettre en relation les données chimiques obtenues par l'analyse de l'émail dentaire, l'alimentation et l'état sanitaire des jeunes enfants.

Le strontium et le calcium absorbés par un individu sont incorporés dans la dent en développement. Le rapport Sr/Ca reflète donc les changements biologiques de concentration de ces deux éléments dans le corps. Le microéchantillonnage d'une section dentaire effectué par ablation laser et analysé en spectrométrie de masse (LA-ICP-MS) nous permet d'évaluer les variations chronologiques du rapport Sr/Ca dans la couronne dentaire de la première molaire définitive. Les marqueurs de croissance par accumulation de l'émail sont utilisés pour estimer l'âge auquel nous observons des variations du rapport Sr/Ca.

Les lames minces dentaires de vingt-deux individus, issus de trois sites français, Saint-Martin-des-champs (Paris), Les Grands Peupliers (Hières-sur-Amby) et Saint-Laurent (Grenoble), ont été examinées de cette manière. Les résultats révèlent une évolution des pratiques d'allaitement et de sevrage à travers le Moyen Âge.

Le travail présenté ici se propose, à partir de l'examen histologique et chimique de l'émail dentaire, de définir un protocole scientifique en vue d'estimer l'âge de la diversification alimentaire et l'âge du sevrage complet au lait maternel chez les individus issus de populations archéologiques. Il propose également une discussion sur les performances et les potentialités offertes par la démarche envisagée.

Mots-clefs

Moyen Âge, populations du passé, anthropologie biologique, émail dentaire, LA-ICP-MS, strontium, calcium, alimentation, durée d'allaitement, transition alimentaire, sevrage

Weaning age in past populations. Assessment from tooth enamel

Abstract

Feeding of past populations, and particularly breastfeeding, are important thematic research in anthropobiology, because they are involved in many sociocultural, sanitary and demographic reflections.

Breastfeeding, whose benefic effects on child health are unanimously accepted, has long been the food choice allowing the best chances of survival for young people. In many cultures, at the beginning of their lives and according to a variable duration, newborns are exclusively breastfeeding. Progressively, mixed supplies are introduced before the definitive cessation of breastfeeding. Nursing and weaning represent significant transitions in the children dietary. Practices and modalities of breastfeeding and weaning are widely varied through time and space, especially as regards duration. This can be explained by socioeconomic, cultural and environmental factors. To get around the problem of the absence of manufactured material remains concerning the breastfeeding's practices and weaning, anthropologists developed promising alternative approaches that permit obtaining information on the consumption of breast milk. One of these approaches combines chemical data obtained by tooth enamel analysis with data concerning the diet and the health conditions of young children.

Strontium and calcium consumed by an individual are incorporated during tooth development. Sr/Ca reflect therefore biological changes in the concentrations of these two elements in the body. Microsampling of longitudinal thin section in tooth enamel withdrawn by laser ablation and tested by inductively coupled plasma mass spectrometry allows us to evaluate the variations over time of the Sr/Ca ratio through the dental crown of the first permanent molar. Incremental growth markers in enamel are used to estimate the age at which we observe changes in the Sr/Ca ratio.

Thin sections of twenty two individuals from three archaeological sites in France, Saint-Martin-des-champs (Paris), Les Grands Peupliers (Hières-sur-Amby) and Saint-Laurent (Grenoble), have been examined in this way. The results reveal the evolution of breastfeeding and weaning practices throughout the Middle Ages. The purpose of the work presented here is, on the basis of histologic and chemical examination of tooth enamel, to define a scientific protocol for estimating the age of dietary diversification and complete weaning for individuals from archaeological populations. It also proposes a discussion of the performances and potentialities offered by the envisaged approach.

Key-words

Middle Ages; Past Populations; Anthropobiology; Tooth Enamel; LA-ICP-MS; Strontium; Calcium; Diet; Breastfeeding Duration; Food Transition; Weaning.

L'âge du sevrage dans les populations du passé

Estimation à partir de l'étude de l'émail dentaire



REMERCIEMENTS

L'achèvement de ce travail est le résultat de la somme des gens qui ont gravité autour moi, ceux qui m'entourent volontairement et ceux qui ont croisé ma voie par hasard, pendant que j'avais sur cette route obscure qu'est la recherche de thèse. C'est donc avec une certaine émotion et satisfaction que je m'attache à rédiger ces remerciements à l'ensemble des personnes qui ont, de près ou de loin, participé à ce travail finalement collectif.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance à mes directeurs de recherche, Monsieur **Luc Buchet** et Monsieur le Professeur **Gérald Quatrehomme**, qui m'ont fait l'honneur de diriger et soutenir mes recherches avec beaucoup d'intérêt, de patience et de disponibilité. De plus, leurs indubitables compétences scientifiques et académiques m'ont donné la possibilité d'entreprendre et d'achever ce gigantesque projet de thèse de doctorat.

Je remercie chaleureusement Monsieur **Luc Buchet** pour son aide précieuse, son écoute et pour m'avoir permis d'accéder à de nombreuses conférences nationales et internationales, ce qui a favorisé les rencontres scientifiques et ainsi permis d'affiner plusieurs aspects de ma thèse. Je lui dois également ma participation à des chantiers de fouilles qui ont contribué à mon expérience de terrain et m'a permis de découvrir l'Albanie. Je salue également la confiance qu'il m'a toujours accordée malgré un chemin souvent semé d'embûches.

Merci à Monsieur le Professeur **Gérald Quatrehomme** d'avoir relayé la direction de mes recherches en cours de route et de m'avoir guidé avec patience à la sortie. Je lui dois aussi de nombreuses recommandations bénéfiques, ma rencontre avec le monde médical, et un encadrement stimulant.

Je remercie les membres du jury Madame **Estelle Herrscher** et Monsieur le Professeur **Valéry Hédouin**, rapporteurs, ainsi que Madame la Professeure **Laurence Lupi**, Monsieur **Christophe Pecheyran** et Monsieur le Professeur **Pascal Adalian** d'avoir pris le temps d'évaluer mon travail, de me faire l'honneur de s'intéresser à mes travaux et de me gratifier de leur présence à ma soutenance de thèse.

Je tiens à saluer la mémoire de Monsieur le docteur **Claude Rücker**, source de ma curiosité grandissante, grand gardien des connaissances dentaires, pour m'avoir guidé avec bienveillance dans les sillons secrets de la dent (et oui toute une éducation dentaire à refaire, à la base), et sans lequel ces travaux n'auraient jamais vu le jour. J'ai une pensée sincèrement émue pour la personne qui est à l'origine de mon projet et qui n'est malheureusement plus là pour constater le résultat.

Un immense merci, à Madame **Estelle Herrscher** et Monsieur **Luc Buchet** pour m'avoir confié les collections archéologiques dont ils ont la responsabilité.

Toute ma gratitude à Monsieur **Christophe Pecheyran**, initiateur et responsable de la plateforme d'analyse PALMAL (Plateforme d'Analyse des Métaux Traces par Ablation Laser) au sein du laboratoire IPREM-LCABIE, de m'avoir accueilli comme l'une des leurs, malgré l'éloignement de nos domaines de compétence et qui a su sans fanfare ni clairon, m'apporter une aide inestimable au détour d'un coin de spectromètre de masse. J'aimerais également témoigner ma reconnaissance à ses étudiants et techniciens, Fannie, Julien, Gaëlle et Ariane pour l'aide qu'ils m'ont apporté et la solidarité dont ils ont fait preuve lors de mes déplacements.

Je suis reconnaissante à Monsieur **Philippe Léonide** (CEREGE, CNRS, Marseille), et son équipe, pour m'avoir généreusement ouvert les portes de son laboratoire et donné les clés de son dispositif de microscopie qui m'a permis d'examiner au mieux mes échantillons.

Un grand merci à l'ensemble des membres du CEPAM qui m'a accueillie avec générosité et convivialité pendant mes années de recherches. Tous, d'une manière ou d'une autre, de par les moments partagés, les actions de la vie du laboratoire ou les remarques précieuses, ont contribué à l'aboutissement du manuscrit qui a vu le jour.

J'adresse des remerciements particuliers aux directeur et directrices du Cepam, Monsieur **Didier Binder**, Mesdames **Martine Regert** et **Isabelle Théry-Parisot** qui m'ont acceptée dans leur laboratoire.

Je tiens à saluer Mesdames **Jeannine François**, **Anne-Marie Gomez** et **Myriam Benou**, secrétaires et comptable du laboratoire, sans qui les labyrinthes des démarches administratives et commerciales auraient pu venir à bout de moi. Je n'oublie pas **Luisa**, mon intermédiaire sympathique et efficace avec la médecine légale.

Je remercie les bibliothécaires du CEPAM, Mesdames **Dominique Trousson**, **Monique Ogier** et **Vanessa Renaudin**, qui ont contribué à l'obtention, voire à la trouvaille parfois, des références qui m'ont permis de réaliser mon projet dans les meilleures conditions.

Je n'oublie pas de souligner les actions secourables des techniciens du laboratoire **Alain Carré**, **Arnaud Mazuy**, **Sabine Sorin** et **Jean-Denis Stritch** qui n'ont pas hésité à me prêter main-forte, chacun dans leur domaine de compétence respectif.

Une mention spéciale pour **Arnaud Jouvencz**, giga-informaticien, toujours présent et efficace quand rien ne va plus parce que l'ordinateur fait des siennes, mais heureusement aucune machine n'a eu raison de lui jusqu'à maintenant.

Une autre mention spéciale pour **Antoine Pasqualini** qui a subi mes derniers jours de thèses et que je remercie mille fois pour avoir donné vie à ma rédaction avec plus de patience et de bienveillance que je ne pouvais en espérer.

Mes remerciements spécifiques vont également à l'ensemble de l'équipe DYNAPP, source d'un contexte de travail favorable à la progression, au partage des connaissances et aux interactions scientifiques.

Je remercie en particulier l'ensemble des membres de l'axe de recherche en anthropologie et en paléodémographie pour m'avoir permis de travailler dans la bonne humeur. Je me plais à mentionner **Isabelle Séguy** pour ses avis pertinents et ses encouragements continus, le docteur **Yves Darton** pour avoir partagé son savoir ostéologique à la moindre occasion, **Martine Toniolo** et **Monica Ginnaio** pour les partages de la vie de l'équipe d'anthropologie.

Au sein du laboratoire, **Michel Dubar** et **Lionel Gourichon** sont ici particulièrement remerciés pour m'avoir aidée à maîtriser l'art subtil des lames minces.

De même, **Frédérique Bertoncello**, **Michel Lauwers** reçoivent ma sincère gratitude pour m'avoir aidée à m'orienter et me retrouver dans mes propres recherches. Je remercie également **Isabelle Rodet-Belarbi** pour ses conseils avisés, sa logique de travail implacable.

Je n'oublie pas tous les comparses avec qui j'ai partagé, de près ou de moins près un bout de chemin aussi **Khun, Seb, Julia, Laura, Jean-Victor** et **Maxime** (à qui nous sommes nombreux à devoir quelques soirées de décompression), **Antonin, Lorène, Auréade, Louise, Grégory, Cédric, Cristina, Ariana, Océane, Aurélie, Isabella, Janet, Léa, Marzia**.

Et j'ai une pensée pour les copains et les copines pour qui l'expédition n'est pas encore finie **Manon, Benjamin, Sophie, Juliette, Doriane, Leïla, Sophie, Léonor**.

Une dédicace spéciale à mes compagnes d'aventure avec qui j'ai partagé un bureau, **Carole, Hala, Émilie, Luana**.

Merci à **Vivien** et **Emilie Comez** pour les étapes parcourues ensemble et les goûters salvateurs les jours de grande anémie. Et merci aussi à **Eugénie** pour les interludes agricoles entre deux chapitres.

En dehors du laboratoire, je témoigne ma profonde reconnaissance à **Corinne Nicolas-Cabane** qui n'a cessé de me suivre et qui, sans le savoir, a plus que largement contribué à la réussite de mes recherches scientifiques. Son enthousiasme et ses critiques constructives ont grandement participé à faire du manuscrit que j'ai rédigé ce qu'il est aujourd'hui.

Je tiens également à saluer **Paul Bailet** et **Philippe Lehors**, pour leur collaboration toujours constructive, leur volonté d'avancer et de faire de nouveaux projets, et pour la qualité des moments partagés.

En dehors du monde de l'archéologie, je voudrais adresser toute ma reconnaissance à **Greg Raulier** (ma principale victime) ainsi qu'à mes amis proches **Marion** et **Gigi Devalle, Elise Benaben** (et sa famille aussi), **Tina Devos** et **Simao**, qui ont eu la redoutable tâche de supporter mes humeurs au gré des imprévus, depuis plusieurs années et qui m'ont malgré tout apporté le soutien quotidien dont j'avais besoin.

Bien évidemment, rien n'aurait été possible sans mes parents, **Elisabeth Ceil** et **Serge Dehais**. Je leur dois pour la curiosité, la persévérance, ainsi que le goût de la recherche et de la connaissance qu'ils m'ont offert en héritage, le temps qu'ils ont consacré à faire de moi ce que je suis, et leur soutien aveugle dans mes choix (entre bien d'autres choses). Je remercie mes grands-parents pour leur soutien et tout simplement d'être là.

À la vue du listing que j'ai dû faire pour écrire ces remerciements, je pense simplement que j'ai de la chance !!!

La thèse a été pour moi une expérience singulière et passionnante, alors un grand merci à tous et à toutes d'avoir été garants de ma santé mentale sur le chemin périlleux de la thèse.

*Partout où quelque chose vit,
il y a, ouvert quelque part,
un registre où le temps s'inscrit*

Henri Bergson



SOMMAIRE

INTRODUCTION	11
CHAPITRE I – PRATIQUES D’ALLAITEMENT DANS LES SOCIÉTÉS PRÉINDUSTRIELLES	19
I.1. Allaitement et sevrage dans le cadre nutritionnel : une transition alimentaire	19
I.1.1. Aliments et propriétés nutritionnelles	20
I.1.1.1. Les propriétés du lait maternel	20
I.1.1.1.1. <i>Les propriétés nutritionnelles du lait maternel</i>	20
I.1.1.1.2. <i>Les propriétés immunologiques du lait maternel</i>	21
I.1.1.1.3. <i>Le métabolisme de la mère</i>	22
I.1.1.2. Les propriétés nutritionnelles des aliments de supplantation	23
I.1.1.3. Alimentation et oligoéléments chez l’enfant	24
I.1.2. L’âge de la transition alimentaire chez les mammifères	25
I.1.2.1. Le sevrage, une étape biologique	25
I.1.2.1.1. <i>La reproduction et la stratégie de survie de l’espèce</i>	26
I.1.2.1.2. <i>Le rythme d’accroissement pondéral</i>	27
I.1.2.1.3. <i>La relation entre variables biologiques, masse corporelle adulte et durée de gestation</i>	28
I.1.2.1.4. <i>L’éruption dentaire</i>	29
I.1.2.1.5. <i>Conclusion</i>	29
I.1.2.2. Les besoins physiologiques du nourrisson	30
I.1.2.3. Le statut biologique	32
I.1.2.3.1. <i>Le statut biologique de l’enfant</i>	32
I.1.2.3.2. <i>Le statut biologique de la mère/nourrice</i>	34
I.1.2.3.3. <i>Conclusion</i>	36
I.1.3. Aperçu de la diversité des pratiques chez l’homme	36
I.2. Les choix dans les pratiques d’allaitement maternel et de sevrage	37
I.2.1. Les sources historiques	37
I.2.2. Les raisons des choix	40
I.2.2.1. Les facteurs socio-culturels	40
I.2.2.1.1. <i>Les conditions socio-économiques de la mère, de la famille et de la communauté</i>	40
I.2.2.1.2. <i>La valeur symbolique du lait et de l’allaitement</i>	44
I.2.2.1.3. <i>Le sexe de l’enfant</i>	46
I.2.2.1.4. <i>La qualité et la quantité du lait</i>	47
I.2.2.2. Les facteurs environnementaux	48
I.2.2.2.1. <i>Les facteurs vitaux</i>	48
I.2.2.2.2. <i>Les facteurs externes</i>	50
I.2.2.2.3. <i>Les facteurs sanitaires</i>	51
I.3. Conséquences démographiques liées aux pratiques d’allaitement maternel et de sevrage	53
I.3.1. Allaitement maternel, santé de l’enfant et mortalité infantile	54
I.3.2. Allaitement maternel et espacement des naissances	56
I.3.3. Incidence sur les structures démographiques	59

CHAPITRE II – LES MARQUEURS DENTAIRES DES PRATIQUES D'ALLAITEMENT ET DE SEVRAGE	61
II.1. La dent: un marqueur spécifique du squelette	61
II.1.1. La dent dans la sphère bucco-dentaire	61
II.1.1.1. Définition spatiale de la cavité bucco-dentaire	61
II.1.1.2. Le maxillaire	62
II.1.1.3. La mandibule	62
II.1.2. Chronologie du développement de la dentition	63
II.1.3. Composition structurale et physique de la dent humaine	65
II.1.3.1. La pulpe dentaire	66
II.1.3.2. La dentine	66
II.1.3.3. L'émail	66
II.1.3.4. Le ciment	66
II.1.4. L'émail: le marqueur spécifique de la dent	67
II.1.4.1. La formation de l'émail	67
II.1.4.1.1. L'odontogenèse	67
II.1.4.1.2. L'amélogénèse	68
II.1.4.1.3. La minéralisation	69
II.1.4.2. L'émail: un assemblage cristallographique	70
II.1.4.2.1. Les types d'émail: prismatique et aprismatique	70
II.1.4.2.2. Les éléments de base de l'émail: monocristaux et cristallites	72
II.1.4.2.3. L'échelle au-dessus des cristallites: le prisme	73
II.1.4.3. Histologie de l'émail dentaire: description et organisation	73
II.1.4.3.1. Les buissons, lamelles et aiguilles d'émail	73
II.1.4.3.2. Les bandes de Hunter-Schreger	73
II.1.4.3.3. Les striations	74
II.1.4.3.4. Les jonctions	75
II.1.4.4. Les anomalies dentaires de structure de l'émail	75
II.1.4.4.1. La forme hypoplasique	76
II.1.4.4.2. La forme hypocalcifiée	77
II.1.4.4.3. La forme hypomature	77
II.1.4.4.4. Les formes hors classification	77
II.1.4.5. Horloge biologique du développement dentaire	78
II.1.4.5.1. Les striations transversales	79
II.1.4.5.2. Les stries de Retzius	80
II.1.4.5.3. Débats sur l'interprétation des marqueurs chronologiques de l'émail	83
II.2. Apport de l'étude des structures de l'émail dentaire en anthropologie biologique	86
II.2.1. L'utilisation des structures dentaires	86
II.2.1.1. Les études taxonomiques	86
II.2.1.2. L'estimation de l'âge à la mort des individus juvéniles	87
II.2.2. Le stress et les défauts de l'émail	90
II.2.2.1. Les hypoplasies de l'émail dentaire	91
II.2.2.1.1. Observation et détermination	91
II.2.2.1.2. Démarches, questions d'interprétations et applications	92
II.2.2.1.3. Les hypoplasies de l'émail dentaire et la prime enfance	95
II.2.2.2. Les stries pathologiques de Retzius	97
II.2.2.2.1. Description	97
II.2.2.2.2. Interprétations	98
II.2.2.2.3. Applications	99

Sommaire

II.2.2.3. Le cas particulier de la ligne néonatale	100
II.2.2.3.1. <i>Description et interprétations</i>	100
II.2.2.3.2. <i>Utilisations marginales de la ligne néonatale</i>	104
II.3. Les outils physico-chimiques pour l'étude des tissus durs du corps humain	107
II.3.1. Isotopes stables et paléonutrition.....	108
II.3.1.1. Historique des recherches.....	108
II.3.1.2. Principes biologiques exploités: biopurification (du calcium), niveaux trophiques et chaîne alimentaire	110
II.3.1.3. Le cas particulier de l'allaitement maternel	112
II.3.1.4. Les limites de l'application des analyses isotopiques	115
II.3.2. Le rôle des oligoéléments dans le cadre des analyses élémentaires en paléonutrition	119
II.3.2.1. Historique des recherches.....	120
II.3.2.1.1. <i>Travaux pionniers</i>	120
II.3.2.1.2. <i>Diversification des thématiques d'application</i>	120
II.3.2.1.3. <i>Diversification des éléments utilisés</i>	122
II.3.2.1.4. <i>Les analyses élémentaires avec LA-ICP-MS sur l'émail dentaire humain dans la littérature</i>	123
II.3.2.2. Les principaux éléments utilisés en paléonutrition	125
II.3.2.2.1. <i>Strontium</i>	126
II.3.2.2.2. <i>Calcium</i>	127
II.3.2.2.3. <i>Baryum</i>	127
II.3.2.2.4. <i>Les éléments secondaires</i>	128
II.3.3. Conservation chimique post-mortem	132
II.3.3.1. Fossilisation et diagenèse: définitions	133
II.3.3.2. Diagenèse: état du problème	134
II.3.3.3. Identification et solutions.....	137
II.3.3.3.1. <i>Le nettoyage</i>	138
II.3.3.3.2. <i>Cristallinité et solubilité</i>	139
II.3.3.3.3. <i>L'utilisation de ratios</i>	141
II.3.3.3.4. <i>La réflexion par comparaisons</i>	143
II.3.3.3.5. <i>Les solutions à développer</i>	143
CHAPITRE III – CHOIX MÉTHODOLOGIQUES	147
III.1. Sélection et préparation des échantillons	148
III.1.1. Problème de référentiel actuel	148
III.1.2. Choix du type de dent	149
III.1.3. Protocole de préparation des échantillons	150
III.1.3.1. Matériel.....	151
III.1.3.2. Les étapes de la préparation des échantillons	151
III.1.3.2.1. <i>Nettoyage</i>	151
III.1.3.2.2. <i>Induration</i>	151
III.1.3.2.3. <i>Procédure de coupe</i>	151
III.1.3.2.4. <i>Montage de la coupe sur la lame en verre</i>	152
III.1.3.2.5. <i>Polissage de la coupe</i>	152
III.2. Techniques d'observation des microstructures au microscope	153
III.2.1. Techniques écartées à partir des recherches bibliographiques	153
III.2.1.1. Microscopie optique	153
III.2.1.2. L'utilisation des rayons X en microscopie optique	154

III.2.2. Techniques testées sans succès ou à l'efficacité insuffisante	156
III.2.2.1. La microscopie à cathodoluminescence	156
III.2.2.2. La microscopie en lumière polarisée	156
III.2.3. Microscope confocal	157
III.3. Techniques d'analyses élémentaires	158
III.3.1. L'équipement: une combinaison de méthodes	159
III.3.2. Les combinaisons de méthode écartées à partir des recherches bibliographiques	159
III.3.2.1. Microscope électronique à balayage	160
III.3.2.2. Spectrométrie d'absorption atomique (ICP-AAS) et spectrométrie d'émission atomique (ICP-AES)	160
III.3.2.3. Spectrométrie sur plasma induit par laser (LIBS)	162
III.3.2.4. Les techniques à rayons X	162
III.3.2.5. Vaporisation électrothermique –ICP-MS (ETV-ICP-MS)	163
III.3.3. Protocole défini dans ce travail: spectrométrie de masse à plasma induit couplée à l'ablation laser (LA-ICP-MS)	164
III.3.3.1. Expérimentation: mode opératoire pour l'ablation laser	166
III.3.3.1.1. <i>Les caractéristiques de l'instrumentation</i>	167
III.3.3.1.2. <i>Le tracé de l'ablation</i>	170
III.3.3.2. Expérimentation: mode opératoire pour le spectromètre de masse	170
III.3.3.3. Expérimentation: mode opératoire pour l'étalonnage	174
III.3.3.3.1. <i>Étalonnage externe</i>	174
III.3.3.3.2. <i>Étalonnage interne</i>	175
III.3.3.4. Le problème de la diagenèse	176
III.3.3.5. Expérimentation: mode opératoire pour le traitement des données	176
III.3.3.6. Les limites de LA-ICP-MS	176
III.4. Interprétation des données	177
III.4.1. Interprétation des marqueurs chimiques	178
III.4.1.1. Comportement du strontium et du calcium dans le corps humain	178
III.4.1.2. Le rôle du strontium et du calcium dans la reconstruction paléonutritionnelle	178
III.4.1.2.1. <i>Biopurification du calcium et rapports élémentaires</i>	179
III.4.1.2.2. <i>Régimes alimentaires</i>	180
III.4.1.2.3. <i>Le problème de l'alimentation issue de la mer</i>	185
III.4.1.2.4. <i>Nutrition et interprétations sociales</i>	187
III.4.1.2.5. <i>L'utilisation des ratios élémentaires pour l'exploitation des données</i>	188
III.4.1.3. Le rapport Sr/Ca: marqueur chimique des transitions alimentaires du jeune enfant	191
III.4.1.3.1. <i>Le rapport Sr/Ca dans l'organisme</i>	191
III.4.1.3.2. <i>Le rapport Sr/Ca dans les tissus durs</i>	192
III.4.1.3.3. <i>Le rapport Sr/Ca dans l'émail dentaire</i>	195
III.4.1.4. Les facteurs d'influence sur le rapport Sr/Ca dans les tissus durs	198
III.4.1.4.1. <i>Les variations environnementales</i>	198
III.4.1.4.2. <i>Les paramètres métaboliques et biologiques</i>	199
III.4.1.5. Les oligoéléments: carences et excès	202
III.4.1.5.1. <i>Carences</i>	203
III.4.1.5.2. <i>Empoisonnements</i>	204
III.4.1.5.3. <i>Le cas du strontium</i>	204
III.4.2. Utilisation et interprétation des marqueurs histologiques	205

CHAPITRE IV – APPLICATION ARCHÉOLOGIQUE	211
IV.1. Présentation des sites sélectionnés	211
IV.1.1. Saint-Martin-des-champs, Paris	211
IV.1.1.1. Situation géographique	211
IV.1.1.2. Fouilles	212
IV.1.1.3. Aperçu Historique	212
IV.1.2. Les grands Peupliers, Hières-sur-Amby	214
IV.1.2.1. Situation géographique	214
IV.1.2.2. Fouilles de la nécropole	216
IV.1.2.3. Aperçu historique	216
IV.1.2.4. La nécropole	218
IV.1.2.5. Les squelettes	219
IV.1.3. Saint-Laurent-de-Grenoble	220
IV.1.3.1. Situation géographique	220
IV.1.3.2. Fouilles de Saint-Laurent	221
IV.1.3.3. Aperçu historique	222
IV.1.3.4. Grenoble et son contexte funéraire	223
IV.1.3.5. Le site de Saint-Laurent	224
IV.1.3.6. Les squelettes de l'église Saint-Laurent	226
IV.2. Présentation du corpus	227
IV.2.1. Intérêt des collections	227
IV.2.2. Corpus	228
IV.2.3. L'intérêt de la diversité entre les collections étudiées	229
IV.2.3.1. Contexte socio-économique et culturel au cours du Moyen Âge	229
IV.2.3.2. Contexte environnemental et sanitaire	234
IV.3. Résultats	237
IV.3.1. Saint-Martin-des-champs	237
IV.3.1.1. Échantillon CNAM 466b	237
IV.3.2. Les Grands peupliers	237
IV.3.2.1. Échantillon GP 07	237
IV.3.2.2. Échantillon GP 18	237
IV.3.2.3. Échantillon GP 32	238
IV.3.2.4. Échantillon GP 38.1	238
IV.3.2.5. Échantillon GP 48	238
IV.3.3. Saint-Laurent-de-Grenoble	239
IV.3.3.1. Échantillon SL 48	239
IV.3.3.2. Échantillon SL 124	239
IV.3.3.3. Échantillon SL 154	239
IV.3.3.4. Échantillon SL 262	240
IV.3.3.5. Échantillon SL 287	240
IV.3.3.6. Échantillon SL 304	240
IV.3.3.7. Échantillon SL 327	241
IV.3.3.8. Échantillon SL 526	241
IV.3.3.9. Échantillon SL 531	241
IV.3.3.10. Échantillon SL 538	241
IV.3.3.11. Échantillon SL 557	242
IV.3.3.12. Échantillon SL 558	242
IV.3.3.13. Échantillon SL 593	242

IV.3.3.14. Échantillon SL 946	243
IV.3.3.15. Échantillon SL 1144	243
IV.3.3.16. Échantillon SL 1327	243
IV.4. Apports méthodologiques	256
CHAPITRE V – PROLONGEMENTS ET CONCLUSION	259
V.1. Discussion	259
V.1.1. Discussion sur les pratiques d'allaitement et de sevrage à travers le temps, à partir des échantillons étudiés.	259
V.1.2. Discussion sur le modèle théorique proposé dans ce travail pour l'interprétation des analyses élémentaires	267
V.2. Perspectives	270
V.3. Conclusion	272
BIBLIOGRAPHIE	277
TABLE DES ILLUSTRATIONS	307

INTRODUCTION

L'allaitement maternel est une pratique naturelle et instinctive que l'on retrouve chez tous les mammifères. Cependant, selon l'époque ou l'aire géographique où elle est observée, la différence la plus flagrante dans la manière de procéder réside dans sa durée. En effet, si certaines mères nourrissent peu de temps leur enfant au sein, d'autres peuvent le faire jusqu'à un âge avancé de l'enfance.

Le lait maternel est un aliment complet qui apporte à l'organisme infantile, notamment par le biais du lactose, l'énergie nécessaire à sa croissance. En outre, le lactose est le seul glucide apporté par le lait. Ce sucre propre au lait joue un rôle important dans la croissance de l'enfant, la formation des structures cérébrales (Gillet, 1994), le développement des défenses immunitaires (arguments encore prédominants aujourd'hui dans nos sociétés modernes) et l'apport des nutriments dont il a besoin. Le lait maternel contient, de surcroît : des métaux et métalloïdes, dont le calcium et le phosphore, favorables à la fixation des minéraux dans les tissus osseux; des protéines du lait (caséine, bêta-lactoglobuline, alpha-lactalbumine, immunoglobuline) fournissant des acides aminés; des lipides; des vitamines qui participent aux processus biochimiques permettant l'anabolisme; en plus du lactose. Toutefois, malgré tous les éléments nutritifs qu'il contient, le lait ne suffit pas pour satisfaire les besoins énergétiques de l'adulte. De plus, l'organisme a besoin d'une enzyme, la lactase, produite par l'intestin grêle, qui décompose le lactose afin qu'il puisse être digéré. La concentration est très élevée chez le nourrisson et diminue avec l'âge (ce qui provoque chez certains adultes une intolérance au lactose). C'est à ce stade que devrait intervenir le sevrage, qui est alors qualifié de « naturel ».

Mais les demandes biologiques ne sont pas les seules à être prises en compte dans l'application de ce processus puisque, nous le savons, les pratiques liées à l'allaitement sont aussi fonction de considérations économiques (le lait maternel étant gratuit, il évite la dépense pour l'alimentation de l'enfant ce qui revêt une grande importance dans certains milieux particulièrement pauvres); religieuses, comme nous le laisse entrevoir l'existence de la déesse romaine Rumia en l'honneur des femmes qui allaitent¹ (Ulmann, 1967); politiques, comme le montre une loi Lycurgue qui obligeait les mères spartiates à allaiter (Ulmann, 1967); ou sociales. Ces choix vont largement dépendre des possibilités de la famille, ou encore de la place et du rôle de l'enfant et de la mère dans la société, ainsi que le lien mère-enfant².

Dans les sociétés occidentales contemporaines, l'allaitement maternel à la demande est préconisé, de façon exclusive sur une durée d'environ six mois. Ce modèle peut-il être transposé

1. Ou Rumina.

2. Éléments dont l'emploi de nourrices dans certaines familles aisées peut être un indicateur.

aux populations archéologiques et quel intérêt présente pour l'historien une connaissance de l'âge de sevrage ?

Notre étude vise à mieux comprendre la diversité et l'évolution des comportements des populations anciennes. Elle peut, aussi, servir les problématiques démographiques en recherchant s'il existe bien un lien entre le temps de l'allaitement et la mortalité infantile. Il est, en effet, communément admis que les pratiques d'allaitement et de sevrage (durée de l'allaitement exclusif, durée de la transition) peuvent avoir un impact sur la survie des jeunes enfants.

En combinant les travaux de l'anthropologie biologique, tels que ceux exposés dans la présente recherche, et ceux des anthropologues sociaux, il devient possible d'obtenir des compléments d'information sur les structures démographiques, malgré des données souvent biaisées, en particulier à cause du problème bien connu des anthropologues de la sous-représentation des enfants en contexte funéraire.

D'autre part, les informations recueillies nous éclairent sur la santé des premières années de la vie des enfants à des époques données. En effet, il est largement admis qu'un sevrage précoce et/ou brutal peut avoir des conséquences sur la santé de l'enfant. Un allaitement exclusif trop bref et/ou opéré dans des modalités inadéquates a généré une mortalité infantile importante dans le passé. À l'inverse, un enfant atteint d'une maladie à un stade critique peut refuser de lui-même l'allaitement maternel.

Pour répondre à la question du temps que devait durer l'allaitement dans les populations du passé, il convient de s'interroger sur les sources qui sont à notre disposition.

Les sources écrites sont rares et peu précises pour les périodes historiques. Les textes portant sur l'allaitement traitent souvent de la mise en nourrice et des règles qui régissent cette pratique, que ce soient les accords entre les deux parties liées autour d'un contrat où les exigences concernant le comportement de la nourrice. Il existe des textes religieux et quelques traités médicaux comme, par exemple, ceux de Galien ou d'Hippocrate qui portent sur le choix entre l'allaitement maternel et la mise en nourrice, le don ou non du colostrum, mais qui n'évoquent que de façon très brève la question de la durée (on retient cependant que la recherche de nourrice et la réglementation d'une durée minimum d'allaitement dans les contrats témoignent de la volonté d'avoir recours à du lait humain pour l'alimentation des nourrissons sur une durée minimum). Les commentaires sur les pratiques de l'allaitement font souvent partie des recommandations concernant la médecine infantile et les soins qui doivent être donnés à l'enfant. Certains documents anciens qui nous sont parvenus laissent penser que l'allaitement maternel était pratiqué dans toutes les aires géographiques. Il semble même avoir été encouragé dans l'antiquité gréco-romaine puisqu'une loi spartiate oblige les mères à allaiter et les honore. De même, à Rome, les femmes qui nourrissent leur enfant au sein ont une déesse (Rumia ou Rumina). De plus, plusieurs médecins qui ont abordé la question et dont nous connaissons les écrits (Galien et Hippocrate, mais aussi Flavorinus d'Arles) y sont favorables. Ce qui ressort de ces remarques, est que, dans l'antiquité, ce n'est pas l'allaitement en soi qui fait débat, mais l'allaitement par une nourrice. Il apparaît, à travers, notamment, d'un témoignage de Démosthène, que cette pratique subissait une mauvaise réputation et les femmes qui nourrissaient l'enfant d'une autre étaient stigmatisées. Néanmoins, l'emploi de nourrices se rencontre dans l'ensemble de l'Europe pendant toute la période chrétienne, bien qu'elle ne soit pas soutenue par la morale religieuse qui encourage

les mères à nourrir leur bébé. Dans le même temps, la pratique de l'allaitement artificiel se développe, même s'il avait déjà été expérimenté par les Romains et les Gallo-romains (Auvard et Pignat; 1889, Ulmann, 1967). Toutefois, dans tous les cas, il ne s'agit que de préconisations ou d'orientations morales. Comme ce ne sont que des données théoriques, qui n'attestent aucunement des pratiques effectives, et qui ne nous permettent pas de savoir dans quelles mesures ces préconisations étaient respectées dans l'intimité familiale, leur intérêt peut être remis en question.

En ce qui concerne l'iconographie, les scènes d'allaitement sont représentées depuis des temps très anciens et dans les différentes parties du monde. Il s'agit le plus souvent de modèles standards religieux, d'épisodes mythologiques, s'allégories de la charité ou de l'abondance (entre autres) ou d'anecdotes exceptionnelles en marge des pratiques quotidiennes.

Dans l'Égypte ancienne, l'une des représentations iconographiques les plus répandues est celle d'Isis allaitant son fils Horus, dont il existe de nombreuses statuettes. Cette figure est une allégorie de l'adoption du pharaon par la déesse et de transmission de caractères divins.

Parmi les thèmes mythologiques, on retrouve souvent le lait des déesses comme étant à l'origine des étoiles dans le ciel. En particulier, on attribue à Héra la création de la Voie lactée en ayant fait jaillir de son sein du lait après avoir rejeté Héraclès, alors nourrisson, enfant illégitime de son mari.

Dans la mythologie gréco-romaine, on retrouve fréquemment le thème de l'enfant allaité au sein par un animal, comme c'est le cas pour Romulus et Rémus allaités par une louve, ou pour Zeus nourri par la chèvre Amalthée. Le lait n'étant pas un produit neutre, ce type de représentation renvoie à ce qu'il transmet, aussi bien d'un point de vue physique et moral que spirituel (et les interprétations sont étroitement liées à la perception culturelle de l'animal choisi). D'autre part, l'allaitement d'un nourrisson humain par un animal est souvent interprété comme l'annonce d'un futur héros (Foehr-Janssens *et al.*, 2019).

Le monde romain nous offre le thème iconographique de la « charité romaine ». Il met en scène une jeune femme donnant le sein à un vieil homme. Ce motif, allégorie de la charité, à forte portée symbolique, est inspiré par des anecdotes rapportés par des auteurs latins (Maxime Valère, puis Pline, par exemple, mais que l'on retrouve plus anciennement chez les Grecs et les Étrusques, notamment). Il reflète plus une construction sociale qu'une pratique de l'époque. La civilisation romaine nous a également livré de nombreuses statuettes représentant une femme allaitant deux enfants. Ces figurines correspondent à la représentation d'une déesse-mère. On les retrouve soit en contexte funéraire où elles sont déposées pour accompagner l'enfant défunt dans l'au-delà, soit dans les sanctuaires où elles sont données en offrande aux divinités et symbolisent alors la protection de la maternité, la fécondité ou l'abondance (nourricière).

Au Moyen Âge, le thème de l'allaitement se fait aussi rare dans la littérature que dans l'art profane. En revanche, nous retrouvons ce thème largement développé dans l'art sacré. Il existe de nombreuses représentations hagiographiques plus ou moins merveilleuses et/ou miraculeuses comme, par exemple, la lactation de vierges ou de statues, ou encore l'allaitement d'un saint. Cependant, le sujet le plus largement répandu est celui de la vierge allaitante. Bien que les origines de ce thème remontent au concile d'Éphèse de 431 (Lett et Morel, 2006) il se développe entre le XI^e et le XII^e siècle, et connaît un nouvel essor aux XIV^e et XV^e siècles.

Enfin, les traces archéologiques matérielles sont difficilement identifiables car l'allaitement direct au sein, à priori plus largement répandu, ne nécessite aucun ustensile qui aurait pu nous parvenir à l'état de vestiges. On peut signaler, malgré tout, des récipients tubulaires à bec découverts en contexte funéraire gallo-romain et identifiés par certains archéologues comme tirelait. D'autres hypothèses ont été proposées pour ces objets, comme celles de pipettes à malade pour donner des remèdes à base de lait, ou de biberons. Des analyses chimiques de ces récipients ont mis en évidence la présence de lait, mais ne permettent pas de déterminer s'il s'agit de lait animal ou humain (Rouquet et Loridant, 2000; Centlivre-Challet, 2016).

L'ensemble de ces sources ne fournit donc pas les informations qui permettraient de préciser la durée de l'allaitement et, par voie de conséquence, l'âge au sevrage. Mais, avant de proposer une nouvelle approche, il est nécessaire d'évoquer le problème posé par la définition du mot sevrage. En effet, dans les différents travaux historiques, scientifiques, sociologiques, que ce soit dans des sources anciennes ou les travaux contemporains, le mot n'est pas toujours utilisé pour renvoyer à la même réalité. Qu'entend-on par « sevrage » ?

Le terme de sevrage est parfois employé pour marquer l'introduction d'une alimentation diversifiée en complément de l'allaitement maternel (à l'initiative des adultes ayant comme finalité l'arrêt de l'allaitement), mais il peut aussi désigner la cessation complète de l'allaitement maternel (spontané, par l'enfant, ou imposé par la mère). Une troisième définition fait référence à l'intégralité du processus de sevrage, de la supplantation du lait maternel au sevrage définitif, en passant par la réduction progressive de l'allaitement.

Lawrence (1994) mentionne le mot anglo-saxon « weanian », d'où est dérivé le terme anglais « wean » qui signifie littéralement « devenir accoutumé à quelque chose de différent ». Ce terme renvoie donc à la notion d'introduction d'une autre alimentation plutôt qu'à l'arrêt de l'allaitement maternel. À l'inverse, le terme français « sevrage » traduit l'idée de cessation définitive. Lorsque « weaning » fait référence à l'arrêt de l'allaitement maternel, le mot évoque un événement. Lorsqu'il se rapporte à l'introduction d'une alimentation mixte parallèlement à une réduction progressive de l'allaitement maternel, le mot « weaning » se rapporte alors à un processus. Le processus de sevrage est donc encadré par deux événements distincts, l'introduction d'une alimentation différente du lait maternel et la cessation complète de l'allaitement maternel. Ces événements peuvent être séparés par des jours, des mois, voire des années. Dans un souci de précision, certains chercheurs utilisent l'expression « complet weaning » pour parler de l'arrêt complet de l'allaitement maternel (Katzenberg et *al.*, 1996).

Le terme sevrage recouvre donc des réalités et des définitions différentes selon les travaux. Dans notre étude, les observations portant sur les changements du rapport Sr/Ca dans la dent s'attachent à identifier, à la fois, l'âge d'introduction et le rythme de la supplantation de l'alimentation non lactée. Le sevrage est donc considéré comme un processus impliquant deux transitions plutôt qu'un événement brutal. Dans cette optique, la supplantation, ou l'introduction graduelle suivie de l'augmentation de la consommation d'une alimentation autre que le lait maternel après une période d'allaitement exclusif, constitue la première transition alimentaire et correspond au début du processus de sevrage. Ce processus s'accompagne d'un déclin du lait absorbé au profit d'une source énergétique alternative. Pendant plusieurs mois, la supplantation s'accroît alors que

l'allaitement est réduit, de façon plus ou moins rapide, plus ou moins régulière, jusqu'au sevrage complet de l'enfant qui ne reçoit plus de lait maternel. L'absence complète de lait maternel dans l'alimentation de l'enfant constitue la seconde transition alimentaire marquée par le sevrage définitif. Une étude optimisée du comportement de sevrage tient compte à la fois de la chronologie des transitions et du rythme du processus de sevrage (Schurr, 1997).

Il a donc été décidé, pour ce travail, de préciser aussi systématiquement que possible, la distinction, dans le processus de sevrage, entre l'introduction d'une alimentation diversifiée (toute alimentation différente du lait maternel) et le sevrage complet (ou définitif).

Compte tenu des problèmes de sources évoqués plus haut, nous avons développé, dans ce travail, une méthode reproductible, sur des bases biologiques utilisant les possibilités offertes par l'anthropologie, afin de travailler sur des traces directes pour obtenir des informations plus précises que celles proposées par les textes sur les pratiques d'allaitement et de sevrage, et de distinguer ainsi les étapes majeures du processus de sevrage.

Pour atteindre ces objectifs, la démarche a consisté à associer deux méthodes, d'une part l'observation histologique des microstructures de l'émail dentaire et, d'autre part, l'analyse chimique des oligo-éléments présents dans l'émail dentaire.

Le statut nutritionnel des individus du passé peut être perçu par plusieurs indicateurs osseux et dentaires. Ces indicateurs peuvent être groupés sur trois niveaux d'analyse. D'abord les manifestations de surface des maladies ou de la malnutrition. Ensuite, les aspects histologiques et microscopiques. Et enfin, l'étude de la composition chimique des tissus. Avec la chimie nous pouvons atteindre la relation entre ce qui est consommé du vivant et les conséquences sur la composition des tissus durs. La majorité de ces recherches se sont concentrées sur les isotopes stables et la chimie élémentaire sur l'os pour percevoir l'alimentation. La chimie des tissus durs s'appuie sur le principe fondamental que les différentes catégories de nourriture ont une composition isotopique et élémentaire distincte, et que ces différences se retrouvent dans les tissus durs de leur consommateur. Ainsi, les analyses chimiques des tissus durs fournissent un reflet direct de la subsistance des populations anciennes.

Des études sur les primates vivants (Humphrey *et al.*, 2008a, b) ont permis de comprendre les indices biologiques de l'alimentation durant l'enfance, grâce à une connaissance de l'histoire de la vie des individus étudiés. Nous avons associé cette démarche à des méthodes d'observation histologiques de l'émail dentaire afin de pouvoir l'appliquer à l'archéologie.

Le choix de l'émail dentaire s'est imposé pour plusieurs raisons. La couronne dentaire comme objet d'étude archéologique est pertinente, car la dent est l'élément le plus minéralisé du corps humain, ce qui en fait la pièce anatomique la plus résistante et la moins sensible aux altérations externes, qu'il s'agisse de l'état de conservation ou des modifications de composition chimique. Découvertes en contexte archéologique, les dents présentent deux avantages considérables : d'une part la fréquence de leur présence sur les sites (Hillson, 1996; Dean, 2006), malgré un contexte funéraire environnemental souvent défavorable, voire destructeur, et d'autre part leur stabilité chimique qui garantit un enregistrement biologique individuel stable depuis la fin de la formation de la couronne dentaire offrant ainsi un accès à l'ensemble du processus de sevrage.

De récentes études sur les primates (Humphrey *et al.*, 2008a, b) mettent en évidence des changements de composition élémentaire de l'émail dentaire en relation avec l'alimentation, notamment celui du rapport Sr/Ca. Au vu de ces résultats, nous avons choisi de nous appuyer sur l'évolution de ce rapport, tout en gardant à l'esprit que notre approche diffère des études citées qui s'appuient sur des individus vivants dont l'âge aux différents événements de la vie est connu.

Nous avons donc choisi d'analyser la composition en oligo-éléments de l'émail dentaire. Nous effectuons ces analyses à partir de micro-prélèvements par ablation laser, analysés par la spectrométrie de masse à plasma induit (LA-ICP-MS).

Des oligo-éléments, dont le calcium et le strontium, sont assimilés par l'organisme et se retrouvent dans l'émail dentaire au cours de la minéralisation. Leur concentration dans l'émail dentaire reflète leur concentration dans l'organisme et, par là-même, les concentrations élémentaires dans l'alimentation absorbée. La relation entre les concentrations en strontium et en calcium dans l'alimentation et celles assimilées par les tissus durs du corps humain est constante.

Dans cette étude, nous allons utiliser ce mécanisme biologique pour étudier la distribution chronologique du rapport Sr/Ca qui correspond à un modèle d'incorporation du strontium et du calcium dans l'émail lors des phases de sécrétion, maturation et formation de l'émail.

Le strontium et le calcium, indices de l'alimentation en général, peuvent être utilisés comme des indicateurs de l'absorption du lait maternel par le nourrisson.

Pour associer les changements alimentaires, mis en évidence par les changements de composition de l'émail, et le processus de sevrage, nous avons recours à l'examen des structures histologiques de l'émail dentaire. L'émail dentaire est formé par la juxtaposition de structures élémentaires, les prismes d'émail (formés de milliers de cristallites d'apatite carbonatée et organisés selon une structure très spécifique). Durant le processus de formation de l'émail, lors de la calcification quotidienne des prismes, un trouble intervenant à un stade donné de la formation se manifeste par un fonctionnement anormal des mécanismes de formation de l'émail, ce qui peut se voir sur certaines formes pathologiques des stries hebdomadaires dites de Retzius. À l'origine de cette perturbation se trouve un stress qui se répercute sur les améloblastes sécrétant la matrice amélaire fluide et les protéines de l'émail.

La première phase de la méthode que nous proposons pour estimer l'âge du sevrage consiste en un repérage des stress enregistrés par l'émail dentaire lors de sa formation.

Pour repérer chronologiquement les stress subis pendant les premiers âges de la vie, et si possible les identifier, nous pouvons nous appuyer sur les traces qu'ils laissent de façon durable dans le tissu dentaire. Moins sensible que l'os aux phénomènes de diagenèse, l'émail est un bon indicateur des maladies comme des stress environnementaux et alimentaires. Sa forte minéralisation diminue considérablement les risques de modifications.

Les signaux chimiques qui nous intéressent s'expriment dans le rapport Sr/Ca. Toutes les dents peuvent enregistrer un stress lors de leur formation, ce qui permet de choisir les dents étudiées selon des critères chronologiques. Nous devons sélectionner nos échantillons parmi les dents dont la minéralisation commence avant la naissance, afin de disposer d'un point de départ pour le décompte du temps (la ligne néonatale), et dont l'enregistrement des signaux s'effectue sur la plus longue période de temps possible après la naissance. Cela implique le choix d'une dent définitive.

La dernière à commencer sa minéralisation avant la naissance est la première molaire définitive qui s'avère donc être la plus appropriée.

Le sevrage marque l'arrêt de la consommation de lait « humain » (maternel ou provenant d'une nourrice) ou, du moins, le moment où ce lait ne constitue plus la part prépondérante de l'alimentation. Même s'il intervient au moment biologiquement approprié, il représente un profond changement des habitudes alimentaires, ressenti le plus souvent par l'enfant comme une agression biologique, un stress qui peut se manifester de façon physiologique.

Il est donc important de distinguer les phases normales de développement de la dent examinée et les périodes perturbées. Cet examen est rendu possible par l'analyse micro-spatiale de la chimie de l'émail. Les analyses chimiques déterminent la distribution des oligoéléments dans l'émail, ce qui permet de reconstituer la chronologie des événements enregistrés et d'aborder les transitions alimentaires de la petite enfance.

Le calcul de l'âge auquel ont lieu des événements chimiques associés aux transitions alimentaires se fait à partir d'observations histologiques. Le moment de la naissance, identifié sur des coupes de l'émail dentaire sous la forme d'une strie particulière (la ligne néonatale), est considéré comme le point zéro. À partir de là, le décompte du temps s'appuie sur le rythme de formation de l'émail. Nous mesurons la distance entre la naissance et la variation du signal chimique, puis nous calculons combien de jours il faut à l'émail pour se former sur cette distance.

Ces archivages biologiques, en plus d'enregistrer l'histoire nutritionnelle d'un individu, attestent également de la mobilité résidentielle, d'une exposition à des métaux lourds ou à des éléments toxiques.

Notre travail s'inscrit dans le cadre plus vaste d'une recherche des indicateurs de stress osseux et dentaires déjà exploités par Goodman et ses collègues (Goodman *et al.*, 1984) qui les ont répartis en trois groupes : les indicateurs de stress général et cumulatif (comme le stade de croissance, selon l'âge et le sexe); les indicateurs de stress épisodiques (tels que les lignes de Harris, les hypoplasies de l'émail dentaire, les micro-défauts de l'émail); les indicateurs de stress associés à des pathologies spécifiques (l'hyperostose porotique, les *cribra orbitalia* mais aussi les traumatismes au sens large, les atteintes ostéoarticulaires dégénératives, les lésions des dents et du parodonte) (Kramar, 1990). Ainsi, le croisement de l'ensemble de ces données permet d'envisager l'étude de l'état sanitaire des populations anciennes.

Les avantages de l'analyse paléo-odontologique, telle que nous l'avons menée, s'expriment, à la fois, d'un point de vue individuel et collectif. Les données fournies par cette approche nous renseignent sur l'histoire biologique de l'individu, grâce au recueil des informations sur son histoire alimentaire et son sevrage. La dimension collective se traduit dans notre travail par l'estimation de l'âge du sevrage dans une série d'enfants issus de populations anciennes afin de répondre à un certain nombre de questions.

Nous avons ensuite éprouvé la méthode proposée sur des échantillons archéologiques du Moyen Âge provenant de trois sites français : Saint-Martin-des-champs (Paris), Les Grands

peupliers (Hières-sur-Amby, Isère) et Saint-Laurent de Grenoble (Isère). Les échantillons étudiés sont répartis entre le IX^e et le XV^e siècles. Les résultats de nos travaux sont ensuite regardés en parallèle avec d'autres travaux sur les pratiques d'allaitement et de sevrage à travers le Moyen Âge. Cela nous permet d'avoir une réflexion plus large sur les pratiques d'allaitement à diverse périodes du Moyen Âge, en divers zones, en fonction du contexte économique et social.

chapitre I

PRATIQUES D'ALLAITEMENT DANS LES SOCIÉTÉS PRÉINDUSTRIELLES

Le travail présenté ici propose une reconstitution des comportements alimentaires de la jeune enfance dans des populations historiques à partir des signatures chimiques élémentaires du strontium et du calcium. Son objectif est de reconstituer les comportements alimentaires chez le nourrisson et de détecter les modifications d'alimentation au cours de la jeune enfance, à l'échelle individuelle. Ces aspects pourront être mis en relation avec plusieurs indices biologiques, sanitaires, socioculturels, environnementaux et démographiques, dans le but de comprendre les facteurs qui interagissent sur les choix concernant la nutrition de l'enfant.

1.1. **ALLAITEMENT ET SEVRAGE DANS LE CADRE NUTRITIONNEL : UNE TRANSITION ALIMENTAIRE**

Le problème de définition du sevrage évoqué en introduction se traduit, d'un point de vue nutritionnel, par la distinction, dans le processus de sevrage, de deux transitions alimentaires pour l'enfant en pleine croissance. La première de ces deux transitions se concrétise par l'introduction d'une nourriture non lactée, dont la proportion évolue de façon croissante. Cela implique une augmentation progressive de l'alimentation solide, parallèlement à la diminution du lait maternel dans le régime alimentaire. Le processus peut être très bref ou perdurer jusqu'à plusieurs années. La seconde transition du processus est matérialisée par l'arrêt complet et définitif de l'allaitement maternel.

Dans la nature, ces transitions alimentaires sont cohérentes avec le développement physique, moteur et cognitif de l'enfant. En effet, l'évolution de l'alimentation, caractérisée par des propriétés qui lui sont propres, correspond à l'évolution des besoins de l'enfant.

Cependant, chez l'Homme, un certain nombre d'influences socioculturelles et environnementales se superposent au modèle naturel biologique. Cela donne lieu à une grande diversité des pratiques d'allaitement et de sevrage chez les humains, notamment en ce qui concerne la durée (Herrscher et Séguy, 2019).

1.1.1. Aliments et propriétés nutritionnelles

1.1.1.1. Les propriétés du lait maternel

Le lait maternel est communément admis comme étant une alimentation idéale pour les très jeunes enfants dans laquelle on a identifié au moins 200 constituants ayant un rôle physiologique connu. Comme tout aliment, il dispose d'une vaste gamme de composants bioactifs nécessaires à la croissance normale et au développement et qui confère, de surcroît, une certaine immunité aux jeunes enfants dont le système immunitaire est immature. Ces constituants incluent des protéines, des composés azotés non protéiques, des vitamines solubles dans l'eau, des cellules, des carbohydrates, des lipides, des minéraux (éléments macronutriments et éléments traces) et des anticorps (voir table). Les variations en proportion des différents composants du lait maternel sont influencées par l'alimentation maternelle, mais tous les mécanismes intervenant dans les fluctuations en question ne sont pas clairement définis (Institute of Medicine, 1991).

1.1.1.1.1. Les propriétés nutritionnelles du lait maternel

Le lait maternel, en tant qu'aliment, contient les composants bioactifs nécessaires pour la croissance normale et le développement de l'enfant. Il fournit également l'immunité aux systèmes immunitaires immatures des jeunes individus. Ces composants, en quantité disponible élevée, comprennent des protéines parmi lesquelles figurent des enzymes, des facteurs de croissance, des hormones, des peptides, des glycoprotéines (en particulier certaines glycoprotéines responsables de la maturation intestinale), des acides aminés, des agents de protection immunologique contre les pathogènes microbiens; des vitamines, par exemple B6, B12, C et

<p>Protéines et composants azotés non protéiques</p> <p><u>Protéines</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Caséine α-Lactalbumine Lactoferrine Immunoglobulines sécrétrices IgA et autres immunoglobulines β-Lactoglobuline Lysozyme Enzymes Hormones Facteurs de croissance <p><u>Composants azotés non protéiques</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Urée Créatine Créatinine Acide urique Glucosamine α-Azote aminé Acides nucléiques Nucléotides Polyamines <p>Vitamines hydrosolubles</p> <ul style="list-style-type: none"> Thiamine Riboflavine Niacine Acide pantothénique Biotine Vitamine B6 Vitamine B9 Vitamine B12 Vitamine C <p>Cellules</p> <ul style="list-style-type: none"> Leucocytes Cellules épithéliales 	<p>Carbohydrates</p> <ul style="list-style-type: none"> Lactose Oligosaccharides Facteurs bifidus Glycopeptides <p>Lipides</p> <ul style="list-style-type: none"> Triglycérides Acides gras Phospholipides Stérols et hydrocarbonés <p>Vitamines liposolubles</p> <ul style="list-style-type: none"> Vitamine A et carotène Vitamine D Vitamine E Vitamine K <p>Minéraux</p> <p><u>Macronutriments</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Calcium Phosphore Magnésium Potassium Sodium Chlore souffre <p><u>Éléments traces</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Iode Fer Cuivre Zinc Manganèse Sélénium Chrome Cobalt
--	---

Fig. 1. Composition du lait maternel (d'après Institute of Medicine, 1991).

des acides foliques; des cellules leucocytaires et épithéliales; des carbohydrates, notamment le lactose; des lipides et des minéraux (voir figure 1).

1.1.1.2. Les propriétés immunologiques du lait maternel

En ce qui concerne l'immunologie, le lait maternel contient une grande quantité de composants anti-pathogènes qui protègent le nouveau-né contre les pathogènes omniprésents et se révèlent essentiels pour lui.

Certains de ces agents de protection immunologiques ont la capacité d'inhiber la croissance des pathogènes dans le système gastro-intestinal et respiratoire de l'enfant comme les immunoglobulines, la lactoferrine³, ou les lactoperoxydases. En effet, le principal accès à l'organisme pour les atteintes microbiennes ou allergiques, est la bouche, menant directement à la membrane muqueuse du système aéroalimentaire, c'est-à-dire, le tractus respiratoire et le tractus gastro-intestinal. Les nouveau-nés ne sont pas capables de produire leurs propres anticorps, en attendant qu'ils développent cette faculté, plusieurs semaines voire plusieurs mois après la naissance, pour faire face aux risques infectieux et bactériologiques induits par le contact avec les aliments et l'eau qu'ils consomment, ils sont dépendants d'une source extérieure d'anticorps, rôle normalement assumé par le lait maternel (Cunningham, 1995; McDade et Worthman, 1998). Les anticorps, ou immunoglobulines sont des protéines présentes sous 5 formes (IgA, IgG, IgM, IgD, IgE) dans le lait maternel. Les immunoglobulines A sécrétoires, les plus abondants, bordent les muqueuses des tractus respiratoire et gastro-intestinal, neutralisent les enzymes microbiennes, les toxines et les virus, et inhibent la propagation des pathogènes (McDade et Worthman, 1998). De plus, ces anticorps sont produits par la mère en réponse spécifique aux agents infectieux avec lesquels elle est en rapport. De ce fait, elle transmet au nourrisson, par le biais du lait maternel, une protection contre les agents infectieux les plus susceptibles d'être en contact avec lui lors des premières semaines. La lactoferrine, protéine nécessaire à l'absorption intestinale du fer, s'approprie le fer nécessaire au développement de certaines bactéries, ce qui fait obstacle à leur croissance. Les lactoperoxydases sont des enzymes antimicrobiennes, grâce à leurs propriétés antioxydantes et leur capacité à produire des composés antimicrobiens. Les lymphokines privilégient la réponse immunitaire active de l'enfant jusqu'à ce qu'il atteigne ses capacités immunes adultes, vers 6 ans (Dettwyler, 1995).

Le lait maternel contient également plusieurs défenses cellulaires comme les leucocytes⁴, le lysozyme, et des acides gras libres qui protègent et détruisent directement les infections, et activent d'autres mécanismes de défense. Certains leucocytes (leucocytes macrophages) produisent du lysozyme, un enzyme propre au lait humain qui détruit les bactéries, augmentant ainsi leur nombre dans les voies gastro-intestinales du nouveau-né et favorisant l'action des lymphocytes⁵ contre l'invasion des germes pathogènes. Il existe deux types de lymphocytes, les lymphocytes B qui produisent des anticorps et les lymphocytes T qui tuent directement les cellules infectées. Les acides gras libres détruisent l'enveloppe de certains virus.

3. Protéine liée au fer intervenant sur la prévention contre les bactéries nécessitant du fer.

4. Globules blancs.

5. Un type de globules blancs.

On trouve également dans le lait maternel plusieurs molécules capables d'adhérer aux bactéries et aux virus de manière à les éliminer du corps.

L'allaitement maternel joue un rôle dans la prévention de certaines maladies auto-immunes⁶. Le lait maternel est également connu pour prévenir la maladie coéliqua (intolérance au gluten), laquelle peut être à l'origine d'une mauvaise absorption de certains éléments vitaux (vitamines, fer, calcium, par exemple) par l'intestin (Cunningham, 1995), dont découlent certaines carences. De ce fait, l'allaitement maternel protège d'un facteur de carence, ce qui favorise la bonne santé de l'enfant.

Les bénéfices immunologiques du lait maternel s'atténuent à mesure que l'enfant développe ses propres défenses immunitaires. Les concentrations d'IgA, de lymphocytes, de macrophages et de lactoferrine connaissent trois ou quatre phases de diminution dans les trois premiers mois de la vie de l'enfant. Ce n'est pas le cas de tous les facteurs immuns, par exemple le lysozyme présente des concentrations plus élevées dans la même période (McDade et Worthman, 1998). L'allaitement prolongé assure à l'enfant une aptitude immunologique une fois le sevrage achevé (World Health Organisation, 2000).

1.1.1.3. Le métabolisme de la mère

La composition du lait maternel varie d'une femme à l'autre et même d'un jour à l'autre (Kara *et al.*, 1988). La teneur en calcium du lait maternel varie entre 84 et 462 mg/l, avec une médiane de 252 mg/l (Dorea, 1999), bien que selon l'étude de Krachler *et al.* (1999), la plupart des données se placent dans une fourchette entre 200 et 300 ppm, soit une moyenne de concentration en calcium de 280 mg/l dans le lait humain mature. Parmi les facteurs influençant les variations de la composition du lait maternel, on peut citer la chronologie de la lactation. La lactation est généralement divisée en trois étapes : le premier stade de lactation est la période immédiatement après la naissance, qui peut durer jusqu'à une semaine, et qui produit le colostrum ; suivie d'une période à l'origine d'un lait de transition qui s'étend entre la première et la troisième semaine après la naissance ; enfin une dernière phase qui commence environ trois semaines après la naissance et correspond à un lait dit mature (Institute of Medicine, 1991). Dans leur révision des études sur les concentrations de calcium Dorea (1999) ont retenu que le calcium est environ 1,7 fois plus élevé dans les quelques jours qui suivent immédiatement la naissance. Concernant la période des six premiers mois (excepté les quelques premiers jours), une diminution du calcium a été observée dans quelques études, tandis que la majeure partie des recherches infirment ces données. En revanche, tous les travaux constatent une diminution des valeurs de calcium au-delà des six premiers mois. L'amorce de cette tendance à la baisse est placée entre le septième et le vingtième mois, selon les études.

La composition organique du lait dépend en grande partie de la nutrition de la mère et quelques autres facteurs non nutritionnels. La nutrition de la mère détermine la composition générale du lait en fonction de l'alimentation quotidienne, des nutriments stockés, et de l'altération des nutriments dans leur utilisation, influencée par les caractéristiques hormonales de la lactation.

6. Maladies dues à une hyperactivité du système immunitaire à l'encontre de substances ou de tissus normalement présents dans l'organisme.

La composition du lait maternel subit également des influences non nutritionnelles, telles que la fréquence de l'allaitement ou les conditions environnementales, l'exposition aux infections ou le temps de gestation (Institute of Medicine, 1991). Cependant, en ce qui concerne la composition minérale du lait maternel, des preuves évidentes indiquent qu'une diminution de l'apport alimentaire en qualité ou en quantité, même dans le cas des femmes sous-alimentées, n'affecte pas la teneur en nutriments du lait. L'organisme de la mère allaitante est capable de produire du lait adéquat en protéines, lipides, carbohydrates, acides foliques et minéraux (Institute of Medicine, 1991). En général, les principaux minéraux contenus dans le lait maternel sont étroitement régulés dans le sérum maternel. La teneur en minéraux de l'alimentation maternelle n'altère donc pas significativement la composition du lait. En effet, pendant la grossesse et l'allaitement la mobilisation du calcium, par exemple dans le développement de l'enfant, est maintenue par une diminution efficace du métabolisme maternel, lequel n'est pas affecté par les apports nutritionnels en calcium de la mère. D'autres facteurs ont été étudiés, incluant le statut social, le temps de gestation, les troubles métaboliques, le volume de lait produit, et sont exclus de toute influence sur la composition du lait maternel (Dorea, 1999).

1.1.1.2. Les propriétés nutritionnelles des aliments de supplantation

La consommation d'aliments de supplantation a des effets complexes sur la quantité totale de nutriments assimilés par l'enfant, incluant notamment la diminution de la biodisponibilité des nutriments contenus dans le lait et l'augmentation de nutriments dans une forme moins facilement assimilable par l'organisme de l'enfant, que dans le lait maternel (Institut of Medicine, 1991).

Quelques études ont établi un lien entre la diminution de la croissance infantile et la supplantation du lait maternel (Delgado *et al.*, 1982). Dans certains cas, les aliments de supplantation et/ou de sevrage sont mal adaptés aux besoins de l'enfant pour sa croissance, aussi bien sur le plan quantitatif que qualitatif, ce qui peut donner lieu à des maladies carencielles (De Garine, 1979). Certains cas de malnutrition, en particulier, affectent les niveaux en vitamines (Institute of Medicine, 1991) et en protéines (Learmonth, 1955). On peut donc raisonnablement penser que la nature des aliments utilisés dans le processus de sevrage influence la santé de l'enfant et, par conséquent, ses chances de survie. L'enfant est, le plus souvent, introduit à l'alimentation de base de sa communauté (De Garine, 1979). Cette alimentation dépend également du niveau de vie de la famille, des connaissances des parents sur les besoins de l'enfant et du système de subsistance de la communauté (responsable des types de produits disponibles).

Les aliments généralement admis comme nourriture de supplantation dans les populations européennes du passé et préindustrialisées sont les bouillies à base de diverses céréales (selon les pratiques agraires) et le lait provenant d'animaux (en particulier de brebis, de vache et de chèvre).

Le lait maternel subvient à tous les besoins nutritionnels pour garantir la santé et le développement du nourrisson (World Health Organisation, 2002). Mais, à partir de 6 mois, les apports de la nutrition maternelle ne sont plus suffisants, notamment en fer et en vitamines. Un allaitement exclusif prolongé ne fournit alors pas une quantité adéquate de nutriments essentiels, nécessaires à la croissance du jeune enfant et peut être à l'origine de carences. Les aliments

introduits dans l'alimentation de l'enfant doivent pallier le déficit du lait maternel. L'introduction de laits animaux dans l'alimentation de l'enfant supplanté semble se traduire par un meilleur état nutritionnel que lorsqu'ils en sont absents (Cantrelle *et al.*, 1980). Mais ces laits ne doivent pas constituer à eux seuls l'alimentation de l'enfant. On sait, par exemple, qu'une supplantation au lait de vache uniquement n'est pas adéquate, car sa composition en fer est similaire au lait humain et la vitamine C y est présente en moindre quantité. Si d'autres aliments ne sont pas introduits dans la nutrition après 6 mois, l'enfant est susceptible d'être anémié. Le manque de vitamine C entre 6 et 10 mois, par exemple, peut être à l'origine du scorbut, causant la mort de l'individu (Hühne-Osterloh et Grupe, 1989). Dans ce cas, la mortalité infantile n'est pas liée à la durée de l'allaitement maternel, mais à la qualité de l'alimentation de supplantation. Ces informations peuvent être approchées par l'étude paléopathologique.

L'étude de Knodel et Kinter (1977)⁷ souligne l'effet de l'allaitement maternel sur les risques de mortalité infantile, dans une démarche centrée sur la structure par âge de la mortalité infantile et les pratiques liées au sevrage. Leur étude comprend la révision de données publiées de cinq études historiques, pour lesquelles l'alimentation artificielle, l'allaitement et le sevrage sont observés en fonction de la structure par âge de la mortalité infantile dans leur population. Certains facteurs comme la qualité nutritionnelle des aliments de remplacement ainsi que les conditions sanitaires relatives à l'alimentation de supplantation et l'état général de l'hygiène dans l'environnement de l'enfant sont également examinés. Leurs résultats établissent une relation entre le type d'alimentation et la structure d'âge de mortalité infantile.

Par exemple, un certain nombre de chercheurs ont identifié la bouillie de maïs comme alimentation des populations amérindiennes, à partir d'indices isotopiques et ethnographiques. Il semblerait donc qu'une alimentation mixte composée de maïs dans des proportions trop extrêmes est insuffisante, d'un point de vue nutritionnel, pour le développement, la croissance et la santé de l'enfant (Katzenberg *et al.*, 1993).

1.1.1.3. Alimentation et oligoéléments chez l'enfant

La proportion des oligoéléments dans l'organisme du nouveau-né allaité dépend essentiellement de trois facteurs : les éléments stockés par l'enfant, déterminés par le transfert placentaire *in utero*; la quantité et la biodisponibilité des éléments fournis par le lait maternel; les facteurs environnementaux et génétiques qui affectent le rythme d'utilisation des nutriments (Institute of Medicine, 1991).

La consommation d'aliments de supplantation a des effets complexes sur la quantité totale de l'organisme d'un enfant, incluant : la forme moins biodisponible des nutriments apportés; la diminution de la quantité des nutriments fournis par le lait humain; la diminution des divers bénéfices apportés par le lait maternel (Institute of Medicine, 1991).

7. Fondée sur le « modèle biométrique », dont les lacunes sont signalées plus bas.

1.1.2. L'âge de la transition alimentaire chez les mammifères

Du point de vue physiologique, le sevrage est un processus complexe qui doit assurer une santé physique et cognitive, ainsi qu'un développement microbiologique, immunologique et biochimique optimal à l'enfant. De plus, le processus de sevrage s'insère dans le processus général de développement de l'enfant et est cohérent avec un ensemble d'évolutions. Ces inférences peuvent éclairer les bases biologiques sous-jacentes des pratiques d'allaitement chez l'homme, indépendamment des croyances culturelles.

1.1.2.1. Le sevrage, une étape biologique

Le choix de l'initiation de l'allaitement, sa durée et de l'âge du sevrage sont conditionnés par des considérations socioculturelles, qui ne sont pas systématiquement cohérentes avec les paramètres biologiques. Or, la priorité ainsi donnée aux considérations culturelles peut être à l'origine d'un comportement inadéquat, ayant pour conséquence une mauvaise santé, des carences alimentaires, une mortalité infantile prononcée. L'étude des pratiques d'alimentation des nourrissons est donc importante, pour comprendre comment la biologie et la culture humaine interagissent sur l'état sanitaire des jeunes enfants, leur survie et les modèles démographiques des populations anciennes. Il semble donc essentiel de pouvoir étudier et comprendre les choix qui relèvent des pratiques culturelles dans le processus de sevrage.

L'étude de ces derniers permet de déterminer à quel âge devraient être sevrés les enfants humains, idéalement, d'un point de vue physiologique. Ces observations sont à mettre en parallèle avec les pratiques afin de mieux comprendre les manques dans la nutrition de l'enfant, qui pourront être impliqués dans son état sanitaire.

Selon plusieurs chercheurs (Dettwyler, 1995), l'âge « naturel » du sevrage est en relation avec plusieurs variables liées à différentes étapes biologiques⁸ de la vie selon l'espèce, telles que le rythme écologique de reproduction de l'espèce, le poids à la naissance et certaines étapes du développement de l'individu (Smith, 1989; Lee, 1997). Ces inférences peuvent nous éclairer sur les bases biologiques sous-jacentes des modèles de sevrage humain, indépendamment des facteurs sociaux, économiques et culturels (Dettwyler, 1995). Dans cette vision des mécanismes, les variations dans la chronologie des événements de développement et de la reproduction reflètent les stratégies mises en œuvre dans la répartition des ressources limitées en temps et en énergie dans la croissance, le maintien, la reproduction et l'investissement maternel en faveur de la descendance. Les variations des différentes étapes de la vie à travers les différentes espèces et populations intègrent un certain nombre de causes sous-jacentes. Cet aspect, au sens large, comprend la synchronisation des transitions entre les différentes étapes de la vie avec les âges des divers événements de maturation, tels que les stades de formation des dents ou d'émergence des dents, les paramètres morphologiques, le développement du cerveau, le rythme de croissance, ou l'espérance de vie. Au sens plus étroit du terme, il prend en compte plusieurs points de repères chronologiques définis, qui limitent directement le nombre de descendants qu'une femelle peut

8. Concept défini par l'expression « life history » dans la littérature anglo-saxonne.

produire au cours de sa durée de vie, ce qui implique l'âge de la première reproduction, le temps de gestation, l'intervalle entre les naissances, l'âge de la fin des capacités reproductives et la durée de vie (Humphrey, 2010).

Les trois approches visant à estimer l'âge naturel du sevrage les plus fréquentes dans la littérature à partir de la croissance physique de l'enfant, dans le cadre des étapes de la vie, s'appuient sur les stratégies écologiques de reproduction, sur l'observation du poids du nouveau-né et de l'adulte et sur les caractéristiques du développement dentaire. Ces observations de corrélations placent le sevrage définitif naturel chez l'homme entre 2,5 et 7 ans.

1.1.2.1.1. La reproduction et la stratégie de survie de l'espèce

L'alimentation est un aspect énergétique largement impliqué dans les mécanismes de reproduction chez les mammifères. Plusieurs observateurs ont mis en évidence le fait que, chez les primates, les mères « choisissent » de concentrer leurs ressources au profit de la descendance actuelle, même si cela doit retarder le rythme de la reproduction, ou de sevrer plus tôt leurs nourrissons (Lee, 1997 ; Vandeleest, 2012).

Les exigences énergétiques de la lactation maternelle sont impliquées, d'une part, dans une logique de dépenses énergétiques et, d'autre part, dans la répartition du temps en termes d'intervalle entre les naissances, qui sont toutes les deux des ressources limitées. En effet, pendant la grossesse et jusqu'au début du processus de sevrage, les besoins énergétiques et nutritionnels de l'enfant sont entièrement satisfaits par la mère, par la nutrition placentaire, puis par l'allaitement. La charge énergétique assumée par la mère augmente continuellement tout au long de la grossesse, et après la naissance du nourrisson, durant son développement. La contribution maternelle aux besoins du nourrisson atteint son plus haut niveau au moment (ou peu après ce moment) où le lait maternel n'est plus suffisant pour contenter les besoins de l'enfant et que, de ce fait, l'alimentation de l'enfant doit être complétée (*cf. infra* I. 1.2.2). Les besoins énergétiques de l'enfant en croissance continuent de s'accroître après le début de la supplémentation alimentaire. La proportion d'aliments non lactés dans l'alimentation est donc augmentée pour répondre aux exigences supplémentaires, jusqu'à l'arrêt complet de l'allaitement maternel. De ce fait, la charge énergétique imposée à la mère diminue à mesure que la part d'aliments non lactés augmente dans la nutrition de l'enfant (Lee *et al.*, 1991).

La seconde composante majeure de l'investissement de la mère dans la lactation concerne le temps, car l'espacement des naissances est un aspect fondamental du succès de la reproduction, et donc de la survie de l'espèce à long terme, chez les mammifères. Une des estimations de l'âge adéquat du sevrage s'appuie sur la fin de la dépendance de l'enfant au lait maternel, défini comme la moyenne d'âge de l'enfant au moment auquel la mère est capable de concevoir à nouveau (Lee, 1997). Cet âge correspond à la fin de la période pendant laquelle l'enfant est largement dépendant du lait maternel, l'allaitement pratiqué de façon intensive inhibant la capacité de conception de la mère. Du point de vue de la mère, cet âge marque donc la possibilité de la reprise de la reproduction. Du côté de l'enfant, il définit le moment où les ressources maternelles sont détournées vers la progéniture suivante. Cette définition du sevrage correspond à un moment du processus de sevrage où l'alimentation de l'enfant est mixte et l'allaitement maternel plus

assez important pour maintenir l'aménorrhée post-partum. Elle est particulièrement pertinente pour les primates qui peuvent poursuivre l'allaitement à un niveau bas jusqu'à l'accouchement (Lee, 1997). Chez les animaux, cet âge peut être calculé en soustrayant la durée de gestation à l'espacement des naissances (Humphrey, 2010). Chez l'homme, les interactions des facteurs impliqués dans ce cycle sont trop complexes pour faire l'objet de ce type de calcul.

Les pratiques d'allaitement font donc partie intégrante des stratégies de survie de l'espèce chez les primates. Plusieurs études sur les variations du temps de lactation et les stratégies de sevrage entre les primates (notamment le chimpanzé, primate le plus proche de l'homme) et les sociétés humaines témoignent des répercussions de ces pratiques (Fahy *et al.*, 2013).

1.1.2.1.2. Le rythme d'accroissement pondéral

L'estimation de l'âge naturel du sevrage sur la base du poids du nourrisson implique la détermination d'un seuil qui trouve son équilibre au cours du processus de sevrage, et qui est limité par des paramètres liés à l'énergie et au développement. La définition de ce seuil fait l'objet de plusieurs théories. L'âge maximum biologique du début du processus de sevrage est atteint lorsque les besoins métaboliques de l'enfant dépassent ce que la mère est capable de fournir, soit lorsque l'enfant atteint environ 2,1 fois son poids de naissance (Lee, 1997). Le poids à la naissance chez les humains modernes se situe entre 2,5 à 4,0 kg pour les filles et 2,6 à 4,2 kg pour les garçons. Selon le modèle précédemment présenté, les aliments solides doivent être introduits quand un poids corporel de l'enfant est compris entre 5,3 et 8,4 kg pour les filles et entre 5,5 et 8,8 kg pour les garçons. Ces caractéristiques correspondent 3,5/4,5 mois chez les garçons et 4/5 mois chez les filles, selon l'Organisation Mondiale de la Santé (World Health Organisation, 2006).

En ce qui concerne le moment du sevrage définitif, l'idée largement répandue dans la littérature sur l'allaitement maternel chez les mammifères placentaires suggère qu'il doit intervenir lorsque l'enfant a triplé son poids de naissance (Lawrence, 1994). Selon cette considération et les données de naissance précédemment énoncées, le sevrage complet devrait intervenir lorsque la masse corporelle de l'enfant a atteint entre 7,5 et 12 kg pour les filles et entre 7,8 et 12,6 kg pour les garçons. Ce modèle d'estimation d'âge naturel du sevrage définitif, c'est-à-dire d'indépendance vis-à-vis de la lactation, place donc l'arrêt de l'allaitement chez les humains, entre 14 et 15 mois pour les filles, et entre 13 et 14 mois pour les garçons, en fonction de la diversité biologique et du sexe de l'enfant.

Cependant, de récentes recherches ont souligné le fait que cette estimation prend en compte une large gamme de mammifères, incluant des espèces de petite taille, ce qui peut éloigner les prévisions spécifiques du modèle humain. À partir d'observations ciblées sur les grands mammifères Lee *et al.* (1991) suggèrent une corrélation de l'âge du sevrage définitif avec le moment où l'enfant a quadruplé son poids de naissance. Les données utilisées par Dettwyler (1995) pour appliquer cette hypothèse sont empruntées au NCHS⁹

9. National center for health statistics.

et s'appuient sur une population malienne périurbaine, vivant dans de mauvaises conditions sanitaires et soumise à une alimentation inadéquate. Le poids de naissance des enfants est multiplié par quatre à 36 mois, soit avant 3 ans chez les garçons et entre 30 et 36 mois, soit 2,5 ans, chez les filles.

Une autre hypothèse fondée sur le lien entre la masse corporelle et l'âge naturel du sevrage s'appuie sur la progression du poids de l'enfant vers son poids adulte. La nature exacte du lien entre le sevrage et le rythme de croissance n'est pas connue, mais la corrélation chez les mammifères est forte. Elle indique que le sevrage définitif intervient lorsque l'enfant a atteint environ 1/3 du poids corporel adulte (Charnov et Berrigan, 1993; Humphrey, 2010). Au regard de l'ensemble des mammifères, les primates ont un plus faible poids au moment du sevrage par rapport à la masse corporelle de la mère. Dans ce cadre, plusieurs études ont discerné une tendance générale à l'augmentation de l'âge du sevrage avec l'importance de la masse corporelle de la mère. Si l'on considère des populations humaines de différentes corpulences de pays non industrialisés, aux contextes sanitaire et alimentaire médiocres, les garçons atteignent un tiers du poids adulte entre 5 ans (dans les populations de petite corpulence) et 7 ans (dans les populations de grande corpulence), et les filles atteignent ce seuil entre 4 ans (dans les populations de petite corpulence) et 6 ans (dans les populations de grande corpulence) (Dettwyler, 1995). On note que dans le cadre de ces trois hypothèses fondées sur le développement de la masse corporelle comme indicateur de l'âge naturel du sevrage définitif, les garçons sont allaités plus longtemps que les filles.

1.1.2.1.3. La relation entre variables biologiques, masse corporelle adulte et durée de gestation

Les travaux publiés par Harvey et Clutton-Brock (1985) compilent et mettent en relation un certain nombre de variables, telles que le poids adulte (par sexe), le poids à la naissance, le temps de gestation, le nombre d'individus dans une portée, l'âge de la maturité sexuelle, l'âge du sevrage, l'intervalle des naissances, le poids du cerveau à la naissance et à l'âge adulte, par exemple, à travers plusieurs espèces de primates, y compris des populations humaines. Ces observations comparées ont révélé que les primates qui ont des nouveau-nés de grande taille ont tendance à avoir une période de gestation relativement longue, un âge de sevrage et un âge de maturité sexuelle tardifs, une plus grande taille de cerveau et une plus longue espérance de vie que les primates, dont les nouveau-nés sont plus petits. Les humains étant considérés comme des primates de grande taille, ayant de grands nouveau-nés, on peut s'attendre à ce qu'ils aient un âge de sevrage naturel tardif.

On trouve également dans la littérature l'idée largement répandue, proche de ce raisonnement, selon laquelle la durée de l'allaitement est approximativement équivalente au temps de gestation. Cette observation se vérifie effectivement pour de nombreux mammifères, en particulier les espèces de petite taille. En revanche, l'examen de primates de large corpulence a révélé un allaitement d'une durée plus longue que le temps de gestation. Harvey et Clutton-Brock (1985), à partir de leurs observations de grands primates proposent une formule de régression pour calculer l'âge du sevrage chez les primates, laquelle situe le sevrage chez l'homme entre 2,8 et 3,7 ans (en fonction de la masse corporelle de la femme). De son côté, Dettwyler (1995) suggère que ce rang représente des âges minimums de sevrage, car ces auteurs utilisent un âge de sevrage relativement

jeune dans l'application de leur formule de régression à la sous-famille de primates, dans laquelle est classé l'homme. Ce choix se traduit, selon l'auteur, par une sous-estimation de l'âge au sevrage chez les humains. Elle fait remarquer que chez les espèces les plus proches de l'homme, le gorille et le chimpanzé, la durée de l'allaitement maternel correspond à six fois le temps de gestation. Si on transpose cette observation sur l'homme, on peut s'attendre à un sevrage définitif à 54 mois, soit 4,5 ans.

1.1.2.1.4. L'éruption dentaire

Plusieurs chercheurs, dont Smith (1989) et Dean (2006), ont montré que le modèle et la chronologie du développement dentaire sont étroitement liés aux différentes étapes de la vie chez les primates. La chronologie de l'éruption dentaire est stable, elle ne subit pas l'influence des facteurs externes, car elle est strictement sous contrôle génétique et n'admet qu'une infime composante environnementale. Dans des conditions extrêmes de maladies, de stress, ou de carences, les dents continuent d'émerger selon le schéma génétiquement prédéfini. Chez les primates, l'âge d'émergence des premières et des dernières dents (dentition déciduale et définitive) est fortement corrélé avec l'évolution de la masse corporelle, le poids à l'âge adulte de la femelle et le développement cérébral. L'âge d'émergence de la première molaire permanente, en particulier, est en lien avec l'âge du sevrage définitif chez quatorze espèces de primates (Smith, 1989).

De manière générale, on peut s'attendre à ce que le sevrage définitif coïncide avec les étapes de développement de la dentition permanente, en s'appuyant sur le fait qu'elle devrait améliorer la capacité de transformation des aliments, à un stade de développement de l'enfant auquel il doit traiter suffisamment de nourriture pour répondre à ses besoins physiologiques. En effet, on remarque que les molaires définitives ont une surface occlusale plus large et plus épaisse, ce qui augmente le volume de nourriture pouvant être assimilé. Ces attentes concernant l'âge du sevrage en relation avec l'émergence de la première molaire définitive coïncident chez toutes les espèces humanoïdes, excepté les populations humaines pour lesquelles la situation est un peu plus complexe et la variabilité de l'âge du sevrage beaucoup plus ample. Les premières molaires permanentes apparaissent chez l'homme moderne entre 4,74 à 7,05 ans, plus tardivement que chez les singes (Liversidge, 2003). On remarque que l'acquisition des capacités immunitaires adultes est également synchronisée avec l'émergence de la première molaire définitive. Chez l'humain, la compétence immune s'opère autour de 6 ans, lorsque la réponse immune des enfants n'est plus renforcée par les lymphokines¹⁰ du lait maternel (Dettwyler, 1995).

1.1.2.1.5. Conclusion

L'estimation de l'âge attendu du sevrage varie selon l'approche utilisée et le taxon étudié. Il semble qu'un ajustement des relations et interactions entre les variables soit nécessaire pour fournir une base à la quantification du degré de divergence connu à travers les taxons. Cependant, s'il est vrai que plusieurs corrélations ont pu être démontrées dans de nombreuses études, elles ne sont pas systématiquement confirmées. Ces incohérences peuvent, en partie, être expliquées par

10. Des glycoprotéines.

les différences entre les méthodes utilisées, entre les définitions des variables prises en compte, le caractère inégal de la couverture taxonomique étudiée et les variables observables avec fiabilité (notamment en ce qui concerne les dents) (Humphrey, 2010).

Au regard des différentes étapes de développement de l'enfant, le sevrage chez l'homme moderne apparaît comme précoce. En effet, si l'on s'appuie sur les études sociologiques de Sellen (2001), à partir de 142 populations non industrialisées, l'âge déclaré pour l'initiation du sevrage, c'est-à-dire l'âge d'introduction des aliments solides, est estimé à $5,0 \pm 4$ mois, avec une grande majorité des enfants complétés vers 5/6 mois. En termes de développement, cet âge correspond globalement aux évolutions morphologiques permettant la mastication. La fusion des deux parties de la mandibule se produit vers 5 mois et l'émergence sur la gencive des premières dents de lait se fait vers 7 mois. En ce qui concerne le sevrage définitif, les études sur des populations humaines non industrialisées ont montré un âge de 2 à 5 ans, avec une grande majorité d'enfants sevrés entre 2 et 4 ans (Dettwyler, 1995 ; Sellen, 2001). L'âge du sevrage complet estimé à partir de l'apparition de la première molaire définitive (entre 4,74 et 7,05 ans) est donc sensiblement plus élevé que l'âge observé dans les études sociologiques. Ce modèle de sevrage précoce, au regard des caractéristiques de l'éruption dentaire, se retrouve également chez plusieurs espèces de singes. L'âge d'apparition de la première molaire permanente semble être un élément d'observation insatisfaisant pour l'estimation de l'âge naturel du sevrage chez les grands singes, les hominidés actuels et fossiles. En outre, les âges de sevrage observés coïncident avec l'âge d'émergence complète de la dentition déciduale (Humphrey, 2010).

Sur le plan de la relation entre le poids du nouveau-né et l'âge du sevrage, l'âge auquel le sevrage est amorcé observé dans les populations non industrialisées est cohérent avec l'évolution de la masse corporelle de l'enfant. En revanche, en ce qui concerne le sevrage définitif, l'âge observé est légèrement moins tardif que celui attendu sur la base de ces critères.

L'âge précoce du sevrage chez les humains peut être rapporté à la stratégie de reproduction. En effet, la vie reproductive de la femme est caractérisée par une maturité relativement tardive et un arrêt précoce (Humphrey, 2010). De ce fait, le taux de fécondité peut être maintenu si l'espacement des naissances est réduit, objectif favorisé par une diminution de la durée d'allaitement, qui réduit la durée de l'aménorrhée post-partum.

1.1.2.2. Les besoins physiologiques du nourrisson

Le moment d'introduction d'une alimentation diversifiée est déterminé par plusieurs facteurs biologiques, dont une partie est liée à la santé de l'enfant. Il constitue, en même temps, un compromis entre le coût énergétique demandé par la lactation pour la mère et les risques qu'elle entraîne pour l'enfant (Lee, 1997).

Idéalement, la chronologie d'introduction d'une alimentation diversifiée doit tenir compte du moment où le lait maternel ne répond plus aux besoins énergétiques et nutritionnels de l'enfant, et qu'il est inadéquat pour la croissance et le développement, ce qui menace la santé et la survie de l'enfant (Lawrence, 1994). L'Organisation mondiale de la Santé et The American Academy of Pediatrics Committee on Nutrition, notamment, après l'étude de ces paramètres, recommandent l'introduction d'une alimentation différente du lait maternel entre 4 et 6 mois. Cette estimation

est cohérente avec l'évolution en quantité de la production journalière de lait d'une mère allaitante (Lawrence, 1994). D'un point de vue nutritionnel, le lait maternel répond exhaustivement aux besoins du nourrisson jusqu'à environ 6 mois. À partir de cet âge, les ressources en nutriments ne suffisent plus à répondre aux besoins croissants de l'enfant. De plus, la quantité de certains éléments diminue dans le lait de la mère avec le temps, comme c'est le cas pour le fer (les besoins de l'enfant à partir de 6 mois dépassent alors les apports fournis par le lait maternel). En outre, une source additionnelle de protéines devient nécessaire à la fin de la première année afin de pallier la diminution de la teneur protéique du lait maternel qui survient après 9 mois de lactation. En effet, les protéines apportées par le lait sont alors insuffisantes pour garantir la croissance normale de l'enfant (Lawrence, 1994).

Sur le plan du développement du nourrisson, chez la plupart des mammifères, la fin du processus de sevrage coïncide avec l'acquisition de l'indépendance alimentaire. À ce stade, l'enfant doit avoir atteint une maturité physique suffisante et l'indépendance de procéder par lui-même à la recherche de nourriture, la capacité de la digérer, ainsi que la capacité à gérer les relations sociales (Lee, 1997). Le sevrage chez l'Homme, à l'instar de plusieurs espèces, est précoce au regard des étapes de développement de l'enfant. Néanmoins, on remarque, comme cela se retrouve chez plusieurs espèces animales sociales, que l'homme présente une période de dépendance postsevrage relativement longue, au cours de laquelle l'enfant, en dépit de son indépendance au lait maternel, est tributaire des adultes, pour les déplacements, la protection, et l'apprentissage de certaines compétences, notamment les moyens d'acquérir la nourriture par eux même.

Un autre aspect physiologique important, la mastication, est lié à la consommation d'une alimentation différente du lait maternel. Les deux mécanismes de traitement de l'alimentation, la succion et la mastication sont fondamentalement différents et complexes. Ils relèvent à la fois du réflexe et de composantes dues à l'apprentissage. Le développement du mécanisme de mastication, indispensable au succès de l'introduction d'une alimentation solide apparaît entre 7 et 9 mois, indépendamment de la présence des dents (par la suite, le développement normal de la dentition est nécessaire à la mastication). L'action de mâcher et la force de mastication progressent à travers l'enfance (Lawrence, 1994). Le réflexe enraciné de l'aspiration à partir du sein commence à disparaître à la fin de la première année (Illingworth et Lister, 1964).

Le dernier aspect physiologique que nous aborderons est celui du développement cérébral. En plus de fournir les besoins énergétiques exigés par la croissance de l'enfant, le lait maternel doit également apporter les éléments biochimiques indispensables au tissu cérébral. La croissance du cerveau des mammifères est associée à une augmentation de l'acide docosahexaénoïque, entre autres chaînes longues d'acides polysaturés, dans le cerveau. Chez les primates, il y a une forte corrélation entre les taux d'acide docosahexaénoïque dans l'alimentation de la mère, le lait maternel et les concentrations présentes dans les tissus infantiles. Ces éléments chimiques sont donc associés au développement du cerveau chez l'homme (Milligan et Bazininet, 2008), mais la durée et l'importance de leur rôle est difficile à apprécier.

1.1.2.3. Le statut biologique

Les comportements humains liés à l'allaitement maternel et au sevrage sont variables, et résultent à la fois des exigences biologiques et des facteurs culturels. Les exigences biologiques, au nombre desquelles figure l'âge du sevrage, ne sont, bien souvent, pas maîtrisées, et leur perception est largement dépendante des croyances et des pratiques traditionnelles. Les croyances culturelles comprennent, en grande partie, les préjugés sur le moment auquel doit être sevré un enfant. La culture, le mode de vie, les conditions de vie, les croyances, les connaissances, se substituent à la démarche naturelle en décidant, selon des normes propres à chaque groupe humain, du moment privilégié pour l'introduction d'une alimentation mixte et le sevrage.

L'âge de l'enfant n'est pas l'unique facteur considéré au moment de prendre la décision de sevrer l'enfant. Comme le rapporte Fildes (1986) dans sa synthèse (qui reprend vingt-deux auteurs) la santé, l'état des intestins, la capacité à digérer les aliments solides ou encore le nombre de dents de l'enfant, ont une influence sur le moment du sevrage. D'autres facteurs se rapportent à la santé de la mère (ou la santé de la nourrice dans le cas où l'enfant ne serait pas nourri par sa mère), l'état de son lait, ou une nouvelle grossesse. Les soins de l'enfant en général, et en particulier l'allaitement maternel sont également influencés par les conditions de la famille et de la communauté, à savoir le niveau de vie, le statut économique et social des parents, la structure des activités quotidiennes de la mère, la prise en charge des enfants, les traditions religieuses, le système de subsistance du groupe humain. Quelques facteurs externes comme la saison de l'année et la phase de la lune sont également évoqués dans la littérature.

1.1.2.3.1. Le statut biologique de l'enfant

Le moment idéal du sevrage peut être interprété à partir du rythme de maturation physiologique et comportemental de l'enfant, plutôt qu'à un âge fixe. Ainsi, outre l'observation de la stature et l'estimation de la prise de poids, la perception des besoins de l'enfant est associée à ses progrès en matière de développement et participe à structurer le processus de l'introduction d'une alimentation complémentaire et le sevrage complet (McDade et Worthman, 1998). Dans cet ordre d'idée, on retrouve fréquemment dans la littérature l'apparition des dents et l'acquisition de la marche comme indices décisifs pour choisir le moment du sevrage. La dentition est associée à la capacité de mâcher, ce qui explique que la possession de dents soit souvent interprétée comme le moment où l'enfant peut être sevré puisqu'il est physiquement apte à traiter l'alimentation solide. Depuis l'Antiquité et jusqu'au début du XVIII^e siècle, les diverses recommandations placent le sevrage entre 18 mois et 2 ans, ce qui correspond à l'âge auquel la plupart des enfants possèdent entre la moitié et la totalité de leurs dents. Certains des auteurs du XVIII^e siècle n'envisagent pas le sevrage de l'enfant avant qu'il n'ait au moins quelques dents (Underwood, 1784 ; cité par Fildes, 1986). Un chirurgien français de la fin du XVIII^e affirme que l'enfant doit avoir au moins vingt dents avant d'être sevré (Baudelocque, 1790 ; cité par Fildes, 1986). Le lien entre le moment du sevrage et la dentition se retrouve également dans certaines populations traditionnelles actuelles, comme les Masa (Cameroun), qui considèrent que l'enfant doit avoir au moins la moitié de ses dents de lait pour être sevré, ce qui correspond aux caractéristiques d'un enfant d'environ 18/20 mois (Mignot, 2002).

La maîtrise de la marche peut constituer un signe indiquant que l'enfant a atteint l'âge d'être sevré dans certaines populations traditionnelles. Dans ce raisonnement, la marche est associée à la capacité de l'enfant à trouver de la nourriture par lui-même dans son environnement (De Lestrangé et Passot-Guevara, 1981 ; Mignot, 2002).

Dans certains cas exceptionnels, on a pu remarquer que le sevrage pouvait être à l'initiative de l'enfant. Les mères confrontées à cette expérience décrivent une augmentation de l'intérêt de l'enfant pour l'exploration du monde qui l'entoure, y compris les autres aliments que le lait maternel, et un désintérêt pour le sein.

Chez plusieurs espèces, le sevrage intervient en fonction du développement du système gastro-intestinal. La différence notable entre un système digestif mature et immature s'observe sur les enzymes (Lawrence, 1994). En effet, progressivement, certaines disparaissent et d'autres apparaissent, car ce ne sont pas les mêmes enzymes qui sont capables de digérer le lait et l'alimentation adulte. On peut donc penser que la disparition des enzymes capables de digérer le lait, au profit d'enzymes dont l'action est efficace sur une l'alimentation adulte constitue un indicateur de l'âge du sevrage naturel. La lactase, en particulier, est connue pour digérer le lactose présent dans le lait. Elle disparaît progressivement au cours de l'enfance, ce qui ne permet plus, à terme, à l'organisme humain de digérer correctement le lactose est, par conséquent, le lait. Le moment de la cessation complète de l'allaitement doit prendre en considération la présence de la lactase dans l'organisme de l'enfant. Ce processus prend place entre 2,5 ans et 7 ans, ce qui semble indiquer la période pendant laquelle le sevrage définitif doit avoir lieu.

La santé préexistante de l'enfant joue un rôle lorsqu'il est question de l'introduction et du sevrage définitif. Cependant, elle peut faire l'objet de démarches contradictoires. En effet, le sevrage est connu pour être une période de vulnérabilité de l'enfant et constituer un risque potentiellement mortel. Les désordres gastro-intestinaux, en particulier, occasionnés par l'étape délicate du sevrage, expliquent l'attention particulière accordée à l'état des intestins, au préalable, lorsqu'il s'agit de sevrer l'enfant (Underwood, 1784 ; cité par Fildes, 1986). S'assurer que la santé générale de l'enfant est aussi bonne que possible avant d'amorcer le processus de sevrage est donc une pratique courante. Si l'enfant est faible ou malade, il est d'usage de différer le sevrage (Fildes, 1986). Par exemple, il semble que dans l'Europe occidentale du Moyen Âge, il soit recommandé d'allaiter plus longtemps un enfant malade (Fildes, 1995). En revanche, des observations sur des populations actuelles de pays en voie de développement ont révélé que la maladie de l'enfant (ou de la mère) pouvait être une raison de procéder volontairement au sevrage définitif de l'enfant. Il arrive également que certains problèmes comme des troubles ORL chez l'enfant ou le stress de la mère soient à l'origine d'un refus du sein. Il a également été constaté, dans certains cas, que les enfants malades, particulièrement au stade final de leur maladie, refusent d'eux-mêmes l'allaitement maternel (Simondon, 2009). Ces facteurs constituent un biais dans l'interprétation du lien entre les modalités de l'allaitement maternel et la mortalité infantile des échantillons archéologiques pour lesquels nous avons peu d'informations sur la santé de l'enfant. En effet, ces cas de maladie de l'enfant, la mortalité infantile est, de fait, particulièrement élevée. Mais, c'est l'état de santé qui est à l'origine du sevrage et non l'inverse. Dans ces situations, la mortalité infantile ne peut donc pas être justifiée par les pratiques de sevrage. Ce type de biais à

l'interprétation des résultats obtenus par la démarche proposée dans ce travail peut être compensé par l'observation histologique des stries pathologiques de croissance qui revêt une importance notable. En effet, la présence de stries pathologiques entre la naissance et le sevrage peut attirer notre attention sur l'existence d'un trouble, psychologique ou physiologique, préexistant au sevrage, et potentiellement impliqué dans un sevrage identifié comme difficile, voire la mort de l'enfant.

Dans le cadre des études archéologiques, un allaitement long, à l'échelle individuelle, peut être interprété comme le résultat d'un enfant en retard ou en mauvaise santé, ce qui aurait incité la mère à l'allaiter longtemps.

1.1.2.3.2. Le statut biologique de la mère/nourrice

Pour l'initiation de l'allaitement, le premier élément à prendre en compte est la capacité de la mère à produire du lait. Dans 95 % des cas, les femmes qui viennent d'accoucher sont capables de produire du lait, mais de nombreux facteurs influencent le succès de son initiation et de son maintien. Les textes médicaux anciens évoquent parfois l'absence de la montée de lait chez la mère. Nous savons aujourd'hui que la montée de lait peut avoir lieu plusieurs jours après l'accouchement, comme le soulignent les observations déjà anciennes de Bronislava (1894), mais une méconnaissance de ce phénomène aux époques historiques a pu laisser place à des conclusions hâtives sur les capacités à allaiter de la mère, conduisant à ne pas initier l'allaitement maternel ou à introduire une alimentation complémentaire dès la naissance.

L'échec d'une production suffisante de lait maternel (par exemple, le stress inhibe la libération d'ocytocines, ce qui peut provoquer une diminution de la production de lait; les modèles de fréquence et de durée des tétées influencent également la diminution de la lactation) est l'une des raisons les plus souvent évoquées pour expliquer un sevrage précoce par les mères (McDade et Worthman, 1998). Cependant, l'estimation de l'insuffisance de quantité de lait soulignée dans de nombreuses enquêtes, notamment dans les pays en voie de développement (Hamade *et al.*, 2013), relève plus souvent de la perception de la mère que d'un réel défaut de production (Quandt, 1986; Kimani-Murage *et al.*, 2011). Cette déduction s'appuie en général sur les pleurs et l'irritabilité de l'enfant, interprétés comme des signes de faim (Marandi *et al.*, 1993). La perception de satiété du nourrisson par sa mère a une influence sur la durée de l'allaitement exclusif et partiel, en dépit de l'intention d'allaiter qui précédait l'expérience.

Il est possible, également, que les parents ayant mis en nourrice leur enfant ne soient pas satisfaits de celle-ci et décident de lui retirer le nourrisson avant la fin de la période estimée initialement (Fildes, 1986). Cela implique un sevrage plus précoce que prévu puisque, retiré de nourrice, l'enfant ne peut pas bénéficier, non plus, du lait maternel, car la mère n'ayant pas stimulé la lactation ne produit plus de lait.

Selon Jones (1579; cité par Fildes, 1986), un des seuls médecins à faire des recommandations spécifiques, si la mère est âgée au moment de la naissance de l'enfant, ce dernier devrait téter plus longtemps que l'enfant d'une femme jeune et vigoureuse. Mais aucune source ne nous permet d'estimer dans quelle mesure cette idée est reçue au Moyen Âge.

Dans de nombreuses sociétés non industrialisées, le sevrage, s'il n'a pas eu lieu avant pour d'autres raisons, intervient lorsque la femme est de nouveau enceinte. Le problème d'une nouvelle grossesse est largement évoqué à travers le temps et l'espace. Galien écrivait que « rien ne pourrait être pire pour l'enfant au sein »¹¹, car il y aurait compétition entre le nourrisson et le fœtus. Cette croyance, largement répandue dans les cultures traditionnelles, s'explique par l'idée que le lait est du sang blanchi, c'est donc le même sang qui nourrit l'enfant au sein et celui qui se trouve dans le ventre de la mère.

Il existe diverses croyances incitant la femme enceinte à cesser l'allaitement de l'enfant précédent lorsqu'elle attend un nouvel enfant. C'est par exemple le cas de plusieurs communautés traditionnelles africaines (De Lestrangue et Passot-Guevara, 1981 ; Mignot, 2002) et asiatiques (Briend, 1995), pour lesquelles les croyances populaires suggèrent que le lait maternel appartient au fœtus, et que si l'enfant plus âgé continue à téter, le fœtus est en danger (Clayton *et al.*, 2006). Selon les croyances populaires, le sang est alors requis pour nourrir le fœtus et ne peut plus monter dans le sein. Dans le cas d'une nouvelle grossesse, le sevrage se fait alors dans l'urgence, sans tenir compte de l'âge et de l'état du nourrisson, ce qui peut avoir des répercussions néfastes sur la santé de ce dernier (Lett et Morel, 2006). Outre les croyances populaires qui viennent d'être abordées, plusieurs cultures reconnaissent implicitement que les demandes en énergie de la grossesse et de la lactation sont importantes, ce qui peut apparaître comme une raison pour sevrer l'enfant. Par conséquent, une nouvelle grossesse pour une mère allaitante est souvent annonciatrice d'une supplantation / d'un sevrage plus précoce que prévu initialement, pour des raisons de coût énergétique (McDade et Worthman, 1998).

En dehors d'une nouvelle grossesse, les coûts énergétiques de la mère pendant la lactation (cumulés avec les soins de l'enfant et la charge de travail) peuvent entrer dans l'équation du choix du timing du processus de sevrage (McDade et Worthman, 1998). Même si, malgré les demandes en énergies nécessaires à la production du lait, le statut nutritionnel de la mère ne semble pas déterminant (bien que certaines études actuelles soient en désaccord avec cette idée) (Michaelsen *et al.*, 1994), mais les coûts maternels augmentent avec la durée de l'allaitement, non seulement en termes de dépenses énergétiques, mais aussi en termes de perte de micronutriments tels que le calcium. La détérioration progressive du statut nutritionnel de la mère causée par les demandes de la reproduction ajoutée à celle de la lactation prolongée peut mener à l'épuisement de la mère. Ces dépenses peuvent compromettre la santé voire la survie de la mère, lesquels affectent la santé et la survie du nourrisson. Un surinvestissement de la mère pour l'enfant en cours d'allaitement peut d'ailleurs interférer sur la santé de ses autres enfants, précédents et futurs. Le choix de la durée de l'allaitement se révèle donc important pour la préservation de la mère (McDade et Worthman, 1998).

Dans ce raisonnement, il est intéressant de constater que les idéologies culturelles et individuelles impliquées dans les pratiques d'allaitement et de sevrage de l'enfant, ainsi que l'accès aux ressources, sont des facteurs déterminants qui agissent sur les choix des mères et, de fait, également sur la survie infantile et l'espacement des naissances.

11. Galien, *op. cit.*, p.29.

1.1.2.3.3. Conclusion

La chronologie optimale des étapes du processus de sevrage doit se placer à la fois du point de vue de la mère et du point de vue de l'enfant. Cependant, ces deux niveaux peuvent ne pas coïncider. Il n'existe pas de solution universelle pour remédier à ce dilemme. La mère doit inévitablement faire un compromis entre les besoins de l'enfant, les siens et ceux des autres enfants de la famille. Il s'agit également de trouver un équilibre entre le maintien de la lactation afin de retarder le prochain cycle reproductif et le processus de sevrage dans le but de diminuer la charge énergétique accentuée par l'allaitement prolongé, et accélérer sa récupération nutritionnelle. La gestion de ce compromis varie en fonction des pressions socio-économiques et des conditions environnementales spécifiques.

En conclusion, au regard des différents indices biologiques, l'enfant apparaît prêt pour une nouvelle expérience alimentaire autour de 6 mois. Cela ne signifie pas qu'il doit être complètement sevré, mais que son alimentation doit être diversifiée. Il est biologiquement apte à consommer une autre nourriture que le lait maternel, qui d'ailleurs n'est plus suffisant pour couvrir l'intégralité de ses besoins nutritionnels.

L'examen des relations entre le poids à la naissance, le poids à l'âge adulte et la croissance de l'enfant place l'âge naturel du sevrage définitif, chez l'homme moderne, entre 2,3 ans (garçons) et 2,5 ans (filles), et entre 6 ans (filles) et 7 ans (garçons). Le large rang des possibilités observées pour l'âge du sevrage naturel chez les humains peut s'expliquer, en partie, par l'environnement dans lequel ils peuvent vivre et qui englobe une importante variété de conditions (responsables d'un certain nombre de variations dans les maladies auxquelles ils sont exposés et dans les ressources alimentaires disponibles), contrairement aux primates qui vivent dans un environnement tropical. De son côté, l'émergence de la première molaire définitive chez les primates non humains suggère un âge de sevrage naturel vers 6 ans chez les premiers hominidés (Dettwyler, 1995).

La comparaison des modèles proposés par Dettwyler (1995), l'un à partir de populations américaines contemporaines, l'autre à partir de l'observation de sociétés traditionnelles (64 sociétés ni européennes, ni américaines), et un troisième à partir de l'étude des primates, a montré que, dans une perspective interculturelle et comparative par rapport aux primates, le modèle d'allaitement court (ici représenté par le modèle américain) n'est pas naturel (Dettwyler, 1995; Kennedy, 2005). Ce comportement dévié du naturel est survenu pour permettre aux mères de répondre aux contraintes et aux avantages de l'allaitement maternel en fonction des différents contextes sociétaux (Sellen, 2001).

1.1.3. Aperçu de la diversité des pratiques chez l'homme

Très souvent, l'allaitement à la demande est préconisé pour une période d'une durée au moins égale à celle d'une grossesse. L'apparition des premières dents signifie souvent le début de la diversification alimentaire, en général progressive, comme le recommandent certains auteurs anciens tels qu'Oribase (médecin grec du IV^e siècle) qui indique que l'introduction de la première

nourriture consistante doit correspondre au moment où l'enfant « fait ses dents de devant »¹². Dans la Rome et la Grèce, les sources écrites indiquent un allaitement exclusif de 6 mois. Dans les faits, il semble que les sevrages avant l'âge de 1 ou 2 ans (selon les études) soient rares et restent essentiellement le fait de notre culture occidentale moderne. Cependant, si l'on souhaite prendre en considération les textes traitant de ce sujet il faut être particulièrement vigilant sur les nuances qui sous-tendent le terme « sevrage », car elles peuvent aboutir à des définitions quelque peu différentes. Dans la pratique, un allaitement long n'est pas synonyme d'un allaitement exclusif. Il arrive, à certaines périodes du Moyen Âge, notamment, que le sevrage soit tardif, mais que la diversification, souvent sous forme de bouillie, soit précoce. Le Talmud et le Coran encouragent un allaitement de 2 ans. C'est cette même durée qui semble avoir été la norme pour les sociétés médiévales (Alexandre-Bidon et Closson, 1985) et modernes occidentales selon Flandrin (1978) ; ce dernier stipule qu'il était rare, à cette période, de voir survivre un enfant sevré à sa première année. Dans les cultures traditionnelles, selon les observations de Wickes (1953) et de StuartMacadam et Dettwyler (1995) la durée de l'allaitement maternel varie considérablement d'une tribu à l'autre, mais pour la majorité d'entre elles le sevrage a lieu entre 2 et 4 ans. Pour citer quelques exemples de cette diversité proposée dans ces études, les Hottentots allaitent rarement plus de 4 mois, les Samoans allaitent moins de 1 an, dans de nombreuses régions africaines la durée de l'allaitement s'inscrit dans une médiane de 24 mois, les Arméniens allaitent entre 1 et 2 ans, les Aborigènes d'Australie allaitent 2 à 3 ans, de même qu'au Pakistan, en Inde, ou au Maghreb. Un allaitement jusqu'à 3 ans était aussi la durée recommandée en Mésopotamie et dans l'Égypte ancienne. Certains peuples allaitent leurs enfants au-delà de cette moyenne. C'est le cas, notamment, pour les Groenlandais qui allaitent entre 3 et 4 ans. À Hawaï, actuellement, les enfants sont, en général, allaités 5 ans, et les mères Inuits allaitent 7 ans, voire plus. Une étude regroupant les données disponibles sur les durées d'allaitement dans 64 sociétés traditionnelles montre une courbe en cloche avec un maximum de sevrages entre 2,5 ans et 3 ans. Les différences sont telles qu'il est intéressant de s'interroger sur les raisons qui poussent vers une option plutôt qu'une autre, mais aussi, et surtout, de comparer les conséquences de cette décision sur les enfants.

1.2. LES CHOIX DANS LES PRATIQUES D'ALLAITEMENT MATERNEL ET DE SEVRAGE

1.2.1. Les sources historiques

Dès l'époque préhistorique, les humains représentent les gestes et les attributs de la lactation. On retrouve dès lors des statuettes féminines allaitant un enfant, mais elles sont probablement associées au culte de la fécondité. Le thème de l'allaitement apparaît fréquemment aux époques historiques très éloignées, dans l'art de l'Inde ancienne, de la Mésopotamie, de l'Égypte ancienne, de la Phénicie, de la Grèce ou des Étrusques (Lett et Morel, 2006).

12. Oribase, livres incert. §17. In Daremberg, p. 136.

Quelques rares documents du Proche-Orient ancien évoquant les pratiques d'allaitement et de sevrage nous sont parvenus (Fildes, 1986). Plusieurs vestiges iconographiques (statuettes, stèles votives, peintures) d'Égypte ancienne et du Proche-Orient présentent des déesses locales avec un enfant dans les bras, dans une posture allaitante. On a également retrouvé de nombreuses représentations d'Isis présentant le sein à son fils Horus, témoins d'un culte de la déesse qui s'étale sur plusieurs milliers d'années et se répand dans tout le bassin méditerranéen. Ces manifestations semblent positionner les pratiques courantes en faveur de l'initiation de l'allaitement maternel, mais il reste délicat d'évaluer la part de symbolisme dans ces représentations.

Outre les témoignages iconographiques, nous avons également quelques documents écrits. La littérature médicale de l'Inde ancienne nous a livré deux documents médicaux, le *Susruta Samhita* (≈ II^e siècle av. J.-C.) et le *Caraka Samhita* (premiers siècles de notre ère), contemporains de la médecine gréco-romaine. Concernant la nutrition infantile, l'allaitement apparaît indispensable puisqu'il est suggéré d'avoir recours à une nourrice pour pallier un allaitement maternel impossible. Cependant, dans les textes, il est recommandé aux mères de ne donner leur lait qu'à partir du quatrième jour. Mais il y a de légers désaccords au sujet de la durée de l'allaitement. Un texte ayurvédique, plus ancien (1500-800 BC), préconise un allaitement exclusif jusqu'à la fin de la première année et une alimentation mixte jusqu'à 2 ans (suivie d'un sevrage progressif), alors que le *Susruta* suggère l'introduction de l'alimentation diversifiée à partir du sixième mois (Fildes, 1986).

Les pratiques d'allaitement dans l'Égypte ancienne sont évoquées par le papyrus d'Ebers (daté entre le XIV^e et le XVI^e siècle av. J.-C.) qui traite davantage du problème de la qualité du lait et propose des sorts, potions et incantations pour y remédier. Les sources égyptiennes soulignent l'importance de l'initiation de l'allaitement maternel en suggérant le recours à une nourrice dans le cas où la mère se trouverait dans l'impossibilité d'allaiter elle-même. Le papyrus d'Ebers recommande un allaitement pendant 3 ans. Plus tardivement, durant la période ptolémaïque de l'Égypte, probablement sous l'influence de la culture grecque, les nourrices doivent allaiter 6 mois l'enfant dont elles ont la charge, puis lui donner du lait de vache.

En ce qui concerne les Hébreux, le Talmud suggère une période d'allaitement de 2 ans, période d'allaitement dont a bénéficié Isaac, fils d'Abraham, selon les textes (Rashi, Gen.20.8), et d'autres textes traditionnels de la religion juive prônent une durée de 2 à 5 ans (sans spécifier la durée de l'allaitement exclusif) (Turck, 2010) et sont cohérents avec l'histoire de Samuel, fils de Hannah, allaité pendant 3 ans (I Sam. I. 23) (Fildes, 1986). On peut aussi citer la mention de Moïse, qui, selon l'Ancien Testament, est retrouvé dans les eaux du Nil et se voit confié à une nourrice. Dans le Nouveau Testament, le lait de femme est évoqué comme étant un aliment pour l'état d'enfance et d'immatunité, mais aucune recommandation n'est faite sur la durée de l'alimentation maternelle (ni exclusive, ni complétée) (Turck, 2010). Compte tenu de la présence de ces précisions dans les textes religieux, on peut donc s'interroger sur le rôle que peut jouer la religion et l'importance de l'initiation de l'allaitement pour ces populations. Cependant, la durée de l'allaitement, entre 2 et 3 ans dans ces populations, semble moins influencée par les perceptions religieuses.

La mise en nourrice apparaît également en Mésopotamie ancienne dans le code de lois d'Hammurabi, ainsi que chez les Hébreux, soulignant ainsi l'importance de l'allaitement. En

ce qui concerne la durée de l'allaitement, elle est souvent évoquée dans les contrats impliquant une nourrice. Des enregistrements mésopotamiens parlent de nourrices allaitant 2 ou 3 ans (Fildes, 1986).

La période homérique de l'antiquité grecque (≈ 950 av. J.-C.) ne nous a fourni, à ce jour, aucun document faisant mention de l'allaitement maternel et de l'alimentation infantile. L'antiquité gréco-romaine, plus tardive, livre de son côté, un certain nombre de témoignages archéologiques, par l'iconographie, les épitaphes ou les textes, qui mettent en valeur l'allaitement au sein. On retrouve également dans ces civilisations plusieurs récits sur l'usage des nourrices. Les traités médicaux qui nous parvenus de l'antiquité gréco-romaine suggèrent que l'allaitement exclusif doit se maintenir les 6 premiers mois, précisant que « le corps doit se consolider avant de recevoir des aliments farineux, ce qui n'arrive pas avant le sixième mois ». C'est, par exemple, l'âge préconisé pour l'introduction d'une alimentation diversifiée par Soranos d'Éphèse¹³, médecin grec et auteur de traités gynécologiques et obstétriques du IIe siècle ap. J.-C. de même les contrats pour les nourrices mentionnent un allaitement exclusif de 6 mois (Turck, 2010).

Le Coran considère que l'enfant doit être allaité pendant une durée de 2 ans, comme en témoigne la sourate 2, Ayat 233 (Turck, 2010). Cette recommandation se retrouve plus largement dans la littérature islamique, comme en témoignent les *Canons de médecine* du savant et médecin Avicenne (980-1037), ou encore « le livre de la femme » rédigé par Averroès (1126-1198), savant musulman d'Espagne devenu médecin du fils de Saladin (Fildes, 1986), tous deux issus de l'école Arabe.

Cependant, à côté de ces encouragements à l'allaitement maternel dans les textes, on note la mise à jour d'ustensiles servant à l'alimentation artificielle des bébés dans des sites archéologiques de Syrie, d'Égypte, de Grèce et de l'Empire romain (Rogers *et al.*, 1997).

Depuis le début du Moyen Âge, tous les traités de médecine ou de pédagogie défendent la supériorité de l'allaitement maternel sur toutes les autres nourritures pour le nouveau-né (Lett et Morel, 2006). Mais la durée recommandée de l'allaitement durant la période médiévale est très peu renseignée. La conduite observée à ce sujet semble influencée par les auteurs antiques et place la durée de l'allaitement entre 1 an et 3 ans. Au début de l'époque moderne, en Europe, Jacques Guillemeau, obstétricien français né en 1550, conseillait de commencer la diversification alimentaire au moment de l'éruption des incisives supérieures et inférieures (Turck, 2010). On peut également se pencher sur les sources historiques qui relèvent l'âge du sevrage des enfants issus de familles royales et aristocratiques (les plus documentées à ce sujet) anglaises au XVIe siècle, on constate une durée d'allaitement moyenne autour de 18 mois (Fildes, 1986).

13. Paul Burguière, Danielle Gourevitch et Yves Malinas (Ed.), Soranos d'Éphèse, *Maladies des femmes*, Livre II, ch. XXXIX-129, traduit du grec et commenté, Paris, Les Belles Lettres (Collection des Universités de France), 1990, pp. 55-57.

1.2.2. Les raisons des choix

1.2.2.1. Les facteurs socio-culturels

Comme nous l'avons vu (*cf. supra* I .2.1) les médecins de l'antiquité, notamment Soranos et Galien, ont laissé quelques écrits sur la santé maternelle et infantile. Ces traités ont largement inspiré la médecine du Moyen Âge. Ils indiquent que la nourriture solide devrait être introduite entre 6 mois et 1 an et préconisent un sevrage définitif après 3 ans. On peut penser qu'avec le temps ces idées se sont diffusées et qu'elles existent dans les consciences, mais nous ne savons pas dans quelle mesure elles sont mises en pratique.

Bien que les bénéfices de l'allaitement maternel sur la santé de la mère et de l'enfant ne soient plus à démontrer, de nombreux facteurs, au nombre desquels figurent les facteurs socioculturels, affectent les choix de la mère concernant l'alimentation du nourrisson. Les conditions de vie de la famille : le niveau socioculturel, l'éducation, l'environnement (urbain ou rural) et la disponibilité de la mère, ainsi que le support social et politique de l'allaitement (position de l'entourage et des autorités sur l'allaitement) affectent les choix de la mère concernant les pratiques d'allaitement, en particulier sur la durée, déjà sous-tendus par un faisceau de croyances populaires et d'habitudes locales (Thirion, 2019).

1.2.2.1.1. Les conditions socio-économiques de la mère, de la famille et de la communauté

La question de la durée de l'allaitement en fonction du statut social des parents se pose. Jones (1579 ; cité par Fildes, 1986) suggère que les enfants de nobles devraient être allaités plus longtemps que les autres enfants. À l'inverse, de nombreux travaux effectués sur des populations préindustrielles, au mode de vie traditionnel, comme ceux de Cantrelle (1980) qui regroupent plusieurs ethnies du Sénégal ont mis en évidence une corrélation entre un statut social élevé et une durée d'allaitement courte.

La valeur sociale de la maternité peut intervenir dans la durée de l'allaitement maternel. Dans certains cas, lorsque la mère est de statut social élevé, elle peut être disposée, voire obligée d'assumer un rythme élevé de reproduction, ce qui constitue un motif pour un sevrage précoce dans la mesure où la lactation prolongée agit sur la suspension de la fertilité (McDade and Worthman, 1998).

Finalement, la durée de l'allaitement est influencée par le niveau social des parents, mais les tendances observées varient selon l'époque et le lieu.

Le niveau d'instruction de la mère est un facteur régulièrement associé à l'initiation et à la durée de l'allaitement maternel dans les travaux sociologiques (Branger *et al.*, 1998 ; Vogel *et al.*, 1999 ; Noirhomme-Renard et Noirhomme ; 2009, Rogers *et al.* ; 1997).

Selon des études sociologiques (Heck *et al.*, 2006), l'éducation des mères est favorable à l'initiation de l'allaitement maternel, même s'il est de courte durée, ce qui semble lié à une meilleure connaissance des bénéfices sanitaires de l'allaitement.

En ce qui concerne la durée de l'allaitement maternel, certaines études sociologiques (Vogel *et al.*, 1999 ; Dop, 2002 ; Égo *et al.*, 2003 ; Noirhomme-Renard et Noirhomme, 2009) relèvent que, dans leurs échantillons, les mères dont le niveau scolaire est plus élevé allaitent plus longtemps que les autres. Cela peut s'expliquer, là encore, par une meilleure connaissance des bénéfices de l'allaitement pour la santé et la croissance de l'enfant (De Luca *et al.*, 2019). Cette tendance se retrouve principalement dans les pays industrialisés (que nous ne pouvons pas utiliser pour une réflexion analogique avec nos populations archéologiques). Au contraire, dans les pays en voie de développement, qui se prêtent mieux à une réflexion analogique, un meilleur niveau d'éducation est généralement associé à un allaitement plus court (Marandi *et al.*, 1993, Rogers *et al.*, 1997, Kimani-Murage *et al.*, 2011).

L'éducation de la mère influe également la perception de l'entourage sur son aptitude à faire des choix dans l'intérêt de l'enfant, notamment en ce qui concerne les pratiques d'allaitement et de sevrage, et donc sa crédibilité vis-à-vis du père et de l'entourage sur ses démarches (Amin, 1990).

Le sevrage dépend également, dans une certaine mesure, du statut économique de la famille et du coût relatif des aliments de supplémentation. Plus les difficultés économiques gênant la capacité de la mère à subvenir aux besoins nutritionnels de la famille sont importants, plus l'allaitement maternel prolongé constitue une solution garantissant une alimentation correcte au nourrisson, tout en permettant d'optimiser les apports pour le reste de la famille. De plus, le niveau de vie joue un rôle sur les possibilités d'accès aux soins favorisant la survie des nourrissons, indépendamment de l'allaitement maternel. De ce fait les lacunes sanitaires liées à un manque d'allaitement maternel peuvent être un peu mieux compensées.

D'autre part, le niveau d'éducation de la mère est souvent lié au niveau de vie. L'éducation des deux parents impacte les revenus du couple (accès à des activités mieux rémunérées). Lorsque les revenus sont élevés, on observe un allaitement de plus courte durée dans les pays en voie de développement (Marandi *et al.*, 1993, Rogers *et al.*, 1997). Plus généralement dans les pays en voie de développement, à mesure que le pays se développe, l'allaitement semble décliner (Rogers *et al.*, 1997).

Le rôle du père, et plus largement de l'entourage, intervient, sur le plan matériel et psychologique, avec l'introduction de l'alimentation non lactée. D'un point de vue matériel, dès ce moment d'autres personnes que la mère peuvent assurer l'approvisionnement de l'enfant dans les sociétés humaines. De ce fait, la mère peut se dégager d'une partie responsabilité de l'alimentation de l'enfant jusqu'à son entière indépendance, allongeant ainsi les durées entre les tétées, ce qui facilite un sevrage plus précoce que chez les primates, mais demeure fonction de la disponibilité et de la volonté du père et de l'entourage. La structure familiale et la taille de la famille, et donc le nombre de proches susceptibles de s'occuper de l'enfant, sont des variables qui influencent le rôle joué par l'entourage (Vitzthum, 1994).

Le jugement du père sur les choix de la mère en matière d'allaitement peut également influencer les choix de la mère. En effet, l'opposition du père à l'allaitement peut réduire la durée de l'allaitement, ce qui a d'ailleurs été mis évidence dans des études contemporaines (Branger *et al.*, 1998 ; Noirhomme-Renard et Noirhomme, 2009), quelle que soit la raison de ses réticences

(la connotation sexuelle du sein nourricier étant souvent évoquée). L'avis de la mère de la femme qui allaite ou de sa belle-mère semble également affecter, de façon positive ou négative, l'initiation et la durée de l'allaitement (Branger *et al.*, 1998).

L'entourage au sens plus large de la société semble impacter l'orientation des choix concernant l'allaitement et le sevrage. Ce facteur est mis en évidence par plusieurs études contemporaines dans des pays en voie de développement ou sur des populations originaires de pays en voie de développement. Elles montrent que la mère est davantage influencée par les pratiques de la région où elle réside que de celles de son pays d'origine (Rogers *et al.*, 1997).

Un certain nombre de pratiques courantes en fonction de la situation familiale ont été relevées. L'ordre de naissance de l'enfant et la taille de la famille sont des variables mesurées dans certaines études sociologiques sur les facteurs déterminant la fréquence et la durée de l'allaitement. Les résultats sont relativement divergents : certaines mères allaitent moins longtemps lorsqu'elles ont déjà d'autres enfants (par exemple, les mères du Botswana), alors que d'autres initient plus volontiers l'allaitement et pour une plus longue durée au fil des grossesses (au Pérou, par exemple). Le nombre d'enfants allaités précédemment peut constituer une expérience et fournir des repères personnels à la mère qui sera tentée de reproduire les pratiques d'allaitement qui semble avoir le mieux réussi à ces enfants, ou, au contraire, de modifier ce qu'elle considère comme un échec (Mignot, 2002). Dans d'autres cas, la mise en parallèle de l'ordre de naissance et de la taille de la famille avec la fréquence et la durée de l'allaitement maternel ne montre aucune corrélation (Rogers *et al.*, 1997).

Les enfants plus petits à la naissance, comme c'est le cas pour les jumeaux ou les enfants nés avant terme, sont supposés avoir besoin d'un allaitement plus long que les autres, car ils sont souvent plus faibles et plus vulnérables aux infections, selon les recommandations de la fin du Moyen Âge (Fildes, 1986).

Plusieurs études sur des populations contemporaines s'interrogent sur les corrélations avec le niveau d'urbanisation. Dans les pays en voie de développement (de différents continents), la fréquence de l'allaitement maternel se révèle particulièrement affectée par le degré d'urbanisation. En effet, la vie urbaine est, dans la majorité des cas, associée à une initiation moins fréquente de l'allaitement et une durée réduite par rapport aux zones rurales, pour une même population (Fildes, 1986; Perez-Escamilla, 1994; Rogers *et al.*, 1997; Dop, 2002). L'intensité de l'effet négatif de l'urbanisation sur l'allaitement maternel varie probablement en fonction des différences socio-économiques et du contexte culturel. Les composantes du mode de vie urbain susceptibles d'impacter l'allaitement comprennent, dans une large mesure, les différents modèles d'activité de la mère et le manque de réseau social pouvant la soutenir (Perez-Escamilla, 1994). Les recherches de Fildes (1986) sur les données historiques de la fin du Moyen Âge ont souligné le problème du phénomène de migration des couples de la campagne vers la ville. Ce changement est associé à la perte de l'enseignement traditionnel des femmes des générations plus anciennes dispensé aux femmes plus jeunes sur les soins de l'enfant en général, aux femmes plus jeunes qui partent

s'installer en ville. On note également que l'urbanisation est associée au travail à l'extérieur de leur maison, ce qui favorise l'éloignement de l'enfant, d'où une durée d'allaitement réduite.

Les études sociologiques qui s'interrogent sur les corrélations avec le niveau d'urbanisation ont démontré une surmortalité infantile en milieu urbain par rapport au milieu rural. Cette surmortalité est attribuée, dans une large mesure, au mauvais état sanitaire qui caractérise les environnements urbains, plus propices au développement et à la propagation des infections. Dans les travaux de Galley et Wood (1998), il est noté que les causes de mortalité liées aux maladies infectieuses touchent plus largement les bébés plus âgés, et l'écart entre les villes et les campagnes s'accroît tout au long de la première année. Ainsi, il apparaît que l'agrandissement des agglomérations, plus densément peuplées, augmente les facteurs de stress et de pression sanitaire sur les populations humaines, ce qui rend les bénéfices immunitaires de l'allaitement maternel et l'évitement de l'exposition aux pathogènes d'origine alimentaire plus décisifs pour la survie des enfants. De plus, la densité de population et la promiscuité sont connues comme facteurs facilitant la transmission des pathogènes, notamment parce qu'ils accentuent les problèmes de disponibilité et de pureté de l'eau et augmentent les problèmes d'évacuation des déchets (McDade et Worthman, 1998).

L'activité de la mère, ainsi que la prise en charge des nourrissons affectent les pratiques d'allaitement à la fois en impactant les revenus de la famille (*cf.* ci-dessus) et la disponibilité de la mère pour allaiter (Roger *et al.*, 1997). Le travail de la mère a souvent été cité dans la littérature comme un obstacle à l'allaitement maternel. En réalité c'est le type de travail de la mère qui semble déterminer le degré d'entrave à l'allaitement, en fonction de son importance dans la productivité pour l'économie de la communauté et du foyer. Le degré de pression exercé sur la mère pour le maintien économique du foyer et/ou de la communauté entraîne un sevrage proportionnellement plus précoce du nourrisson (McDade et Worthman, 1998).

Dans une étude sur des populations traditionnelles, Nerlove (1974) a montré que les femmes ayant un rôle plus important dans l'économie de subsistance de leur société introduisent une alimentation diversifiée plus tôt que les mères qui ont une activité secondaire. Cette réflexion peut être transposée au rôle de la mère dans la subsistance à l'échelle de la famille. Mais ce facteur ne peut pas être considéré seul, il doit être mis en parallèle avec les pratiques autour de l'organisation autour du nouveau-né. Par exemple, la manière dont la mère peut gérer son travail (en fonction du modèle d'activité) et les dispositions existantes pour permettre l'allaitement après la reprise du travail par la mère influencent la disponibilité et la proximité de la mère pour l'allaitement, et donc la durée de ce dernier. La reprise d'une activité professionnelle par la mère est souvent associée à une réduction de la durée de l'allaitement exclusif (Hamade *et al.*, 2013). Une séparation mère/enfant sur une longue durée pendant la journée constitue nécessairement un obstacle à l'allaitement maternel exclusif et une contrainte pour l'allaitement partiel. Dans ce contexte, par exemple, l'organisation du travail pouvant être effectué individuellement ou en groupe (Panter-Brick, 1991) ainsi que l'éloignement du travail par rapport au domicile (Rollet, 1978), interviennent sur le rythme, la fréquence et la durée des temps de pause, qui vont définir les pratiques d'allaitement. Dans tous les cas, la proximité et la disponibilité de la mère augmentent

les possibilités d'allaiter, ce qui favorise l'allongement de l'allaitement maternel. Dans le cas contraire, le travail de la mère peut être à l'origine de l'introduction d'une alimentation mixte ou du sevrage plus précoce que voulu.

Au Moyen Âge, dans les milieux ruraux, il semble que les bébés soient toujours proches de leurs mères. Ils les accompagnent sur leur lieu de travail, portés sur le dos ou dans une petite hotte, ou encore installés dans un champ à proximité, afin de pratiquer « l'allaitement à la demande » (Lett et Morel, 2006), ce qui favorise la longue durée de l'allaitement.

La quantité et la qualité nutritionnelle du lait ne sont pas affectées par le type d'activité de la mère. Mais, le problème de l'importance des besoins énergétiques liés à l'activité de la mère a été souligné. L'allaitement nécessite des apports caloriques supérieurs aux recommandations normales chez une femme, besoins qui s'ajoutent à la demande énergétique induite par l'activité professionnelle. Or, dans certaines situations, l'accès à la nourriture ne permet pas un apport calorique suffisant pour couvrir ces deux besoins, ce qui peut avoir des répercussions sur la durée de l'allaitement, alors écourté pour éviter que la mère ne s'épuise (Vitzthum, 1994).

Les exigences de la lactation en matière de temps et d'énergie sont donc des points importants, car ils rentrent en considération dans les stratégies des femmes pour répartir leur temps et leurs ressources énergétiques entre la lactation et l'activité professionnelle. La préoccupation du retour au travail de la mère prend une large part dans la décision de la mère sur le choix du moment du sevrage.

1.2.2.1.2. La valeur symbolique du lait et de l'allaitement

L'allaitement, fortement idéalisé dans de nombreuses sociétés du passé n'est pas seulement un acte nourricier et protecteur, c'est aussi un geste symbolique. Il exprime les constructions sociales, religieuses ou culturelles propres aux sociétés. Les textes du Moyen Âge mettent fréquemment en évidence la valeur du comportement alimentaire comme signe d'identité religieuse, ethnique et culturelle (Flandrin et Montanari, 1996). Dans ce cadre, les comportements d'allaitement et de sevrage constituent un cas particulier.

Les modèles d'allaitement et de sevrage sont impactés par les croyances culturelles concernant l'âge idéalisé du sevrage, la perception du lait, les idées populaires sur l'alimentation de substitution du nourrisson et les interdits moraux attachés à l'allaitement maternel. Les différences culturelles sont notamment soulignées par les enquêtes sociologiques qui se penchent sur les variations des pratiques interethniques en prenant en compte des populations vivant au même endroit au même moment. Ces différences sont souvent multifactorielles et mal comprises (Kimani-Murage *et al.*, 2011). Les raisons impliquent probablement les pratiques culturelles liées à l'encadrement des enfants, les croyances liées à l'allaitement et la religion.

Les sources écrites médiévales étant relativement restreintes, une réflexion par analogie peut être envisagée, dans le but de pallier le manque d'informations. Elle permet d'établir des parallèles entre les populations médiévales et certaines sociétés non industrialisées qui, confrontées aux mêmes questionnements et dans des conditions proches, peuvent avoir des réponses comparables.

L'activité d'allaiter est liée, de façon plus ou moins forte selon les cultures, à l'idéal symbolique de la maternité et à l'image du corps de la femme. Dans la majorité des cultures, cette symbolique est positive. Cependant, il existe des exceptions, par exemple dans les bidonvilles au Brésil où les femmes qui allaitent sont perçues comme abandonnées par leur mari, cette symbolique a une connotation négative (McDade et Worthman, 1998).

De grandes interrogations entourent l'origine du lait maternel. Pour les alchimistes du Moyen Âge, le lait, au même titre que le sang, est un symbole des événements originels. Dans de nombreuses croyances (mythologies ou religions), le lait tient une place importante et il apparaît régulièrement dans les représentations iconographiques et les textes où il a une grande portée symbolique. Il est souvent symboliquement associé à la douceur, à la pureté, au don, et surtout à la vie. Par exemple, dans l'Égypte antique, de nombreuses représentations nous montrent la déesse Isis en train d'allaiter le pharaon. Cette image livre un message dans lequel le lait donne la vie, voire l'immortalité. L'usage du lait dans certains rituels religieux, tel que le culte d'Attis ou de Mithra, nous renvoie également à sa portée symbolique. Dans la bible, il existe de nombreuses allusions au lait, pur et doux, qui nourrit les élus. De plus, la terre promise de Canaan est une terre où le lait et le miel y coulent à flots. De même, dans le Coran on retrouve un paradis avec des rivières de lait.

En Occident, depuis l'Antiquité et au moins jusqu'à la fin du Moyen Âge les représentations iconographiques et les documents écrits sur l'allaitement sont dominés par des personnages sacrés ou symboliques (Lett et Morel, 2006), à l'exception de quelques écrits médicaux évoqués ci-dessus. Dans le monde chrétien, la principale scène d'allaitement représente Marie donnant le sein à l'Enfant Jésus. Elle apparaît dans l'Égypte copte au Ve siècle, mais n'arrive en Occident qu'au XIIIe siècle (Lett et Morel, 2006). Le lait semble destiné à tenir une place privilégiée dans l'imaginaire religieux qui en fera le symbole de l'amour divin (ainsi, la Vierge allaitant l'Enfant Jésus devient l'allégorie de l'*Ecclesia lactans*) (Gillet, 1994). La symbolique du lait dans la tradition judéo-chrétienne souligne les notions capitales de nourriture spirituelle et de tendresse de la divinité. Dès les premiers temps du christianisme, on discerne une assimilation du lait de la vierge à la parole de Dieu. Le lait est aussi un aliment spirituel, et vénérer la Vierge allaitant Jésus revient à se nourrir des paroles de Dieu (Lett et Morel, 2006). Ainsi, les représentations médiévales de la Vierge allaitant Jésus, présentant une forte teneur symbolique, ne constituent pas un discours réel sur la pratique de l'allaitement, même si elle met en valeur le lait maternel. Cependant, le lait est la matière du principe nourricier et protecteur dont la relation mère-nourrisson constitue la réalité psychologique et affective. La mère n'est plus seulement génitrice, mais aussi nourricière de l'être auquel elle a donné le jour, qu'elle nourrit de son propre lait donnant ainsi sa vie, son énergie et le meilleur d'elle-même (Gillet, 1994).

Dans le même temps, le lait maternel est aussi une substance corporelle associée à la sexualité et la procréation. En plus d'être une nourriture, la seule directement produite par le corps humain, le lait joue un rôle dans la représentation du corps, de la conception et de la croissance, au côté du sperme et du sang. D'ailleurs, on parle de consanguinité aussi bien pour les liens du sang que pour la parenté du lait (Gillet, 1994). Ces associations d'idées intègrent l'allaitement maternel dans les pratiques réglementées par le christianisme. À mesure que l'enfant grandit, l'allaitement maternel

est rapidement considéré comme indécent par la morale chrétienne. En effet, il peut avoir un aspect moral par association à la sexualité, selon les références culturelles, par l'intermédiaire du sein de la mère. Alors que dans certaines cultures le sein est uniquement un outil nourricier, pour d'autres, il est un objet fortement sexualisé. De ce fait, l'allaitement d'un enfant qui n'est plus un nourrisson peut être assimilé à un acte incestueux, autant au niveau de l'enfant qui prend le sein de sa mère, qu'au niveau de la mère qui, selon certaines opinions, peut être suspectée de bénéficier du plaisir sexuel (Dettwyler, 1995). Cette idée d'inceste apparaît dans les écrits de Grégoire de Tours (Grégoire de Tours, Folio Histoire, 2012), évêque du VI^e siècle qui rapporte une anecdote dans laquelle une femme allaite un enfant qui a des dents. Si on s'appuie sur cette description, on peut estimer l'âge de l'enfant aux environs de 9 mois. L'évêque est marqué par cette pratique qu'il qualifie d'incestueuse. Il est difficile de savoir s'il s'agit là d'un avis personnel ou d'une idée plus largement répandue dans le dogme religieux qu'il représente.

L'idée selon laquelle le lait peut être altéré, voire devenir dangereux, en fonction du régime alimentaire et du mode de vie, est assez diffuse. Les choix alimentaires observés par plusieurs religions comprennent un certain nombre de recommandations, d'interdictions et de tabous (Flandrin et Montanari, 1996). Dans le cas de l'allaitement maternel qui intervient instinctivement, les motivations et croyances religieuses de la mère sont importantes et peuvent dominer les choix liés à l'allaitement (Marandi *et al.*, 1993). Cela renvoie aux croyances sur les prescriptions et les proscriptions à observer pour une mère allaitante, reconnues comme responsables de la qualité du lait. Dans les populations où ces croyances sont fermement ancrées, les femmes sont soumises à des précautions particulières pour ne pas « gâcher le lait », ce qui implique souvent de nombreuses contraintes ayant trait aux restrictions alimentaires, au comportement, au ménagement de leurs émotions, à leur activité physique ou leurs relations sexuelles. Ces pressions peuvent favoriser une l'introduction d'une alimentation mixte et un sevrage précoce (Gillet, 1994; McDade et Worthman, 1998), par crainte de donner un lait « nocif » au nourrisson.

1.2.2.1.3. Le sexe de l'enfant

Dans le cas de l'allaitement, on peut s'interroger sur le rôle déterminant du sexe de l'enfant sur le comportement d'allaitement. En effet, le sexe s'avère être un paramètre pris en compte dans certaines sociétés (Paine et Dorea, 2001). On peut lire, dans les écrits médicaux de l'antiquité et du Moyen Âge, que les garçons doivent être allaités plus longtemps que les filles. Cette idée se retrouve chez certains biologistes plus tardifs comme Jones (1579; cité par Fildes, 1995) qui recommandent de sevrer un garçon entre 6 à 12 mois, plus tard que les filles.

Certains auteurs médicaux européens du Moyen Âge comme Aldobrandino de Sienne (XIII^e), Arnold de Villanova (XIII^e), Bernard de Gordon (XIV^e), Michele Savonarole (XIV-XV^e), suggèrent que les garçons doivent être allaités 6 à 12 mois de plus que les filles. Cela semble avoir été pratiqué dans quelques régions françaises où les filles sont sevrées à 1 an alors que les garçons le sont à 2 ans, pour diverses raisons. Le sentiment qu'il faut allaiter plus longtemps les garçons pourrait s'expliquer par la surmortalité néonatale des garçons par rapport aux filles,

argument souligné aussi bien par des auteurs anglais de la fin du Moyen Âge (Fildes, 1986) que des sociologues contemporains travaillant sur des zones rurales défavorisées (Amin, 1990).

Selon des études sociologiques contemporaines (Fildes, 1986) les mères de plusieurs sociétés patriarcales (Canada, Suède, Irlande, France, Guatemala, Équateur, Brésil, Pérou, Taïwan, Inde, Jordanie, Libéria, Botswana) rapportent allaiter plus longtemps leurs enfants mâles. De même, les études ethnographiques de certains pays en voie de développement, comme le Sénégal (Cantrelle *et al.*, 1980; De Lestrangue et Passot-Guevara, 1981), ne relèvent pas de différence significative selon le sexe de l'enfant.

La différenciation de traitement en fonction du sexe donne lieu à trois questionnements d'ordre social principaux. Tout d'abord, ces observations posent le problème d'une différence au niveau du rythme de maturité, socialement reconnue, entre les deux sexes, qui invite la mère à allaiter plus longtemps un enfant considéré comme nourrisson et dépendant sur une plus longue durée. Les deux autres interrogations concernant le rôle du sexe de l'enfant sont liées au statut et la reconnaissance sociale accordée à un individu adulte selon son sexe par les membres de sa société. Dans certains cas, il semble que le niveau social d'un couple lui impose des contraintes, parmi lesquelles une pression sociale et économique demandant la survie d'un enfant d'un sexe en particulier (selon la culture). C'est le cas par exemple des familles aristocratiques de tradition salienne pour lesquelles la transmission des titres et des biens se font par les hommes. On peut donc supposer qu'une attention particulière et donc, éventuellement, un allaitement plus long est consacré aux héritiers mâles. Il est également possible que la réussite de la mère à garder en vie ce descendant d'un sexe spécifique lui confère un niveau social supérieur.

Cependant, l'examen de l'âge du sevrage des familles royales et aristocratiques anglaises ne relève pas un sevrage plus tardif des garçons par rapport aux filles. Jusqu'à aujourd'hui les études sur le sevrage dans les populations archéologiques s'appuyant sur des analyses chimiques n'ont pas pu mettre en évidence de différence entre les sexes. Mays *et al.* (2002), par exemple, dans ses travaux fondés sur des analyses isotopiques, suggèrent que, s'il existe une différence entre les pratiques, elle n'est pas très importante dans son échantillon.

Dans les populations archéologiques concernées par notre étude, la mise en parallèle de l'âge du sevrage et du sexe de l'individu étudié ne peut être envisagée dans le cadre de nos réflexions que si les dents étudiées proviennent d'adultes. En effet, dans les cas des immatures l'identification du sexe au moyen de l'étude anthropologique n'est pas possible, et non-satisfaisante à partir de l'étude du matériel funéraire (Perez, 2013).

1.2.2.1.4. La qualité et la quantité du lait

Les perceptions sur les caractéristiques du lait maternel (McDade et Worthman, 1998), ses effets sur la santé et les progrès de développement de l'enfant (Song, 2004), ont un impact important sur la durée de l'allaitement exclusif. Les mères, dans certaines cultures, comme Amélés (population traditionnelle de Papouasie-Nouvelle-Guinée) voient le lait maternel comme une substance aqueuse à la naissance, qui devient progressivement plus dense à mesure que l'enfant grandit. Pour elles, le lait s'adapte aux besoins de l'enfant en croissance au fil du temps. Une telle croyance soutient le maintien de l'allaitement intensif, exclusif long (environ 7 mois), avec une

supplantation minimum et une dépendance au lait maternel comme source largement principale pour la nutrition infantile la première année et un sevrage complet tardif (environ 36 mois). À l'inverse, certaines cultures traditionnelles perçoivent le lait maternel comme une substance proche de l'eau, pauvre et peu nourrissante. Une telle conception encourage une supplantation assez précoce, car il est alors jugé comme insuffisant pour le développement physique de l'enfant (McDade et Worthman, 1998).

La question problématique de la suffisance énergétique du lait se pose particulièrement pour le colostrum. De nombreuses populations, historiques et contemporaines ont pour habitude de ne pas donner le colostrum, premier lait, pour diverses raisons, et soit de faire jeûner l'enfant les premiers jours soit de lui administrer une alimentation liquide. On trouve d'ailleurs ce genre de recommandations dans certains traités médicaux anciens. Il s'agit souvent de préparations aqueuses à base d'herbes (sous forme d'infusion), de sucre ou de miel. Ces pratiques peuvent être assimilées à une introduction très précoce d'une alimentation mixte par l'organisme. Plusieurs études contemporaines ont montré qu'en plus d'exposer l'enfant à une eau potentiellement contaminée, cette pratique a une influence néfaste sur la durée de l'allaitement maternel exclusif et partiel (Marandi *et al.*, 1993). De même, le lait d'une femme enceinte est jugé nocif. Il est également déconseillé d'allaiter plus d'un enfant à la fois en cas de naissance multiple (Fildes, 1986).

En conclusion de cette partie sur les croyances populaires, bien que tous, lettrés, médecins, religieux, au Moyen Âge s'accordent sur la préférence du lait maternel plutôt qu'à toute autre alimentation ou au recours à une nourrice pour nourrir les nouveaux nés, certaines femmes décident de ne pas allaiter, ou d'arrêter rapidement, car elles pensent que leur mode de vie (prescriptions et proscriptions) peut nuire à leur enfant si elles l'allaitent.

Il existe des cas où la nécessité de trouver une solution alternative s'impose. En effet le décès de la mère, ou l'impossibilité physique d'allaiter impose d'avoir recours à des bouillies ou à une nourrice.

Cependant, lorsqu'il s'agit d'un choix, ces derniers tiennent compte, également, d'un certain nombre de facteurs environnementaux.

1.2.2.2. Les facteurs environnementaux

1.2.2.2.1. Les facteurs vitaux

La Stratégie de subsistance de la communauté et les ressources disponibles sont des composantes des comportements alimentaires.

Il est communément admis dans la littérature sociologique que la disponibilité des aliments suppléant le lait maternel (en quantité et en diversité), qu'elle soit liée à des différences environnementales favorisant naturellement les ressources naturelles ou à l'économie de subsistance d'une société, peut contribuer aux variations de durée d'allaitement maternel dans les sociétés humaines (Song, 2004, Vitzthum, 1994). En effet, le modèle de subsistance est connu pour influencer la qualité, la quantité et la variabilité de l'alimentation (McDade et Worthman, 1998). Il semblerait que dans les contextes où les alternatives nutritives sont abondantes (profusion des ressources naturelles par rapport à la taille de la population), la diversification alimentaire peut

être plus brutale et précoce que dans les contextes où celles-ci sont restreintes (Vitzthum, 1994). Ce paramètre important dans les pratiques d'allaitement est particulièrement bien illustré par l'exemple des sociétés inuits, vivant dans des conditions particulièrement extrêmes. La durée de l'allaitement (partiel) documentée pour ces populations est d'environ 7 ans (Dettwyler, 1995), ce qui peut être supposé en relation avec les conditions environnementales relativement hostiles, responsables de la pauvreté des ressources naturelles disponibles. Le lait maternel dans ce cas peut s'avérer être un facteur alimentaire indispensable pour pallier les manques de ressources.

Parmi les ressources alimentaires, celles pour lesquelles la teneur en strontium semble relativement plus élevée sont les poissons, les mollusques et les crustacés, les noix, les légumineuses et les céréales (Sillen et Kavanagh, 1982). Partant de ces informations plusieurs chercheurs ont utilisé le strontium comme indicateur d'une économie de subsistance, préagricole ou agricole, dans le cas des sociétés préhistoriques (Schoeninger, 1982); de la transition d'un système économique au sein d'une population (Beck, 1985); ou encore pour révéler la diversité d'un régime alimentaire (Sillen, 1992). Plusieurs chercheurs (Sellen et Smay, 2001) ont travaillé sur la relation entre l'économie de subsistance d'une société (agricole, pastorale, ou chasse et pêche), liée à la qualité nutritionnelle et à la quantité des ressources disponibles pour l'introduction d'une alimentation mixte, et le sevrage complet des enfants. L'hypothèse de départ dans les recherches de Sellen et Smay (2000) est que l'introduction d'une alimentation différente du lait maternel est plus précoce dans les populations agropastorales, car les produits laitiers animaux et les céréales augmentent la disponibilité d'aliments jugés digestes, riches en nutriments et donc appropriés pour la substitution du lait maternel. De ce fait, la variété et la quantité des aliments utilisables dans le processus de sevrage influenceraient la fréquence et la durée de l'allaitement maternel. Mais les résultats de leurs observations appuyées sur un grand nombre de populations préindustrielles dans une large gamme de zones géographiques ne permettent pas de confirmer cette hypothèse. Les pratiques d'allaitement et de sevrage ne sont pas systématiquement liées à l'économie de subsistance, qui n'est, elle-même, pas toujours significative de la quantité et la qualité des aliments disponibles jugés appropriés pour le sevrage. Un des exemples cohérents avec le fait que cette hypothèse ne soit pas confirmée concerne la question des laits animaux. L'accès aux laits animaux, souvent utilisés comme aliments de sevrage, est un facteur rattaché au moment du sevrage dans les recherches sur l'allaitement. Il intervient de deux manières. D'une part, une plus grande facilité à se procurer du lait animal peut être une condition favorisant le sevrage précoce des enfants (Rollet, 1978). D'autre part, dans les zones où les populations ont aisément accès aux laits animaux, l'allaitement peut être incité jusqu'à la période où l'animal d'élevage qui fournit le lait soit en lactation (De Lestrage et Passot-Guevara, 1981). Cependant, cet argument n'est pas suffisant, car il est possible que, représentant une source économique importante, il ait été plus largement utilisé à des fins commerciales qu'à des fins domestiques (Rollet, 1978).

Le modèle de reproduction est lié aux pratiques d'allaitement. La chaîne de causalité reliant l'allaitement, la suspension des fonctions ovariennes et l'espacement des naissances est unanimement reconnue dans la littérature scientifique, et avait déjà été constatée dans les populations historiques. La régulation de la fertilité de façon à gérer l'espacement des naissances peut être un argument qui impacte les pratiques d'allaitement. Les populations ayant une

politique plutôt axée sur le nombre des naissances pour prospérer, malgré une mortalité élevée, auront tendance à pratiquer un modèle d'allaitement court. D'autres populations favorisent un allaitement plus long, visant à optimiser les chances de survie des enfants, moins nombreux (actuels, précédents et futurs), plutôt qu'à multiplier les naissances (McDade et Worthman, 1998). Ces raisonnements dépendent des traditions et des autorités dirigeantes d'une communauté. Ces dernières agissent à la fois par l'influence du discours politique et par les dispositifs mis en place pour faciliter l'allaitement, comprenant la charge de travail de la mère, l'aménagement de ses disponibilités et de sa proximité pour l'enfant.

1.2.2.2. Les facteurs externes

La saison de l'année et la phase de la lune sont des préoccupations pour le sevrage. La saison de l'année est parfois évoquée dans les textes pour le choix du moment du sevrage pour des raisons climatiques. L'idée de ne pas sevrer les enfants en n'importe quelle saison est aussi observée dans les cultures traditionnelles qui évitent de sevrer leurs enfants lors des saisons trop chaudes, trop froides et trop humides, qui sont associées à l'arrivée de plusieurs épidémies (Mignot, 2002). Les médecins suggèrent que les saisons à privilégier pour le sevrage des enfants, dans les contextes climatiques européens, sont le printemps et l'automne. Le climat de ces saisons est plus tempéré, et, ainsi, plus favorable que les températures extrêmes de l'hiver et les chaleurs élevées de l'été, étroitement associées aux troubles gastro-intestinaux, qu'il faut donc éviter (Pechey, 1697; cité par Fildes, 1986). Cependant, on constate, dans les recherches de Fildes (1986) sur les familles royales et aristocratiques anglaises entre le XVI^e et le XVIII^e siècle, que les enfants sont plus souvent sevrés en hiver et en été qu'aux saisons recommandées par les médecins. Ces observations nous laissent penser que, malgré le décalage chronologique de nos informations, la saison de l'année n'est pas un facteur prioritaire pour les familles dans le choix du moment du sevrage.

Les rythmes saisonniers interviennent sur le modèle d'activité de la mère et donc sa disponibilité pour l'allaitement maternel exclusif. Par exemple, une étude sur le Bangladesh (Huffman *et al.*, 1980), souligne que la période de récoltes intensives tend à réduire la durée de l'allaitement. On note aussi que lorsque les ressources locales sont majoritairement saisonnières, ce qui se retrouve dans de nombreuses zones rurales, la saison devient un facteur déterminant la disponibilité des ressources utilisables pour l'introduction d'une alimentation mixte (Vitzthum, 1994). Mais les familles aristocratiques dont nous avons les données ne sont pas dépendantes de ce genre de facteurs, il n'est donc pas possible d'établir un parallèle et l'impact de la saison sur le choix du moment du sevrage peut être plus important dans les familles socialement moins aisées.

L'idée selon laquelle les enfants devraient être sevrés pendant la lune croissante est probablement liée aux croyances populaires qui associent souvent la recherche d'un effet de croissance avec la phase de la lune croissante. Aussi, dans cette logique, on peut s'attendre à ce que le sevrage pendant la phase croissante de la lune favorise la croissance et la santé de l'enfant lors de cette période à risque (Fildes, 1986). Mais dans les données historiques qui répertorient l'âge au sevrage des enfants de certaines grandes familles, la phase de la lune à ce moment n'est pas renseignée. Il

est donc difficile de dire dans quelle mesure ce facteur joue un rôle dans la décision du moment du sevrage.

1.2.2.2.3. Les facteurs sanitaires

Les pathogènes, à l'origine des maladies infectieuses, jouent un rôle dans la durée de l'allaitement maternel. Les maladies infectieuses sont le premier agent de sélection naturelle depuis 5000 ans et continuent de tuer plus de 9 millions d'enfants de moins de 5 ans chaque année, principalement dans les pays non industrialisés, soumis à un état sanitaire médiocre et à la malnutrition. Parmi ces maladies infectieuses, les deux catégories les plus fatales sont les maladies respiratoires et les maladies diarrhéiques. Dans les pays non industrialisés, la malnutrition en association à ces maladies infectieuses accentue les risques de mortalité infantile. L'allaitement maternel réduit le risque d'infection du système gastro-intestinal et respiratoire (Marandi *et al.*, 1993 ; McDade et Worthman, 1998).

Les maladies respiratoires apparaissent plus fréquentes, selon certaines études récentes (Cunningham, 1995), chez les enfants qui ne sont pas allaités. De plus, certains aliments sont connus aujourd'hui pour favoriser les allergies respiratoires lorsqu'ils sont introduits trop tôt dans l'alimentation de l'enfant.

Dans le cas des infections gastro-intestinales, résultant de contaminations microbiennes par l'eau suppléée et les ustensiles utilisés pour l'alimentation, l'absence d'allaitement maternel implique un manque de facteurs immunitaires, une malnutrition et l'exposition à des agents microbiens qui interagissent, aboutissant à l'affaiblissement de l'enfant non allaité au sein (Cunningham, 1995).

L'allaitement maternel est fortement associé à une diminution de la prévalence des maladies diarrhéiques. À partir de 35 études réparties sur 14 pays, l'OMS (Feachem et Koblinsky, 1984) a estimé que l'échec de l'allaitement maternel les cinq premiers mois multiplie environ par cinq les risques de mortalité dus aux maladies diarrhéiques, et par 25 par rapport à l'allaitement exclusif, indépendamment du niveau d'hygiène et du statut socio-économique. L'allaitement maternel réduit également la sévérité des symptômes (Motarjemi *et al.*, 1993). Cela s'explique à la fois par la présence de nombreux anti-pathogènes présents dans le lait maternel et la présence des pathogènes dans l'eau et les aliments introduits.

Les maladies gastro-intestinales et respiratoires constituent une cause majeure de mortalité infantile dans les populations des pays non industrialisés, mal nourries et soumises à un mauvais état sanitaire. Le lien établi entre l'influence de l'allaitement maternel et l'ampleur que peuvent prendre ces maladies suggère que, pour des raisons immunitaires, l'allaitement maternel joue un rôle dans la mortalité infantile à court terme.

Plusieurs études (Amin, 1990 ; Nankabirwa *et al.*, 2011) ont souligné que, malgré les recommandations médicales, qui placent l'introduction d'une alimentation solide entre 4 et 6 mois, la question peut être reconsidérée dans le cas de populations vivant dans des conditions sanitaires défavorisées. En effet, l'augmentation de l'exposition aux agents pathogènes environnementaux, associée à la supplantation pourrait réduire les chances de survie des enfants à un âge aussi précoce.

Il existe un lien complexe entre les maladies infectieuses et la malnutrition. Une maladie infectieuse est souvent associée à une quantité insuffisante d'aliments absorbée, que ce soit du fait d'un rejet du malade ou d'un rationnement par les parents. Dans les deux cas, cette diminution des apports alimentaires entraîne une perte en nutriments, ce qui aboutit à une déficience nutritionnelle avec de sérieuses conséquences sur la croissance et le système immunitaire de l'enfant. De ce fait, l'enfant est également plus vulnérable à d'autres maladies, il entre alors dans un cercle vicieux infection/malnutrition (Motarjemi *et al.*, 1993).

Certains facteurs augmentent le degré d'exposition aux risques pathogènes. Parmi les principaux facteurs intervenant sur le degré d'exposition aux maladies, on peut citer la qualité de l'eau (notamment dans le cas des maladies diarrhéiques puisqu'elles sont toutes susceptibles d'être transmises par de l'eau infectée), le traitement des déchets (idée qui comprend à la fois les infrastructures d'évacuation et les dispositions prises par les autorités locales, élément déterminant des conditions sanitaires d'une population) et la densité de population.

La proximité avec les animaux domestiques entraîne un lien étroit entre l'homme et les animaux, lesquels sont porteurs d'une large série de vecteurs potentiels de maladies (McDade et Worthman, 1998).

Les maladies contractées par les enfants peuvent avoir de multiples origines, virales, bactériennes, parasitaires, qui prospèrent dans différents climats, à différents moments de l'année. La saison peut donc indirectement influencer le degré d'exposition aux risques pathogènes par ses conditions favorables à certaines maladies, ainsi que ses répercussions sur l'eau et le processus d'assainissement (McDade et Worthman, 1998).

Il est également possible que le trait spécifiquement humain de modification de la nourriture, que ce soit par le feu, l'écrasement, le broyage, qui atteint la texture, les caractéristiques de digestion et les valeurs nutritionnelles de la nourriture ait joué un rôle dans la capacité humaine à tolérer une alternative alimentaire avant l'âge naturel du sevrage estimé dans un contexte où l'alimentation adulte est composée de végétation non cuisinée et de production animale brute (Dettwyler, 1995).

L'allaitement maternel exclusif des nourrissons de moins de 6 mois, grâce aux bénéfices nutritionnels (la malnutrition étant impliquée dans la moitié des morts de nourrissons) et immunologiques qu'il apporte à l'enfant, diminue les risques diarrhéiques par 4 à 14 (Leon-Cava *et al.*, 2002) et les risques de pneumonie (première cause de mortalité infantile dans le monde) par 5 (OMS, Wardlaw *et al.*, 2006). Il participe également à l'évitement des aliments contaminés, largement impliqués dans les maladies diarrhéiques et respiratoires des enfants. De cette manière, il participe à la diminution de la mortalité infantile. Ces avantages sont plus importants dans les milieux pauvres et non industrialisés où la nutrition et l'hygiène sont de plus mauvaise qualité et où la prévalence des maladies est élevée (Heymann *et al.*, 2013).

Mais une méconnaissance d'ordre socioculturelle ou individuelle sur les besoins nutritionnels de l'enfant en période de croissance laisse une large place au poids des croyances et des traditions. Les croyances culturelles sont impliquées dans les pratiques d'allaitement maternel et affectent

l'espace des naissances, ainsi que la croissance et la santé de l'enfant. La compréhension des déterminants culturels impliqués dans les pratiques d'allaitement et de sevrage est donc essentielle pour comprendre leur rôle en matière de paléodémographie.

Cependant, compte tenu de tous les facteurs biologiques et environnementaux à considérer, parfois dans des proportions mal définies, en admettant que certains aient pu être omis, il est préférable de rester prudent avec l'interprétation des résultats et des implications sociales, ou de fortes corrélations dans une réflexion interdisciplinaire.

1.3. **CONSÉQUENCES DÉMOGRAPHIQUES LIÉES AUX PRATIQUES D'ALLAITEMENT MATERNEL ET DE SEVRAGE**

Parmi les objectifs régulièrement rencontrés dans les travaux de restitution des comportements d'allaitement et de sevrage, qui se multiplient ces dernières années, on retrouve fréquemment la volonté de comprendre les différences de structure de la population en lien avec les stratégies de subsistance et l'espace des naissances (Tuross et Fogel, 1994 ; Ventresca *et al.*, 2017 ; Chinique de Armas et Pestle, 2018) ou la relation entre le sevrage et la mortalité infantile (Lewis, 2007 ; Pearson *et al.*, 2020).

Certains chercheurs se sont intéressés au problème de la mortalité infantile, en fonction du contexte culturel et en parallèle avec la survie différentielle parmi les enfants. Les méthodes qu'ils développent tendent à déterminer la nature de la santé dans l'enfance et la survie des individus durant cette période. Dans cette optique, la mortalité infantile peut être étudiée dans sa relation entre les disparités d'accès et de distribution des ressources consommables, entre les diverses communautés. D'autres anthropologues ont ciblé l'influence de la structure familiale, les liens de cause à effet dans des systèmes où la femme travaille et les différents modes de garde des nouveau-nés. À cela vient s'ajouter un certain nombre de considérations telles que le contexte écologique, socioculturel et économique.

Dans le cadre de ces réflexions, une attention particulière a été portée sur le rôle de l'allaitement maternel, sur sa durée, sur la nature des aliments de supplémentation, sur la mortalité/morbidité infantile à court et long terme. De même, la survie à l'étape délicate du sevrage, pendant laquelle l'enfant est brusquement surexposé aux risques de contamination à la fois par l'eau et la nourriture qu'il ingère et par la multiplication des contacts extérieurs puisqu'il peut être nourri par une autre personne que sa mère.

La nutrition de la petite enfance est observée par des chercheurs de diverses spécialités, car elle est considérée comme un des facteurs déterminants pour la morbidité, la croissance, le développement des enfants, et finalement la structure démographique d'une population (Stuart-Macadam et Dettwyler, 1995 ; Cunningham, 1995). Dans cette réflexion, la première alimentation du nouveau-né est un élément fondamental dans la nutrition de la prime enfance. Le lait maternel, souvent premier apport alimentaire d'un individu, est largement reconnu pour ses avantages importants sur la santé du nourrisson, notamment parce qu'il constitue un aliment

complet et suffisant pendant les six premiers mois de la vie. En outre, il contient de nombreux éléments nécessaires au développement du système immunitaire, transmis de la mère à l'enfant. À l'inverse, il a été observé, notamment par Newman (1906; cité par Knodel et Kintner, 1977) une surmortalité des nourrissons exclusivement allaités au-delà de 6 mois, induite par des phénomènes de dénutrition.

1.3.1. **Allaitement maternel, santé de l'enfant et mortalité infantile**

L'alimentation d'une population, et à plus forte raison celle des enfants, est directement liée à la structure démographique de la population (Stuart-Macadam et Dettwyler, 1995). L'étude de l'alimentation du nourrisson et des pratiques de sevrage dans les populations du passé s'avèrent donc être des composantes importantes pour la reconstruction du modèle démographique d'une population (Herring *et al.*, 1998).

Les bénéfices de l'allaitement maternel sur la mortalité infantile sont dus aux propriétés du lait maternel. La grande quantité d'éléments bioactifs fournis au nourrisson, des agents immunitaires, antimicrobiens et anti-inflammatoires qui le protègent des maladies infectieuses (*cf. supra* I. 1.1.1). De plus, la pratique de l'allaitement au sein limite l'exposition des nourrissons aux agents pathogènes des aliments et des ustensiles utilisés pour l'alimentation, potentiellement contaminés. La grande quantité d'éléments bioactifs confèrent à l'enfant allaité, comme nous l'avons vu, de nombreux avantages biologiques, principalement dans le développement immunologique ainsi que dans la croissance et la maturation des systèmes intestinal et respiratoire. Il en résulte plusieurs bénéfices qui comprennent : une probabilité réduite de développer des allergies alimentaires et respiratoires (Kramer et Kakuma, 2002), un faible risque d'ictère (jaunisse), d'infections respiratoires et gastrointestinales (Cunningham, 1995), de colite (Institute of Medicine, 1991 ; Stuart-Macadam et Dettwyler, 1995), et déficiences en fer (Song, 2004) qui peuvent être des causes importantes de mortalité infantile dans des sociétés traditionnelles. Ces avantages aboutissent incontestablement à de meilleures chances de survie chez les nourrissons.

Les observations de l'allaitement maternel dans les pays en voie de développement ont souligné que l'allaitement exclusif est associé à une mortalité infantile plus basse et à un taux de maladies infectieuses plus faible chez les jeunes enfants (Institute of Medicine, 1991).

La période de sevrage est connue pour être un passage critique de la vie. Il est largement observé et accepté que, dans les sociétés traditionnelles, la mortalité infantile atteint des taux particulièrement élevés au cours de la période de sevrage (De Garine, 1979). L'introduction d'aliments solides implique une exposition plus importante aux maladies et est fréquemment associée à un risque accru de mortalité et de morbidité infantiles. La réduction de la consommation du lait maternel diminue le niveau d'immunité chez le nourrisson et les aliments de sevrage accentuent l'exposition de l'enfant à de nouveaux agents pathogènes et au stress nutritionnel (Katzenberg *et al.*, 1996).

Une enquête dans les pays développés entre 1850 et 1950 a révélé une plus faible mortalité infantile chez les enfants allaités par rapport aux bébés nourris au biberon. Dans les pays en voie de développement, l'allaitement maternel exclusif est associé à une faible mortalité infantile et un faible taux de contamination aux maladies infectieuses (Institute of Medicine, 1991). Un allaitement très bref avait déjà été clairement associé à une mortalité infantile élevée la première année de vie dans les études de Knodel et Kinter (1977).

Plusieurs études (Briend, 1995, Ravelomanana *et al.*, 1995) ont mis en évidence les bénéfices de l'allaitement maternel sur la survie des enfants dans des communautés particulièrement défavorisées. Ils sont particulièrement significatifs dans les cas des nourrissons mal nourris, jusqu'à un an, en grande partie par la diminution des maladies diarrhéiques. Après un an, ces effets sont encore débattus.

Les diarrhées post-sevrage sont considérées, dans les pays en voie de développement, comme responsables de l'augmentation de la mortalité et la morbidité infantiles. L'ampleur que prend cette pathologie est liée aux conditions sanitaires et particulièrement à l'accès à l'eau potable (Nankabirwa *et al.*, 2011). L'étude de Dop (2002), portant sur plusieurs pays africains en voie de développement, a mis en évidence la responsabilité de l'allaitement non exclusif des nourrissons de moins de 4 mois comme cause importante de diarrhée. L'allaitement non exclusif est souvent favorable à l'apparition de la malnutrition chez les nouveau-nés. La malnutrition est également un facteur déterminant dans la survie des enfants, dans des contextes où les aliments introduits ne permettent pas de couvrir les besoins nutritionnels de l'enfant ce qui peut donner lieu à des carences. Ces phénomènes sont liés, car lorsque le sevrage se fait au bon moment, progressivement, et que la mère et l'enfant sont alimentés de façon équilibrée, les diarrhées de sevrage sont, en général, quasi inexistantes (Lawrence, 1994).

Un nombre satisfaisant d'études met en évidence la faiblesse des risques de mortalité infantile des nourrissons allaités au sein. Parmi elles, on peut citer, par exemple, une étude réalisée en Angleterre, à Derby, au tournant du XXe siècle (Howarth, 1905 ; cité par Knodel et Kintner, 1977), dans laquelle il s'avère que les nouveau-nés allaités ont une chance de survie trois fois plus élevée que les enfants nourris artificiellement.

Plusieurs enquêtes sociales et sanitaires dans des pays non industrialisés (Dop, 2002) ont mis en évidence une diminution de la mortalité infantile lorsque les pratiques d'allaitement maternel progressent.

En Amérique du Nord, en contexte industrialisé, l'allaitement maternel a été relié à une diminution de la mortalité infantile de 4 % (Rogan, 1989 ; cité par Cunningham, 1995).

La mortalité infantile est plus fortement liée à l'absence d'un allaitement exclusif lors des premiers mois qu'à la non-poursuite de l'allaitement en complément de l'alimentation diversifiée. Or on a pu constater dans plusieurs populations de pays non industrialisés un allaitement maternel de longue durée, mais un allaitement exclusif peu pratiqué (Dop, 2002).

Knodel et Kintner (1977) explorent les possibilités offertes par le modèle biométrique en se focalisant sur la relation entre la structure par âge de la mortalité infantile et les comportements d'allaitement. Les données disponibles sont revues au regard des effets de la nutrition artificielle, de l'allaitement et du sevrage, sur la mortalité infantile des populations étudiées (populations

contemporaines, provenant d'aires géographiques variées). Les résultats confirment l'existence d'un lien entre le type d'alimentation et la structure par âge de la mortalité infantile. Ils mettent en avant que dans les populations où l'allaitement maternel est rare ou pratiqué sur une courte durée, la mortalité infantile augmente de façon plus abrupte que ce qui est attendu dans les premiers mois de la vie. Parmi les populations qui pratiquent un allaitement prolongé, au contraire, une augmentation progressive de la mortalité infantile cumulative est observée dans les 6 premiers mois, suivie d'une étape progressive dans la deuxième moitié de la première année (ce qui est attribué essentiellement aux effets immunoprotecteurs et aux bénéfices nutritionnels de l'allaitement).

En ce qui concerne les effets positifs de l'allaitement maternel sur les risques amoindris de contracter de nombreuses maladies et sur la mortalité des enfants de 1 à 3 ans, les études divergent. Selon certaines études (Institute of Medicine, 1991, Cunningham *et al.*, 1991), les bénéfices de l'allaitement maternel sur la mortalité infantile se répercutent sur le sevrage et après le sevrage jusqu'à 3 ans. Cependant, d'autres auteurs ne font pas le même constat (Knodel et Kinter, 1977) et avancent que, en général, les avantages de l'allaitement maternel pour la survie de l'enfant semblent plus importants dans les premiers mois de la vie, et diminuent, voire disparaissent avant la fin de la première année.

Dans les études archéologiques, lorsque le pic de mortalité infantile est corrélé avec l'âge estimé du sevrage, les résultats ouvrent la voie à divers questionnements sur la pertinence de la durée de l'allaitement exclusif, la progression régulière du processus de sevrage et les aliments de sevrage utilisés (qui peuvent être inappropriés ou porteurs d'agents pathogènes). Le lait maternel ne fournissant pas les quantités de nutriments essentiels à la croissance de l'enfant au-delà de 6 mois notamment le fer et la vitamine C, l'alimentation de l'enfant doit être complétée par des aliments végétaux contenant de la vitamine C (excepté le lait de vache qui contient une quantité similaire de vitamine C au lait humain). Sans une introduction alimentaire appropriée, il peut être anémié (Hühne-Osterloh et Grupe, 1989).

Cependant, les méthodes d'estimation de l'âge et, par conséquent, de l'âge du sevrage dans les populations archéologiques peuvent toujours être discutées. De plus, il est rare de disposer d'un échantillon suffisant, en particulier en ce qui concerne la représentativité des plus jeunes (moins de 1,5 an), pour des conclusions générales exploitables.

1.3.2. **Allaitement maternel et espacement des naissances**

De nombreux travaux mettent en évidence le lien entre l'allaitement maternel et l'aménorrhée post-partum, et l'espacement des naissances qui en résulte (Howie et McNeilly, 1982). L'aménorrhée post-partum commence juste après l'accouchement et s'achève avec le retour des menstruations, qui autorisent une nouvelle grossesse (Robin *et al.*, 2010).

Un intervalle des naissances adéquat est important à la fois pour la mère, pour lui permettre de récupérer ses forces physiques entre deux grossesses et pour l'enfant auquel il confère plusieurs

avantages pour favoriser sa santé et son développement. L'allaitement maternel, en prolongeant l'aménorrhée post-partum, est une méthode naturelle permettant de réguler l'espacement des naissances. Plus exactement, la durée de l'allaitement maternel est un facteur qui interagit principalement avec la mortalité infantile, l'âge de la mère à la naissance de l'enfant, la place de l'enfant dans l'ordre des naissances et la différence d'âge entre les conjoints, sur l'indice de fécondité naturel (Cantrelle *et al.*, 1980).

Chez les femmes qui allaitent, la succion impliquée dans l'allaitement maternel stimule massivement la prolactine qui suspend les fonctions ovariennes, ce qui aboutit à une anovulation (Vitzthum, 1994; McNeilly, 1997). L'allaitement maternel est donc capable de prolonger l'aménorrhée post-partum. Dans le cas de l'allaitement exclusif (avec une fréquence minimale de six tétées par jour), l'absence d'ovulation peut s'étendre sur environ les 6 mois, qui suivent l'accouchement (dans 98 % des cas) (Gray *et al.*, 1990). Néanmoins, une considérable hétérogénéité a été constatée parmi les mères qui allaitent exclusivement. Ces variations sont traditionnellement expliquées, en partie, par les différences de durée, de fréquence et de répartition des tétées (Vitzthum, 1994). La suspension de l'ovulation induite par la lactation ne fait plus débat, aussi la durée de l'allaitement est un facteur déterminant qui agit sur la fécondité et l'espacement des naissances dans les populations dépourvues de contraceptions artificielles.

Il a également été remarqué que l'énergie demandée par la lactation peut altérer les fonctions reproductives, en raison de la perte de graisse corporelle qu'elle entraîne, associée à une perte de poids, ce qui affaiblit les fonctions ovariennes (McDade et Worthman, 1998).

L'allaitement tend à augmenter l'espacement entre les naissances de sorte que moins d'enfants naissent par femme, et le taux de croissance de la population est limité (Knodel et Kintner, 1977; Vitzthum, 1994). Un intervalle entre les naissances prolongé jusqu'à 4 ans a été documenté pour les chasseurs-cueilleurs d'Afrique australe, particulièrement bien documentée chez les Kung (Clayton *et al.*, 2006). Ils sont d'avis qu'un enfant a besoin de lait maternel jusqu'à au moins 3 ou 4 ans. Les Kung nomades, qui ne sont pas en contact régulier avec les agriculteurs n'ont pas à leur disposition de lait de vache ou de chèvre. Pour le sevrage des enfants, ils ont donc recours aux céréales. Même si les mères supplémentent les bébés avec de la viande prémastriquée, des racines, et des noix (Marshall, 1976; cité par Clayton *et al.*, 2006), les familles ne peuvent pas prendre en charge deux enfants. Les enfants peuvent se développer difficilement et un ou deux sont susceptibles de mourir. Il est alors nécessaire, dans l'intérêt de l'enfant et de la mère, d'allaiter aussi longtemps que possible, ce qui allonge l'intervalle entre les naissances. Le sevrage se fait quand la femme s'aperçoit qu'elle est à nouveau enceinte. L'intervalle entre les naissances est probablement dû, au moins en partie, à l'interruption de la fertilité due à l'allaitement, mais d'autres facteurs peuvent également être impliqués. La fonction ovarienne est réprimée par l'état nutritionnel marginal et un mode de vie très actif (Ellison et O'Rourke, 2000; Clayton *et al.*, 2006). L'étude de Cantrelle (1980) a relevé une augmentation de la durée d'intervalle entre les naissances de 9 mois lorsqu'on passe d'un sevrage à 12 mois à un sevrage à 30 mois.

Dans des sociétés où la contraception artificielle n'est pas utilisée, l'allaitement maternel est la méthode la plus utilisée pour l'espacement des naissances. Il revêt de ce fait une importance démographique majeure (Howie et McNeilly, 1982). En reprenant plusieurs études sur

l'espacement des naissances (Potter *et al.*, 1965 ; Berman *et al.*, 1972) et en répétant l'intervalle des naissances entre les grossesses successives, Howie et McNeilly (1982) suggèrent que les femmes non allaitantes pourraient avoir le double du nombre d'enfants par rapport aux femmes qui allaitent, sur une même période de temps.

La diminution de la fertilité post-partum est réelle, mais dans une certaine mesure et selon certaines conditions. La relation entre l'allaitement maternel et l'absence des menstruations juste après l'accouchement et dans la durée de l'allaitement maternel, est incontestable, mais les caractéristiques de ces liens sont manifestement à hauteur variable. L'allaitement maternel est, de ce fait, reconnu comme facteur de ralentissement du rythme des naissances, mais il est délicat d'en étudier le rythme.

Il convient également de rappeler que les études des pratiques d'allaitement fondées sur les analyses chimiques révèlent la consommation d'un lait maternel, mais ne permettent pas d'identifier les cas de mise en nourrice. Le lien entre l'allaitement maternel et l'espacement des naissances se révèle plus complexe qu'il n'y paraît. Il est en effet possible d'observer un intervalle des naissances réduit dans une population où l'allaitement maternel semble long, car les femmes qui mettent en nourrice leurs enfants ne bénéficient pas de la propriété contraceptive de la lactation (Fildes, 1995).

Il faut également avoir en tête le fait que le décès d'un nouveau-né interrompt, de fait, l'allaitement maternel, ce qui contribue à réduire la période d'ovulation post-partum, et à tendance à réduire l'espacement entre deux naissances (Cantrelle *et al.*, 1980).

Plus largement, les pratiques alimentaires sont imbriquées dans un système social. De ce fait, les croyances culturelles, les pratiques d'éducation des enfants s'ajoutent aux ressources économiques pour agir sur la santé de l'enfant et, en définitive, sur le succès de la population (Stuart-Macadam et Dettwyler, 1995). Par exemple, le poids des tabous sexuels liés à la mère allaitante comme on peut le voir dans de nombreuses cultures peut participer à l'efficacité de l'allaitement maternel comme moyen de contraception et donc sur l'espacement des naissances.

L'allaitement maternel exclusif, au moins les 6 premiers mois, est donc doublement favorable à la survie des nourrissons :

- les bénéfices biologiques en eux-mêmes qu'il apporte à l'enfant ainsi que l'évitement des contaminations par l'eau et les aliments solides atténuent la mortalité et la morbidité infantiles,
- l'espacement des naissances qu'il induit, permettant ainsi de concentrer les ressources de la mère sur un nombre réduit d'enfants (multipliant ainsi leurs chances de survie).

De plus, l'espacement des naissances a des implications positives sur la santé et diminue les risques de mortalité maternelle (Heymann *et al.*, 2013). En effet, un intervalle prolongé évite le drainage des réserves nutritionnelles maternelles associé à un espacement des naissances court et donc à des grossesses répétées (Vitzthum, 1994).

La mortalité infantile, l'espacement des naissances et les structures démographiques apparaissent clairement liés, mais les relations chiffrées restent incertaines.

1.3.3. Incidence sur les structures démographiques

Dans plusieurs articles publiés au milieu du XXe siècle, Bourgeois-Pichat (1951) développe une méthode démographique simple pour traiter les variations des taux de mortalité infantile entre différentes populations (modèle biométrique). La démarche s'appuie sur une distinction des causes de mortalité infantile, endogènes ou exogènes. Cette distinction répartit les décès néonataux avec d'une part les facteurs génétiques et congénitaux, la mauvaise santé de la mère et les problèmes lors de l'accouchement (causes endogènes), et, d'autre part, les décès influencés par l'environnement postnatal, comme la malnutrition, les infections et les blessures (causes exogènes). Le modèle ainsi proposé s'affranchit des informations sur la cause des décès. Fondé sur l'observation de la structure par âge de la mortalité infantile, il admet virtuellement que toutes les morts survenant entre 1 et 11 mois sont exogènes. L'hypothèse de départ postule qu'il existe une relation stable et linéaire entre l'âge et le rythme de mortalité infantile cumulatif entre 1 et 11 mois, virtuellement indépendante dans le temps et l'espace, des variations de cette mortalité. La distribution des âges au décès est alors exprimée par une fonction logarithmique qui traduit le raisonnement suivant : « Si la mortalité exogène conserve une structure par âge stable, c'est qu'il existe une fonction $P(\pi)$ de l'âge n , la même pour tous les pays et toutes les époques et telle que la probabilité de décès d'un nouveau-né entre les âges x et y de la première année de la vie, est proportionnelle à la différence $P(y) - P(x)$. En particulier, $P(\pi)$ est proportionnelle à la probabilité D' de décès exogène d'un nouveau-né avant l'âge n ». La fonction logarithmique est alors exprimée $[\log(n + 1)^3]$, dans laquelle n représente l'âge au décès en nombre de jours depuis la naissance (Bourgeois-Pichat, 1951).

L'objectif initial de ce modèle est de contourner par l'arithmétique les insuffisances basiques des données sur les causes de la mort, induites par la documentation écrite, qui manque souvent de précisions nécessaires pour distinguer les causes endogènes des causes exogènes de mortalité infantile, dans le but de renseigner la part de mortalité infantile imputable à l'environnement postnatal, et donc pouvant être pallié. Le modèle biométrique a pu être envisagé également pour des populations historiques qui présentent, nécessairement, des lacunes similaires. Cependant, l'analyse biométrique n'offre qu'une estimation de la mortalité endogène. En l'absence d'informations sur les causes de décès, le niveau réel ne peut pas être déterminé (Galley et Woods, 1998). L'application de la méthode biométrique dans le cadre de recherches médicales et démographiques, sur diverses populations contemporaines (Knodel et Kintner, 1977) et historiques (Herring *et al.*, 1998), a montré que le postulat de départ d'une distribution au décès régulière au cours de la première année de la vie, n'est pas systématiquement confirmé et qu'elle dépend probablement de facteurs spécifiques propres à certains paramètres chronologiques et géographiques (son application est donc limitée à une catégorie de populations). Les conclusions de Bourgeois-Pichat (1951) correspondent aux conditions de la mortalité infantile en Angleterre et au pays de Galles entre 1920 et 1949, contexte dans lequel les bébés moins jeunes ont une chance de survie accrue, notamment en raison des conséquences de l'urbanisation progressivement mieux maîtrisée. Le modèle n'est fiable que dans les contextes où la distribution des décès

ne s'écarte pas significativement de la population de référence (Galley et Woods, 1998). Les exceptions les plus courantes concernent les cas dans lesquels la mortalité cumulée après plusieurs mois augmente plus fortement que ce qui est suggéré par l'extrapolation du modèle à la fin de l'année. Dans ces exemples, la mortalité infantile au cours des derniers mois de la première année semble correspondre à une inclinaison graphique plus abrupte. Cette « surmortalité » survenant généralement entre 2 et 4 mois est attribuée à des problèmes digestifs, eux-mêmes liés au sevrage précoce, à l'absence d'allaitement maternel (Knodel et Kintner, 1977) ou plus généralement à des pratiques de soins délivrés aux enfants. De plus, le modèle proposé par Bourgeois-Pichat (1951) repose sur la précision de l'âge au décès des enfants, ce qui n'est pas possible en contexte archéologique (Herring *et al.*, 1998).

La mise au point de structures démographiques en contexte archéologique pose trois problèmes majeurs :

- La mortalité des périnataux, groupe qui comprend indistinctement des décès *in utero*, des mort-nés et de très jeunes nouveau-nés pour lesquels le début de la vie est difficile à situer ;
- Les infanticides et négligences délibérées, bien que peu répandus, et souvent fonction du sexe et du rang de l'enfant, peuvent biaiser la configuration « naturelle » de la distribution de la mortalité infantile en augmentant artificiellement la proportion des décès des nouveau-nés ;
- Les problèmes de représentativité des très jeunes enfants dans les vestiges anthropologiques (qui s'expliquent partiellement par des tombes moins profondes et plus facilement endommagées, une plus grande friabilité de l'os des immatures, un ensevelissement dégroupé par rapport aux adultes).

Les implications des pratiques d'allaitement maternel sur les structures démographiques sont complexes, notamment en raison de la régulation de la croissance de la population par l'espacement des naissances qui semble, dans une certaine mesure, réduire par un plus faible taux de mortalité chez les enfants nourris au sein (Knodel, 1977 ; cité par Howie et McNeilly, 1982). On peut donc raisonnablement penser que l'utilisation de la durée de l'allaitement maternel comme paramètre de calculs, appliqué aux études démographiques des populations du passé, pourrait réajuster les estimations.

chapitre II

LES MARQUEURS DENTAIRES DES PRATIQUES D'ALLAITEMENT ET DE SEVRAGE

Les dents se forment avant et pendant l'enfance, et, contrairement à l'os, ne connaissent aucun remaniement. De ce fait, elles enregistrent des informations sur cette période de la vie de l'individu. Il est donc important de comprendre les caractéristiques de l'émail et de sa formation pour accéder aux informations correspondant à l'enfance, notamment en ce qui concerne les stress et les pratiques d'allaitement et de sevrage.

II.1. LA DENT : UN MARQUEUR SPÉCIFIQUE DU SQUELETTE

Les dents, loin de former un organe isolé, appartiennent, d'un point de vue anatomique, à l'ensemble plus vaste des os de la face. On distingue traditionnellement le squelette cérébral du squelette facial, dans lequel s'insère l'appareil dentaire.

II.1.1. La dent dans la sphère bucco-dentaire

Dans ce cadre anatomique, les dents sont enchâssées dans les alvéoles des bords alvéolaires des arcades indistincts de l'os sous-jacent avec lequel ils forment un tout (Lautrou, 1997). L'os alvéolaire se présente en deux parties, le maxillaire (maxillaire supérieur) et la mandibule (maxillaire inférieur), qui délimitent la sphère bucco-dentaire. Le terme bucco-dentaire sousentend l'ensemble formé par la cavité buccale et le système dentaire.

II.1.1.1. Définition spatiale de la cavité bucco-dentaire

La cavité bucco-dentaire, de forme ovoïde (plus large que haute), est limitée en haut par la voûte palatine et, plus en avant, par les fosses nasales, en bas par la mandibule; antérieurement par la région labiale, postérieurement par les amygdales et latéralement par les régions géniennes qui abritent les extrémités des arcades dentaires formant la mâchoire (Farge *et al.*, 1992).



Fig. 2. Maxillaire

II.1.1.2. Le maxillaire

Le maxillaire de la mâchoire, qui s'articule avec le neurocrâne et le splanchnocrâne, est fixe. Sur le plan vertical, il commence au frontal, puis s'étend jusqu'au bord alvéolaire de la denture supérieure. Ses bords latéraux sont constitués par les sutures maxillo-zygomatiques et ses bords médians forment l'échancrure nasale. Sur le plan transversal, il est tributaire, en hauteur, de la largeur du méséthmoïde cartilagineux (structure cartilagineuse primaire appartenant à la base du crâne dont la progression vers le bas et l'avant entraîne la croissance sagittale de la face) et, en bas il est directement lié à la fonction linguale et à la fonction de ventilation (qui contribue au bon développement de la fosse nasale) (voir figure 2).

II.1.1.3. La mandibule

La cavité bucco-dentaire est limitée dans sa partie inférieure par la mandibule, qui est le seul os mobile de la face. Elle est formée par une partie horizontale, le corps mandibulaire, et prolongée de chaque côté par une branche montante. Le corps mandibulaire comporte sur sa surface supérieure le bord alvéolaire et présente au bord inférieur de la symphyse une proéminence mentonnière. Les branches montantes possèdent chacune deux apophyses, séparées par l'échancrure sigmoïde, l'une antérieure, le processus coronoïde où s'insèrent des muscles de la mastication et l'autre, postérieure, où se situe le condyle articulaire (Kahle *et al.*, 1982). L'articulation temporomandibulaire, bilatérale, est le seul point de liaison entre la mandibule et le reste du crâne.

Les dents sont donc régulièrement réparties sur les deux bords alvéolaires maxillaire et mandibulaire, insérées dans des alvéoles, lesquelles sont séparées par des cloisons interalvéolaires; le tout forme l'arcade dentaire de l'homme (voir figure 3).

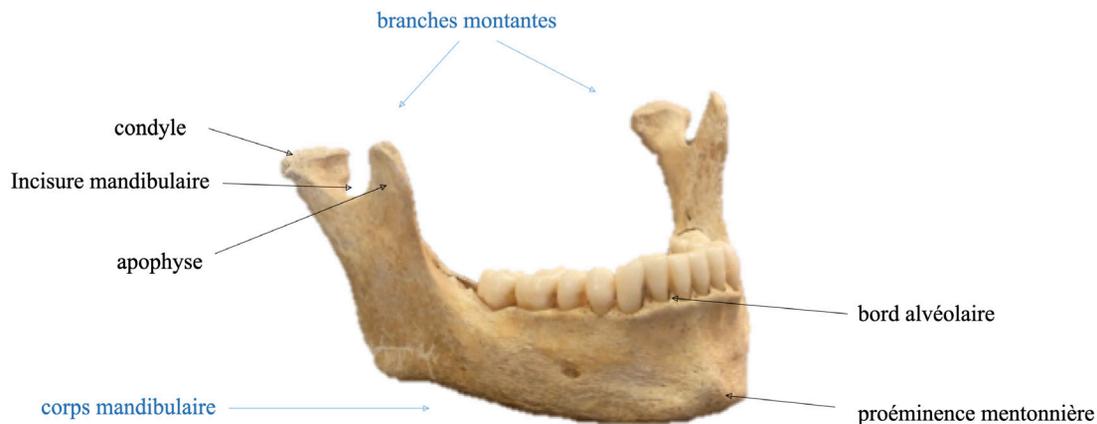


Fig. 3. Mandibule

II.1.2. Chronologie du développement de la dentition

L'Homme possède deux types de dentitions, l'une provisoire et l'autre permanente. La première qui n'est que provisoire comprend 20 dents déciduales (ou lactéales) dont 4 incisives, 2 canines et 4 molaires sur chacune des arcades. La formation de la première dentition s'amorce avec la sécrétion de son liquide d'émail, dès la sixième semaine embryonnaire, et la minéralisation débute entre le troisième et le quatrième mois (Lautrou, 1997), de l'incisive centrale supérieure pour commencer et qui émerge vers 7,5 mois. La croissance de ces premières dents est immédiatement suivie de celle des dents correspondantes inférieures, que ce soit pour la calcification de la couronne ou l'éruption dentaire. Puis, ce sont les canines qui apparaissent, d'abord les supérieures et ensuite les inférieures. Enfin, ce sont les molaires qui se forment en observant toujours le même ordre, les dents supérieures devant les dents inférieures. La dernière dent à se former est la seconde molaire inférieure, qui débute la minéralisation de son émail au sixième mois fœtal et présente une couronne achevée entre 10 et 12 mois. Le développement des dents déciduales se poursuit jusque vers la fin de la troisième année du sujet avec l'achèvement de la dernière formation radiculaire (Liversidge et Molleson, 2004).

Les dents déciduales, à l'émail nettement moins épais et moins minéralisé (Lautrou, 1997), sont temporaires; lorsqu'elles tombent, elles laissent l'espace libre à la dentition adulte définitive qui comprend 32 dents : 4 incisives, 2 canines, 4 prémolaires, et 6 molaires par arcade. Les premières dents permanentes sécrétées et minéralisées sont les premières molaires (inférieures et supérieures); elles entament leur processus de formation avant la naissance. Par la suite, la minéralisation des dents antérieures permanentes commence au cours de la première année postnatale (Scheuer et Black, 2000). Les dents permanentes commencent leur développement pendant l'odontogenèse (Bayle, 2008).

À l'exception de la troisième molaire qui présente une grande variabilité chronologique de croissance (pouvant atteindre plusieurs années) d'un individu à l'autre, il semblerait que la chronologie absolue de formation de la couronne dentaire varie assez peu d'un individu à l'autre, voire entre les populations, contrairement aux phases d'éruption dentaire plus sensibles

aux diverses influences internes et externes (Liversidge et Molleson, 2004) (voir figure 4). La formation de l'émail est donc un processus long, qui commence *in utero*, puisque, chez l'homme, toutes les dents déciduales et les premières molaires permanentes ont généralement commencé leur minéralisation avant la naissance (Scheuer et Black, 2000). Le processus, dont la fin est marquée par l'achèvement des couronnes de la dentition permanente, s'étend jusqu'à 4 ou 5 ans après la naissance (excepté pour les troisièmes molaires). Au cours de la première année, les dents antérieures définitives commencent à se minéraliser (Scheuer et Black, 2000). Les deux tiers du temps de l'amélogénèse sont occupés par la maturation (Smith, 1998), qui s'effectue par apposition de couches successives de l'intérieur (à la jonction amélo-dentinaire) vers l'extérieur (à la surface externe de la dent), en observant un rythme relativement régulier. Le rythme de

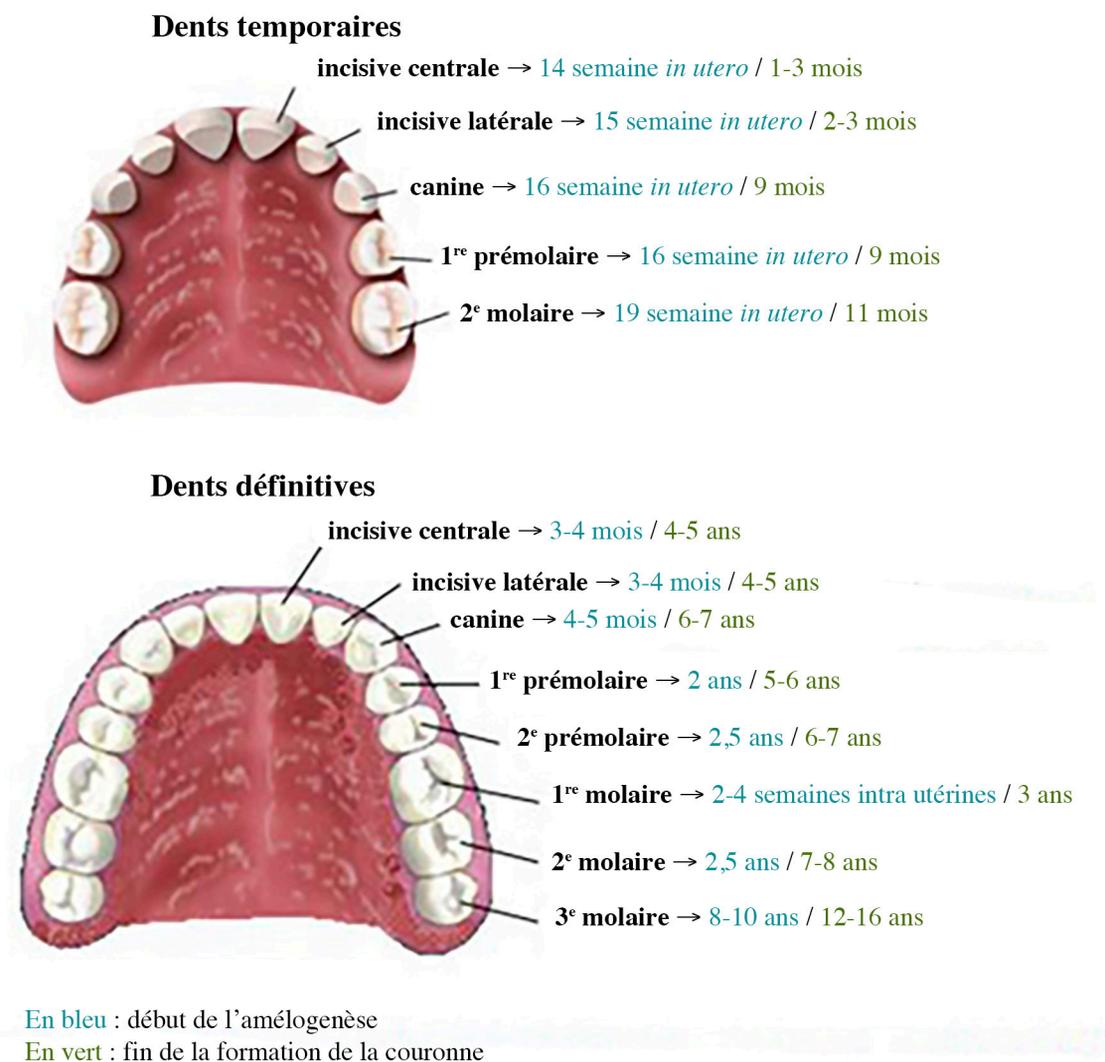


Fig. 4. Chronologie de formation des dents définitives et temporaires (d'après Alliot-Licht, 2010-2011)¹⁴.

14. D'après le cours d'Alliot-Licht, Professeur à l'université de Nantes, U.E. Odontologie, Chapitre 3 : Amélogénèse, 2010-2011. http://spiral.univ-lyon1.fr/files_m/M9464/Files/723242_6450.pdf.

croissance appositionnelle de l'émail dentaire, qui définit la vitesse à laquelle s'accumulent, en épaisseur, les couches extracellulaires est estimé chez l'homme à 4 μm par jour. Ce rythme est également lié au développement en volume de l'émail qui augmente au fur et à mesure que les améloblastes s'éloignent de la dentine (Smith, 1998).

La chronologie de formation de l'émail offre deux possibilités applicables dans les études archéologiques qui nous intéressent. Premièrement, le chevauchement de la formation des dents permet le contrôle d'une information par comparaison avec d'autres dents. Deuxièmement, elle permet d'avoir un choix plus précis pour une phase de croissance donnée de l'individu en jouant sur le choix des dents étudiées.

II.1.3. Composition structurelle et physique de la dent humaine

Les dents humaines ont des morphologies différentes, qui permettent de les répartir en plusieurs catégories : incisives, canines, prémolaires et molaires. Mais elles présentent toutes les mêmes divisions anatomiques et sont constituées des mêmes tissus. Chaque dent est composée de deux régions anatomiques identifiables, la racine et la couronne, séparées par une zone cervicale -ou collet- qui correspond à la partie imbricationnelle de la dent dans la gencive. La dent est reliée à l'os alvéolaire par les ligaments alvéolo-dentaires (ou ligaments parodontaux, formant le desmodonte).

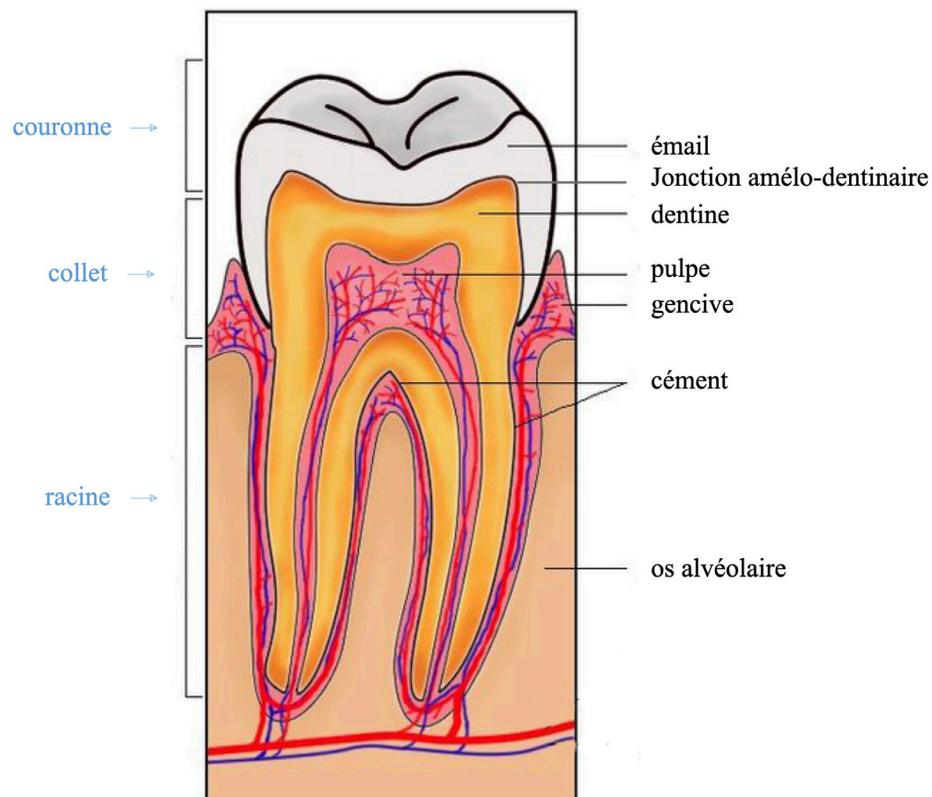


Fig. 5. Structure et composition de la dent (d'après Wikimedia Commons).

Chaque organe dentaire comprend quatre types tissulaires différents, toujours composés de cellules spécialisées (par exemple, améloblastes dans le cas de l'émail) et de matrice extracellulaire (liquide organique acellulaire). Le plus interne des quatre est un tissu conjonctif lâche, qui deviendra la pulpe dentaire, directement recouverte par un tissu minéralisé interne, la future dentine (ou ivoire), elle-même revêtue d'un tissu minéralisé de recouvrement, qui sera l'émail, lequel sera recouvert d'un autre tissu minéralisé autour des racines, le ciment (voir figure 5).

On définit les tissus en fonction des variations quantitatives et qualitatives des diverses macromolécules matricielles, ainsi que leur système d'organisation dans la matrice, selon leur rôle biologique (Bertrand, 1997).

II.1.3.1. La pulpe dentaire

La chambre pulpaire est l'espace où se loge la pulpe dentaire, tissu conjonctif spécialisé, en périphérie de laquelle se trouvent les corps cellulaires des odontoblastes qui agissent sur la production de la dentine (Bertrand, 1997).

II.1.3.2. La dentine

La dentine représente la plus grande partie de la couronne et de la racine. Elle présente une limite nette avec l'émail, la jonction amélo-dentinaire. La dentine est un tissu dur, formé de cristaux d'hydroxyapatite, minéralisée à 50 %, laissant la place à environ 30 % de trame organique, essentiellement du collagène, mais aussi des protéines non collagéniques, ainsi que des lipides, et 20 % d'eau. Elle se forme parallèlement à la cupule épithéliale, destinée à la formation de l'émail, grâce à la prolifération des cellules différenciées, les odontoblastes.

II.1.3.3. L'émail

L'émail, considéré comme l'un des quatre tissus dentaires, dont les modalités de développement seront exposées plus bas (*cf. infra* II. 1.4.1), est donc le plus dur, le plus minéralisé; il est composé à 96 % de matière minérale et à moins de 1 % de matière organique, laissant environ 3 % occupés par l'eau. En ce qui concerne la répartition inégale de l'émail sur la dentine, dans le cas des dents peu usées, il se répartit plus largement sur les cuspidés que dans la région cervicale (Bayle, 2008).

II.1.3.4. Le ciment

Le ciment, tissu conjonctif dense minéralisé, entoure et recouvre les racines dentaires. La fonction principale du ciment est de garantir le maintien des dents dans l'os alvéolaire par l'enracinement des fibres de collagène du ligament parodontal. On discerne deux types de ciment, cellulaire et acellulaire. Le ciment acellulaire, peu épais, se forme pendant l'édification de la racine, recouvre la dentine au collet et croît en épaisseur en direction apicale, alors qu'il se couvre de ciment cellulaire. Le ciment cellulaire est produit par les cimentoblastes, lors de phases plus tardives du développement dentaire. Ces cellules spécialisées déposent une matrice riche en fibrilles de collagène et en protéines non collagéniques, directement à la surface radiculaire. Il est caractérisé par la présence de cimentocytes, cellules incluses dans des cavités du ciment (cémentoplastes) après la sécrétion des précurseurs de la matrice. La cémentogenèse ne se réalise

pas seulement au cours du développement dentaire qui voit apparaître le cément primaire, mais se poursuit postérieurement au développement dentaire en formant un cément secondaire durant toute la vie de l'individu (Bertrand, 1997).

II.1.4. L'émail : le marqueur spécifique de la dent

La formation de la dent commence avec deux processus fondamentaux : l'odontogenèse (formation de l'appareil odonte, qui comprend l'ensemble des phénomènes régissant essentiellement divers mécanismes de différenciations et de migrations cellulaires) et l'amélogénèse (origine embryonnaire de l'émail dentaire). L'émail est la structure (ne contenant ni cellules, ni vaisseaux, ni nerfs) qui recouvre la couronne dentaire (Triller, 1986).

II.1.4.1. La formation de l'émail

II.1.4.1.1. L'odontogenèse

D'un point de vue histologique l'odontogenèse commence pendant la période fœtale, au début du développement crâniofacial (à la fin du premier mois embryonnaire), et se prolonge jusque vers l'âge de vingt ans (pour la troisième molaire¹⁶). L'odontogenèse constitue le processus qui aboutit à la formation de l'appareil odonte. Les cellules de cet appareil élaborent la prédentine, qui devient la dentine. Au contact de la dentine, les cellules de l'épithélium dentaire se différencient en améloblastes, groupe de cellules qui constituent l'organe d'émail dans la dent en développement.

Lors du développement embryonnaire, les cellules de l'épithélium buccal sont soumises à divers phénomènes qui les mènent à la mise en place, d'une part, de la lame primitive déterminant ainsi le site de développement des dents sur la mâchoire, et, d'autre part, des odontoblastes. La lame primitive se sépare en deux lames qui sont les futurs arcs maxillaire et mandibulaire. Les odontoblastes sont des cellules situées autour de la pulpe dentaire. Elles sécrètent la matrice organique de la dentine.

Les cellules de l'épithélium forment un bourgeon qui s'aplatit en forme de cupule, évoluant en forme de cloche, où va naître le bourgeon dentaire ou organe d'émail (figure 6)¹⁷. Chaque bourgeon d'émail est individualisé. À terme, les cupules aboutissent à la formation de l'émail par la multiplication et la spécialisation des améloblastes (Simmer et Fincham, 1995; Wakhabe Kane, 1995; Auriol *et al.*, 2000; Dean, 2006; Goldberg, 2007).

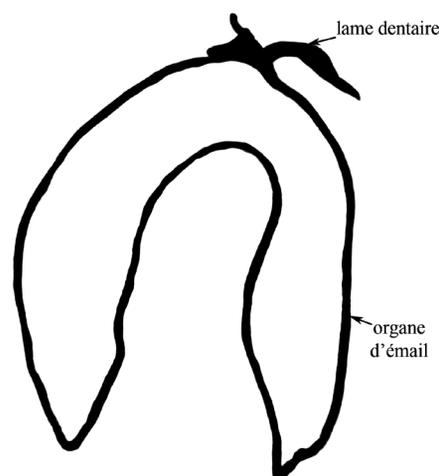


Fig. 6. L'organe d'émail (d'après seigneurin, 2007-2008)¹⁷

15. http://umvf.omsk-osma.ru/premannee/seigneurin_daniel/seigneurin_daniel_p12/seigneurin_daniel_p12.pdf

16. Appelée couramment « dent de sagesse ».

17. L'organe d'émail est composé de quatre couches de cellules : l'épithélium dentaire externe, le réticulum étoilé, le stratum intermedium et l'épithélium dentaire interne (améloblastes).

Les odontoblastes sécrètent la couche initiale de la dentine, face aux améloblastes présécréteurs, créant un support pour la première couche d'émail et une voie de passage pour les vaisseaux pulpaire permettant ainsi à l'organe d'émail d'être irrigué et aux nutriments d'atteindre les améloblastes.

L'odontogénèse pose ainsi les conditions nécessaires à l'amélogénèse. Une partie des odontoblastes se différencie pour devenir des améloblastes, qui assurent la sécrétion de la matrice organique de l'émail.

11.1.4.1.2. L'amélogénèse

L'amélogénèse est le processus de formation de l'émail. Elle débute autour de la sixième semaine embryonnaire et se déroule en plusieurs étapes. Les améloblastes sécrètent un gel matriciel, organique, puis on assiste à la minéralisation de la matrice. Ensuite s'opère la phase de maturation et enfin, le processus s'achève avec le stade de protection (Nanci et Smith, 1992; Simmer et Fincham, 1995; Fincham *et al.*, 1999).

Le gel matriciel sécrété par les améloblastes est composé de protéines (spécifiques et non spécifiques de l'émail) (Smith et Nancy, 1996), de protéases (Fukae *et al.*, 1998; Fukae *et al.*, 2002), de composants organiques non spécifiques de l'émail¹⁸ (Bawden, 1989; Robinson *et al.*, 1995b; Goldberg, 2005) et d'eau. La trame protéique du gel matriciel joue un rôle dans la précipitation des ions minéraux qui vont être intégrés dans l'émail. Elle initie la formation des cristaux (nucléation cristalline) (Termine *et al.*, 1980; Nanci et Smith, 1992; Deutsch, 1989; Nanci et Smith, 1992; Fincham *et al.*, 1994; Bartlett *et al.*, 2006; Tarasevich *et al.*, 2007; Iijima *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2011), est impliquée dans l'orientation des monocristaux (Fincham *et al.*, 1994; Paine et Snead, 1997; Iijima *et al.*, 2002; Iwaasaki *et al.*, 2005; Bartlett *et al.*, 2006; Uskoković *et al.*, 2008), régule la croissance des cristaux (dans l'espace et le temps) (Termine *et al.*, 1980; Deutsch, 1989; Aoba, 1987; Nanci et Smith, 1988, 1992; Deutsch *et al.*, 1995; Simmer et Fincham, 1995; Caterina *et al.*, 2002; Tarasevich *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2008; Iijima *et al.*, 2010), et participe à l'organisation des prismes (gestion des écarts entre les cristaux) (Simmer et Fincham, 1995; Zhu *et al.*, 2006; Uskokovic *et al.*, 2011). Les protéines matricielles présentes dans le liquide d'émail sont organisées le long de la membrane basale dans des conditions environnantes spécifiques observant une température de 37° (Simmer et Fincham, 1995; Moradian-oldak *et al.*, 1998), un apport en ions minéraux significatif, un pH entre 7 et 8 (Simmer et Fincham, 1995; Smith, 1998; Robinson *et al.*, 2004, 2005; Lacruz *et al.*, 2010) sous contrôle génétique (Caterina *et al.*, 2002; Fukumoto *et al.*, 2004; Hart *et al.*, 2000, 2004; Moffatt *et al.*, 2006, 2008; Goldberg, 2007; Potvin-Lapointe *et al.*, 2009; Iisuka, 2011).

Les protéases sont des enzymes qui ont la capacité de dégrader les protéines par clivage des liens peptidiques (par hydrolyse dans le cas de l'émail dentaire). Pendant la phase de maturation, les protéases dégradent les protéines de l'émail afin qu'elles puissent être remplacées par des ions minéraux une fois leur fonction accomplie (DenBesten *et al.*, 1989; Deutsch, 1989; Nanci et Smith, 1992; Moradian-Oldak, 1996; Llano, 1997; Caron *et al.*, 1998; Bartlett et Simmer, 1999;

18. Lipides, cytokératines et acides aminés

Devy *et al.*, 1999; Bourd-Boittin *et al.*, 2004; Fukumoto *et al.*, 2004; Fukumoto *et al.*, 2005; Bartlett *et al.*, 2006).

Après l'intervention des protéases, quelques protéines non produites par les améloblastes persistent. Il s'agit de résidus protéiques issus du clivage d'autres protéines présents dans des quantités plus ou moins importantes. Ils semblent intervenir sur la croissance et la maturation, mais les hypothèses restent incertaines à ce sujet (Couwenhoven, 1989; Limeback *et al.*, 1989; Stramwich et Glimcher, 1990; Robinson *et al.*, 1992; Farge *et al.*, 1992; Robinson *et al.*, 1995a; Wright *et al.*, 1997; Ajacques, 2002).

L'amélogénèse est le processus de formation par dépôts successifs du gel matriciel d'émail, riche en eau et en protéines. Ces dépôts constituent la matrice de l'émail mature, à partir de la surface dentinaire (qui devient avec le temps la jonction amélo-dentinaire).

II.1.4.1.3. La minéralisation

II.1.4.1.3.1. Formation des monocristaux d'émail

L'émail dentaire, initialement produit sous la forme d'un liquide doit, pour se transformer en tissu dur mature, éprouver un certain nombre de processus complexes de minéralisation. La minéralisation implique une cristallisation à partir des ions présents dans la solution amélaire. Ce phénomène permet, dans un premier temps, l'apparition de cristaux précurseurs, des phosphates octacalciques (OCP), dits amorphes (chimiquement peu stables). Dans un deuxième temps, les phosphates octacalciques (OCP) évoluent en hydroxyapatites de calcium (OHAP) chimiquement plus stables (Simmer et Fincham, 1995; Eanes, 2003; Cazalbou *et al.*, 2004).

La formation des cristaux d'émail est conventionnellement décrite en trois étapes. Pour commencer, des « bourgeons » cristallins se forment à partir de groupes d'ions précipités. La sursaturation du liquide d'émail en ions calcium et phosphore entraîne, lorsque les conditions environnementales sont réunies (pH, contrôle génétique), une précipitation des nanosphères octacalciques solides qui constituent le germe cristallin ou monocristal d'émail (Simmer et Fincham, 1995; Tarasevich *et al.*, 2007). Puis s'opère la croissance de la structure en longueur et en largeur, évènement qui correspond à la construction de l'OCP. Les monocristaux nouvellement formés constituent alors une phase amorphe (ou métastable), plus soluble, nécessaire à la formation des futures hydroxyapatites de calcium matures (Nanci et Smith, 1992; Aoba, 1996; Risnes, 1998b).

Enfin, on assiste à la croissance en épaisseur de l'OCP. Cette dernière étape comprend, successivement, une phase de précipitation et une phase d'hydrolyse. L'hydrolyse est le phénomène de décomposition par l'eau grâce aux ions hydrogène et oxygène qu'elle contient. Cette étape permet la recristallisation des ions provenant de la solution sursaturée (Simmer et Fincham, 1995). C'est à l'issue des réactions chimiques décrites que les monocristaux constituant l'unité cellulaire de l'émail dentaire mature deviennent des hydroxyapatites de calcium (OHAP) pouvant être traduits par la formule $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$. À l'issue de ce processus, la structure de l'hydroxyapatite de calcium est dominée par de grands ions phosphore, organisés en réseaux hexagonaux auxquels s'ajoutent les ions calcium et les groupes hydroxyles (un atome d'oxygène et d'hydrogène, liés) selon une organisation prédéfinie. Cette disposition spécifique donne lieu à une structure cristalline (Robinson *et al.*, 1995b; Simmer et Fincham, 1995; Goldberg, 2007).

La formation des monocristaux d'hydroxyapatite amorce la transformation de la nature de l'émail qui jusqu'alors était à l'état de gel organique et devient une matière minérale solide. Ainsi l'émail passe d'un état liquide à une phase solide amorphe, puis à une phase cristalline chimiquement stable. Cet émail mature est presque dépourvu de protéines et d'eau. Il est composé de 96 % de cristaux, 3,2 % d'eau, et 0,8 % de matière organique.

II.1.4.1.3.2. Formation des couches d'émail

Les marqueurs de croissance traités dans ce travail reflètent le parcours des améloblastes pendant la formation du gel matriciel de l'émail dentaire. Le modèle d'association et de mouvement de groupes d'améloblastes de la jonction amélo-dentinaire vers l'émail externe se traduit optiquement par des striations transversales (*cf. infra* II. 1.4.5). Elles matérialisent le rythme journalier de la formation de l'émail, qui est d'environ 4 µm d'émail par jour. Ce processus s'opère par couches successives qui s'accumulent pour constituer l'épaisseur de l'émail (voir figure 7). Ces couches se traduisent optiquement par des stries de Retzius (*cf. infra* II. 1.4.5), croisant les striations transversales. Elles reflètent un rythme plus ou moins hebdomadaire (selon les individus) de la formation de l'émail (Risnes, 1998). Ce rythme peut-être précisé individuellement à l'aide des striations transversales (le nombre de prismes entre deux stries indique le nombre de jours qui séparent la formation de deux stries de Retzius).

La première couche fine de matrice amélaire est aprismatique et est déposée le long de la future jonction émail-dentine, depuis la pointe cuspidienne de la future dentine vers le collet. Elle s'étend en direction de la surface (Boyde, 1967; Cuisinier *et al.*, 1992; Nanci et Smith, 1992; Diekwisch *et al.*, 1995; Aoba, 1996; Risnes, 1998). Sa formation achevée, l'émail est composé de trois « épaisseurs » : une couche initiale d'émail aprismatique, une partie prismatique qui occupe l'essentiel de l'épaisseur de l'émail, et une couche finale d'émail aprismatique externe (particulièrement dans les dents déciduales) (Risnes, 1998) (voir figure 8).

II.1.4.2. L'émail : un assemblage cristallographique

Les cristallites, éléments de base de la structure de l'émail sont regroupées selon deux organisations : les prismes et le liquide interprismatique (Warshawsky, 1989). L'émail est formé de couches prismatiques, séparées par du liquide aprismatique. Le tout évolue selon un ordre spatio-temporel précis pour aboutir à un émail mature.

II.1.4.2.1. Les types d'émail : prismatique et aprismatique

Chez les mammifères supérieurs, on distingue deux formes d'émail, l'une prismatique, l'autre aprismatique (Risnes, 1998; Goldberg, 2007). De même composition, elles sont définies par l'organisation et l'orientation des cristallites qu'elles contiennent par rapport à la jonction amélodentinaire et entre elles (Von Koenigswald, 1999). Les cristallites sont globalement parallèles entre elles dans les bordures non prismatiques de l'émail interne et externe, et sont perpendiculaires aux stries de Retzius. Elles respectent une disposition en éventail dans les prismes et forment un angle d'environ 60° entre les prismes et les interprismes. Le type d'émail est induit par la morphologie des améloblastes qui évolue au cours du processus de formation de l'émail dentaire (Risnes, 1998; Goldberg, 2007).

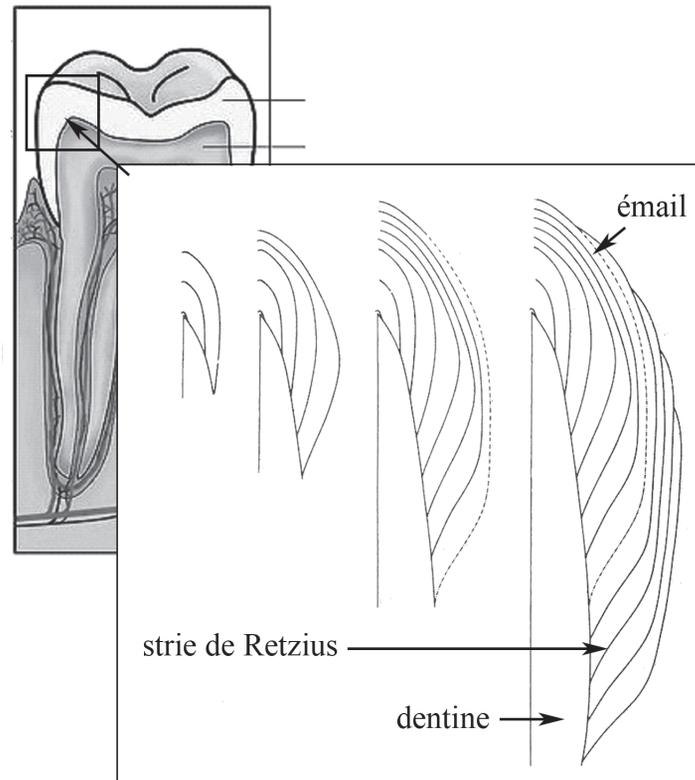


Fig. 7. Schéma de la croissance de l'émail par accumulation des couches (d'après Beynon et al., 1991)

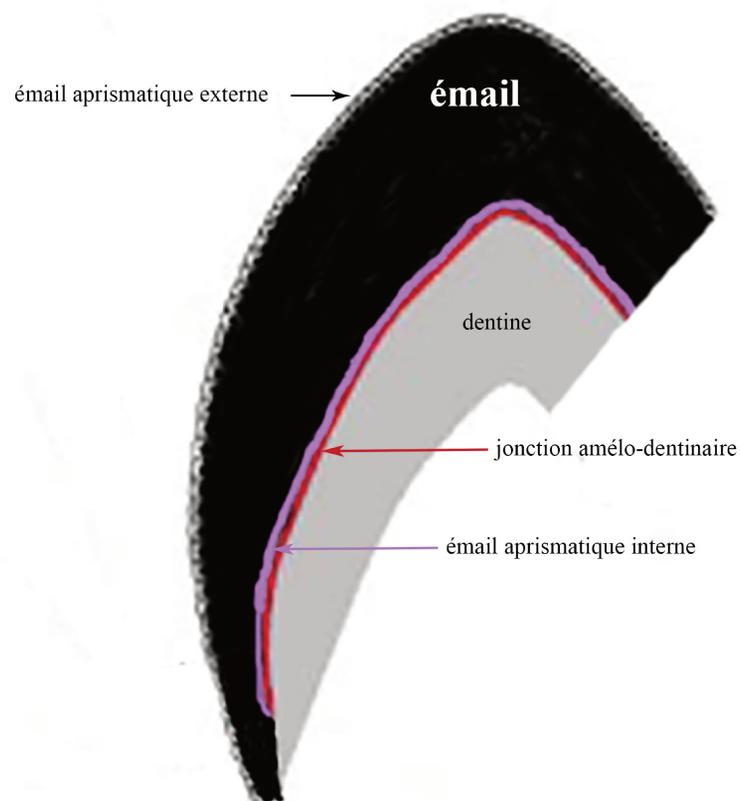


Fig. 8. Schéma d'une coupe histologique dentaire pendant la formation de l'émail (D'après Alliot-Licht, 2010-2011)¹⁹

19. Alliot-Licht, Professeur à l'université de Nantes, U.E. Odontologie, Chapitre 3: Amélogénèse, 2010-2011. http://spiral.univ-lyon1.fr/files_m/M9464/Files/723242_6450.pdf.

L'émail interprismatique, aprismatique, est composé d'une centaine de cristallites parallèles, qui sont réunies, mais non organisées (Tafforeau, 2004; Martin, 2005). Cette forme d'émail correspond à un état des améloblastes tout juste devenus sécréteurs qui ne présentent pas encore de prolongement de Tomes²⁰. Cet émail prend l'aspect d'un réseau continu, dit, de façon imagée, « en alvéole de gâteau de cire d'abeille » (ou de miel), résultat de l'entrecroisement de la sécrétion de plusieurs améloblastes adjacents en même temps.

Ce sont les améloblastes, dont la morphologie évolue selon la modification de leur activité fonctionnelle (Nanci, 1989; Robinson *et al.*, 1995a; Simmer et Fincham, 1995; Smith, 1998), qui, en agissant sur la croissance et les changements morphologiques des cristaux d'hydroxyapatite, agencent les prismes et les espaces interprismatiques entre eux. Ces mécanismes, encore mal définis, aboutissent à une organisation spécifique qui forme l'émail (Aoba, 1996; Smith *et al.*, 2011).

11.1.4.2.2. Les éléments de base de l'émail : monocristaux et cristallites

Les éléments de base de l'émail sont les monocristaux et les cristallites. Au commencement, il y a le monocristal d'hydroxyapatite, la plus petite unité, la plus petite nanostructure (400 Angströms de diamètre en moyenne), qui compose l'émail (Goldberg, 2007). Il est désigné comme l'unité de base de répétition de l'émail, définie par sa composition élémentaire qui, dans le cas qui nous occupe, se trouve être des structures cristallines en feuillets assemblés « comme des legos », de manière à former de l'hydroxyapatite de calcium. La longueur et l'orientation sont variables selon qu'ils appartiennent au prisme ou à l'émail interprismatique. Le monocristal sert d'assise à un autre, qui s'appuie et permettra, à son tour, la superposition d'un nouveau monocristal. Ainsi, ces sous-unités nucléées donnent naissance à un noyau initial qui s'accroît de façon centrifuge. Ce noyau est alors au centre d'une cristallite en formation (hydroxyapatite également magnésinée et carbonatée) (Goldberg, 2007).

Pour commencer, les cristallites sont isolées dans la matrice d'émail sécrétée à la surface de la dentine nouvellement établie. Lorsque de nouvelles cristallites sont sécrétées, les précédentes peuvent grandir en longueur. Ensuite, la matrice est dégradée et résorbée, les cristaux peuvent alors grandir en largeur et en épaisseur (Risnes, 1998).

Les mécanismes qui gouvernent l'orientation des cristallites sont encore mal connus. Osborn (1970) proposait une théorie selon laquelle les cristallites seraient orientées le long des lignes de flux matriciel, en observant l'orientation perpendiculaire au front de minéralisation (Risnes, 1998), mais rien ne nous permet, à l'heure actuelle, de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse. Il se pourrait aussi que les changements des cristaux dans les prismes et entre les prismes soient le reflet d'une variation de disposition dans l'espace. Une autre suggestion a pu être évoquée, concernant cette fois la composition chimique de la matrice, dont les composants connaissent des différences de distribution susceptibles de se répercuter sur les cristallites. En revanche, le fait que l'organisation spatiale des cristallites soit liée au comportement des améloblastes est relativement bien admis (Risnes, 1998).

20. Le prolongement de Tomes est une prolongation de l'améloblaste dont la fonction est de sécréter l'émail.

II.1.4.2.3. L'échelle au-dessus des cristallites : le prisme

Le niveau structural au-dessus des cristallites est le prisme. L'empilement de quelques milliers de cristallites, plus ou moins disposées en éventail, est nécessaire pour former un prisme. Ce dernier reflète l'épaisseur d'émail produite quotidiennement (l'échelle de taille se situe au niveau du micromètre). L'épaisseur n'étant pas homogène dans la dent, la longueur du prisme dépend de sa localisation. On observe sa taille minimum au niveau du collet, à partir duquel elle augmente progressivement pour atteindre son maximum dans la région cuspidienne (Auriol *et al.*, 2000). Finalement, on obtient un diamètre moyen de 3 μm (Goldberg, 2007) ou 4 μm (Auriol *et al.*, 2000) selon les auteurs. Une fois formé, le prisme va enrichir la surface d'émail de façon oblique (Risnes, 1998). Les prismes présentent une gaine, espace étroit rempli de matrice organique constituée par les résidus des améloblastes. Elle n'entoure pas complètement le prisme et respecte une forme évoquant celle du fer à cheval.

II.1.4.3. Histologie de l'émail dentaire : description et organisation

II.1.4.3.1. Les buissons, lamelles et aiguilles d'émail

L'unité fonctionnelle de l'émail est donc le prisme, (ou bâtonnet, ou tige d'émail par traduction littérale de la dénomination anglaise « rod »), dont on vient de voir l'origine. Il est doté d'une gaine prismatique périphérique et d'une substance interprismatique minéralisée, moins dure que celle des prismes (Auriol *et al.*, 2000). La gaine et la substance interprismatique marquent le contour des unités prismatiques ce qui permet d'en voir les limites en microscopie à lumière transmise.

Parmi les structures identifiables, on peut signaler les « buissons » d'émail. En coupe transversale, on constate que ce sont des zones peu minéralisées et riches en protéines. Ces zones sont moins résistantes que les autres parties de l'émail (Auriol *et al.*, 2000; Dary, 2000). Les « buissons » d'émail partent de la jonction amélo-dentinaire pour s'étendre sur environ un tiers de l'épaisseur de l'émail selon une forme arborescente (Dary, 2000).

De même, on peut voir des lamelles d'émail. Ce sont de fines lignes droites qui s'étendent perpendiculairement de la surface d'émail vers la jonction amélo-dentinaire, s'infiltrant même parfois à l'intérieur de la dentine, sur un plan longitudinal de la pointe cuspidienne vers la zone cervicale (Auriol *et al.*, 2000; Dary, 2000). Elles sont essentiellement composées de matériel organique et contiennent donc très peu de sels minéraux, ce qui les rend hypominéralisées par rapport aux autres structures de l'émail (Goldberg, 1989; Dary, 2000).

Il existe également des « aiguilles » ou « fuseaux » dentinaires dans l'émail, partant de la jonction amélo-dentinaire pour s'incruster verticalement dans l'émail profond. Il arrive parfois que des prolongements cytoplasmiques issus d'odontoblastes emprisonnés entre les améloblastes pendant la minéralisation persistent dans ces aiguilles (Auriol *et al.*, 2000; Dary, 2000) qui sont en réalité des fibre dentinaires, insérées dans l'émail (Goldberg, 1989).

II.1.4.3.2. Les bandes de Hunter-Schreger

Les bandes de Hunter-Schreger ont été décrites pour la première fois par John Hunter en 1771, puis par Heindrich Théodor Schreger en 1800. Leur organisation des sous-unités prismatiques

matérialise le changement de direction des prismes dans la partie interne de l'émail. Elles sont reconnaissables à leur alternance caractéristique de zones claires (parazonie) et sombres (diazonie), et sont presque perpendiculaires à la jonction amélo-dentinaire, quel que soit le plan de coupe. Ces bandes n'occupent que les deux tiers de l'épaisseur de l'émail. Chez l'homme, chacune de ces structures implique entre 8 et 15 prismes. Ces variations en nombre évoquent l'existence d'un lien entre la forme et fonction, qui permet à la structure amélaire d'être plus résistante (Tafforeau, 2004; Goldberg, 2007).

Les diverses classes de mammifères développent différents modèles de protection de l'émail pour faire face aux forces de mastication et aux fissures qu'elles peuvent provoquer. Cela consiste en un arrangement tridimensionnel particulier des différents types d'émail dentaire sur la dent que l'on appelle schmelzmuster (Von Koenigswald *et al.*, 1990; Von Koenigswald, 1997) et qui se traduit, d'un point de vue optique, par des bandes de Hunter-Schreger.

Le terme de schmelzmuster traduit la distribution spatiale, à l'échelle du prisme, de l'émail prismatique et aprismatique à travers une couronne dentaire.

Le schmelzmuster est généralement utilisé dans les problématiques liées à la classification et l'évolution des espèces (Von Koenigswald *et al.*, 1990; Von Koenigswald, 1997), c'est pourquoi nous ne développerons pas ce niveau de microstructure.

II.1.4.3.3. Les striations

L'émail dentaire dessine deux types de lignes de croissance, étroitement liées entre elles et au processus de l'accroissement, qui représentent les différentes orientations empruntées par les améloblastes pendant la formation. D'un côté, la sécrétion des améloblastes donne lieu à une constitution verticale de la jonction amélo-dentinaire vers la surface de la dent et, d'un autre côté, l'insertion de nouveaux améloblastes actifs sur le front de formation du liquide d'émail aboutit à une formation horizontale (Ramirez-Rozzi, 2010).

II.1.4.3.3.1. Striations transversales

L'émail prismatique montre des séries de striations, semblables à des gonflements transverses, selon des intervalles de 4 µm le long des prismes (Goldberg, 1989).

Les prismes des striations transversales ne sont habituellement pas ou peu observés au microscope électronique à balayage dans l'émail non mature (Weber et Glick, 1975; Fitzgerald *et al.*, 1998; Risnes, 1998). Il existe un lien étroit, bien que mal défini, entre les prismes des striations transversales et d'autres phénomènes périodiques qui ont lieu le long des prismes.

II.1.4.3.3.2. Stries de Retzius

Les stries de croissance de l'émail ont été décrites pour la première fois par le suédois Anders Retzius en 1836 sur une coupe histologique longitudinale labio-linguale d'émail dentaire humain et deviennent dès lors un objet d'étude. Définies comme des bandes sombres et lumineuses alternées, arquées, allant de la jonction émail-dentine vers la surface, parallèles à la surface de l'émail et concentriques autour de la dentine. Elles sont présentes sur tout le pourtour de la couronne (Mann *et al.*, 1990b).

Les stries de Retzius sont observées sur les coupes histologiques longitudinales labio-linguales. Elles apparaissent, dans ce cas, disposées en cernes successifs et se manifestent sous forme de lignes continues minces, au trajet plus ou moins rectiligne, voire sinueux. Elles traversent en fait les prismes d'émail de façon oblique et continue. Cette zone étroite semble être dépourvue de cristaux d'apatite. En observant avec plus d'attention ces stries de Retzius, on constate qu'il est possible d'en distinguer deux types. Les plus fréquentes respectent un aspect et un espacement régulier alors qu'une autre forme de stries est anormalement élargie, ce qui traduit une anomalie de formation. Lorsque cet épaissement correspond à au moins 75 % environ de la longueur de la strie de Retzius, celle-ci est alors dénommée bande de Wilson (WB).

II.1.4.3.4. Les jonctions

Il existe deux jonctions amélares dans l'émail dentaire. La structure la plus interne de l'émail est la jonction amélo-dentinaire (ou EDJ), qui apparaît sur les coupes transversales, au microscope optique, comme une ligne festonnée, irrégulièrement ondulée en forme de S, qui marque l'interface entre l'émail et la dentine (Auriol *et al.*, 2000 ; Dary, 2000). La partie concave de la courbe est à rapprocher du tiers occlusal de la dent, qui correspond à l'endroit où l'émail est le plus épais, là où il résiste le mieux à l'abrasion. La portion convexe est, quant à elle, liée à l'émail plus mince (Auriol *et al.*, 2000).

La seconde, dite amélo-cémentaire, se situe entre l'émail et le ciment, mais elle n'est ni systématique, ni régulière lorsqu'elle est présente. Les variations selon les individus ont été réparties en trois types de jonctions définies (Auriol *et al.*, 2000 ; Dary, 2000). Soit l'émail recouvre le ciment (65 % des cas), soit l'émail et le ciment sont disposés en bout à bout (30 % des cas), soit il existe un écart, une zone dentinaire, entre l'émail et le ciment (5 % des cas). Auriol (2000) a noté que les différents aspects de cette jonction peuvent coexister au sein d'un même individu, voire d'une même dent.

Les structures classiques et normales de l'émail ayant été décrites, on peut mieux comprendre en quoi consistent les anomalies dentaires de structure.

II.1.4.4. Les anomalies dentaires de structure de l'émail

Le développement normal des tissus dentaires est susceptible d'être entravé par des troubles de la sécrétion cellulaire provoqués par des pathologies génétiques (dues à des gènes responsables du codage des protéines) ou acquises (infantiles ou maternelles) se traduisant souvent par des perturbations de la formation de l'émail, qui se répercutent sur la structure amélaire (Goldberg, 2007 ; Bayle, 2008). Ces anomalies de l'émail consistent en des altérations hétérogènes produites pendant l'amélogénèse, elles sont, dans ce cas, dites imparfaites et peuvent aussi bien s'exprimer au niveau d'une dent, ou à l'ensemble de la denture (Farge *et al.*, 1992). Ce terme d'amélogénèse imparfaite a longtemps été réservé à un certain type d'anomalies alors qu'il peut, étymologiquement parlant, convenir à toutes les anomalies de structures de l'émail puisqu'il s'agit d'une malformation génétique rare, d'origine ectodermique (elle ne touche donc pas la partie d'origine mésodermique de la dent), qui se déroule pendant l'étape de sécrétion de la formation de l'émail.

Nous avons choisi, pour les présenter, d'utiliser la classification de Weinmann (1943) qui propose une distinction des diverses formes d'amélogenèse imparfaite à partir de la dualité des phases organique et minérale. Ce choix traduit une réalité histo-pathologique relative (Farge *et al.*, 1992), même si de nouvelles classifications se mettent en place à partir du phénotype et du mode de transmission (Goldberg, 2007). Elles sont pertinentes, mais moins significatives pour le sujet qui nous intéresse.

11.1.4.4.1. La forme hypoplasique

L'hypoplasie de l'émail dentaire est la conséquence d'une faille dans la croissance des cristallites dont la longueur n'est pas arrivée à terme (Hart *et al.*, 2004; Goldberg, 2007), ou d'un défaut de formation, ou encore d'une réduction en quantité de la matrice protéique. De ce fait l'émail est réduit ou absent par endroits (Farge *et al.*, 1992). Plusieurs degrés de ces atteintes ont été décrits : soit faiblement exprimés, sous forme de piquetés plus ou moins larges, ou se manifestant un peu plus fortement par de fines rainures continues ou discontinues, ou, dans des cas extrêmes, par l'apparition de larges sillons. On observe également assez souvent une forte propension au détachement et, parfois, une absence de structure prismatique dans certaines zones pouvant être accompagnée d'un aspect irrégulier (Brocheriou et De Roquancourt, 1987). Les étiologies pouvant occasionner des hypoplasies de l'émail sont nombreuses et peuvent aussi bien être d'origines génétique que pathologique²¹.

Les malformations génétiques, de façon générale, proviennent des mêmes mécanismes impliquant un mauvais codage au niveau de l'ADN ou une mauvaise transcription du gène, responsables de la formation d'une protéine mutante dont la fonction est alors altérée. Cela se traduit par un émail de moindre qualité. Parmi les maladies génétiques, on peut citer l'ostéodystrophie d'Albright, responsable de la malformation d'une protéine qui déclenche des dépôts anormaux de calcium dans les tissus et les organes, perturbant de cette manière les taux de calcium dans les tissus du corps humain, y compris les tissus dentaires.

Pour ce qui est des origines pathologiques, il s'agit aussi bien de pathologies infantiles que transmises par la mère. Les pathologies infantiles susceptibles d'agir au moment où la dent se forme sont nombreuses. En effet, les maladies infectieuses et virales, les intoxications, les carences / excès alimentaires (vitamines, calcium), ou les fièvres peuvent perturber la formation de l'émail. En ce qui concerne les malformations dentaires liées à une maladie maternelle, les deux exemples les mieux connus (outre les troubles endocriniens) sont la syphilis congénitale et la rubéole. La syphilis congénitale est à l'origine de la dent de « Hutchinson », qui touche en général les incisives supérieures de la dentition permanente. La dent apparaît dans ce cas anormalement petite et présente une échancrure semi-lunaire sur son bord libre, avec un aspect torse (Brocheriou et De Roquancourt, 1987), ce qui explique qu'elles soient souvent, dans la littérature, qualifiées de dents « en tournevis ». Il arrive parfois que les effets de la syphilis se répercutent sur les premières molaires qui prennent une apparence muriforme et/ou présentent des hypoplasies de

21. Pomerol J.C, Benhamou A.C., Francke J.P. (Dir.), Université médicale virtuelle francophone, 2008-2009, Item 35: Développement bucco-dentaire et anomalies (Cours en ligne).

l'émail dentaire. Le deuxième exemple bien documenté de pathologie maternelle est celui de la rubéole qui peut provoquer des encoches sur les dents ou leur donner une forme conique²². Excepté dans le cas de la syphilis et de la rubéole congénitale souvent accompagnées d'autres traces ostéologiques bien connues des anthropologues²³, il est très difficile de trancher pour une cause plutôt qu'une autre.

Malgré les problèmes posés par l'identification des origines de l'hypoplasie de l'émail dentaire, ces défauts ont attiré l'attention des archéoanthropologues pour leur utilisation comme indicateur de stress, que ce dernier soit physique ou psychologique. En effet, plusieurs recherches ont établi des corrélations entre les hypoplasies de l'émail et des épisodes de stress à l'échelle de la population (invasions, épidémies, ...) (*cf. infra* II. 2.2).

II.1.4.4.2. La forme hypocalcifiée

La forme hypocalcifiée (ou immature) de l'amélogenèse, la moins sévère et la plus fréquente se manifeste visuellement par une coloration foncée, brunâtre ou blanche et un caractère friable avec des rainures (des pans d'émail ont tendance à se détacher). L'épaisseur de l'émail et la forme extérieure de la dent sont normales, mais la minéralisation est insuffisante à cause des facteurs responsables de ce mécanisme défaillant; de ce fait, la matière organique est plus abondante, le tissu plus mou et les lamelles plus larges (Brocheriou et De Roquancourt, 1987; Farge *et al.*, 1992). On remarque également que la jonction amélo-dentinaire étant d'une densité minérale inférieure à l'émail normal, dans le cas d'une hypocalcification amélaire la jonction est moins marquée (Farge *et al.*, 1992). À ce jour, trois causes possibles à l'origine de cette anomalie ont été identifiées, toutes liées à des mutations génétiques intervenant sur le codage des protéines ou des protéinases (concernant les protéines, protéases et leurs mécanismes génétiques).

II.1.4.4.3. La forme hypomature

La forme hypomature se manifeste par un émail tacheté ou complètement opaque, de couleur brune ou blanchâtre, présentant des rugosités de surface. Cette apparence révèle un trouble dans l'élaboration organominérale de l'émail dont l'état final correspond, en terme de maturation, à un stade précoce. L'étiologie de ces défauts de l'émail est également génétique (Farge *et al.*, 1992).

II.1.4.4.4. Les formes hors classification

On distingue également une autre variante qu'il faut connaître pour être capable de l'identifier, il s'agit de l'amélogenèse imparfaite avec des troubles de la maturation qui altèrent la structure cristalline de l'émail (Brocheriou et De Roquancourt, 1987), parfois accompagnée d'une atteinte de l'épaisseur de l'émail.

Les fluoroses sont des altérations qui résultent des effets des fluorures sur les tissus dentaires. Les effets des fluorures dépendent de la dose assimilée et plusieurs travaux ont contribué à établir

22. Pomerol J.C, Benhamou A.C., Francke J.P. (Dir.), Université médicale virtuelle francophone, 2008-2009, Item 35: Développement bucco-dentaire et anomalies (Cours en ligne).

23. La rubéole congénitale peut-être à l'origine d'anomalies osseuses, de microcéphalie, et retards de croissance.

un seuil, selon l'âge et le poids, au-delà duquel les effets négatifs se manifestent. L'absorption de ces éléments lors de la période décisive de formation de l'émail, depuis la période embryonnaire jusque vers l'âge de 8 ans, est de 0.03 à 1 mg et par kilo de l'individu et par jour (Goldberg, 2007). Cette limite dépassée il existe un risque d'excès pouvant se traduire par une fluorose, c'est-à-dire des modifications de composition et de structure (les espaces intercrystallins ainsi que les gaines entre les prismes et les interprismes sont élargis) à cause de fluorures. Il existe plusieurs degrés de gravité qui dépendent, à la fois, de l'importance de la surcharge en fluor, mais aussi de la phase de l'amélogenèse touchée par l'altération. Les effets sont plus discrets lorsque les atteintes se déroulent pendant la phase de sécrétion de l'émail et, à l'inverse, plus visibles s'ils ont lieu pendant la maturation. L'expression physique de la fluorose dentaire consiste en une porosité augmentée reflétant le caractère hypomature des zones concernées, soit le long des stries de Retzius participant alors à leur manifestation accrue, soit sur toute la surface. Il existe également des formes plus rigoureuses caractérisées par une hypomaturation de l'ensemble de l'émail, de la jonction amélo-dentinaire à la surface, et plus seulement la surface (Goldberg, 2007).

Deux principaux types de fluoroses sont distingués : soit le dysfonctionnement apparaît au milieu de la maille d'hydroxyapatite, provoquant ainsi un fluoroapatite, soit le dysfonctionnement provoque le blocage des sites de dissolution des cristallites, mais sans intégrer la maille cristalline, ce qui donne lieu à une hydroxyapatite fluorée (Goldberg, 2007).

Parmi les altérations de la structure amélaire, on distingue des mutations qui affectent soit le développement de l'améloblaste, soit le gène responsable de la formation de l'émail, soit le gène de régulation de la formation de l'émail.

Ces précisions sur les malformations de l'émail d'origine pathologique et génétique sont importantes, car elles nous permettent d'être prudents quant à une éventuelle confusion avec les marqueurs de stress qui nous intéressent. Il est également pertinent de les repérer dans le but de confronter leur localisation avec d'autres marqueurs de stress, ce qui pourrait nous amener, dans certaines situations, à renforcer les arguments qui vont dans le même sens.

II.1.4.5. Horloge biologique du développement dentaire

Il existe dans la nature un certain nombre de rythmes biologiques, identifiés aussi bien chez les animaux, que dans les plantes ou les organismes cellulaires simples, avec des intervalles pouvant aller de quelques heures à quelques années (Hasting, 1997 ; cité par Smith, 2006). Dans le cas de ces rythmes biologiques, la croissance quotidienne par apposition de couches est un fonctionnement qui se retrouve dans les parties structurelles de nombreux systèmes biologiques (coquillages, coraux, ou encore les périodes astrales). Ils reflètent, en général, un rythme métabolique, synchronisé avec l'environnement et constituent, en cela, un outil expérimental pratique pour la recherche dans de nombreuses disciplines (Neville, 1967). L'application d'un tel système biologique aux questionnements sur la croissance de l'émail dentaire comme tissu dur biologique, lui aussi soumis à un rythme métabolique d'un individu ou d'un taxon, dans un environnement qui lui est propre, est cohérent.

Cependant, l'utilisation de ces traces de croissance n'est possible que par la compréhension de leur structure et leur morphogénèse. Dans cette optique, le processus de développement de l'émail et la structure de l'émail mature servent de base de référence à l'interprétation chronologique de ces cernes de croissance (Risnes, 1998a). Les informations déduites dépendent alors des aspects de croissance par accumulation, manifestés par deux types de marqueurs, « période courte » et « période longue », de l'émail (Fitzgerald *et al.*, 1998).

II.1.4.5.1. Les striations transversales

Si on accepte l'hypothèse du rythme régulier de la sécrétion et de la formation de l'émail, les marqueurs microstructuraux de la dent sont répartis en deux catégories : les marqueurs « courte période » ou striations transversales et les marqueurs « longue période » ou stries de Retzius.

Les striations transversales sont expliquées par l'activité métabolique régulière circadienne des améloblastes. Elles témoignent donc du rythme journalier de la formation de l'émail dentaire par les améloblastes (Schour et Poncher, 1937; Risnes, 1986; Dean, 1987; Bromage, 1991; Dean, 2006; Smith, 2006; Smith *et al.*, 2006; Fitzgerald et Rose, 2008; Ramirez-Rozzi, 2010).

Les striations transversales observées au microscope à lumière polarisée apparaissent comme des bandes constituées de fines striations sombres et transversales sur toute la longueur des prismes d'émail. Lorsque les scientifiques utilisent le microscope électronique à balayage, ces lignes sont associées à des élargissements et des constriction du diamètre des prismes, qui leur donnent des aspects ondulatoires, souvent appelés varicosités²⁴ (Fitzgerald *et al.*, 1998, Fitzgerald et Rose, 2008).

Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer l'apparence des striations transversales, dont la plupart sont axées sur les propriétés minérales de ces marqueurs (Shellis, 1998; Fitzgerald et Rose, 2008). Boyde (1979; cité par Dean, 1987) insiste sur de possibles variations locales en CO₂. Le dioxyde de carbone (carbonate/bicarbonate) disponible pour l'incorporation dans l'hydroxyapatite serait causé par l'activité circadienne des améloblastes. Dans ce cas, le CO₂ serait supérieur au cours des phases des cycles de 24 heures quand l'activité métabolique est à son maximum. Cette variation dans le rythme de l'activité métabolique résulte d'une modification du rythme de sécrétion de la matrice amélaire, avec un émail sécrété plus rapidement à certains moments, quand l'activité métabolique est plus intense. La modification de la concentration en carbonate entraînerait, dans ce raisonnement, des modifications de composition et de cristallinité du minéral, susceptibles d'expliquer les variations de luminosité sous lumière polarisée, avec des régions plus riches en carbonates, ce qui les rend plus biréfringentes. En outre, la sécrétion accélérée a un effet sur la distribution et la croissance orientée des cristallites qui constituent le prisme, dont le corps devient plus épais. Cette précision mécanique justifie aussi la variation de densité minérale associée aux striations transversales le long du prisme. D'autres hypothèses ont été évoquées comme celle de Simmelink et Nygaard (1982; cités par Ramirez Rozzi 1993b) qui suggère que la taille des cristallites peut produire des différences à la surface des prismes; ou celle

24. Traduction littérale du terme « varicosities » utilisé dans littérature anglophone.

de Warshawsky (Warshawsky et Bai, 1983 ; Warshawsky *et al.*, 1984) qui avance qu'elles puissent résulter d'un arrangement en spirale des cristallites.

Néanmoins, les propriétés optiques des striations transversales, telles que l'absence de filtration par les colorants des prismes immatures isolés ou l'aspect sombre à la lumière ordinaire alors qu'elles sont isotropiques²⁵ sous une lumière polarisée nous suggèrent dans tous les cas, de surcroît, une augmentation de la porosité (Shellis, 1998).

La périodicité journalière des striations transversales fournit un support pour la périodicité régulière d'autres microstructures de la dent, en particulier pour les stries régulières de Retzius.

II.1.4.5.2. Les stries de Retzius

II.1.4.5.2.1. Historique

Parmi les chercheurs connus pour leurs études sur les stries de croissance, après leur découverte par Anders Retzius, on peut citer Asper (1916 ; cité par Mann *et al.*, 1990), un des premiers à utiliser les coupes histologiques en vue d'obtenir une information chronologique. Il procède alors au calcul du temps de formation de la couronne de la canine supérieure chez des primates et propose un schéma de croissance journalière pour l'émail. Puis Gysi (1931 ; cité par Mann *et al.*, 1990) adopte cette approche dans le but d'argumenter le rythme circadien des striations transversales. Par la suite deux collaborateurs, Schour et Poncher (1937) injectent à un enfant de 5 mois une solution de fluorure de sodium selon des intervalles allant de 3 à 34 jours pendant 4 mois, étude qui a permis après examen de soutenir les théories de rythmes réguliers de dépôts de l'émail (Mann *et al.*, 1990b). Dans la lignée de ces recherches, Komai (1942 ; cité par Reid et Dean, 2006) utilise la même démarche pour estimer le temps de formation de l'émail des incisives centrales et latérales. Puis Boyde, dès le début des années 1960 utilise cette démarche histologique pour établir l'âge à la mort des individus (1963) tout en approfondissant nos connaissances de la microstructure de l'émail dans le but d'en améliorer les interprétations (1967). Par la suite, ces manifestations incrémentales des rythmes biologiques sont plus largement documentées par des microscopistes et des biologistes spécialisés dans la sphère orale (Dean et Smith, 2006). En ce qui concerne les études sur l'estimation du temps de formation de la couronne, à partir des indices incrémentaux, il a fallu attendre les études de Bromage et Dean (1985). Par voie de conséquence, c'est dans les années 1990 que les recherches commencent à établir le cadre pour le développement dentaire des primates non humains. Ces travaux conduisent à une extension de la taille des échantillons traités, au déploiement des proportions prises par les applications de ces principes avec diverses expérimentations s'employant à la diversification des taxons dans les échantillons, et à la multiplication des origines chronologiques et du matériel (Reid et Dean, 2006 ; Smith, 2008).

25. Les propriétés physiques ne changent pas, quelle que soit la direction.

II.1.4.5.2.2. Description et explications

Sur des sections transversales, les stries de Retzius se présentent sous forme d'anneaux concentriques qui encerclent la dent. En sections longitudinales (en deux dimensions), qui sont choisies dans le travail présenté ici, les stries brunes de Retzius semblent composer des couches successives autour de la dentine, des arceaux successifs bruns, de la pointe vers le collet de la dent. La plupart des stries dans ces observations sont obliques par rapport à la surface et la jonction amélo-dentinaire (Fitzgerald et Rose, 2008).

Les stries de Retzius diffèrent dans leur visibilité et leur expression, à l'intérieur même d'une dent. Par exemple, elles sont plus clairement discernables dans l'émail externe que dans l'émail interne, et plus nettes également dans l'émail occlusal qu'à proximité du collet. Les stries de Retzius observées au microscope sur des sections longitudinales peuvent être décrites comme des « plis » circulaires constitués de séries de « crêtes » et « sillons » correspondants (Risnes, 1985; Risnes, 1998).

Très tôt, leur apparence en forme de cernes similaires à ceux des arbres, par analogie, encourage les chercheurs à postuler leur représentation de la croissance de la dent par accumulation des cernes (Mann *et al.*, 1990b). Tout comme les bandes d'Hunter-Schreger, elles traduisent un type d'organisation des sous-unités prismatiques influant sur la trajectoire des prismes. Asper (1916) est le premier à les définir et à proposer un intervalle de cinq à 10 jours entre deux stries successives en étudiant un échantillon de dix canines supérieures définitives humaines. Cette étude a permis d'émettre l'hypothèse d'un modèle de croissance quotidienne (Mann *et al.*, 1990b). Les théories sur le rythme régulier de formation de l'émail sont étayées dans leur évaluation par de nombreux chercheurs et pendant longtemps puisque Beynon (1991) parle de rythme circaseptan entre deux lignes. Cependant, certains auteurs plus contemporains réajustent cette estimation à environ 12 jours. Des recherches approfondies ont finalement mis en évidence la fréquence régulière du nombre de striations transversales, correspondant aux nombres de jours écoulés entre deux stries de Retzius. Cette périodicité constante se retrouve à travers l'émail d'une dent, mais aussi dans toutes les dents d'un même sujet (Fitzgerald *et al.*, 1999). Il est donc possible de définir le rythme de fréquence des stries de Retzius pour un individu. Si on tient compte des différentes estimations sur cette question, concernant uniquement les hommes modernes on observe, le plus souvent, une périodicité de 7 à 9 striations transversales/jours/prismes entre deux stries de Retzius, plus rarement de 6 jours et plus exceptionnellement jusqu'à 12 jours (Dirks, 1998; Dean, 1998; Risnes, 1998; Dean, 2000; Bayle, 2008; Smith et Tafforeau, 2008). Certaines publications évoquent même des intervalles maximums (inférieurs et supérieurs) allant jusqu'à 5 ou 14 jours, pour l'homme moderne (Hillson, 1996; Fitzgerald et Rose, 2008). L'intervalle de ces périodes est dit circaseptan, en référence au rythme moyen situé autour de 7 jours.

Les stries de Retzius sont invariablement parallèles entre elles à travers l'émail, mais leur espacement ainsi que l'angle formé entre les stries et la jonction amélo-dentinaire ou la surface évoluent. Ces changements reflètent l'extension du rythme de formation de l'émail. Chez les humains modernes, les stries de Retzius sont plus largement espacées dans la partie occlusale de la dent et se resserrent progressivement vers la zone du collet. Les différents espacements sont de 30 à 45 μm dans les secteurs les plus larges et de 15 à 20 μm dans les zones les plus étroites. Dans

l'émail occlusal les arceaux n'atteignent jamais la surface de la dent. Dans la région du collet, les stries parcourent la dent de façon oblique depuis l'EDJ vers la surface de la couronne où elles sont visibles sous forme de périkymaties. L'angle formé par les stries et la ligne de jonction amélo-dentinaire est plus aigu dans la région cuspidienne de l'émail et s'agrandit à mesure que l'on s'avance vers la zone du collet (Fitzgerald et Rose, 2008). Les évolutions graduelles des espacements et de l'angulation des stries traduisent les deux phases de développement de l'émail, appositionnelle et imbricationnelle, qui se succèdent dans le temps.

Les stries de Retzius sont liées au front de minéralisation du liquide d'émail qui s'amorce lorsque la matrice amélaire a atteint son épaisseur maximale (Suga, 1983). La croissance par incrémentation des couches d'émail se fait de la dentine vers l'extérieur, de façon progressive. Leur manifestation résulte d'une discontinuité dans le développement de la couronne (c'est-à-dire d'une perturbation de minéralisation), affectant tous les améloblastes en sécrétion au moment de la perturbation. Par conséquent, ces lignes se manifestent par des couches successives formées à intervalles circaseptan à travers le développement de la dent (Fitzgerald et Rose, 2008).

Dans la littérature, la croissance de l'émail est couramment qualifiée d'appositionnelle ou incrémentale, pour évoquer la succession des couches, mais ces termes, bien que relativement explicatifs, ne sont pas corrects au sens strict. Les couches ne sont pas ajoutées, elles traduisent plutôt l'augmentation continue de la longueur des prismes, et ponctuellement leur croissance est légèrement perturbée, ce qui produit une discontinuité, laquelle est reflétée optiquement par les stries de Retzius. Le résultat d'ensemble de ces discontinuités liées aux améloblastes en développement suppose l'apparence de couches. Les terminologies « incrémentation » et « apposition » pour désigner la croissance de l'émail sont donc généralement admises (Fitzgerald et Rose, 2008).

La nature des stries fait encore débat en plusieurs points, mais, très tôt la mise en évidence d'une accentuation de ces lignes au niveau visuel, sous microscope optique par dissolution à l'acide, suggère qu'elles sont causées par des variations de minéralisation (Hillson, 1996). Les recherches ayant progressé, les spécialistes s'accordent désormais largement sur le fait qu'elles sont hypominéralisées par rapport au reste de l'émail, et qu'elles résultent d'une variation de la composition de l'émail et/ou de la structure des prismes. L'hypominéralisation de ces stries traduit, pour certains chercheurs, une minéralisation qui serait incomplète ou altérée et provoquerait une augmentation de la phase matricielle dans la strie. Pour d'autres, certaines stries plus minces sont dépourvues de cristaux à cause d'un arrêt de production des améloblastes (Boyde, 1967), contrairement aux stries plus larges qui contiennent un émail hypominéralisé indiquant une baisse de la production de l'émail (Frank, 1978). Un déplacement des prismes sur le plan transversal pourrait aussi contribuer à la formation de stries de Retzius, car, en plus d'une altération de leur structure, les prismes ont une trajectoire modifiée (Dary, 2000). Une autre théorie soutient l'existence d'une correspondance entre les stries de Retzius et des plans de fuite de la matière organique, par excédent matriciel éliminé le long de plans de fuite qui inhibe, à ce stade, la minéralisation, au fur et à mesure de ce processus. S'il est vrai que les stries correspondent au plan de fuite, rien ne vient infirmer la périodicité de l'élimination de l'excédent matriciel.

II.1.4.5.3. Débats sur l'interprétation des marqueurs chronologiques de l'émail

L'idée selon laquelle les microstructures dentaires ont une périodicité régulière à travers la croissance de la dent, pourtant largement admise, a été contestée à plusieurs reprises (Weber et Glick, 1975; Warshawsky et Bai, 1983; Goldberg, 2007). Les aspects optiques à considérer dans la discussion sur la représentativité spatio-temporelle des observations histologiques sont de deux ordres : les marqueurs « courte période » ou striations transversales, qui reflètent la formation journalière des prismes par les améloblastes, et les marqueurs « longue période » interprétés comme des fronts successifs réguliers, circaseptan²⁶ de minéralisation de l'émail. Lorsque le caractère régulier des marqueurs de croissance est remis en question, les variations optiques sont généralement expliquées par une origine inconnue ou des artefacts liés à la préparation des échantillons.

II.1.4.5.3.1. Les arguments en faveur d'une formation périodique de l'émail

La majorité des auteurs, sur la base de plusieurs arguments, s'accorde sur le fait que l'émail dentaire reflète l'activité périodique des cellules et du dépôt, à l'origine de la formation de l'émail (Frank, 1978; Dean, 1987; Risnes, 1998b; Shellis, 1998; Fitzgerald et Saunders, 2005; Bromage et Lacruz, 2006; Smith, 2006; Antoine *et al.*, 2009; Ramirez-Rozzi, 2010).

La première preuve directe de la régularité des marqueurs de croissance est donnée par l'administration de colorants à des individus, selon un intervalle de jours documenté. Le nombre de jours entre les injections successives de colorants est corroboré par le nombre de lignes de croissance mises en évidence par le marquage (Schour et Poncher, 1937; Massler et Schour, 1946; cités par Fitzgearld et Rose, 2008; Bromage, 1991; Smith, 2006).

Les autres arguments avancés en faveur de l'interprétation chronologique des marqueurs de croissance sont plus indirects, mais constituent un ensemble d'indices à prendre en compte. Pour commencer, il s'avère que l'estimation du temps de formation de la couronne dentaire à partir des striations transversales correspond aux estimations effectuées par d'autres mesures indépendantes (radiographiques, par exemple; Beynon *et al.*, 1998a).

La périodicité régulière des marqueurs de croissance de l'émail a également été comparée et confirmée avec les microstructures équivalentes de la dentine, appelées lignes de von Ebner pour les marqueurs « courte période » et lignes d'Andressen pour les marqueurs « longue période » (Dean et Scandrett, 1996).

Le rythme des striations transversales varie selon un chemin régulier, en fonction du type de dent, difficile à justifier par l'explication des artefacts ou du facteur aléatoire.

Malgré une large acceptation du principe rythmique de l'apparition des striations transversales et l'augmentation de son utilisation pour la chronologie du développement dentaire des hominidés, certains auteurs ont pointé cette périodicité comme source d'erreur. Parmi eux figurent, notamment, les biologistes Warshawsky et Bai (1983) ou encore les histologistes Weber

26. Tous les sept jours.

et Glick (1975), qui suggèrent que les striations transversales pourraient être confondues avec des artefacts de coupes. L'argumentation de cette critique réside dans l'accusation des effets optiques supposés capables de nous induire en erreur en faisant apparaître les rangs de prismes à la coupe comme des stries (Weber et Glick, 1975).

II.1.4.5.3.2. Les arguments en opposition à la formation périodique de l'émail

Les études sur le développement dentaire par incrémentation et l'utilisation des microstructures qui en résulte sont contestées à partir des années 1970. Plusieurs aspects fondamentaux du développement incrémental ont été remis en question par les biologistes, les anthropologues et les odontologues, y compris la nature quotidienne des striations transversales (Weber et Glick, 1975; Warshawsky et Bai, 1983) et le caractère circaseptan des stries de Retzius. En effet, on rencontre dans la littérature l'idée selon laquelle les caractéristiques visuelles de l'émail, identifiées aux moyens de diverses techniques microscopiques, sont des aspects géométriques indépendants, d'origine inconnue, ou des artefacts liés à la préparation des échantillons.

L'une des premières études est proposée par Wilson et Schroff (1970; cités par Fitzgérald et Rose, 2008), qui ont examiné des coupes histologiques préparées par diverses techniques, y compris des lames traitées à l'acide. Ils ont suggéré que, en raison de l'absence de contre-stries visibles dans les préparations et de la manifestation de prismes sectionnés, les précédents rapports de ces lignes avaient mal identifié les prismes sur les coupes transversales. Ce raisonnement est rapidement soutenu et précisé par Weber et Glick. (1975), qui expliquent la manifestation des striations transversales par un effet d'optique lorsque la coupe dentaire est transversale par rapport aux prismes, constituant ainsi une des limites de la microscopie optique. Le plan de coupe couramment utilisé pour étudier la structure de l'émail est vertical. De telles sections positionnent les prismes dans un plan de section satisfaisant, à l'exception de certaines variations connues et facilement détectables, associées à la décussation des prismes (Risnes, 1986; Macho *et al.*, 2003; Smith *et al.*, 2006; Antoine *et al.*, 2009). Ils proposent l'hypothèse selon laquelle l'illusion d'un plan longitudinal peut être générée lorsque l'axe de la section n'est pas strictement parallèle à l'axe des prismes. Or il est assez rare que les prismes soient sectionnés de façon parfaitement longitudinale. Ces auteurs ajoutent à leur démonstration le problème de l'épaisseur de la coupe histologique, entre 80 et 120 μm (selon le protocole de préparation), correspondant à une vingtaine de prismes superposés (en moyenne), pouvant gêner l'estimation de l'inclinaison de la coupe. Mais l'examen des lames minces sous lumière polarisée, caractérisée par une invariance des propriétés physiques en fonction de la direction de la lumière, discrimine la possibilité des illusions optiques des sections transversales des prismes. Il n'y a pas, non plus, de risque d'erreur de sections transversales en ayant recours au microscope électronique à balayage (*cf. infra* III. 2.1.1). L'explication appuyée sur la production d'artefacts ne semble donc pas induire en erreur les expérimentations histologiques (Shellis, 1998).

Warshawsky et Bai (1983) indiquent que les striations interprétées comme des marqueurs de croissance sont des artefacts résultant de la procédure de coupe de la dent. Cependant, il semble difficilement concevable que ce type de dommages puissent expliquer le croisement des stries observées sur les sections, qui sont, au moins, mille fois plus épaisses que les sections minces,

lors des examens au microscope électronique à balayage (Shellis, 1998). De plus Risnes (1986) contredit cet argument en démontrant que les artefacts produits par la technique de coupe ne présentent pas la même régularité que celle qui est remarquée pour les striations transversales.

Warshawsky (1984; cité par Mann *et al.*, 1990b) propose une autre hypothèse. Il avance que, quelques stries, au moins, peuvent être considérées comme des courbes reflétant le tracé des prismes dans l'émail, mais qu'elles constitueraient plutôt des limites entre des groupes de prismes. De ce fait, elles seraient seulement des aspects structurels de la géométrie de l'accumulation de l'émail. Dans ce cas, le décompte des lignes pourrait ne pas donner d'indications chronologiques.

Une autre théorie présente dans la littérature soutient l'existence d'une correspondance entre les stries de Retzius et des plans de fuite de la matière organique, par excédent matriciel éliminé le long de plans de fuite qui inhibe à ce niveau la minéralisation, au fur et à mesure de ce processus (Goldberg, 1982). Si les stries correspondent réellement au plan de fuite, rien ne vient infirmer la périodicité de l'élimination de l'excédent matriciel.

Plus récemment, Goldberg (2007) soutient qu'il s'agit plus d'une hypothèse de travail avancée au cours de discussions, acceptée comme démonstration établie, mais que les preuves scientifiques ne sont pas convaincantes. Son argumentation est fondée sur l'observation des modules de l'émail dans les pointes cuspidiennes qui forment des arceaux, à l'image de ceux obtenus par des études sur la photoélasticité, provenant de simples contraintes biomécaniques aussi bien pendant la sécrétion que pendant la maturation de l'émail. Cette analogie lui permet de suggérer l'indépendance de la formation de l'émail vis-à-vis de tout contrôle cellulaire.

Cependant, il semble peu probable que ces illusions visuelles puissent expliquer la majorité des prismes observés dans les striations transversales puisqu'ils sont aussi constatés dans des zones où les prismes sont orientés en grande partie parallèlement au plan de section, dans l'émail humain. Pour clore ce débat, les progrès en matière de microscopie, que ce soit à l'aide du microscope à balayage (Kaqueler *et al.*, 1989), du microscope à laser confocal (Fitzgerald *et al.*, 1998; Smith, 2006; Bromage *et al.*, 2007) ou de la microtomographie à rayon-X synchrotron (Tafforeau, 2004) (*cf. infra* III. 2.3.), permettent d'invalider les arguments fondés sur les biais optiques. Malgré les controverses qui subsistent sur l'interprétation des caractéristiques micromorphologiques, de l'émail dentaire, le reflet d'un rythme régulier de la sécrétion et de la minéralisation de l'émail par les marqueurs de croissance, est aujourd'hui largement admis.

En résumé, on peut retenir que l'émail est constitué de monocristaux d'hydroxyapatite de carbone et de magnésium. Ces monocristaux sont des nanostructures dont la taille est d'une dizaine d'angströms. Les monocristaux d'hydroxyapatite s'assemblent sous l'action de la croissance hélicoïdale centrifuge en cristallites. Sur un plan de section transversale donné, la réunion d'une centaine de cristallites forme l'épaisseur de l'émail interprismatique, mesurant entre 0,5 et 1 μm . De même, plusieurs milliers de cristallites forment un prisme d'environ 3 μm de diamètre. Tous ces ensembles microstructurels résultent de la minéralisation extracellulaire des composants organiques matriciels sécrétés par les améloblastes.

Ces précisions sur le développement de l'émail sont essentielles pour bien comprendre qu'un dysfonctionnement lors d'une des étapes du processus de formation peut être à l'origine d'un défaut de formation de l'émail. Elles doivent être prises en compte pour éviter certaines sources d'erreurs dans nos analyses. De plus, une fois que l'émail est mature et sa minéralisation achevée, l'organe d'émail disparaît. L'émail devient alors une structure acellulaire, incapable de remaniements tissulaires. Les signes de dysfonctionnement lors de la formation de l'émail sont définitifs. Cette caractéristique constitue à la fois l'avantage de ce matériau qui enregistre de façon permanente ce qu'a subi un individu pendant sa minéralisation dentaire, mais aussi sa limite, car nous ne pouvons percevoir, par l'étude de l'émail dentaire, aucune perturbation postérieure à sa minéralisation.

Il a été envisagé que de telles perturbations de la formation de l'émail puissent affecter le décompte des striations transversales, mais des études effectuées sur la collection de Spitafelds auraient tendance à infirmer cette hypothèse (Antoine *et al.*, 2009). La grande majorité des expérimentations sur la croissance incrémentale de l'émail dentaire confirme la périodicité de ce processus selon deux rythmes parallèles : la sécrétion circadienne du liquide matriciel de l'émail, matérialisée par les striations transversales et la minéralisation de la matrice dans un cycle circaseptan, manifestée par les stries de Retzius.

II.2. **APPORT DE L'ÉTUDE DES STRUCTURES DE L'ÉMAIL DENTAIRE EN ANTHROPOLOGIE BIOLOGIQUE**

II.2.1. **L'utilisation des structures dentaires**

II.2.1.1. Les études taxonomiques

Depuis le début du XX^e siècle, on présupposait que les hominidés avaient un développement dentaire très proche de celui des hommes modernes (Ramirez Rozzi, 1998). Mais en 1985, Bromage et Dean, notamment, effectuent une série de travaux sur la microstructure de l'émail à l'aide d'une nouvelle méthodologie d'analyse (microscope électronique à balayage), empruntée aux biologistes de la sphère orale (Boyde, 1967). Ils s'appuient sur la définition de la sécrétion de l'émail par les améloblastes, telle que nous l'avons expliquée dans le présent travail, et sur l'hypothèse selon laquelle les striations transversales et les stries de Retzius sont des marqueurs réguliers traduisant la périodicité de la formation de l'émail (*cf. supra* II. 1.4.5.). L'article qui en découle (Bromage et Dean, 1985) traite une question en débat depuis plusieurs décennies : le développement dentaire des hominidés du Plio-Pléistocène²⁷ était-il plus proche de celui des grands singes ou des hommes modernes ? Pour répondre à cette interrogation, fondamentale pour estimer l'âge à la mort de l'individu à partir du stade de l'éruption dentaire, ils suggèrent que le développement dentaire des hominidés en question est plutôt assimilable aux grands singes. L'information importante extraite de ces travaux réside dans le fait que les recherches

27. Relatif à la fin du pléistocène, lui-même à la fin du tertiaire, c'est-à-dire il y a 1 à 3 millions d'années.

sur la microstructure de l'émail permettent d'aborder le développement dentaire des anciens hominidés de manière directe (Ramirez Rozzi, 1993a), sans postulat hypothétique de réflexion par analogie par rapport aux singes. Cette démarche rend possible l'étude indépendante des individus/spécimens ainsi que la comparaison des résultats et des observations. Ce raisonnement permet par la suite d'explorer d'éventuelles relations phylogénétiques entre les différents taxons de primates éteints et vivants (Beynon *et al.*, 1998b; Dean et Shellis, 1998; Dean *et al.*, 2001; Smith *et al.*, 2003). Dès lors, les études se multiplient sur le développement dentaire dans son ensemble. Les chercheurs s'intéressent autant à la microstructure de l'émail, qu'à l'âge de l'émergence de la première et la deuxième molaire, au temps de formation de la couronne d'émail et de la racine dentaire (Dean, 2006), ou encore à l'épaisseur définitive de l'émail (Smith *et al.*, 2003). Ces éléments sont utilisés pour la caractérisation et la comparaison des différentes espèces de singes et d'hominidés, éteints et actuels. À partir de là, des observations sont faites sur l'évolution de certaines familles pour mettre en évidence des changements biologiques parallèles pouvant être liés entre eux, comme la capacité crânienne (Smith, 1989; Dean, 2006) ou encore l'espacement des naissances. Depuis les prémices de Bromage et Dean (1985), les études de ce genre sur des dents fossiles de primates humains et non humains se multiplient, et perdurent encore aujourd'hui, car elles constituent des sources d'information particulièrement pertinente pour les archéologues et les paléoanthropologues. Elles sont particulièrement utiles lorsqu'il s'agit de reconstruire l'histoire de l'évolution des primates, offrant pour cela un aspect chronologique du développement et des indices sur les relations phylogénétiques (Reid et Dean, 2006).

À travers les différentes espèces animales et au sein du groupe des mammifères, le développement et l'organisation interne de l'émail peuvent être différents, notamment en ce qui concerne le rythme de croissance, le schmelzmuster, l'organisation des prismes, la forme des prismes, les variations en épaisseur de zones spécifiques. Ces différences peuvent avoir une certaine valeur taxonomique (Hillson, 1996)

Les caractéristiques concernant le développement dentaire peuvent être intégrées à une réflexion générale, beaucoup plus vaste, sur l'ensemble des règles biologiques qui guident l'évolution des espèces et qui assurent un équilibre écologique. Dans le cas de l'homme, on constate, par exemple, une maturation plus tardive et une croissance plus lente entre les anciens hominidés et l'homme moderne. Cette information peut être confrontée à d'autres observations telles que l'augmentation de la longévité et de la fertilité, l'arrêt précoce de la reproduction, l'augmentation de la capacité cérébrale, la diminution du taux de mortalité à la fois infantile et adulte, chez l'homme moderne par rapport aux anciens hominidés, dans le but de nourrir une réflexion évolutionnaire et écologique beaucoup plus large (Dean, 2006).

Après l'application évolutionnaire de ces recherches, l'objectif initial de la jeune méthodologie s'élargit dans plusieurs directions et particulièrement en vue de l'estimation de l'âge à la mort de l'individu.

II.2.1.2. L'estimation de l'âge à la mort des individus juvéniles

Les premières estimations de l'âge au décès des restes d'hominidés retrouvés étaient établies sur l'état de l'éruption dentaire, le degré de maturation et quelques critères d'usure dentaire. Mais

ces arguments se sont rapidement révélés très approximatifs. Nous sommes désormais capables d'estimer la durée absolue du temps de formation de la couronne dentaire, ce qui constitue un fondement plus précis pour l'estimation de l'âge à la mort, à condition d'admettre la théorie, généralement reconnue, du rythme de croissance régulier de l'émail dentaire.

Si on admet l'hypothèse selon laquelle les cernes de croissance de l'émail dentaire sont représentatifs d'un rythme défini, on peut utiliser plusieurs méthodes pour procéder au décompte des lignes de croissance (Ramirez Rozzi, 1998) et le choix dépend généralement des conditions et de l'état de conservation, ainsi que des possibilités techniques de traitement de la dent (Ramirez Rozzi, 2005). Parmi ces méthodes, on retient deux catégories de possibilités qui s'offrent aux chercheurs pour compter les stries de Retzius. Ils peuvent décider de s'appuyer sur le comptage des périkymaties, manifestations, à la surface de l'émail, des stries de Retzius, en utilisant une technique d'empreintes/contre-empreintes et un microscope à balayage (avec un grossissement compris entre 36 et 55). Ou bien, ils comptabilisent les stries elles-mêmes à partir de la ligne néonatale, en utilisant des lames histologiques dentaires (*cf. supra* II. 1.4.5).

Un certain nombre d'études sur le développement dentaire des hominidés fossiles ont eu recours aux périkymaties (voir figure 9), plus facilement accessibles que les marqueurs incrémentaux de croissance (Bromage et Dean, 1985; Bacon, 1989; Mann *et al.*, 1990a; Ramirez Rozzi, 2005). Il s'agit d'une méthode dont le principe a été exposé par Bromage et Dean (1985) et qui a d'abord, et surtout, été développée en paléontologie pour l'estimation de l'âge au décès de jeunes sujets humains, sous forme d'âge chiffré (Bacon, 1989; Ramirez-Rozzi, 2005). En effet, la détermination de l'âge à la mort des immatures juvéniles a longtemps reposé sur une méthode observant le développement dentaire au niveau de la maturation, la minéralisation et l'éruption, aussi bien pour l'homme moderne que pour les hominidés fossiles. Cette démarche a perduré, malgré l'imprécision des résultats, les différences mal cernées inter- et intra- espèces d'hominidés (Bacon, 1989; Ramirez-Rozzi, 2005), ainsi que la variabilité individuelle élargissant la marge d'erreur de l'estimation. Le principe s'appuie sur la structure typique des périkymaties qui sont la manifestation, à la surface de l'émail, de successions de fines couches d'émail interne. Elles créent des « sillons » qui sont continus le long de la circonférence de la dent (Risnes, 1998b), perpendiculaires à l'axe longitudinal de la dent et parallèles entre eux (Bacon, 1989). L'estimation du temps de formation de la couronne à partir des périkymaties implique la maîtrise des marqueurs quotidiens de croissance, c'est-à-dire la relation entre les striations transversales et les stries de Retzius. Or, le nombre de jours entre deux stries de Retzius successives ne peut être déterminé que par une observation histologique. Les études utilisant les périkymaties utilisent un intervalle moyen, circaseptan, systématique entre deux

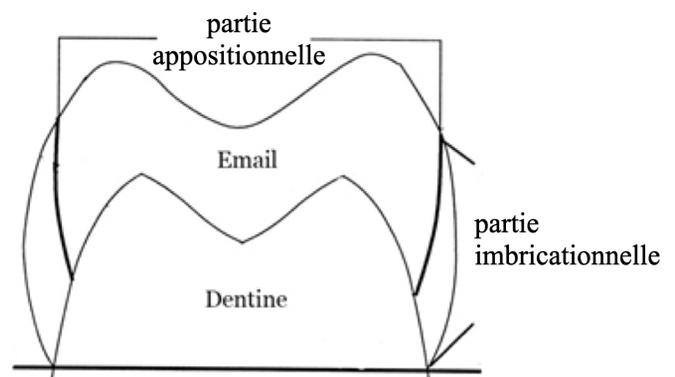


Fig. 9. Émail appositionnel – émail imbricationnel (d'après Ramirez-Rozzi, 1993a, fig.1).

manifestations, ce qui introduit un facteur d'erreur (Reid *et al.*, 2006). De plus, elles n'émergent pas toutes à la surface de l'émail. Sur les incisives et les canines permanentes, 80 à 90 % des stries émergent à la surface de l'émail en formant des périkyميات, et seulement 50 à 70 % sur les molaires permanentes (Hillson, 1992). Dans le cas des dents déciduales, l'emploi des périkyميات amène une difficulté supplémentaire, car les stries de Retzius n'atteignent presque jamais la surface de l'émail (Mann *et al.*, 1990b, Fitzgerald *et al.*, 1998). Les problèmes liés à l'invisibilité en surface de certaines périkyميات peuvent résulter de quelques facteurs inconnus ou de l'usure dentaire, ainsi que de difficultés d'identification qui se présentent parfois en pratique (Bromage et Dean, 1985, Dean et Beynon, 1991). L'utilisation des périkyميات ne permet pas, dans tous les cas, une estimation du temps de formation de la couronne et de l'âge à la mort précise.

L'alternative proposée par le décompte des lignes de croissance dans l'émail dentaire permet d'obtenir l'information de la durée de formation des couronnes. Par conséquent, pour un jeune individu dont le développement dentaire est resté inachevé, cette durée pourra permettre de déduire son âge au décès (Reid *et al.*, 1998 ; Ramirez Rozzi, 2005).

Le deuxième domaine principal d'exercice, étroitement lié à l'application des périkyميات, vise à évaluer la durée et la chronologie de formation de la couronne dentaire de différents hominidés et grands singes en vue d'applications sur des théories évolutionnistes. Il s'avère que plusieurs chercheurs, travaillant sur différents hominidés, essayent de comparer les différences de chronologie de formation de l'émail pour voir s'il y a évolution de ce processus entre les grands singes et l'homme moderne, en passant par les diverses espèces intermédiaires. Cependant, cette démarche présente un certain nombre de lacunes. Tout d'abord, la technique s'appuyant sur l'observation de la surface suppose impérativement que cette dernière n'a pas été parasitée par quelque usure que ce soit (Ramirez-Rozzi, 2005) pouvant fausser l'interprétation. De ce fait, elle incite à privilégier l'incisive aux autres dents, car elle offre une meilleure visibilité des caractéristiques significatives. De plus, du fait que l'émail peut être divisé en deux parties, l'une dite appositionnelle, l'autre étant imbricationnelle (voir figure 10), la distinction se fait sur la base de la disposition des stries sur la couronne dentaire. La partie appositionnelle comprend des stries qui n'arrivent pas jusqu'à la surface dentaire alors que dans la partie imbricationnelle, les stries se manifestent à la surface de l'émail par des périkyميات. Les stries de Retzius situées dans la partie appositionnelle, au sommet des cuspidés, ne parvenant pas à la surface de l'émail sont dites « cachées » et ne peuvent pas être comptées (Dean, 1987 ; Bacon, 1989 ; Mann *et al.*, 1991 ; Risnes, 1998b ; Ramirez Rozzi, 1993a ; Ramirez Rozzi, 2005). Même si des études ont été faites pour remédier à ces failles, notamment les stratégies de calculs pour réajuster les évaluations de temps en tenant compte des stries absentes pour plusieurs raisons, par exemple l'estimation (Mann *et al.*, 1991 ; Huda et Bowman, 1994), temps qu'il

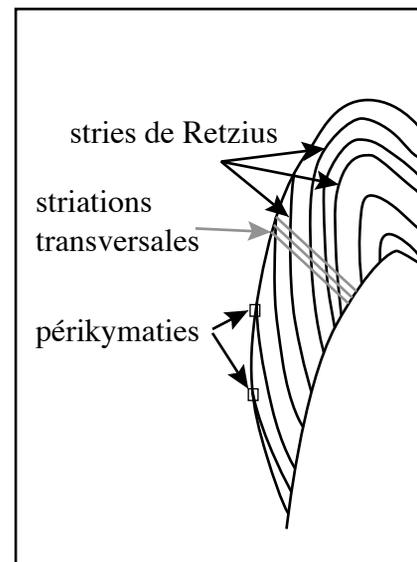


Fig. 10. Périkyميات (d'après Ramirez-Rozzi, 1993a, fig.1)

faudrait alors ajouter pour prendre en considération les périkymaties non visibles à la surface, cela reste encore souvent approximatif et variable d'une dent à l'autre. Enfin, un autre inconvénient est souligné par plusieurs auteurs, celui du problème de l'identification des périkymaties, dont certaines sont moins clairement exprimées que d'autres, ce qui entraîne un décompte variable d'un observateur à l'autre. Plus récemment, Guatelli-Steinberg *et al.* (2012) soulignent un autre obstacle, celui du rythme quotidien de formation de l'émail, qui est supposé affecter l'espacement des périkymaties. La rapidité de ce rythme peut conduire les prismes, et par conséquent les contours des stries, à changer d'angle à travers l'épaisseur de l'émail, par rapport à la jonction amélo-dentinaire. Dans ce cas, la variation est indépendante des périkymaties qui les représentent à la surface de l'émail (Dean et Shellis, 1998) et il est donc possible que les périkymaties ne reflètent pas réellement les stries de Retzius.

Malgré cela, cette méthode continue à être préférée à d'autres, parfois pour des raisons de moyens techniques, puisqu'elle ne demande aucun équipement spécifique, mais surtout pour son caractère non destructif qui peut un être un argument décisif, notamment dans le cas de matériel fossile rare.

La question de l'âge à la mort de jeunes individus a également été abordée du point de vue de l'histologie dentaire. Selon Huda et Bowman (1995), l'estimation de l'âge à partir de la microstructure de l'émail donne des résultats plus précis que les méthodes fondées sur l'observation du squelette. Dans ce cas, les possibilités disponibles pour l'estimation du temps sont les mêmes que celles qui s'offrent à nous pour l'estimation de l'âge au sevrage, à savoir, soit le calcul du rythme de sécrétion et de formation de l'émail (Smith *et al.*, 2006), soit le décompte des marqueurs de croissance depuis la naissance (Bacon, 1989 ; Dirks, 1998), qui sera abordé en détails plus loin (*cf. infra* III. 4.2).

11.2.2. Le stress et les défauts de l'émail

Il existe plusieurs types de défauts de développement dans l'émail, incluant les hypoplasies et les stries accentuées de Retzius. Contrairement à d'autres défauts tels que les opacités de l'émail qui résultent d'une hypominéralisation, les hypoplasies et les stries accentuées de Retzius sont dues à une perturbation des cellules qui produisent l'émail lors du processus de formation. Comme nous l'avons déjà évoqué, la formation de l'émail s'inscrit dans un système périodique régulier et contrôlé. Cependant, des interactions indépendantes des phénomènes d'accumulations sont susceptibles de se superposer par à-coups. Ces altérations s'expliquent par le retrait des améloblastes de la jonction amélo-dentinaire vers la surface lors du processus de formation, qui sont perturbés de façon locale ou systématique, selon les cas (Teivens *et al.*, 1996). Ainsi, les défauts de l'émail dentaire reflètent des périodes instables. Lorsque les améloblastes, de nature sensible, sont soumis à un épisode agressif, d'origine interne ou externe, un changement temporaire dans le rythme de formation matricielle de l'émail peut s'opérer, provoquant ainsi la manifestation de défauts hypoplasiques et l'apparence particulièrement marquée de certaines stries de Retzius (Eli *et al.*, 1989 ; Skinner et Dupras, 1993). Ces interactions du rythme régulier

sont induites par d'autres événements biologiques connus, périodes de malnutrition, de modèles d'alimentation temporaire, de maladies (Dean, 1987 ; Goodman et Rose, 1990), ou de situations psychologiquement stressantes (Schwartz *et al.*, 2006). D'autres bouleversements inconnus peuvent troubler l'activité des améloblastes.

Dans la cadre de la formation de la couronne dentaire, qui se déroule pendant les 6 premières années de la vie d'un enfant, le jeune individu en croissance est susceptible de ressentir certaines faiblesses de santé (fièvre, déficience nutritionnelle, par exemple), qui constituent des perturbations de la sécrétion et/ou de la minéralisation de la matrice, capables de laisser différents types de traces, notamment sur l'émail, en fonction de la durée et de l'intensité du stress subi par l'individu. Depuis plusieurs décennies, les anthropobiologistes utilisent la prévalence des défauts d'émail comme indicateur du niveau de stress physiologique des populations du passé, mais il n'existe pas de preuves réellement satisfaisantes pour corroborer la relation entre le stress et le défaut. La première raison de cette incertitude réside dans l'imprécision des méthodes utilisées pour estimer l'âge de la formation du défaut. De plus, la corrélation exacte entre l'étiologie, la cause du stress, l'âge de l'évènement manifesté et l'aspect du défaut observé sur la couronne dentaire est assez difficile à établir (Guatelli-Steinberg, 2001 ; Fitzgerald et Saunders, 2005).

Classiquement, les chercheurs focalisent leurs observations sur des défauts d'émail liés au stress sur deux catégories : l'hypoplasie de l'émail dentaire, visible à la surface de la couronne et les stries pathologiques de Retzius ou bandes de Wilson, défauts internes observables uniquement sur des coupes histologiques dentaires.

II.2.2.1. Les hypoplasies de l'émail dentaire

L'aspect des hypoplasies de l'émail dentaire est décrit plus haut (*cf. supra* II. 1.4.4). D'un point de vue biologique les hypoplasies linéaires de l'émail résultent d'un arrêt précoce ou d'une interruption de l'activité des améloblastes, pendant le développement de l'enfant. Les hypoplasies de l'émail dentaire peuvent avoir des causes physiologiques, comme des contraintes nutritionnelles (Ogilvie *et al.*, 1989) ou des maladies infectieuses (Guatelli-Steinberg, 2001), ou être provoquées par des traumatismes psychologiques (Schwartz *et al.*, 2006). Chaque défaut représente un épisode troublé, net et délimité (Hillson, 1992). Bien que ces anomalies dans la formation de l'émail soient contenues à l'intérieur, ce sont leurs manifestations sur la surface externe de l'émail qui sont habituellement évaluées. L'apparition à la surface de l'émail des défauts hypoplasiques, sur un matériau particulièrement répandu parmi les vestiges anciens, fait de ces aspects une caractéristique souvent observée sur les couronnes dentaires humaines issues de sites archéologiques.

II.2.2.1.1. Observation et détermination

L'un des principaux problèmes dans l'enregistrement des hypoplasies, en vue d'une réflexion archéologique, réside dans leur classification. La forme hypoplasique la plus couramment étudiée est l'hypoplasie linéaire de l'émail (LEH), c'est-à-dire une ou plusieurs lignes ou rainures horizontales à la surface de l'émail (Guatelli-Steinberg, 2001). Ce type d'hypoplasie s'exprime à divers degrés de sévérité, ce qui explique la difficulté à délimiter avec précision des catégories

de gravité du défaut. L'attribution de ces défauts à des degrés de sévérité définis peut varier d'un observateur à l'autre, voire pour un même observateur, dans différentes conditions d'analyses (que ce soit dans l'intensité ou la continuité des défauts) (Goodman et Rose, 1990), notamment lorsque l'expression de l'hypoplasie se situe à la limite entre deux classes (Hillson, 1992). De même, il n'existe pas de niveau minimum d'altération de l'émail clairement défini à partir duquel on peut parler d'hypoplasie (Guatelli-Steinberg, 2001; Cunha *et al.*, 2004). Par convention, dans la majorité des études sur les hypoplasies de l'émail dentaire, les défauts qui ne peuvent pas être suivis sur au moins deux des côtés de la couronne ne sont pas pris en compte (Hillson, 1992), mais le problème de la profondeur est encore discuté. Pour pallier le facteur d'erreur induit par l'observation et la classification, des travaux visant à normaliser les critères utilisés pour l'enregistrement des défauts hypoplasiques ont été entrepris, à l'échelle internationale, notamment par la Fédération Dentaire Internationale (FDI). Elle propose une classification fondée sur les aspects macroscopiques et microscopiques des défauts à la surface de l'émail dentaire (Fédération Dentaire Internationale, 1982; Guatelli-Steinberg, 2001). Le classement des hypoplasies proposé par la FDI distingue quatre types de défauts : les fosses, les rainures horizontales, les rainures verticales et les zones d'absence d'émail. Les défauts sont également répartis selon trois degrés de gravité, légère, modérée et sévère, en fonction de la largeur, la profondeur et la définition (Goodman et Rose, 1990; Duray, 1996).

L'utilisation de populations modernes comme point de référence a été envisagée, mais elle présente des difficultés. Il est en effet délicat de comparer les défauts hypoplasiques des populations vivantes avec ceux des populations archéologiques, car les conditions d'observation sont très différentes. Premièrement, les dents archéologiques sont examinées dans des dispositions optimisées, d'abord en environnement sec, avec un éclairage idéal, non limité par la cavité buccale, avec le choix de l'orientation, de sorte que la lumière tombe de façon oblique. Deuxièmement, il est possible de recourir à un grossissement optique pour faciliter et améliorer la détection des hypoplasies. Dans ces conditions, on peut envisager que des défauts plus modestes soient plus facilement repérés sur des échantillons archéologiques que sur des populations vivantes, faisant ainsi varier les statistiques de fréquence et de sévérité des hypoplasies.

11.2.2.1.2. Démarches, questions d'interprétations et applications

L'établissement de la chronologie des troubles subis pendant la croissance est un point crucial pour les archéologues, dans le cadre des études s'appuyant sur les hypoplasies de l'émail dentaire. La question a été étudiée par plusieurs auteurs à partir de la position du défaut par rapport à la hauteur totale de la couronne. Ensuite, traditionnellement, la position du défaut sur la couronne est considérée en fonction de l'estimation du rythme de formation de l'émail, afin de déterminer à quel âge a eu lieu l'évènement stressant (King *et al.*, 2002; Goodman et Rose, 1980; Blakey *et al.*, 1994; Cunha *et al.*, 2004; Reid et Dean, 2006).

Mais, cette démarche pour la détermination de l'âge de formation des hypoplasies a été critiquée à plusieurs reprises (Goodman et Rose, 1990; Bromage, 1991; Hillson, 1996; Cunha *et al.*, 2004; Mahoney et Johns, 2012). Le raisonnement s'appuie sur deux hypothèses principales,

à savoir : la hauteur de la couronne est équivalente au temps total de formation de la couronne et la formation de la couronne observe un rythme constant. Or, si l'on prend l'exemple d'une hypoplasie qui serait positionnée à mi-hauteur de la couronne, on en déduirait qu'elle est située à la moitié du temps de formation de la couronne, ce qui n'est pas exact, car lorsque les cuspides sont complètement formées, le développement du reste de la couronne a déjà commencé. Il a été souligné que les aspects hypoplasiques émergent à la surface de l'émail 1 an environ après la naissance, sur les premières molaires permanentes. Avant leur expression externe, les hypoplasies sont limitées à la structure interne de la couronne interne (Mahoney et Johns, 2012). Par ailleurs, la variation peut être liée à la géométrie de croissance de la couronne. Il s'avère que la démarche ne parvient pas à prendre en compte l'apposition de l'émail « cachée » sous les cuspides des molaires, en particulier, parce que l'émail de cette zone n'apparaît pas à la surface de la dent (King *et al.*, 2002 ; Cunha *et al.*, 2004). Il semblerait que 20 à 50 % du début de la croissance de la couronne soient concernés par ce phénomène (Fitzgerald et Rose, 2008). Par conséquent, les perturbations de la formation de l'émail qui correspondent chronologiquement à cette zone de l'émail appositionnel sont dissimulées. Il existe également des différences de sensibilité en fonction du type de dent. L'aspect d'un même épisode de trouble peut donc s'inscrire différemment d'un type de dent à un autre, ce qui rend la classification des hypoplasies risquée de même que l'établissement de comparaisons entre sites historiques (Hillson, 1992 ; King *et al.*, 2002) si la dent utilisée n'est pas la même pour tous les individus d'un échantillonnage. Cela démontre aussi que l'apparence et la taille des défauts hypoplasiques sont influencées par leur position sur la couronne dentaire. On note également, d'une part, que la formation de l'émail dentaire est sujette à des variations interdents, individuelles et interpopulations importantes (Goodman *et al.*, 1987), à la fois dans la hauteur de la couronne et dans le rythme de formation de l'émail. D'autre part, l'utilisation de la dent en archéologie est confrontée aux problèmes d'usures dentaires ante-mortem et postmortem. En effet, l'usure de la surface dentaire entraîne une perte d'émail dont on ne peut pas estimer la quantité. Dans ce cas, la hauteur totale de la dent doit être restituée puisque la mesure directe est alors impossible. Or, le calcul de l'âge auquel se produit une hypoplasie s'appuie sur la hauteur totale, l'estimation est, de ce fait, imprécise. Par ailleurs, si l'on choisit d'exclure les dents usées de l'échantillonnage, on introduit, de cette manière, un biais aux analyses statistiques des hypoplasies dans la population étudiée (King *et al.*, 2002). Pour pallier ces obstacles, l'alternative possible réside dans les marqueurs quotidiens et hebdomadaires. En effet, certains auteurs ont proposé une correspondance des lignes hypoplasiques avec les cernes de croissance. Ainsi, l'histoire des stress dans l'enfance peut être reconstruite, avec une estimation de l'âge du stress fondée sur le calcul de l'âge de l'hypoplasie (Cunha *et al.*, 2004 ; Fitzgerald et Saunders, 2005 ; RamirezRozzi, 2010 ; Mahoney et Johns, 2012). Le décompte des marqueurs de croissance est réalisable, soit à partir des périkymaties (Cunha *et al.*, 2004 ; Lacruz *et al.*, 2005), procédé qui présente des facteurs d'erreurs (*cf. infra* III. 4.2.2), soit au moyen des caractéristiques histologiques, stries de Retzius et striations transversales, contenues dans l'émail interne (Fitzgerald et Saunders, 2005 ; Mahoney et Johns, 2012).

La deuxième question d'interprétation repose sur la prévalence des hypoplasies, aussi bien au regard de l'individu que de l'échantillon (Blakey *et al.*, 1994 ; Lacruz *et al.*, 2005 ; Goodman *et*

al., 1987; Palubeckaité *et al.*, 2002). Elles sont utilisées comme mesure de stress non spécifiques d'une population, et par voie de conséquence, interprétées comme un indicateur de l'état de santé des populations humaines (Goodman et Rose, 1990; Guatelli-Steinberg, 2001). On pourrait penser qu'un épisode de stress intense, subi pendant la formation de l'émail, donnerait lieu à une importante fréquence des hypoplasies. Cependant, il a été remarqué que les individus soumis à ce type de stress sont susceptibles de décéder avant que ce dernier ait eu le temps d'être enregistré par l'émail dentaire. On ne peut donc pas simplement considérer qu'un échantillon dentaire présentant une forte prévalence d'hypoplasies traduit un très mauvais état de santé de la population ou, à l'inverse, qu'une faible occurrence de ces défauts reflète un bon état de santé, sans données complémentaires (Guatelli-Steinberg, 2001). Certaines recherches ont également tenté de mettre en relation les marqueurs de stress et l'espérance de vie des adultes, mais ces études sont contradictoires. Barker est l'un des premiers chercheurs avoir mis l'accent sur la relation entre la mortalité humaine et les stress subis au stade prénatal et dans l'enfance. Sa théorie s'appuie sur une série d'études soutenant que de nombreuses maladies, chez l'enfant et l'adulte, ont une origine fœtale et infantile et un impact sur l'espérance de vie (Gardner *et al.*, 1984; Armelagos *et al.*, 2009). Plusieurs applications archéologiques des idées de Barker viennent argumenter cette hypothèse. Par exemple, White (1978), examine des hypoplasies de l'émail dentaire sur des hominidés fossiles de plusieurs sites du sud de l'Afrique, trouvés dans des dépôts du pliocène et du pléistocène. Il met en évidence une quantité de décès plus élevée chez les enfants âgés de 4 à 10 ans lorsque ces derniers présentent des hypoplasies de l'émail dentaire. Duray (1996) remarque que les individus d'une population adulte préhistorique d'Amérique qui présentent des défauts d'émail liés au stress ont une espérance de vie significativement moins élevée par rapport aux individus qui en sont dépourvus. Il suggère alors que les sujets exposés aux stress prénataux et infantiles sont biologiquement affaiblis et ont une résistance réduite à l'âge adulte. L'hypothèse de Barker est controversée, notamment par Lewis et Robert (1997; cités par Palubeckaité, 2002), qui, à l'inverse, dans leur examen d'une population préhistorique trouvent une espérance de vie plus longue pour les individus ayant des marques de stress, ce qu'ils justifient par une meilleure réponse immune. Dans les études archéologiques, les échantillons retenus sont, de préférence, relativement épargnés par l'usure dentaire occlusale qui peut supprimer un certain nombre d'hypoplasies potentielles, et ainsi biaiser l'estimation de leur fréquence, même si la majorité des hypoplasies se forme entre le collet et le milieu de la dent du fait d'une plus grande sensibilité de l'émail aux perturbations de croissance dans ces zones (Palubeckaité, 2002). Dans ce cas, la prévalence de ces défauts est un moyen d'obtenir des informations sur la mortalité/morbidité infantile (Palubeckaité *et al.*, 2002; Cuhna *et al.*, 2004). Il semblerait finalement que ces hypothèses ne soient pas suffisamment établies pour être largement appliquées aux interprétations archéologiques et que, de manière plus générale, il n'y ait pas de relation claire entre la prévalence des hypoplasies et l'état de santé. Une autre application archéologique de la prévalence des hypoplasies de l'émail dentaire, traditionnellement exploitée en préhistoire, consiste à mettre en rapport l'augmentation de la fréquence de ces défauts avec la transition du système de subsistance des chasseurs-cueilleurs vers un système agricole (Blakey *et al.*, 1994).

Une autre question importante qui préoccupe les chercheurs se concentre sur la signification biologique de l'aspect du défaut. Pour cela, des études ont tenté d'évaluer la durée et la gravité de l'épisode stressant, à partir de la taille des défauts hypoplasiques (Duray, 1996). La relation entre la taille du défaut hypoplasique et la gravité du stress ou la durée de cet épisode troublant n'est pas évidente. Plusieurs auteurs (Guatelli-Steinberg, 2001) ont tenté de mettre en lien les hypoplasies et le nombre de marqueurs incrémentaux qu'elles recouvrent, dans le but d'obtenir des informations sur la gravité et la durée de l'épisode de stress. Pour Hillson (2008), la taille du défaut n'est pas nécessairement liée à la durée ou l'intensité du stress. La relation avec la durée du stress pose d'autant plus de problèmes que l'espacement des stries de Retzius varie à travers la hauteur de la couronne dentaire, ce qui accentue la marge des estimations prenant en compte la taille du défaut hypoplasique (on ne sait pas si le temps de formation du défaut correspond plus à sa taille ou au nombre de marqueurs qu'il recouvre).

Des tentatives de répartition saisonnière des hypoplasies ont été faites. La répartition saisonnière peut refléter l'exposition différentielle et les risques de maladies infectieuses selon les périodes de l'année. Dans les travaux de King *et al.* (2002), une fréquence plus élevée de stress s'est révélée associée aux mois les plus chauds, résultant probablement d'infections gastro-intestinales. Là encore, la fiabilité de cette répartition dépend de la calibration de la chronologie.

Plusieurs expérimentations (Hillson, 1992) ont cherché à établir un lien avec différentes pathologies telles que les carences en calcium ou en vitamines A et D, les allergies, les naissances prématurées, les diverses malformations congénitales, les cas de rougeole pendant la grossesse, ou le diabète maternel. De manière générale, les hypoplasies de l'émail sont plus fréquentes chez les enfants ayant des antécédents, mais la corrélation directe avec une pathologie, toujours dépendante des problèmes des niveaux d'enregistrement de ces défauts, reste délicate et laisse les chercheurs réservés sur leurs interprétations.

Plusieurs auteurs étudiant les primates non humains en Afrique (revus par GuatelliSteinberg, 2001) ont noté que dans certains échantillonnages les hypoplasies se manifestent selon des intervalles réguliers. Ces troubles reproduits de façon systématique sont corrélés avec des changements climatiques saisonniers, notamment les saisons des pluies. Nous ne savons pas si la conséquence est directement due au climat lui-même ou si la perturbation est induite par le biais du climat à l'origine de maladies respiratoires, ou liées à l'humidité, ou encore de maladies carencielles liées aux problèmes de ressources qu'il entraîne. Dans tous les cas, cela suggère l'influence du climat sur la formation des défauts hypoplasiques.

Une information peut être extraite de l'observation des défauts hypoplasiques, en fonction de leur étendue, leur sévérité (largeur et profondeur) et leur fréquence. Les hypoplasies sont des indicateurs des conditions de vie et peuvent être utilisées, dans ce sens, pour comparaison interpopulations, même si les interprétations restent délicates.

II.2.2.1.3. Les hypoplasies de l'émail dentaire et la prime enfance

Au début du XX^e siècle, les études sur les hypoplasies de l'émail dentaire ont accordé une attention particulière aux défauts de formations de l'émail autour de la naissance et pendant la petite enfance. Kronfeld et Schour (1939; cités par Hillson, 1992) ont signalé un « anneau »

hypoplasique attribué à la naissance et qui est, d'ailleurs, plus prononcé chez les enfants souffrant de lésions à la naissance.

Plusieurs études ont tenté de mettre en relation l'âge du pic de fréquences des hypoplasies chez les enfants et le processus de sevrage. Goodman *et al.* (1987) ont relevé une fréquence significativement plus élevée entre 2 et 3 ans dans leur échantillon actuel d'enfants provenant du Mexique (issus de cinq communautés différentes), en contexte rural. Le pic des défauts hypoplasiques enregistré pourrait correspondre au stress causé par le sevrage définitif, documenté par des données supplémentaires. Cependant, les auteurs restent prudents quant à leur interprétation et suggèrent que des études complémentaires sont nécessaires pour clarifier la relation entre les deux phénomènes. Une étude du même ordre sur des hommes de Néandertal (Ogilvie *et al.*, 1989) a rapporté une haute fréquence des hypoplasies de 2 à 5 ans, avec un pic particulièrement élevé vers 4 ans. Pour les auteurs, ce modèle est interprété comme un reflet de certaines contraintes nutritionnelles, associées au processus de sevrage, mais actuellement aucune donnée additionnelle ne peut soutenir cette hypothèse. Les travaux de Moggi-Cecchi *et al.*, (1994) exploitent de leur côté une collection moderne italienne. Dans cette population, l'augmentation des hypoplasies à partir de l'âge de 1,5 ans par rapport aux âges antérieurs, avec un pic de fréquence entre 2 et 3 ans, semble correspondre au processus de sevrage, documenté par ailleurs par des sources historiques. L'analyse des hypoplasies de l'émail par Cunha et ses collègues (2004) sur une population d'*Homo Heidelbergensis* démontre une faible prévalence, dont la majorité est attribuée à la troisième année. Elles sont probablement liées au sevrage, mais le manque d'informations supplémentaires ne permet pas de préciser à quelle(s) étape(s), ni de l'interpréter avec fiabilité.

Certaines observations des hypoplasies dans l'enfance ne permettent pas de considérer les hypoplasies de l'émail comme l'expression d'un stress lié au sevrage. Blakey *et al.* (1994), en examinant une population archéologique d'esclaves afro-américains, soulignent cette possibilité. Leurs observations concluent à un stress pouvant être interprété comme un léger effet postsevrage, mais la relation directe entre la fréquence des hypoplasies et le processus de sevrage n'est pas démontrée. La fréquence élevée des perturbations individuelles de la croissance de l'émail, en moyenne plus élevée que dans la plupart des populations étudiées sous cet angle, et la fréquence particulière à un âge plus tardif que l'âge du sevrage documenté par les sources historiques, leur font rejeter l'hypothèse de la corrélation entre les défauts hypoplasiques et le sevrage. De même, Lacruz *et al.* (2005) ont relevé une importante prévalence des hypoplasies de l'émail à proximité du collet et ont convenu qu'elles ne traduisaient pas le processus de sevrage. Dans le cas de cet individu (*Australopithecus africanus*), les défauts de formation de l'émail reflèteraient plutôt une maladie, un traumatisme ou un autre évènement stressant, mais aucune donnée complémentaire ne permet de déterminer l'origine du trouble avec plus de précisions.

Si l'on tient compte des différentes tentatives de corrélation entre le sevrage et les hypoplasies de l'émail on constate que le lien de cause à effet entre les deux n'est pas évident, et que lorsqu'il y a une concordance on ne sait pas, à partir des seules observations, quelle étape du processus de sevrage est reflétée par les défauts hypoplasiques. De ce fait, dans les recherches fondées sur

les hypoplasies de l'émail, des informations complémentaires sont nécessaires pour confirmer ou infirmer l'association avec le processus de sevrage.

Depuis plusieurs décennies, les défauts hypoplasiques sont utilisés en anthropologie pour détecter les niveaux de stress non spécifiques dans les populations anciennes. Cependant, il n'existe pas vraiment de preuves satisfaisantes permettant de corroborer la relation entre le stress et le défaut de formation de l'émail. Cela s'explique en grande partie par l'imprécision des méthodes exploitées pour estimer l'âge de la perturbation, d'une part, et la corrélation exacte entre la cause du stress chez un individu, la connaissance des épisodes de tensions et la manifestation du défaut de formation complexe à établir, d'autre part. Dans le but d'associer les hypoplasies de l'émail à des causes plus précises, il est conseillé d'observer d'autres marqueurs (Palubeckaitė *et al.*, 2002). Tout dysfonctionnement dans le processus de formation de l'émail, cause directe de l'apparition des hypoplasies, est souligné par une modification de l'aspect et/ou de la répartition des stries de Retzius. Dans le but d'établir une corrélation avec l'âge du sevrage, l'observation des stries pathologiques de Retzius dans leur structuration des couches d'émail et les analyses chimiques de l'émail dentaire représentent des solutions aux problèmes évoqués ci-dessus. En ce qui concerne leur association à un âge individuel, le recours aux striations transversales et aux stries de Retzius semble, actuellement, le moyen le plus pertinent d'obtenir une estimation précise.

II.2.2.2. Les stries pathologiques de Retzius

Les stries pathologiques de Retzius sont des stries accentuées suivant la même direction que les lignes régulières de Retzius. Elles peuvent soit souligner une ligne existante, soit s'interposer entre deux cernes « normaux » de croissance (Antoine *et al.*, 2009).

II.2.2.2.1. Description

Les bandes de Wilson se distinguent des stries régulières de Retzius, car elles sont plus épaisses, plus foncées, plus marquées et visibles sur une plus large partie de leur longueur (voir figure 11). Le plus souvent, elles sont en fait observables sur toute leur longueur depuis la jonction amérodentinaire jusqu'à la surface de l'émail, ce qui est rarement le cas des stries de Retzius.

Les stress laissent des traces différentes sur l'émail en fonction du temps et de l'intensité des troubles subis, à une échelle individuelle. Il n'existe pas de modèle de corrélation stress/aspect histologique de ce stress. Goodman et Rose (1990) définissent la strie pathologique de Retzius comme étendue, au minimum sur les trois quarts de la longueur d'une strie régulière de Retzius, de façon continue. Cette définition a été retenue par plusieurs études récentes. Cependant, il s'agit d'une estimation abstraite, il n'existe pas de réelle définition minimum, sur la base de caractéristiques biologiques pour identifier les événements (Fitzgerald et Saunders, 2005 ; Fitzgerald *et al.*, 2006).

Les stries pathologiques de Retzius et les cernes de croissance n'ont pas la même origine. Les stries pathologiques de Retzius sont induites par une atteinte de la minéralisation, elles ne résultent pas, comme les lignes de Retzius, du rythme circaseptan de la minéralisation de la matrice amélaire (Fitzgerald et Rose, 2008). Les stries pathologiques de Retzius sont, d'ailleurs, souvent associées à

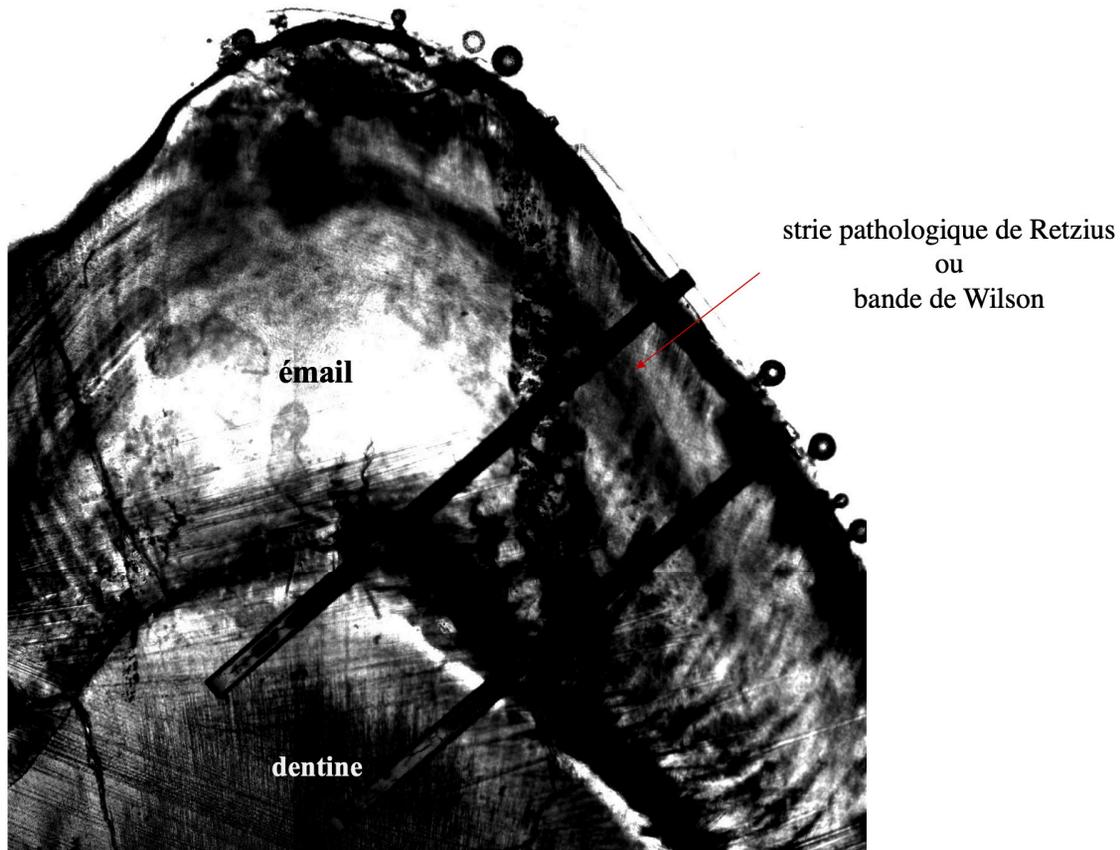


Fig. 11. Observation au microscope à confocal des stries pathologiques de Retzius sur une première molaire définitive (cliché G. Oeil)

des lignes hypoplasiques (Goodman et Rose, 1990). Il est d'ailleurs probable qu'elles soient liées aux mêmes perturbations d'origine métabolique qui répondent à un stimulus externe et agissent sur la croissance de l'émail dentaire. Ces atteintes de la croissance dentaire interviennent à un point donné dans le temps qui peut être exploité comme une ligne d'enregistrement. Elles se superposent aux stries régulières et ne semblent pas les affecter.

11.2.2.2. Interprétations

Certaines stries irrégulières ont été associées à divers stress physiologiques en relation avec la santé de l'individu, tels que les infections, les maladies et la malnutrition (Rose, 1977 ; Goodman et Rose, 1990 ; Fitzgerald et Saunders, 2005 ; Fitzgerald *et al.*, 2006), ou encore des traumatismes psychologiques (Schwartz *et al.*, 2006). Elles ont également été largement étudiées dans les populations anciennes et vivantes par les anthropologues qui l'utilisent comme indicateur de stress environnemental (Hillson, 2008). Cela implique la considération du moment, de la durée et de la fréquence des épisodes de stress, dans le but de cerner la cause du stress.

L'enregistrement de stress d'ordre plutôt socio-environnementaux dans les tissus dentaires internes, exprimés par des lignes accentuées de Retzius, a été démontré par plusieurs études sur des primates non humains en captivité (Dirks *et al.*, 2002 ; Schwartz *et al.*, 2006). Ces recherches ont mis en évidence des corrélations entre des stries pathologiques et des stress sociaux, des changements alimentaires, notamment dans le cas du sevrage (Fitzgerald *et al.*, 2006 ; Mahoney

et Johns, 2012), des variations écologiques ou encore la phase de puberté. En ce qui concerne les individus fossiles ou archéologiques, les données environnementales, contextuelles et individuelles sont relativement limitées. Le recours à une approche fondée sur l'interprétation des stries accentuées de Retzius implique la recherche d'informations complémentaires. Dans le cas des changements alimentaires, comme ceux représentés par la naissance et le sevrage qui peuvent être reconstitués par l'évaluation des changements chimiques à travers la dent, les ressources complémentaires doivent être prises en compte dans l'interprétation des changements chimiques à travers la dent et la mise en parallèle avec les stress repérés optiquement (Wright et Schwarcz, 1998 ; Humphrey *et al.*, 2007 ; Humphrey *et al.*, 2008b).

II.2.2.2.3. Applications

Les stries pathologiques de Retzius traduisent un état de stress ponctuel chez un individu, plus ou moins long, plus ou moins intense. La perturbation enregistrée, traduite par une strie pathologique, peut aussi bien être d'origine physiologique que psychologique.

Plusieurs chercheurs ont essayé d'établir une correspondance entre les stries pathologiques de Retzius et les hypoplasies de l'émail (Massler *et al.*, 1941 ; cité par Fitzgerald *et al.*, 2005 ; Wright, 1990). En ce qui concerne la corrélation des hypoplasies et des stries pathologiques de Retzius, Simpson (1997 ; cité par Fitzgerald *et al.*, 2005) a montré que les stries pathologiques de Retzius sont souvent associées à des défauts de surface de l'émail dentaire. Mais selon les observations de Wright (1990) ces deux types de défauts ne sont associés que dans 25 à 50 % des cas. Cette corrélation, relativement faible, pose la question de leur étiologie respective même si, du point de vue du biocellulaire, ils résultent tous les deux d'une perturbation métabolique des améloblastes pendant la formation de l'émail. Plus précisément, ces défauts reflètent un arrêt ou une diminution temporaire de la sécrétion des protéines dans le liquide matriciel de l'émail, ce qui agit sur la structure prismatique de l'émail (Wright, 1990). Des facteurs de stress sévères et aigus semblent affecter la totalité de la sécrétion améloblastique sur une courte période (de un à cinq jours) et provoquer ainsi l'apparition de stries pathologiques de Retzius. Des facteurs de stress de plus faible intensité, mais pendant une période de temps plus longue, allant de plusieurs semaines à deux mois, peuvent affecter plus légèrement l'activité des améloblastes et se manifestent sous forme d'hypoplasies (Condon, 1981 ; Wright, 1990). On note que cette explication est cohérente avec le fait que l'évènement bref et particulièrement perturbant de la naissance donne lieu à une strie pathologique de Retzius, la ligne néonatale (*cf. infra* II. 2.2.3), mais n'entraîne pas d'hypoplasie de l'émail dentaire. Il est donc possible que certains épisodes de stress sévères initient la formation de stries pathologiques de Retzius, sans pour autant influencer l'aspect de la surface de l'émail. De même, un stress léger et long est capable de provoquer des hypoplasies, sans atteindre le seuil d'intensité nécessaire pour produire des stries pathologiques de Retzius. On en déduit alors que leur expression respective ne nécessite pas les mêmes conditions, qu'ils correspondent à des niveaux de tension différents et qu'ils peuvent être ressentis indépendamment. Par conséquent, ils peuvent être utilisés et interprétés comme des indicateurs de différents niveaux de stress.

Les recherches de Rose (Rose, 1977 ; Rose *et al.*, 1978) suggèrent que la prévalence des stries pathologiques de Retzius peut être employée pour la reconstruction des niveaux et des

modèles chronologiques de stress dans l'enfance, en dégageant les âges auxquels on dénote des pics de stress, à partir de matériel archéologique. Dans la suite de ces observations, ces stries sont également mises en relation avec l'espérance de vie (Armelagos *et al.*, 2009). L'interprétation de leur fréquence sur des Indiens d'Amérique de la préhistoire a révélé une moyenne d'âge à la mort plus précoce chez les individus ayant enregistré des stress dans la jeune enfance, que ceux qui en sont exempts.

La présence de stries accentuées de Retzius éventuellement avant la naissance et/ou tout au long de l'enfance, peut indiquer un état pathologique pouvant être relié à de faibles chances de survie ou aux pratiques d'allaitement et de sevrage. Dans le cas de l'utilisation des cernes de croissance de l'émail dans les problématiques d'alimentation du nourrisson, afin d'apprécier l'état de santé de l'enfant, les stries pathologiques peuvent donc être examinées. Elles constituent un aspect complémentaire aux hypoplasies de l'émail dentaires. La relation entre la position des défauts d'émail, le moment et la durée du stress est particulièrement complexe. Les récents travaux (King *et al.*, 2002) ont montré que les hypoplasies de l'émail dentaire, lorsqu'elles sont visibles à la surface de l'émail, peuvent être liées à des aspects de la structure incrémentale de l'émail, les stries de Retzius, par le biais des périkynties. Ces associations ont permis la mise au point d'une chronologie précise des séquences des défauts de formation de l'émail. L'examen des stries pathologiques de Retzius peut également se superposer aux analyses chimiques, telles que les analyses isotopiques, couramment utilisées pour ces questions. Cette observation constitue ainsi une alternative aux problèmes posés par la démarche isotopique qui sous-entend l'absence de biais à la mortalité infantile affectant les résultats.

II.2.2.3. Le cas particulier de la ligne néonatale

II.2.2.3.1. Description et interprétations

La ligne néonatale (voir figure 12) est un cas particulier de strie pathologique de Retzius visible sur les dents déciduales et la première molaire définitive, voire, exceptionnellement, sur la couronne des incisives centrales permanentes (Eli *et al.*, 1989, Weber et Eisenmann, 1971). La manifestation de la ligne néonatale semble résulter d'un phénomène optique dû à des modifications du degré de minéralisation des prismes de l'émail (Sabel *et al.*, 2008), comme les stries pathologiques de Retzius en général.

Elle constitue une manifestation optique, histologique, du stress subi par un individu en naissant et la transition d'une vie intra-utérine à un environnement extra-utérin (Eli *et al.*, 1989, Sabel *et al.*, 2008, Mishra *et al.*, 2009, Zanolli *et al.*, 2011). Cette transition représente à la fois un changement d'environnement (de liquide à aérien), de système d'acheminement de l'oxygène avec l'utilisation nouvelle du système respiratoire, et de l'apport nutritionnel, qui emprunte désormais le système digestif au lieu de passer par le cordon ombilical. Ces évolutions fondamentales s'opèrent en même temps et de façon assez brutale (quelques heures, le temps de l'accouchement). Il n'est donc pas étonnant que le stress physiologique généré par la naissance, alors vécu comme un traumatisme, s'inscrive biologiquement. Il arrive même, occasionnellement, qu'une hypoplasie de l'émail dentaire soit associée à la ligne néonatale. À ces modifications viennent s'ajouter d'autres

facteurs physiologiques, tels que le phénomène d'hypocalcémie observé dans les 48h à 72h qui suivent la naissance (Zanolli *et al.*, 2011).

La ligne néonatale est désormais bien connue des spécialistes qui la distinguent aisément grâce à plusieurs signes. Cependant, elle n'est pas uniforme d'un individu à l'autre et peut varier en épaisseur ou en intensité, en fonction de divers facteurs, notamment les caractéristiques de l'accouchement (Eli *et al.*, 1989, Canturk *et al.*, 2014). Tout d'abord, la naissance, représentant un stress sans équivalent dans l'enfance, il n'est pas surprenant que cette strie pathologique de Retzius soit en général la plus marquée et la plus épaisse parmi celles qu'on observe sur une dent. Selon les études, les perturbations de la ligne néonatale sont estimées sur une largeur allant de 10-12 μm dans les cas dits normaux (Jakobsen, 1975, Eli *et al.*, 1989) et pouvant atteindre, voire dépasser les 30 μm (Zanolli *et al.*, 2010) dans les cas pathologiques. Les différents auteurs s'accordent à penser que l'intensité du traumatisme de la naissance, la durée du processus, la corrélation entre l'accouchement et le terme biologique (plus un enfant est prématuré, plus la ligne néonatale est épaisse) et surtout le mode d'accouchement qui, lorsqu'il connaît des complications ou nécessite une intervention, peut être responsable d'une épaisseur accrue, sont à prendre en compte (Skinner et Dupras, 1993). Certains auteurs (Eli *et al.*, 1989, Canturk *et al.*, 2014) soulignent le rôle du rythme des naissances. Il semble qu'au fur et à mesure des accouchements de la mère, la ligne néonatale de l'enfant ait tendance à être plus mince (en raison d'une dilatation plus rapide du col de l'utérus qui favorise un accouchement plus court). De plus, contrairement à Jakobsen (1975), Eli *et al.* (1989) soutiennent l'idée que la largeur et l'intensité de la ligne néonatale dépendent fortement de la distance qui la sépare de la pointe cuspidienne.

On sait également qu'elle adopte une position caractéristique sur chaque dent où elle apparaît (Skinner et Dupras, 1993) puisque le développement des différentes dents se chevauche chronologiquement entre eux. De ce fait, par exemple sur l'incisive déciduale, la ligne néonatale s'étend du collet sur la jonction amélo-dentinaire vers la surface d'émail incisal en ne laissant qu'une petite partie d'émail postnatal, car elle a quasiment achevé sa formation au moment de la naissance, alors que sur une molaire elle est plus proche de la jonction amélo-dentinaire et présente une très faible proportion d'émail prénatal (Teivens, 1996). Il existe néanmoins une certaine variabilité

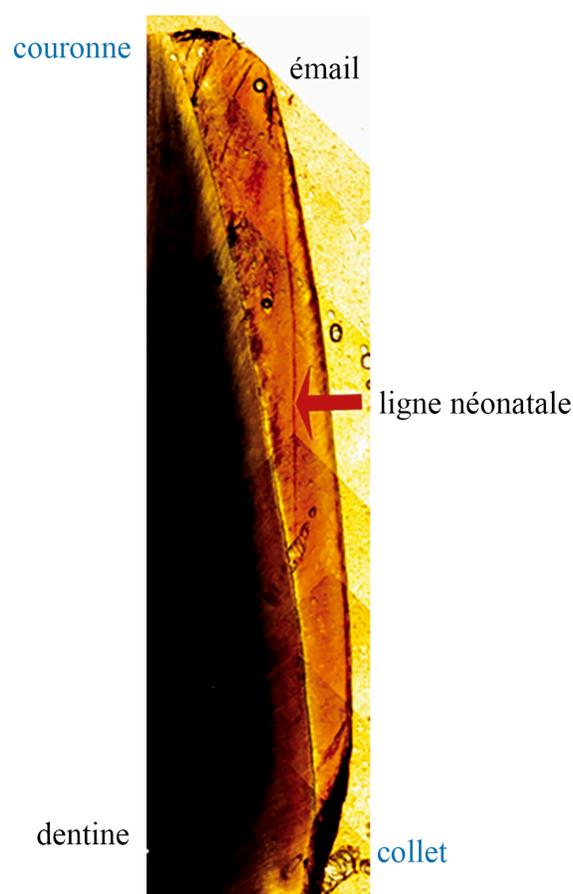


Fig. 12. Observation de la ligne néonatale sur une coupe dentaire longitudinale labio-linguale d'une incisive déciduale, sous microscope optique à lumière transmise polarisée (cliché G. Oeil).

de position pour cette ligne, que Skinner et Dupras (1993) justifient par des temps de gestation différents (plus le temps de gestation est long plus la ligne se décale vers le collet). De leur côté, Huda et Bowman (1995) envisagent une variabilité de la position de la ligne néonatale à travers le temps et l'espace, ce qui sous-entend l'influence de facteurs externes. Ils rappellent aussi la faiblesse des populations de référence pour cette information, ce qui gêne sa localisation avec une extrême précision. La chronologie de développement des dentitions est également responsable de la présence systématique de la ligne néonatale sur les dents déciduales et, la plupart du temps, sur la première molaire définitive (Eli *et al.*, 1989; Skinner et Dupras, 1993; Kodaka *et al.*, 1996; Antoine *et al.*, 2009; Mishra *et al.*, 2009; Zanolli *et al.*, 2011). Christensen et Kraus (1965, cités par Antoine *et al.*, 2009), notaient à ce sujet que la première molaire inférieure débute sa formation *in utero* légèrement plus tôt par rapport à la première molaire supérieure, elle présente donc une plus forte probabilité de présenter une marque néonatale dentaire. Sa présence peut aussi ne pas être détectée, dans certains cas, à cause de sa trop grande proximité avec la jonction amélo-dentinaire, gênant la lisibilité, ou bien en raison de certaines circonstances particulières telles que les conditions de la naissance, la santé postnatale, le traumatisme, entre autres hypothèses. Dans tous les cas, il apparaît logique que la ligne néonatale soit sensible aux mêmes agressions que les autres stries de Retzius (Antoine *et al.*, 2009).

En outre, elle sépare la dent en deux aspects amélaire de qualité différente (Humphrey, 2007; Zanolli *et al.*, 2011). Cette disparité est attribuée au fait que l'émail postnatal est plus minéralisé, bien que moins calcifié, et moins homogène. Les prismes présentent également plus de défauts structurels que l'émail prénatal (Eli *et al.*, 1989; Kodaka *et al.*, 1996; Mishra *et al.*, 2009).

En ce qui concerne l'émail de la ligne néonatale, il présente lui aussi des spécificités qui le caractérisent. La plupart des auteurs ont souligné sa nature hypominéralisée (Weber et Eisenmann, 1971; Skinner et Dupras, 1993) et hypocalcifiée (Jakobsen, 1975; Kodaka *et al.*, 1996; Mishra *et al.*, 2009). Cela n'est pas étonnant puisque, en effet, aux perturbations qui résultent du passage de la vie intra-utérine à la vie extra-utérine, s'ajoutent certains facteurs physiologiques tels que la diminution significative du calcium dans le plasma dans les premières 48 h à 72 h, à l'origine d'une hypocalcémie qui pourrait participer à la manifestation de la ligne néonatale (Zanolli *et al.*, 2010).

L'argument de la chute des niveaux de calcium à la naissance soutient d'ailleurs l'hypothèse, évoquée plus haut, selon laquelle les stries de Retzius, dans leur ensemble, sont supposées hypocalcifiées. En ce qui concerne la ligne néonatale, l'hypocalcification se manifeste de façon localisée dans la région de la gaine prismatique ou dans les contours du prisme, ainsi que dans leurs zones périphériques, plutôt qu'à l'intérieur des prismes et dans les espaces interprismatiques (Kodaka *et al.*, 1996). Cela peut être justifié par la présence d'une assez grande quantité de matière organique, localisée dans un sous-compartiment organique des gaines prismatiques de la ligne néonatale (Kodaka *et al.*, 1996). On remarque aussi qu'elle manifeste, de façon plus claire que les autres, les perturbations prismatiques qu'elle enregistre (Skinner et Dupras, 1993; Zanolli *et al.*, 2010), et qui se révèlent être, à la lumière de la haute résolution optique, un brusque changement d'orientation des prismes et de leurs changements structuraux internes consistant en une réduction de la concentration cristalline et un épaissement local des contours

qui provoquent des variations de configuration des prismes d'émail sur la ligne néonatale (Weber et Eisenmann, 1971; Kodaka *et al.*, 1996; Mishra *et al.*, 2009). Weber et Eisenmann (1971) suggèrent que les changements d'orientation et les lacunes au niveau de l'agencement cristallin sont à l'origine de l'hypocalcification de la ligne néonatale, mais la démonstration de ce lien reste à faire.

Dans une approche analytique, on peut prendre en considération les modalités de transmission des ions strontium et calcium au nouveau-né. En effet, le strontium et le calcium sont soumis à des gradients de concentration lorsqu'ils sont transférés à travers le placenta. Lorsque le calcium passe à travers la glande mammaire, il subit des mécanismes beaucoup plus actifs que dans le placenta (Krachler *et al.*, 1999; Rossipal *et al.*, 2000). De ce fait, il augmente significativement en quantité dans l'organisme et, par conséquent, dans le squelette. Cette différence implique une augmentation du rapport Sr/Ca entre les tissus amélaire formés avant la naissance et après la naissance, chez les nourrissons exclusivement allaités à la naissance (Humphrey *et al.*, 2007) (*cf. infra* III. 4.1.3).

Le stress en général et donc celui provoqué par la naissance semble se répercuter sur l'enregistrement histologique dentaire pendant le processus ou juste après (Eli *et al.*, 1989), étude corrélée avec les observations de Zanolli et son équipe (2010) qui constatent qu'il suffit qu'un nourrisson survive quelques jours, au moins 7 pour Schwartz *et al.* (2010) pour que nous puissions percevoir la ligne néonatale sur les dents déciduales et la première molaire.

Huda et Bowman (1995) soulèvent le cas particulier de la double ligne néonatale parfois observée, souvent associée à une large hypoplasie de l'émail dentaire. Ce marquage particulier de la ligne néonatale pourrait être mis en relation avec un temps d'adaptation postnatal plus important pour le nourrisson. Ce besoin particulier pour s'adapter au nouvel environnement peut se justifier dans le cas des nouveau-nés prématurés, généralement plus fragiles que les bébés nés à terme. Dans ce cas on peut s'attendre, pour une même dent, à ce que la ligne néonatale soit plus proche de la jonction amélo-dentinaire que chez les individus nés à terme. Mais cette variable n'est pas suffisamment observée et corrélée pour être incontestablement admise. Il est d'ailleurs possible que la présence d'une double ligne néonatale soit simplement le signe d'un enfant faible, d'une perturbation prolongée à la naissance ou d'un retard de croissance, par exemple.

La ligne néonatale matérialise l'enregistrement de la naissance, qui constitue le point « zéro » du développement chronologique de la vie d'un individu, ce qui est fondamental pour la technique d'estimation de l'âge associé à un événement. Dans ce travail, la proportion d'émail interne/externe postnatal a été évaluée à partir de l'identification de la ligne de croissance néonatale. L'identification de la ligne néonatale a été effectuée sur la base des critères suivants : épaisseur, longueur et couleur de la ligne de croissance néonatale (Weber et Eisenmann, 1971), la position attendue de la ligne néonatale en fonction de la dent (Skinner et Dupras, 1993; Teivens, 1996), la différence d'aspect, traduisant une différence de qualité de l'émail de part et d'autre de la ligne néonatale (Humphrey *et al.*, 2007; Zanolli *et al.*, 2011), la corrélation avec le comportement du rapport Sr/Ca au niveau de la ligne néonatale (Krachler *et al.*, 1999; Rossipal *et al.*, 2000).

II.2.2.3.2. Utilisations marginales de la ligne néonatale

II.2.2.3.2.1. Les sacrifices infantiles et infanticides

La ligne néonatale a été utilisée dans certaines études pour identifier ou infirmer les pratiques de sacrifices d'enfants (Smith et Avishai, 2005 ; Schwartz *et al.*, 2010 ; Mays et Evers, 2011). Il existe dans la littérature historique de différentes époques et de différentes aires géographiques, plusieurs anecdotes et mythes qui rapportent des exemples de sacrifices d'enfants, soit dans un cadre de rituels religieux afin de satisfaire les dieux, soit reliés à un contexte de régulation des naissances ou de sélection du sexe. Cependant, il semble qu'à partir de quelques citations dans les textes, le phénomène ait été largement amplifié et utilisé rapidement, voire de façon presque systématique, pour expliquer une concentration significative d'enfants sans adultes, alors que les nourrissons et les jeunes enfants sont habituellement sous-représentés dans les zones d'inhumation fouillées. De plus, ce type d'observation reste subjectif puisqu'on est toujours limité dans nos certitudes sur la représentativité de l'ensemble fouillé.

Les extrapolations à ce sujet semblent facilitées par le fait que l'infanticide est souvent difficile à détecter en anthropologie biologique, car les moyens de mettre fin à ces vies déjà fragiles ne laissent généralement pas de traces sur l'os, comme c'est le cas pour l'étouffement (Mays et Evers, 2011) ou la noyade (Smith et Kahila, 1992), souvent évoqués. L'identification de l'infanticide en archéologie nécessite donc des approches indirectes. Traditionnellement, dans un premier temps, on observe les modalités du rite funéraire en considérant notamment le soin apporté à l'enfant, sa position dans la tombe et la localisation de son inhumation pour déterminer si le traitement post-mortem semble cohérent par rapport aux pratiques de la société à laquelle l'individu appartient et par rapport à son statut de nourrisson. Dans un deuxième temps, l'âge des individus périnataux est estimé à partir de la longueur des os exhumés. Puis, à partir de cette information, on peut étudier de façon statistique la distribution de l'âge à la mort, en partant de l'hypothèse communément acceptée que les infanticides et sacrifices d'enfants se font traditionnellement dans les 48 heures qui suivent la naissance et, en tenant compte des modèles connus, définir si cette distribution présente un pic de mortalité périnatal anormalement élevé (Mays et Evers, 2011) ou, au contraire, si elle a un aspect naturel avec une répartition plus dispersée (en fonction du modèle démographique de la population, de la taille de la population, par exemples).

Cette approche courante présente néanmoins deux limites importantes liées à l'étude du squelette. La première de ces limites réside dans la précision de l'estimation de l'âge osseux. La croissance à la naissance étant particulièrement rapide ou pourrait espérer une bonne précision de l'estimation de l'âge avec une marge d'erreur autour de deux semaines (Scheuer *et al.*, 1980 ; Smith et Kahila, 1992). Cependant, nous devons tenir compte du fait que les facteurs génétiques, l'âge de la mère, le nombre de grossesses antérieures, la santé de la mère, ou encore son activité sont des facteurs qui influent le poids et la taille du fœtus en gestation et du nourrisson à la naissance. En outre, 43 % des enfants naissent entre 7 et 9 mois de gestation, ce qui peut faire varier la taille d'un enfant à la naissance de 50 % même au sein d'une fratrie exposée à des conditions homogènes (Smith et Avishai, 2005). À ces variabilités biologiques s'ajoute une seconde limite avec la question de la conservation de l'os dont la minéralisation chez les enfants est largement inachevée, ce qui peut impliquer certaines lacunes de lisibilité des extrémités osseuses,

de reconnaissance d'éléments caractéristiques, accentuant l'imprécision de l'estimation de l'âge. En outre, il faut avoir conscience que la pratique de l'infanticide n'est détectée par cette approche que s'il est pratiqué avec une fréquence suffisante, capable de rendre la concentration de l'âge à la mort statistiquement significative (Smith et Avishai, 2005).

Dans le cadre de ces réflexions sur la détermination de la pratique de l'infanticide, Smith et Avishai (2005) proposent l'utilisation de la ligne néonatale en histologie dentaire pour renforcer l'argumentation lorsque cette question peut se poser sur un site archéologique.

Schwartz et ses collègues (2010) ont tenté d'éclaircir la question du sacrifice infantile chez les Carthaginois anciens, réputés pour avoir eu recours à ce genre de pratiques de façon fréquente et systématique. Comme dans la plupart des cas, les premières hypothèses s'appuient sur une citation décrivant une scène avec des enfants jetés vivants au bûcher²⁸ et un extrait parlant d'enfants égorgés avant la crémation, sans plus de précisions²⁹. Ces arguments sont rapprochés d'un passage de l'Ancien Testament évoquant la compromission des progénitures et particulièrement des premiers-nés mâles, ainsi que de la découverte archéologique d'un regroupement de très jeunes enfants³⁰, ce qui oriente facilement les chercheurs vers l'interprétation du sacrifice. Cependant, un examen histologique des dents d'enfants périnataux, après exclusion des périnataux dont la masse osseuse particulièrement faible laisse penser qu'ils sont morts *in utero* avant le terme, a permis d'identifier la ligne néonatale sur une bonne proportion de ces nouveau-nés révélant ainsi qu'ils ont survécu au moins 7 jours. Il ne reste alors qu'un petit nombre d'enfants morts trop peu de temps après la naissance, moins de 7 jours après, pour déterminer s'ils ont été tués à la naissance, mais ce pourcentage d'incertitude reste trop faible pour être utilisé et les résultats de cette démarche tendent à infirmer l'interprétation du sacrifice infantile normalement pratiqué dans un délai maximum de deux jours après la naissance (Smith et Avishai, 2005).

L'examen de la ligne néonatale des périnataux ne permet pas de distinguer la pratique du sacrifice dans une démarche rituelle ou de l'infanticide pour des raisons de malformations, de sélection du sexe ou de régulation des naissances, par exemple. La ligne néonatale ne peut, à elle seule, déterminer si la mortalité infantile au sein d'un site est naturelle ou forcée. Son absence signifie que le nourrisson n'a pas survécu au-delà du 7^e jour, mais il n'est pas possible de dire s'il est mort *in utero* ou *ex utéro*. Sa présence est une preuve solide que l'enfant a vécu au moins 7 jours, ce qui permet d'infirmer avec une quasi-certitude l'infanticide. À ce titre, la ligne néonatale est un indice à examiner dans ce type de problématique, à côté des observations du rite funéraire, du développement osseux et des analyses statistiques de l'âge de distribution à la mort pour un protocole optimisé d'identification de l'infanticide.

II.2.2.3.2.2. Implications médico-légales

Indépendamment de l'aspect et de la position individuelle de la ligne néonatale, son identification pourrait s'insérer dans des démarches médico-légales, notamment dans le cas du

28. Kleitarchos, III^e siècle BC.

29. Diodore de Sicile, I^{er} Siècle BC.

30. Dont on ne peut pas, anthropologiquement déterminer l'âge et le sexe.

syndrome de la mort subite du nourrisson. Dans le cas d'individus décédés au cours de la première année de la vie sans explication apparente, la mort subite du nourrisson est parfois invoquée, par défaut d'informations pouvant aboutir à un diagnostic. Cependant, l'absence d'explication apparente peut mettre en cause le comportement de la mère. On peut alors envisager dans ces cas de décès un examen des stries pathologiques de Retzius de l'émail prénatal, donc entre la jonction amélo-dentinaire et la ligne néonatale, pour mettre en évidence d'éventuelles perturbations pouvant traduire l'état de l'enfant avant la naissance et rendre hors de cause les intentions de la mère. Cependant, il faut être prudent avec cette utilisation, car il s'agit d'un diagnostic par exclusion et l'absence de signes de troubles prénataux ne signifie pas systématiquement que le décès du nourrisson a des origines volontaires. De plus, cette application de la ligne néonatale reste encore plutôt théorique, car aucune étude n'existe sur la qualité de l'émail prénatal sur des victimes du syndrome de la mort subite du nourrisson. La ligne néonatale et l'histoire antemortem représentent donc des éléments incomplets à rapprocher des autres résultats de l'autopsie, néanmoins, précieux pour les investigations médico-légales dans les cas de mort subite du nourrisson (Skinner et Dupras, 1993), démarche positivement éprouvée par une étude de Teivens *et al.* (1996) qui fournit de très bonnes corrélations. En pratique, les examens médico-légaux traditionnels concernant la mort subite du nourrisson n'ont pas recours à ces éléments et il n'est pas démontré que cela soit réellement utilisable.

En revanche, l'utilisation des marqueurs histologiques de la dent commence à être suggérée dans les démarches d'estimation de l'âge pour les périodes prénatale, natale et postnatale dans le cadre des examens médico-légaux. Ce protocole peut être utile lorsque l'identification de l'individu présente des obstacles ou lorsqu'il existe des implications juridiques en cas de fœticide ou de meurtre d'un nouveau-né (Singla *et al.*, 2018).

Pour conclure sur le stress et les défauts d'émail, on retient que la relation entre la fréquence des perturbations physiologiques, manifestées par des défauts de formation de l'émail dentaire (en plus des stress couramment rencontrés associés à la naissance et au sevrage) et l'augmentation du taux de mortalité peut s'expliquer par trois hypothèses de mécanismes (Armelagos *et al.*, 2009). Dans une première supposition, il se pourrait que la prédisposition de certains individus à développer des défauts de l'émail reflète également une plus grande sensibilité à d'autres facteurs, qui peuvent être impliqués dans la santé et le décès de l'individu adulte. Dans ce cas, les hypoplasies de l'émail et les stries pathologiques de Retzius traduiraient une sensibilité biologique préexistante individuelle. Une deuxième suggestion ferait envisager que les données soient interprétées comme indiquant un schéma différentiel d'ordre social, culturel et une exposition aux facteurs de stress environnementaux. Dans ce raisonnement, les sujets qui présentent des défauts d'émail ont connu des niveaux de stress élevés entre la naissance et l'enfance. Les défauts de la couronne dentaire représentent alors les conditions défavorables de développement de l'enfant. Une troisième hypothèse avance l'idée selon laquelle les stress impliquant des traces physiologiques seraient en mesure de diminuer les capacités des individus à d'autres facteurs de stress (ce qui est cohérent avec l'hypothèse de Barker). Les connaissances actuelles ne permettent pas de déterminer la ou les hypothèses à privilégier.

La grande diversité des facteurs de stress pouvant initier des perturbations du cycle régulier des améloblastes, à l'origine des défauts de l'émail dentaire, est largement signalée dans la littérature. En effet, l'observation des hypoplasies de l'émail dentaire et des stries pathologiques de Retzius ne permettent pas de distinguer les stress pathologiques, les stress psychologiques et les stress alimentaires. De plus, il n'existe pas de niveau de seuil pour l'apparition des défauts d'émail en fonction du temps et de l'intensité du stress. Pour ces raisons, les hypoplasies de l'émail dentaire doivent être considérées comme des indicateurs de stress non spécifiques. Ce constat justifie l'orientation des recherches sur l'alimentation vers les analyses chimiques sur les restes humains, afin d'examiner la santé des populations historiques, au regard de l'influence alimentaire.

Les questions qui se posent désormais concernent les problèmes d'identification des marqueurs de croissance, leur utilisation, et leur relation avec les signatures chimiques.

11.3. LES OUTILS PHYSICO-CHIMIQUES POUR L'ÉTUDE DES TISSUS DURS DU CORPS HUMAIN

Déterminer l'alimentation des populations est depuis plusieurs décennies une question importante pour les archéologues, anthropobiologistes et d'autres chercheurs intéressés par le passé culturel et biologique de l'homme. En effet, les considérations alimentaires jouent un rôle important pour de nombreuses interrogations telles que l'origine et le développement de l'agriculture, l'évolution et les stratégies d'adaptation humaine, les évolutions morphologiques dentaires et crâniofaciales (Smith et Kavanagh, 1982), les relations entre l'homme et son milieu, les types de régimes alimentaires, l'état sanitaire, les carences alimentaires, ou encore la démographie.

Il existe plusieurs méthodes traditionnelles visant à reconstituer les comportements alimentaires des populations anciennes. Elles s'appuient sur les études de la faune (ossements animaux) et de la flore (pollens et phytolithes). Ces vestiges permettent de fonder une hypothèse sur les ressources présentes dans l'environnement du groupe humain étudié. L'examen des déchets retrouvés présentant des traces de préparation (analyse taphonomique des restes culinaires) peut également fournir des indices sur les pratiques alimentaires. Dans ces démarches, les interprétations sont biaisées, car l'enregistrement archéologique défavorise les restes périssables. De plus, les restes fauniques issus des fouilles en général représentent l'alimentation de la période d'occupation du site étudié qui peut être de courte durée et représentative des pratiques de la société (Tauber, 1981). Les archéologues peuvent aussi avoir recours à l'analyse fonctionnelle des outils de préparation des aliments (difficiles à quantifier en proportions, notamment le rapport en proportion viande/végétaux), ainsi qu'à l'examen des pathologies induites par des carences alimentaires, mais ces dernières ne peuvent pas nous renseigner sur l'alimentation des individus en bonne santé.

Il est important de remarquer que toutes ces techniques sont dépendantes des faibles traces archéologiques laissées par ces matériaux et des hypothèses sur lesquelles est fondée l'interprétation de l'utilisation de l'artefact (Sillen et Kavanagh, 1982). Ainsi les reconstitutions possibles à partir des artefacts sont d'ordre qualitatif.

Conscients des lacunes de ces méthodes, les chercheurs en anthropologie biologique ont développé, ces dernières années, des démarches permettant d'interpréter, à partir de l'étude du squelette, les traces indirectes, celles résultant par exemple des répercussions de certains régimes alimentaires inappropriés, ou encore les traces directes des signaux chimiques laissés par les éléments présents dans les divers apports alimentaires, en tenant compte de l'assimilation par l'organisme. Les raisonnements ainsi étayés s'appuient sur des éléments chimiques, constituant l'ensemble des entités chimiques (atomes, isotopes, ions) caractérisé par un même nombre de protons dans leur noyau atomique (qui définit leur numéro dit atomique). Leurs propriétés chimiques sont définies par leur structure électronique, qui est elle-même occasionnée par le nombre de protons. La piste d'étude offerte par les enregistrements chimiques du squelette se divise en deux approches, d'une part l'examen des mesures isotopiques (De Niro et Epstein, 1978; 1981; Lee-Thorp *et al.*, 1989; Bocherens, 1999; Balasse, 2002; Katzenberg, 2008) et, d'autre part, l'examen des proportions élémentaires dans la composition du squelette (Sillen et Kavanagh, 1982; Klepinger, 1984; Gilbert, 1994; Pharswan et Farswan, 2011).

Une appréciation attentive de ces méthodes nous permettra d'avoir une idée des informations potentielles offertes par l'examen du squelette en paléonutrition.

11.3.1. Isotopes stables et paléonutrition

Les os et les dents enregistrent dans leur composition chimique l'origine des matériaux à partir desquels ils sont synthétisés et donc certaines caractéristiques sur l'environnement et la nourriture consommée, notamment les signatures isotopiques. Les analyses isotopiques appliquées aux restes humains livrent des informations sur l'alimentation (Bocherens, 1999; Herrscher, 2003) et les migrations/mouvements saisonniers des populations anciennes (Muller, 2003; Schwarcz et Schoeninger, 1991). Les isotopes sont des formes différentes d'un même élément avec le même numéro atomique, mais se distinguent par leur nombre de neutrons. Ils peuvent donc être identifiés par leur poids atomique. Les scientifiques utilisent le ratio de deux isotopes d'un même élément (Schwarcz et Schoeninger, 1991). Les isotopes stables peuvent identifier des mécanismes physico-chimiques ainsi que des sources (alimentation et environnement) à l'origine de certaines signatures chimiques spécifiques. La composition isotopique d'un élément n'est modifiée que lors de certains processus (fusion, évaporation, condensation, photosynthèse, digestion, par exemple), où l'inégalité des masses entre deux isotopes d'un même élément provoque des différences de propriétés physico-chimiques (Polet, 2008).

11.3.1.1. Historique des recherches

L'idée selon laquelle les signatures isotopiques du carbone dans les restes de mammifères peuvent révéler une information alimentaire sur ces derniers, est envisagée dès les années 1960. Parker (1964) procède à une étude à partir de l'analyse isotopique du carbone dans les plantes et chez les animaux marins. La signature isotopique du squelette est acquise par la consommation de plantes, ou d'animaux, ou d'insectes qui mangent ces plantes. Ainsi, les informations alimentaires sont encodées dans le rapport isotopique du carbone contenu dans le carbonate des tissus (Merwe

et Vogel, 1978). Mais il faut attendre les années 1970 pour que cette hypothèse soit appliquée à des études sur la paléo-alimentation (DeNiro et Epstein, 1978) qui mettent en évidence la relation entre les isotopes stables du carbone dans l'os animal et l'alimentation. Cette relation se traduit par un enrichissement en ^{13}C par rapport à l'alimentation.

La démarche appliquée au carbone est ensuite étendue à l'azote par l'utilisation du ratio $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$. Ces principes ont servi de base à DeNiro et Epstein, (1981) pour proposer, dans la foulée, une reconstitution du régime alimentaire des anciens Mexicains³¹. Ils examinent les isotopes de l'azote sur les animaux et la relation isotopique entre les plantes ingérées et leurs consommateurs. Pour restituer l'alimentation des hommes, ils s'appuient sur l'analyse des isotopes stables de l'azote qui sont associés à la proportion de l'alimentation non protéique dans le collagène osseux. Dans cette étude, la composition isotopique coïncide avec une subsistance dominée par le maïs.

Les signatures isotopiques de l'azote ont également été identifiées comme des marqueurs des pratiques d'allaitement et de sevrage (Fogel *et al.*, 1989 ; Katzenberg *et al.*, 1993). Ces découvertes sont rapidement suivies d'explorations qui ont permis d'élargir le champ des recherches à d'autres spécificités alimentaires, telle qu'une forte dépendance alimentaire aux produits marins, ou dulcicoles (Polet, 2008), par exemple.

Des études postérieures confirment les travaux plus anciens, améliorent le protocole scientifique et élaborent les réajustements nécessaires à une meilleure interprétation des informations historiques et préhistoriques (Bocherens, 1999 ; Herrscher, 2003 ; Katzenberg, 2008).

Par la suite l'utilisation des signatures isotopiques est élargie à des thématiques plus diversifiées comme l'étude des migrations (Tykot, 2006 ; Jaouen *et al.*, 2015) et du climat (Evans *et al.*, 2006 ; Chenery, 2010).

Le répertoire des isotopes stables exploités en archéologie dans le but d'étudier l'alimentation et les migrations s'allonge avec les recherches. Le ratio $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ a été exploité pour identifier des régimes alimentaires plutôt carnivores, omnivores ou végétariens (Sillen et Hall, 1995). En plus du strontium, on utilise le soufre pour déterminer l'origine terrestre, dulcicole ou marine de la nourriture (Richards *et al.*, 2003) et l'oxygène qui varie en fonction de l'origine géographique de l'eau (Dufour et Gerdeaux, 2001 ; Polet, 2008). Les interrogations concernant les migrations peuvent être abordées, elles aussi, par l'utilisation du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Schweissing, 2003 ; Chenery, 2010), et par l'étude associée des isotopes de l'hydrogène et/ou du soufre, associés aux isotopes du carbone et de l'azote (Richards *et al.*, 2003 ; Sharp *et al.*, 2003). L'oxygène est utilisé comme indicateur climatique (Evans *et al.*, 2006 ; Chenery, 2010). En effet, les compositions isotopiques de l'oxygène se sont révélées directement liées au climat, à la température et à l'humidité de l'environnement local. Elles ont également été exploitées dans le cadre de travaux sur la saisonnalité des coquilles et des animaux (Tykot, 2006). Le plomb quant à lui est utilisé, comme révélateur de pollution et d'activité humaine (Molleson, 1986).

En ce qui concerne les premières explorations paléobiochimiques en vue d'une application pour l'étude de l'alimentation ont commencé avec l'analyse du collagène osseux, ce qui s'explique par une connaissance et une maîtrise de la méthode d'extraction, couramment utilisée pour les

31. Sur le site de Tehuacan, dans la vallée de Mexico.

datations radiocarbone (Herrscher, 2003). Avec le développement de cette méthode, les tissus analysés se diversifient. En plus du collagène, les fractions minérales osseuses et dentaires sont désormais utilisées (Balasse, 2002 ; 2003). Ces deux dernières décennies, en particulier, les études isotopiques se sont tournées vers des mesures de variations internes d'une dent, sur les phases organiques et minérales de la dentine et l'émail (pour des recherches sur le climat, les migrations et l'alimentation).

Dans le cadre des reconstructions paléalimentaires, les analyses isotopiques des restes humains sont généralement complétées par des prélèvements fauniques, visant à améliorer l'interprétation des signatures chimiques en fonction de la position des espèces dans la chaîne alimentaire locale (Phaff, 2012 ; Buzon et Simonetti, 2013).

11.3.1.2. Principes biologiques exploités : biopurification (du calcium), niveaux trophiques et chaîne alimentaire

Les analyses isotopiques en archéologie et paléanthropologie s'appuient sur les modifications qui se produisent lors de certains processus naturels biologiques, comme la photosynthèse, les réactions métaboliques, ou la digestion. Lors d'une réaction chimique, un isotope plus léger réagit plus vite qu'un isotope plus lourd, et se trouve en plus nette abondance dans la nature. De ce fait, le produit résultant de cette transformation sera plus largement enrichi par l'isotope le plus léger (Polet, 2008). Par exemple, le carbone et l'azote présentent deux isotopes stables chacun : ^{12}C , ^{13}C et ^{14}N , ^{15}N . Les isotopes lourds (^{13}C et ^{15}N) sont significativement moins abondants dans la nature que les isotopes légers (^{12}C et ^{14}N) (Herrscher, 2003).

La réflexion sur l'interprétation des analyses isotopiques est essentiellement fondée sur la notion de chaîne trophique et sur la place occupée par un groupe d'individus dans ce système (niveau trophique). Elle s'appuie sur le principe de la biopurification. Le terme de biopurification définit la propension de l'organisme (des plantes et des animaux) à l'assimilation préférentielle du calcium au détriment des autres éléments. Ce phénomène se produit à chaque étape de la chaîne alimentaire et se traduit par des ratios en diminution par rapport aux aliments consommés.

Les isotopes du carbone et de l'azote analysés conjointement sont complémentaires et livrent des informations sur le niveau trophique d'un groupe de sujets dans la chaîne alimentaire. L'avancée des travaux sur cette question a très vite permis de distinguer les niveaux trophiques des herbivores par rapport aux carnivores grâce aux rapports isotopiques de l'azote, ce qui autorise, dans certains cas, une estimation de la proportion de viande consommée dans une population. Ces interprétations sont permises par les propriétés des isotopes du carbone et de l'azote qui ne subissent pas de modifications de concentration après la mort de l'individu, ainsi les quantités mesurées aujourd'hui sur des échantillons archéologiques correspondent aux compositions isotopiques du vivant des individus étudiés (Froment et Ambrose, 1995 ; Bocherens, 1999 ; Herrscher, 2003).

Le rapport du $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ présent dans les plantes et leurs consommateurs dépend du type de photosynthèse dont on distingue deux modes principaux pour les plantes terrestres. Les plantes dotées de C_4 , c'est-à-dire les plantes herbacées des milieux tropicaux chauds et secs, sont plus

riches en ^{13}C que les plantes dominées par le C_3 . Les plantes riches en C_3 correspondent plutôt aux arbres des milieux tempérés et froids (Bocherens, 1997 ; Filoux, 2011). Les valeurs de ^{13}C de la matière organique d'un animal présentent un enrichissement assez faible, entre 0 et 1 ‰, par rapport à celles de son alimentation (DeNiro et Epstein, 1978). La teneur en ^{13}C des espèces appartenant à un écosystème est donc liée à celle des plantes qui constituent la base des niveaux trophiques.

L'azote a deux isotopes stables ^{15}N et ^{14}N avec une abondance naturelle, respectivement, de 0,36 ‰ et 99,64 ‰. L'azote se trouve uniquement dans la matière organique, il n'est donc pas exploitable dans l'émail humain, trop minéralisé. L'augmentation des rapports isotopiques de l'azote est d'environ 3-5/6 ‰, de l'alimentation au consommateur (Bocherens et Ducker, 2003). Ainsi, les valeurs de cet isotope sont plus élevées pour l'individu en bout de chaîne alimentaire, et plus la chaîne est longue plus les valeurs sont élevées. Chez l'homme les signatures isotopiques de l'azote dépendent des pourcentages relatifs des aliments et des animaux à base de plantes dans l'alimentation. Pour ce qui est du milieu aquatique, les compositions isotopiques de l'azote y sont supérieures par rapport au milieu terrestre. Par conséquent, on distingue trois niveaux de signatures isotopiques. Un premier rang de composition de l'azote plutôt faible est associé à une alimentation herbivore. Un rang intermédiaire correspond à un régime alimentaire carnivore et un rang élevé de la composition de l'azote est révélateur de la consommation de vertébrés marins (Froment et Ambrose, 1995 ; Herrscher, 2003 ; Clayton *et al.*, 2006).

Le rapport radiogénique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ a lui aussi été exploré et utilisé comme indicateur alimentaire (Bocherens, 1999 ; Jaouen *et al.*, 2015). Les rapports de ces isotopes lourds de strontium naturel présent dans l'os sont identiques à ceux de la géologie sous-jacente puisqu'ils ne subissent pas de fractionnement biologique. Si la zone géographique présente un type de roche en plus grande proportion avec des rapports isotopiques de strontium différents, alors la source régionale de la matière alimentaire peut être identifiée. Cette méthode s'est révélée particulièrement utile dans son application visant à approcher la proportion de nourriture protéique dans l'alimentation, distinguer les ressources alimentaires terrestres et marines (Elliott, 1993), ou détecter la consommation du lait maternel (Herrscher, 2013).

En ce qui concerne le traitement des données, le problème qui se pose a trait aux faibles différences de valeurs des ratios $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ entre les échantillons. Afin de percevoir les très faibles variations qui ont lieu lors du fractionnement isotopique, les données sont exprimées en delta pour mille (δ ‰). Elles correspondent ainsi au rapport de l'isotope lourd sur l'isotope léger, en fonction de leur standardisation à partir d'un étalon international (Herrscher, 2003, Tykot, 2006).

L'influence des conditions environnementales locales, telles que l'aridité du climat ou l'acidité des sols, entre autres facteurs, peut faire varier les gammes de concentrations associées à un niveau trophique (Bocherens, 1997).

La restitution des régimes alimentaires des populations archéologiques à partir des analyses isotopiques s'appuie sur la comparaison des signatures isotopiques des ressources alimentaires et celles des hommes qui les consomment. Pour ce faire, ce type d'étude repose sur la caractérisation de l'écosystème en tenant compte, autant que possible, des ressources alimentaires disponibles. Dans ce cadre, des modèles mathématiques sont développés pour estimer les valeurs isotopiques

attendues en fonction de l'alimentation dominante dans le régime alimentaire d'un individu (Herrscher et Goude, 2015).

L'application isotopique la plus récemment expérimentée concerne notre sujet puisqu'elle s'intéresse à la corrélation entre l'absorption du lait maternel et l'augmentation en ^{15}N par rapport à la nourriture de la mère, ce qui permet d'éclairer la discussion sur la durée de consommation (exclusive et/ou partielle) du lait maternel, l'allaitement maternel constituant dans ce contexte un cas particulier du saut trophique (Herrscher, 2013 ; Tsutaya et Yoneda 2015, Herrscher *et al.*, 2019).

II.3.1.3. Le cas particulier de l'allaitement maternel

Compte tenu de l'importance de la santé du jeune enfant sur le statut de la santé générale et la survie de la population, de nombreuses approches anthropologiques ont été appliquées dans le cas particulier de la reconnaissance des modèles d'allaitement et de sevrage dans les populations anciennes. Les méthodes traditionnelles, telles que l'étude du rythme de la mortalité infantile et de la paléodémographie, ou l'examen des indicateurs non spécifiques de stress sur les tissus durs, comme les hypoplasies (*cf. supra* II. 2.2.1) comportent un certain nombre de biais pour l'interprétation et des facteurs d'incertitude. En effet, des problèmes méthodologiques, comme les variations dans le développement des tissus durs, les résultats contradictoires, les documents contradictoires, les biais liés à l'échantillon lui-même comme la sous-représentation des immatures en contexte archéologique, ou l'écart entre la santé réelle de l'individu que nous observons sur le squelette et les signes ostéologiques qu'il présente (problème connu sous le nom de « paradoxe de Wood » (Wood, 1992) ne permettent pas aux démarches traditionnelles d'être satisfaisantes pour évaluer les pratiques d'allaitement et de sevrage dans les populations anciennes.

Pour mieux comprendre les effets du comportement alimentaire sur les tissus durs, des méthodes impliquant des analyses isotopiques ont été appliquées pour tracer l'absorption du lait maternel et le sevrage définitif. Dans cette démarche, plusieurs études se sont concentrées sur les isotopes de l'azote, du carbone et de l'hydrogène. L'analyse des isotopes stables est désormais une méthode reconnue pour la détermination des modèles d'allaitement et de sevrage (Reynard et Tuross, 2015), appliquée à différentes populations issues d'aires chronologiques et géographiques (Katzenberg *et al.*, 1993 ; Katzenberg *et al.*, 1996 ; Schurr, 1997 ; Katzenberg *et al.*, 1998 ; Schurr, 1998 ; Wright et Schwarcz, 1998 ; Dittmann et Grupe, 2000 ; Dupras *et al.*, 2001 ; Mays *et al.*, 2002 ; Richards *et al.*, 2002 ; Herrscher, 2003 ; Clayton *et al.*, 2006 ; Dupras et Tocheri, 2007 ; Howcroft *et al.*, 2012 ; Fuller *et al.*, 2006a, b ; Williams *et al.*, 2005 ; Bourbou *et al.*, 2013 ; Burt, 2013).

Pour un jeune enfant, à priori nourri au sein par sa mère, la seule source de l'azote alimentaire provient du lait de celle-ci. La teneur en azote du collagène de l'enfant est donc liée à l'allaitement maternel. Dans ce contexte, l'allaitement maternel constitue un saut trophique intéressant dans lequel la mère allaitante est assimilée à un « producteur » et le lait correspond à la « proie » qui nourrit le jeune enfant ou « consommateur » (Herrscher, 2003). Cette vision trophique de l'allaitement a permis de développer un protocole dans le but d'identifier les modalités des

pratiques réelles des populations du passé dans l'intimité, au-delà des traditions, des écrits et des images politiques, ainsi que des discours médicaux et religieux. L'azote est le premier marqueur isotopique exploité intensivement pour la détection des modèles d'allaitement (DeNiro et Epstein, 1981; Katzenberg *et al.*, 1993; Katzenberg *et al.*, 1996; Schurr, 1997; Herring *et al.*, 1998; Schurr, 1998; Dupras *et al.*, 2001; Richards *et al.*, 2002; Fuller *et al.*, 2006a, b; Dupras et Tocheri, 2007). En général, les ratios isotopiques de l'azote augmentent de 2 à 3 ‰ à chaque niveau trophique (DeNiro et Epstein, 1981; Tykot, 2006). Tuross et ses collègues (1993) sont parmi les premiers à démontrer que les isotopes de l'azote varient avec l'âge dans les quelques premières années de la vie. À partir de cette observation ils proposent une relation de ces variations avec l'allaitement et le sevrage, en mettant évidence une différence de niveau trophique en passant de la mère à l'enfant. L'azote est actuellement la technique isotopique la mieux établie pour l'identification de ce phénomène (Schurr, 1997; Dupras et Tocheri, 2007). À la naissance, un enfant présente dans ses tissus un niveau de l'azote-15 similaire à celui de sa mère. Par le biais de l'alimentation, qui pour les nouveau-nés consiste le plus souvent en une nourriture lactée, la teneur en ^{15}N augmente chez l'enfant de 1 à 4 ‰ par rapport à la mère (Katzenberg *et al.*, 1993; Katzenberg *et al.*, 1996; Dupras et Tocheri, 2007). Cette augmentation est soutenue par l'absorption complète, sans discrimination, de l'azote contenu dans le lait par le système digestif de l'enfant (Fuller *et al.*, 2006a, b). Le sevrage constitue un changement de régime alimentaire résidant dans le passage plus ou moins progressif de l'alimentation lactée maternelle à une subsistance solide similaire à celle de l'adulte (Dettwyler, 1995; Herring *et al.*, 1998). Au moment de la supplantation, les apports extérieurs de l'alimentation ne sont plus aussi élevés en azote et continuent à diminuer jusqu'à la cessation complète de l'allaitement maternel où les niveaux ^{15}N se stabilisent à un faible niveau de concentration similaire à celui de l'adulte (Schurr, 1998; Dupras *et al.*, 2001; Dupras et Tocheri, 2007). La comparaison des valeurs de l'azote à plusieurs moments de l'enfance, entre les différentes dents (des deux dentitions) et à la fois sur la dentine et l'émail, permet d'établir une différence de régime alimentaire à différents moments de la vie de l'enfant (Dupras et Tocheri, 2007). Les isotopes stables de l'azote déterminent un modèle de sevrage en estimant la dépendance proportionnelle à l'apport protéique, venant du lait maternel, et aux protéines dérivant de l'alimentation solide (Schurr, 1998). Cependant, il arrive que la quantité de l'azote fluctue sous l'influence du stress ou augmente dans le cas de sujets porteurs de certaines pathologies, indépendamment de l'alimentation.

De récentes recherches ont également signalé l'intérêt du changement dans les valeurs de ^{13}C pour examiner les pratiques d'allaitement et de sevrage (Wright et Schwarcz, 1998; Wright et Schwarcz, 1999; Dupras *et al.*, 2001; Richards *et al.*, 2002; Fuller *et al.*, 2006a, b, Herrscher *et al.*, 2019). Contrairement à l'azote, qui se trouve uniquement dans les protéines alimentaires, le ^{13}C se trouve dans toutes les fractions alimentaires et peut être légèrement sensible aux variations en glucides et en lipides. Les valeurs $\delta^{13}\text{C}$ sont moins sensibles aux effets du niveau trophique que le ^{15}N , elles sont donc plus étroitement resserrées que le ^{15}N (Clayton *et al.*, 2006). Les isotopes stables du carbone participent à la distinction d'un régime alimentaire à partir de l'importance des apports en C_3 et en C_4 , détectés sous forme de ^{13}C . En ce qui concerne le lait maternel, il est riche en lipides et pauvre en C_3 et en C_4 . On s'attend donc à ce qu'un allaitement maternel exclusif génère

une diminution des valeurs ^{13}C dans l'organisme de l'enfant. De même, lorsqu'une nourriture autre que le lait maternel est introduite dans l'alimentation de l'enfant, ce dernier consomme moins de lait maternel et, en général, une quantité accrue de végétaux et/ou de lait provenant d'animaux, tous deux riches en C_4 (Dupras *et al.*, 2001). L'introduction d'une alimentation mixte est supposée se traduire par une augmentation des valeurs du ^{13}C (Wright et Schwarcz, 1998; Wright et Schwarcz, 1999; Dupras *et al.*, 2001; Balasse, 2002; Richards *et al.*, 2002; Clayton *et al.*, 2006; Fuller *et al.*, 2006a, b). En ce qui concerne les études sur l'allaitement maternel, les recherches sur l'utilisation du carbone sont actuellement moins abouties que pour l'azote. La confrontation de ces deux exemples souligne l'importance des informations complémentaires sur la société étudiée pour formuler une interprétation cohérente des modèles d'allaitement à partir des analyses isotopiques.

Lorsque la nourriture solide est introduite dans l'alimentation, les valeurs de ^{13}C rattrapent le niveau maternel plus rapidement que l'azote. Cette observation suggère que le carbone-13 pourrait être utilisé comme indicateur de l'introduction d'aliments solides dans l'alimentation, alors que l'azote reflèterait plutôt la durée totale de l'allaitement maternel (exclusif et complété). Cependant, des expérimentations supplémentaires, sur de plus larges échantillonnages incluant des individus contemporains sont nécessaires pour valider cette interprétation (Fuller *et al.*, 2006a, b).

Les isotopes de ^{18}O des tissus biologiques, telles que les apatites carbonatées de l'émail dentaire reflètent étroitement, par leurs valeurs, l'origine géographique de l'eau absorbée sous forme liquide et, dans une moindre mesure, l'oxygène assimilé par le biais de la nourriture (Wright et Schwarcz, 1998). ^{18}O varie en fonction de la latitude, à cause du cycle mondial des précipitations et de la température de l'air (plus il est froid, moins l'eau contient de ^{18}O) (Polet, 2008). À partir de cette observation, les signaux isotopiques de l'oxygène ont été utilisés avec succès sur des os de mammifères pour les reconstructions paléoclimatiques et humains pour des travaux sur les migrations. Dans le cas de l'allaitement maternel exclusif, les valeurs ^{18}O reflètent la concentration du lait maternel formé à partir de l'environnement aqueux de l'organisme de la mère. L'oxygène dans l'eau du corps est enrichi en ^{18}O par rapport à l'eau potable absorbée (à cause de l'élimination préférentielle de la vapeur de H_2^{16}O). De ce fait, le lait maternel est plus riche en ^{18}O que l'eau disponible dans l'environnement. On peut donc s'attendre à ce que les individus nourris au lait maternel présentent des compositions élevées en oxygène-18, ce qui nous permet de considérer cet isotope comme indicateur de l'allaitement maternel et du sevrage à partir des restes humains (Wright et Schwarcz, 1998). Lorsqu'un enfant survit au processus de sevrage, ses valeurs ^{18}O changent en raison de l'introduction d'autres sources d'eau dans son alimentation. Une fois le processus de sevrage achevé, les valeurs commencent à atteindre des niveaux similaires à ceux des adultes de la même population. Ce signal chimique associé au sevrage a été expérimenté sur plusieurs populations humaines archéologiques (Wright et Schwarcz, 1998, 1999; White *et al.*, 2004; Williams *et al.*, 2005; Dupras et Tocheri, 2007).

L'examen combiné des ratios isotopiques du carbone, de l'azote et de l'oxygène permet une compréhension plus nuancée du processus de sevrage. Les valeurs de ^{13}C sont révélatrices des apports alimentaires autres que le lait maternel. Elles sont donc des indicateurs de l'âge de la

supplantation et de la nature de l'alimentation introduite (Katzenberg *et al.*, 1993, Fuller *et al.*, 2006a, b). De leur côté, l'oxygène et l'azote nous renseignent sur l'âge du sevrage complet. Le ^{18}O traduit le remplacement du lait maternel par une source d'eau, ce qui en fait un indicateur du sevrage définitif (Wright et Schwarcz, 1998 ; Dupras et Tocheri, 2007), pendant que l'azote-15 trace la suppression progressive des protéines du lait maternel (Howcroft *et al.*, 2012). Les analyses isotopiques, dans le cadre des réflexions sur les pratiques d'allaitement et de sevrage, appliquées à l'échelle de l'individu dans les populations historiques, dans un premier temps, visent souvent à définir un modèle d'allaitement et de sevrage (Herring *et al.*, 1998). La définition de modèle permet des comparaisons entre différents groupes selon la période chronologique (Herrsher, 2003), l'aire géographique, ou le sexe de l'enfant (Eerkens et Bartelink, 2013)

II.3.1.4. Les limites de l'application des analyses isotopiques

Les limites de l'application des analyses isotopiques aux échantillons archéologiques comprennent à la fois les obstacles imposés par l'utilisation de l'os comme matériau, et celles qui sont inhérentes à la démarche analytique et à ses interprétations.

Le premier problème posé par l'emploi de l'os est celui de l'âge de l'individu. En effet, la teneur en carbonate dans le minéral osseux croît avec l'âge chez les vertébrés. L'interprétation des variations des quantités de carbone dans l'os doit donc tenir compte de l'âge de l'individu, mais nous ne pouvons pas faire corrélérer avec précision un âge avec une valeur absolue de carbone.

Le turn-over du renouvellement osseux, lié au mécanisme biologique de l'os, est le second problème qui constitue une entrave aux analyses isotopiques (Herrscher, 2003 ; Song, 2004). L'activité des ostéoblastes producteurs des cellules matricielles osseuses et des ostéoclastes qui participent à la résorption des tissus osseux, ainsi que celles des odontoblastes, sont largement responsables du développement et du renouvellement continu des os du squelette. Ainsi, la croissance et le renouvellement osseux sont sous le contrôle de leur action conjointe, laquelle dépend de certains facteurs comme l'âge, le sexe ou d'éventuelles pathologies. Si le turn-over ne permet pas de connaître avec précision la période de vie étudiée, il semblerait que les signaux analysés dans ce type de démarches correspondent approximativement aux 10 dernières années de la vie de l'individu (Hedges *et al.*, 2007). Cette méthode se limite donc à la fin de la vie de l'individu ce qui rend impossible toute identification d'éventuels changements de régime alimentaire plus précoce, si le squelette examiné n'est pas celui d'un jeune immature.

Ces problèmes ne se posent évidemment pas pour l'émail dentaire qui ne se renouvelle plus et ne subit aucune modification chimique une fois mature et définitivement calcifié. Cette différence de rythme de formation du tissu entraîne des discordances chronologiques qui peuvent laisser un laps de temps mal défini dépourvu d'informations. Pour ces raisons, elle empêche de procéder à un double échantillonnage de comparaison impliquant l'os et l'émail pour l'étude des transitions alimentaires, en dehors des jeunes enfants. De plus, le renouvellement osseux ne s'effectue pas au même rythme dans toutes les parties osseuses, et plus le renouvellement est rapide, plus les enregistrements se font rapidement. On note, en particulier, une différence flagrante entre l'enregistrement des diaphyses et celui des métaphyses, ou encore en fonction de la densité de

l'os, compact ou spongieux (Pate et Hutton, 1988). La maturité de l'os est également un facteur important, et comme les enfants ont un métabolisme plus rapide cela induit un renouvellement des cellules osseuses accéléré par rapport aux adultes.

La série de limites qui suit est dépendante des contraintes méthodologiques imposées par l'analyse isotopique.

Le premier inconvénient à signaler concerne la préparation du matériel. En effet, les analyses isotopiques s'effectuent sur la matière organique de l'os et nécessitent un protocole d'extraction du collagène préalable, qui passe par une série de mises en solutions. Pour ce qui est des éléments présents dans la fraction minérale de l'os et de l'émail, la matière doit être réduite en poudre pour être analysée. Outre les contraintes techniques de préparation, ce procédé ne permet pas d'avoir une vision longitudinale, et donc d'obtenir une information chronologique précise, ni d'aborder une éventuelle évolution ou transition dans la période de vie couverte par le matériel réduit en poudre (Katzenberg *et al.*, 1993; Clayton *et al.*, 2006). De plus, la nature invasive et destructrice de cette méthode incite souvent à la sélection d'un échantillon réduit, ce qui implique un appui sur l'hypothèse de l'homogénéité de l'alimentation de la population étudiée, et donc une représentativité fiable de l'échantillon traité (Katzenberg *et al.*, 1993).

On remarque également que plusieurs facteurs sont susceptibles de biaiser l'interprétation des résultats. À la base de la détermination des niveaux trophiques fondés sur les mesures isotopiques, se trouvent les plantes pour lesquelles il est avéré que la composition isotopique en azote diffère sous l'influence des conditions écologiques locales. Dans ce cadre, on peut citer le cas des conditions climatiques extrêmes comme les zones de sécheresse ou les milieux tropicaux, ou encore l'aridité et l'acidité des sols qui sont connues pour provoquer d'importants changements sur la teneur en ^{15}N des plantes, et par conséquent sur les différents niveaux trophiques de la chaîne alimentaire. Par exemple, une espèce soumise à des conditions environnementales drastiques de sécheresse présentera une teneur significativement plus élevée en ^{15}N qu'un autre sujet d'une même espèce qui se développerait en milieu tempéré (Rodière *et al.*, 1996; cités par Bocherens, 1999; Herrscher, 2003). Les analyses isotopiques sur les os et les dents des populations archéologiques peuvent donc fournir des informations sur leur régime alimentaire, à condition que les sources de nourriture disponibles soient isotopiquement distinguables et que les paramètres et les conditions environnementales d'enregistrement soient bien connus (Bocherens, 1999). De plus, l'azote, étudié à partir du collagène, est principalement caractérisé par les protéines alimentaires absorbées (et non par l'ensemble de l'alimentation), contrairement aux apatites de l'os et de l'émail dentaire qui reflètent l'ensemble de l'alimentation (Tykot, 2006). La distinction herbivore/carnivore demeure simpliste par rapport à une réalité bien plus complexe et nuancée, avec des interprétations plus difficiles (Bocherens, 1999).

L'interprétation de l'enrichissement de certaines valeurs est sujette au débat. Par exemple, l'enrichissement en ^{13}C peut suggérer une part importante de viande dans l'alimentation de la population étudiée. Cependant, certains chercheurs estiment que ces valeurs peuvent résulter de différentes sources de C_4 comme les ongulés, les reptiles, les micromammifères, les oisillons, les œufs, les insectes, les graines, les racines et les herbes grasses. De même, les sources de C_3 sont

variées, elles comprennent les noix, les fruits, les feuilles comestibles, les racines (Lee-Thorp *et al.*, 2000). Dans ces conditions, l'interprétation des valeurs en ^{13}C demande beaucoup de prudence.

Des facteurs physiopathologiques, notamment liés à l'état de santé de l'enfant (Fuller *et al.*, 2006; Dupras et Tocheri, 2007), sont susceptibles d'entraîner une absorption anormale des éléments et par conséquent de biaiser leur interprétation (Herring *et al.*, 1998). C'est le cas par exemple de certaines maladies telles que l'ostéomyélite, ou encore la période de grossesse qui est associée, dans les études, à une diminution de l'azote (Polet, 2008).

Nos connaissances incomplètes sur le métabolisme des éléments isotopiques constituent un facteur d'incertitude. Nous avons notamment quelques lacunes sur la durée du métabolisme des isotopes stables que nous utilisons (Howcroft *et al.*, 2012). De ce fait, bien que la démarche isotopique donne un calendrier général pour la durée de l'allaitement maternel, un calcul précis de l'introduction des aliments de sevrage n'est pas possible, car il existe une incertitude au sujet du temps nécessaire au collagène du squelette pour refléter l'appauvrissement isotopique significatif du sevrage (Schwartz et Schoeninger, 1991).

Aux biais qui viennent d'être évoqués dans le cadre des recherches paléonutritionnelles en général, s'ajoutent des limites spécifiques à la question du sevrage (Herrscher, 2003). Les analyses isotopiques s'appuient sur diverses méthodes traditionnelles d'estimation de l'âge qui laissent une importante marge de possibilités qui ne permet pas d'avoir un âge précis à la mort (Séguy et Buchet, 2011). De ce fait lorsqu'un changement alimentaire est avéré par les isotopes stables, au moment du décès de l'individu, il est mis en correspondance avec un âge imprécis (Fuller *et al.*, 2006). De plus, les analyses isotopiques dans le cadre d'études sur l'allaitement maternel se font en partie à l'aide des racines dentaires en formation, d'individus donc morts sans avoir survécu à l'enfance, ce qui constitue un biais à l'échantillon (Mays *et al.*, 2002). On note également que, pour limiter les contre-interprétations, il est prudent d'avoir un nombre suffisant de valeurs correspondant aux adultes de la même époque et de la même zone, afin de comparer et d'estimer l'écart par rapport aux valeurs des données adultes. L'examen de cet écart permet de déterminer s'il est significatif dans le but d'interpréter de façon pertinente les valeurs associées au sevrage, ce qui nécessite au préalable une quantité suffisante de références.

Pour finir, on signale les biais à l'interprétation des analyses isotopiques induits par la sélection de l'échantillonnage qu'elles nécessitent. Les analyses isotopiques, dans le cadre des études sur les pratiques d'allaitement et de sevrage, se font sur les dents en croissance pour identifier l'état de l'alimentation au moment du décès. Elles ne peuvent donc se pratiquer que sur des squelettes d'enfants, décédés avant d'avoir atteint l'âge adulte. La mortalité infantile dans ce cas est une contrainte à la sélection des échantillons pour ce type d'analyses et peut être un biais dans la mise en relation entre l'allaitement et la mortalité infantile puisqu'il n'est pas possible de comparer la corrélation avec des individus ayant survécu (Dupras *et al.*, 2001, Dupras et Tocheri, 2007). De plus, l'hypothèse sous-jacente inhérente à la démarche isotopique telle qu'elle est pratiquée pour étudier les tendances de sevrage suppose l'absence de biais à la mortalité infantile affectant les résultats. Cette hypothèse de départ peut induire en erreur l'interprétation,

car, par exemple, un enfant malade ou en mauvaise santé peut être traité différemment d'un enfant sain. Par conséquent, deux profils de consommateurs peuvent exister : un pour lequel l'état de santé prédispose l'individu à survivre au processus de sevrage, un pour lequel il est probable qu'il ne survive pas au sevrage. Or l'échantillonnage est susceptible de présenter une quantité disproportionnée d'enfants malades/sains. La supposition sous-jacente de l'absence de biais à la mortalité infantile affectant les résultats peut ne pas être valide et donc les interprétations sur les pratiques alimentaires des nourrissons dans les populations archéologiques appuyées sur ces principes peuvent être incorrectes. Pour contrôler le taux de mortalité infantile et palier ce biais aux interprétations, certains auteurs proposent d'examiner les rapports isotopiques de la dentine et de l'émail dentaire de plusieurs dents afin de disposer d'une chronologie d'enregistrements d'une plus longue durée traduisant l'évolution des pratiques alimentaires depuis la période foetale jusque tardivement dans l'enfance (Dupras et Tocheri, 2007).

Les complications liées au processus de diagenèse, impliqué dans la conservation des signatures isotopiques en général, diffèrent selon le tissu étudié, car l'os, la dentine et l'émail n'ont pas les mêmes propriétés physico-chimiques. Certains tests pour estimer la conservation des signatures isotopiques impliquent des comparaisons entre différents tissus et notamment avec l'émail, plus résistant que les autres à la diagenèse, ou bien par comparaison avec des espèces contemporaines similaires à celle étudiée pour avoir un ordre de grandeur de la teneur biologique naturelle sur le vivant des éléments (Lee-Thorp, 2002); après traitement de purification des phases biologiques (Bocherens, 1999; Szostek, 2009).

Quel que soit le matériau utilisé, il est recommandé de prendre les précautions qui s'imposent pour s'assurer que la diagenèse n'influence pas significativement les résultats. Il est également recommandé d'estimer les absorptions chimiques post-mortem afin de les prendre en compte.

D'autre part, pour ce qui est de l'interprétation des ratios plusieurs réflexions posent problème comme les différences isotopiques hommes/femmes et question de l'interprétation sociale, par exemple. La préférence nutritionnelle sexo-spécifique ou la disparité sociale homme/femme pourraient être révélés par le régime alimentaire, cependant, il est possible que les différences liées aux sexes soient d'ordre biologique et reflètent une différence physiologique de l'assimilation des isotopes, notamment lors de la grossesse et de l'allaitement (Fuller *et al.*, 2006a, b).

On remarque actuellement un grand intérêt pour l'étude des pratiques alimentaires à partir des analyses isotopiques sur le squelette, en s'appuyant en particulier sur l'enrichissement en azote-15, mais ce n'est pas la seule méthode chimique existante, puisqu'en effet, se développent progressivement les recherches sur certains ratios d'éléments traces.

Dans ce cadre, le sevrage est considéré comme un cas particulier de changement d'alimentation. Mais pour ces cas spécifiques l'analyse isotopique ne semble pas la méthode la mieux appropriée, car si la détermination d'un sevrage achevé ou non est fiable, la marge d'erreur pour ce qui est de l'estimation de l'âge du sevrage reste souvent trop large pour une exploitation pertinente des données.

En conclusion, les os et les dents peuvent donc fournir des informations sur le régime alimentaire des hommes, par le l'intermédiaire des études isotopiques, dans une certaine mesure, laquelle est variable selon les conditions. À partir de l'alimentation supposée par ces moyens, des efforts ont été faits pour essayer de corréliser les changements alimentaires et les maladies en comparant les modèles et les incidences d'indicateurs de pathologies.

11.3.2. Le rôle des oligoéléments dans le cadre des analyses élémentaires en paléonutrition

Bien que l'analyse des isotopes stables soit au centre des recherches sur la restitution des modèles paléonutritionnels, l'analyse des oligoéléments a attiré l'attention de plusieurs chercheurs.

Les éléments traces ou oligoéléments ont été répertoriés au nombre de 103 par Mendeleïev. Ils composent les matières vivantes et sont caractérisés par une masse atomique (correspondant au nombre de protons présents dans le noyau de chaque atome). Les oligoéléments sont dits éléments traces lorsque leur taux est inférieur à 1mg/kg du poids corporel, chez l'homme. Traditionnellement, les éléments sont répartis en quatre catégories : les essentiels, les possiblement essentiels, les non essentiels, et les toxiques. Cependant, il est avéré que tous les éléments ont des effets néfastes lorsqu'ils sont en excès dans le corps. La fonction principale des éléments traces essentiels s'exprime dans les réactions catalytiques de l'organisme, et ils sont, le plus souvent, associés à des enzymes spécifiques ou métallo-enzymes. Ils peuvent être de simples activateurs ou des substances vitales pour la fonction métabolique que doit effectuer la métalloprotéine (Underwood, 1977). Plusieurs études (dont un certain nombre sont revues par Price *et al.*, 1985) ont mis en évidence le fait, désormais unanimement reconnu, de la potentialité des oligoéléments à refléter l'alimentation absorbée, mais cet intérêt n'est actuellement démontré que dans le cas des alcalino-terreux (Sillen et Kavanagh, 1982 ; Klepinger, 1984).

Cependant, en plus de l'alimentation, d'autres facteurs influencent la composition élémentaire du squelette. Les concentrations élémentaires présentes dans les os résultent de l'interaction des apports alimentaires et des influences environnementales. Elles sont donc dépendantes d'un écosystème dans son ensemble. Ces concentrations ne reflètent pas directement celles des flux corporels sur le vivant (Pate et Hutton, 1988), mais traduisent plutôt les processus physiologiques et les niveaux environnementaux dans leur ensemble. Un certain nombre de processus vitaux influent sur la teneur des éléments stockés de façon temporaire ou définitive selon les cas. On peut citer, par exemple, l'ingestion de la nourriture par l'organisme dont une proportion est ensuite intégrée aux flux sanguins en passant au travers du système intestinal, ou des états physiologiques spécifiques, tels que la croissance, la grossesse, l'allaitement, qui agissent sur les mécanismes d'absorption et de rejet des éléments (Elliott, 1993). L'absorption et le métabolisme du strontium méritent une attention particulière pour leur implication dans la reconstruction alimentaire des populations historiques et préhistoriques (Comar *et al.*, 1957 ; Toots et Voorhies, 1965 ; Blakely, 1989) notamment par le biais des mesures du ratio strontium/calcium dans les ossements issus de fouilles archéologiques (Elliott, 1993). Le strontium et le calcium sont déposés dans les tissus calcifiés en plus grande quantité que tous les autres éléments traces. Chez l'homme, environ 99 %

du strontium et du calcium corporels sont stockés dans les tissus durs et les tissus conjonctifs (Elias *et al.*, 1982), ce qui justifie l'intérêt des archéologues pour ces deux éléments, en plus de leur signification alimentaire. Mais il est nécessaire, pour restituer une interprétation fiable de l'alimentation de prendre en compte le plus grand nombre possible de facteurs intervenant dans le traitement et le comportement des éléments traces.

Dans ce cadre, l'impact de la grossesse et de la lactation sur le strontium et le calcium présents dans le squelette, sont des exemples spécifiques, probablement les mieux documentés parmi les phénomènes métaboliques (Sillen et Kavanagh, 1982 ; Blakely, 1989).

II.3.2.1. Historique des recherches

II.3.2.1.1. Travaux pionniers

L'utilisation des éléments traces en vue d'une reconstitution alimentaire a d'abord été exploitée dans le domaine paléontologique, sur différentes espèces fossilisées, notamment par Wyckoff et Doberenz (1968), ainsi que dans les travaux paléontologiques de Toots et Voorhies (1965). Ces derniers, en particulier, ont signalé que des différences alimentaires, certes limitées, pouvaient être reflétées par les niveaux de strontium dans les os, chez les vertébrés du pléistocène. Ils ont démontré que le strontium permet de distinguer non seulement les carnivores des herbivores, mais également les pousseurs (qui consomment des végétaux très abrasifs, de type graminées) des broouteurs (qui se nourrissent de végétaux peu abrasifs comme les arbustes ou les feuilles d'arbre). Le strontium a donc été étudié et utilisé pour les questions de niveaux trophiques. En effet, en raison du niveau trophique dans la chaîne alimentaire, le strontium est très présent dans les plantes. Il l'est un peu moins chez les mammifères herbivores qui s'en nourrissent, et encore plus faiblement présent chez les mammifères carnivores qui consomment ces herbivores. Les mammifères carnivores ont donc un apport alimentaire beaucoup plus faible en strontium que les herbivores. Cette différence de concentration est reflétée par leurs os, ce qui permet, lors de l'analyse du squelette de distinguer chez les mammifères ces deux types de régimes alimentaires (Schoeninger, 1982), à condition évidemment que la comparaison relative se fasse au sein d'un groupe d'une même région géographique compte tenu de la répartition inégale du strontium dans l'environnement (Kyle, 1986).

II.3.2.1.2. Diversification des thématiques d'application

Ces dernières décennies, l'utilisation des éléments traces, et plus spécifiquement du strontium, s'est étendue au domaine de l'anthropologie biologique et largement développée pour déterminer l'alimentation des populations préhistoriques dans un premier temps, puis plus généralement historiques.

L'étude des comportements alimentaires a beaucoup intéressé les préhistoriens, car ils revêtent une importance particulière dans l'évolution des hominidés. En effet, le régime alimentaire d'une espèce lui impose des contraintes sur plusieurs aspects biologiques. Pour ces raisons, on peut voir dans la littérature plusieurs hypothèses alimentaires expliquant la séparation entre les grands singes et les hominidés (Dart, 1957 ; Blumenshine et Cavallo, 1992 ; cités par Bocherens, 1999)

ou la coexistence de plusieurs espèces d'hominidés (Coppens, 1986 ; Jaouen *et al.*, 2015), par exemple.

Plus largement, une des grandes implications des analyses de strontium concerne l'estimation de la proportion d'aliments végétaux et carnés dans l'alimentation d'une population donnée, consommant à la fois des carnivores, des herbivores et des végétaux (Brown, 1974 ; Schoeninger, 1979, 1982 ; Sillen, 1981, 1982 ; Sillen et Kavanagh, 1982 Price *et al.*, 1985 ; Le Bras-Goude *et al.*, 2006, Schwarcz et Schroeninger, 2011 ; Flensburg *et al.*, 2018), souvent appuyée par la comparaison des squelettes humains et animaux d'un même site, qui permet de constater une certaine cohérence des proportions élémentaires. Cette démarche est généralement explorée dans le but de déterminer l'accès aux protéines animales d'un individu ou d'une population. Dans le même ordre d'idées, le raisonnement a ensuite été appliqué à la comparaison de la quantité relative de viande et de végétaux consommés entre différents sites archéologiques. Cependant, une complication supplémentaire a été mise en évidence par la concentration particulièrement élevée de strontium dans l'eau de mer et donc dans les produits alimentaires issus de la mer (Schoeninger et Peebles, 1981 ; Sillen et Kavanagh, 1982 ; Burton et Price, 1990, 1999). Si la consommation de fruits de mer, en tant que facteur à prendre en compte, est relativement bien admise, son interprétation ne fait pas l'unanimité. Ce type de démarche est d'abord exploité comme outil pour une meilleure compréhension des sociétés préhistoriques, notamment en appréciant la quantité des ressources terrestres par rapport aux ressources marines dans la nutrition, avant de s'étendre par la suite aux périodes historiques.

Les mesures élémentaires incluant le strontium peuvent également servir les problématiques liées aux changements alimentaires. Parmi les réflexions sur les modifications d'alimentation, on compte les questionnements liés aux influences environnementales. En effet, le modèle saisonnier des ressources disponibles peut, dans certaines circonstances, être à l'origine de fluctuations dans le rapport Sr/Ca de l'émail formé tardivement (Sponheimer *et al.*, 2006).

De même, les variations élémentaires existantes entre les régions nous renseignent sur des questionnements migratoires (Katzenberg et Schwarcz, 1984 ; Knudson *et al.*, 2004 ; Scharlotta, 2018).

Le troisième type de transition alimentaire traité est le passage de l'alimentation lactée à une nutrition adulte. Dans ce cadre, plusieurs chercheurs examinent les valeurs Sr/Ca contenues dans les os d'individus juvéniles issus de populations historiques (Sillen et Smith, 1983 ; 1984, HühneOsterloh et Grupe, 1989 ; Mays, 2003). Dans leurs études sur des os médiévaux d'individus arabes, Sillen et Smith (1983, 1984) trouvent des ratios Sr/Ca en augmentation graduelle après la naissance avec des individus âgés de 1,5 à 3,5 ans. Ils notent également que ces individus présentent des valeurs plus élevées que l'ensemble de la population. Par la suite, le ratio Sr/Ca diminue jusqu'à atteindre des niveaux qui perdurent à l'âge adulte. Selon les auteurs, l'interprétation qui met en lien les valeurs Sr/Ca et l'allaitement est cohérente avec les données ethnographiques dont ils disposent sur les Palestiniens arabes au mode de vie traditionnel qui allaitent jusqu'à 2 ou 3 ans. Plus récemment, Mays (2003) démontre que l'estimation de la durée de l'allaitement à partir du rapport Sr/Ca d'échantillons d'os provenant de squelettes du Moyen Âge était concordante avec les résultats d'analyses isotopiques de l'azote effectuées antérieurement

sur la même population. À partir de l'étude de canines et de deuxièmes molaires déciduales d'enfants européens, contemporains, Humphrey *et al.* (2008a) proposent que le rapport Sr/Ca à travers les cernes de croissance successives de l'émail reflètent les transitions alimentaires de l'enfance. L'interprétation de la durée de l'allaitement exclusif et de l'âge du sevrage est cohérente avec les informations données par les mères dans le cadre de cette étude. Cette étude tient compte à la fois des paramètres alimentaires et physiologiques qui contribuent à l'intégration des oligoéléments dans les tissus durs.

Une autre voie sur l'alimentation est explorée par certains chercheurs qui tentent de mettre en lien la qualité de l'alimentation individuelle et le statut social. Parmi les premiers travaux, on peut citer ceux de Brown (1973), et de Brown et Blakely (1985), qui appliquent le ratio strontium/calcium sur des os humains provenant de neuf populations différentes³² pour déterminer l'appartenance d'un individu à un rang social plutôt élevé ou plutôt bas. Quant à Schoeninger (1979), elle utilise la teneur en strontium pour déterminer la proportion carnée dans l'alimentation de squelettes issus d'un site précolombien de Mexico, ce qui lui permet d'en déduire leur statut social et d'identifier un groupe d'élite.

Enfin, le strontium est parfois utilisé en vue d'éventuelles corrélations entre l'alimentation et certains changements morphologiques.

11.3.2.1.3. Diversification des éléments utilisés

L'hypothèse selon laquelle la diminution du rapport Sr/Ca reflète une consommation de viande relativement importante est fragile compte tenu des interférences possibles (détaillées plus bas). Il est alors nécessaire, dans le but d'optimiser la fiabilité de la méthode, de compléter ces mesures par l'estimation d'autres variables supplémentaires.

Il faut attendre la thèse de Gilbert (1975) qui procède à une étude anthropobiologique sur une population mississippienne du site de Mounds Dickson en élargissant l'analyse élémentaire à cinq oligoéléments (zinc, cuivre, strontium, magnésium, manganèse). Cette démarche est rapidement soutenue par Lambert *et al.* (1979) suggérant que, même si la justification initiale de l'examen de strontium a été la base physiologique des études sur le rapport entre la distribution élémentaire et la position de l'organisme étudié dans la chaîne alimentaire, les reconstructions fondées sur plusieurs éléments sont bien plus précises et convaincantes que les analyses utilisant le strontium seul.

Il existe assez peu de travaux publiés sur d'autres éléments alcalino-terreux que le strontium, appliqués à des recherches en paléonutrition, même s'il existe des preuves scientifiques suggérant que ces éléments peuvent se substituer au calcium dans le squelette en formation ou en renouvellement osseux, et qui pourraient donc être d'utiles indicateurs alimentaires. Parmi eux, on peut évoquer le baryum qui selon certains auteurs pourrait même se révéler encore plus pertinent que le strontium (Sillen et Kavanagh, 1982; Gilbert *et al.*, 1994; Balte, 2012) pour l'étude de l'alimentation solide, mais pas pour la détection du lait maternel.

32. Ces populations sont issues de sites archéologiques relativement récents, incluant ceux de Bussinger dans la région des Grands Lacs supérieurs, 3 sites forestiers dans les vallées du Mississippi et de l'Illinois, le site de Farukhabad sur la plaine Deh Luran en Iran, et 4 sites de l'état Oaxaca dans le sud du Mexique.

Les oligoéléments ont suscité une première vague d'intérêt dans les années 70 pour leurs applications anthropologiques, sur des questions de plus en plus diversifiées, en retenant de plus en plus d'éléments en vue d'une meilleure interprétation des analyses chimiques. Mais l'interprétation de la chimie des tissus durs s'est rapidement avérée plus complexe que dans les premières hypothèses. Les travaux se sont alors concentrés sur les facteurs pouvant biaiser les interprétations, tels que les altérations par diagenèse, l'âge, le sexe, et l'état physiologique de l'individu incluant le cas de la femme enceinte et allaitante.

11.3.2.1.4. Les analyses élémentaires avec LA-ICP-MS sur l'émail dentaire humain dans la littérature

En archéologie, l'ablation laser couplée à la spectrométrie de masse à plasma induit (LA-ICP-MS) a été utilisée sur la céramique, le verre, les métaux, l'obsidienne, les pierres semi-précieuses et les restes humains (Bellot-Gurlet *et al.*, 2005; Giussani *et al.*, 2009). Sa capacité à fournir une résolution spatiale (c'est-à-dire une haute résolution analytique sur une microlocalisation) a été exploitée en particulier pour analyser les variations de composition élémentaire des dents humaines, compte tenu des caractéristiques de formation régulière que nous avons évoquées.

Plusieurs études ont cherché à mettre en évidence les différences de distribution des oligoéléments entre l'émail prénatal et l'émail postnatal. Lochner *et al.* (1999), par exemple, ont analysé dix dents déciduales humaines pour observer les fluctuations d'oligoéléments sur l'émail avant et après naissance. Ils observent une hausse générale des éléments (14 éléments sont recherchés) après la naissance, notamment le fer, le zinc et le plomb.

L'étude de Lee *et al.* (1999) révèle une augmentation des niveaux de zinc et de plomb qui atteignent des valeurs particulièrement hautes dans l'émail externe. Ces particularités de l'émail externe (à la surface de la dent) sont interprétées comme le résultat d'une reminéralisation liée à l'interaction entre la salive et les dents.

Goodman *et al.*, (2003) exploitent LA-ICP-MS pour analyser ^{138}Ba , ^{88}Sr , ^{206}Pb , ^{66}Zn sur des dents contemporaines (XIX^e siècle) et notent que tous les éléments sauf le strontium, présentent des valeurs plus élevées dans l'émail prénatal que dans l'émail postnatal. L'interprétation de ces différences se porte sur des questions d'alimentation et d'exposition à la pollution.

Kang *et al.* (2004) se penchent sur l'étude de la concentration en ^{65}Cu , ^{87}Fe , ^{25}Mg , ^{88}Sr , ^{208}Pb et le ^{66}Zn dans les différentes parties de la dent. Ils mettent ainsi en évidence la répartition hétérogène des éléments analysés dans l'émail. Cette étude leur permet de démontrer les possibilités techniques de cartographie de la distribution des éléments dans l'émail dentaire à l'aide de LA-ICP-MS.

De même Dolphin *et al.* (2005) examinent le ^{25}Mg , ^{57}Fe , ^{66}Zn , ^{68}Zn , ^{88}Sr , ^{138}Ba , ^{208}Pb et confirment ainsi le potentiel analytique de LA-ICP-MS pour l'analyse microspatiale de la composition en oligoéléments de l'émail dentaire. Leur étude révèle une augmentation significative de presque tous les éléments en comparant les concentrations avant et après la naissance, sauf le ^{25}Mg qui diminue et le ^{88}Sr qui reste constant. En outre, ils notent que les variations de concentrations ne sont pas significatives lorsque l'on compare différentes dents d'un même individu.

Un autre axe de recherche s'est engagé sur la quantification de certains éléments dont la carence ou la surabondance peut entraîner une pathologie ou une toxicité, et peut être révélateur des conditions environnementales dans lesquelles l'individu a grandi. Evans *et al.*, (1995) utilisent LA-ICP-MS sur des dents de morses actuels dans le but d'étudier leur exposition environnementale aux métaux lourds (plomb, cuivre, strontium, zinc). Cox *et al.* (1996) expérimentent LA-ICP-MS sur des dents humaines modernes et contemporaines de différentes provenances (Pologne et Norvège). Ils travaillent sur l'exposition des populations et détectent une augmentation du mercure et de l'or de l'intérieur vers l'extérieur de la dent, ainsi qu'une diminution du plomb. Ces observations leur permettent de proposer une origine endogène du plomb et une origine exogène du mercure et de l'or (liée aux interactions *in vivo* avec l'environnement buccal ou la diagenèse) et de démontrer une différence d'exposition liée aux conditions environnementales. L'étude de Budd *et al.*, 1998, par exemple, porte sur l'exposition au plomb des populations préindustrielles et préhistoriques. Ils notent que le plomb est présent dans des concentrations plus élevées à la surface de l'émail. Ils remarquent également que les dents médiévales contiennent plus de plomb que les dents prélevées sur des sites préhistoriques, ce qui pose la question de l'impact éventuel de l'utilisation courante d'objets métalliques étamés avec un alliage d'étain et de plomb. Lee *et al.* (1999) analysent plusieurs éléments, parmi lesquels certains métaux lourds, dans la dentine et l'émail. Ils notent, à leur tour une augmentation du plomb, ainsi que du zinc à la surface de la dent. L'exposition au plomb *in utero* a également fait l'objet de recherches (Uryu *et al.*, 2003). Hare *et al.* (2011) se penchent également sur l'exposition d'une population à certains éléments (strontium, cadmium, zinc et plomb) et les risques qu'ils font peser sur cette dernière. Farrell *et al.* (2013) utilisent LA-ICP-MS sur des dents de momies archéologiques chiliennes afin d'en extraire des informations toxicologiques et alimentaires.

On trouve aussi quelques recherches mettant en avant le potentiel des informations sur l'exposition environnementale dans leurs applications médico-légales, notamment dans les démarches d'identification (Castro *et al.*, 2010).

Les études sur la détermination du régime alimentaire sont également abordées. Les études de Goodman *et al.* (2003) et Dolphin *et al.* (2005) portent sur plusieurs éléments et mettent en relation les concentrations de ⁶⁶Zn et la consommation de maïs (tortillas). Les oligoéléments sont utilisés pour étudier le sevrage dans les populations du passé (Céil *et al.*, 2019) et le statut de la mère dans un contexte alimentaire spécifique, par Dolphin et Goodman (2009). Cependant les avis sur l'utilisation du zinc en paléonutrition sont mitigés (*cf. infra* II. 3.2.2).

D'autre part, plusieurs études ont utilisé l'analyse des oligoéléments pour fournir des données fiables sur les origines géographiques des populations humaines (Lappalainen *et al.*, 1981), les migrations humaines et les origines (Schneider et Blakeslee, 1990; Hanč *et al.*, 2013), et la détection de la présence d'individus d'origine exogène dans un échantillon archéologique (Cucina *et al.*, 2007; 2011).

II.3.2.2. Les principaux éléments utilisés en paléonutrition

Le développement d'un modèle de reflet alimentaire par les tissus durs des populations anciennes, à partir des analyses élémentaires, nécessite une sélection des éléments interprétés. Cette sélection s'opère sur la base de la faisabilité, la fiabilité et la pertinence, pour optimiser le potentiel des informations recueillies, en vue de répondre à un questionnement posé.

Le choix des éléments, dans ce contexte, doit tenir compte de plusieurs disciplines qui interfèrent entre elles. Parmi celles-ci, on peut citer l'écologie, la nutrition et la biologie, qui permettent d'obtenir des informations sur les éléments d'abord ingérés, puis absorbés par le système organique humain à travers l'alimentation. La chimie et la médecine sont également utiles pour comprendre les modalités d'incorporation des éléments dans le corps, leur relation à l'alimentation, et leur rapport avec les niveaux des différents tissus durs.

La démarche pluridisciplinaire proposée permet de prendre en compte un nombre maximum de mécanismes responsables des concentrations élémentaires dans des populations archéologiques.

Ces critères définissent la liste des conditions optimales guidant le choix des éléments pour établir un modèle de relation alimentation/concentration à partir du squelette, mais il est rare qu'un élément respecte l'intégralité des conditions. Selon Beck (1985) il n'existe que deux éléments capables de répondre à cette définition, le strontium et le zinc.

Dans le but d'élargir les possibilités pour réfléchir sur un modèle alimentaire, les chercheurs ont, le plus souvent, choisi de contrôler l'absence de diagenèse dans le but d'élargir la série des éléments utilisables. Les principaux éléments utilisés dans les tentatives de reconstruction des régimes alimentaires animaux et humains, à partir des analyses élémentaires, sont finalement le strontium, le calcium et le baryum. Ce sont tous les trois des métaux dits alcalino-terreux incorporés dans les fractions minérales (hydroxyapatite) du squelette (Schroeder *et al.*, 1972). Le choix du calcium dans les analyses élémentaires paléoalimentaires s'impose assez naturellement de par son abondance dans les tissus durs et l'alimentation, ainsi que son comportement physiologique (responsable du phénomène de biopurification, détaillé plus bas). Ces caractéristiques lui permettent d'assumer un rôle de repère auquel les autres éléments étudiés peuvent être rapportés. Après de nombreuses expérimentations, les éléments retenus comme étant les plus significatifs et donc les plus pertinents, dans le cadre de démarches sur la reconstruction nutritionnelle, sont le strontium et le baryum (Comar *et al.*, 1957; Schroeder *et al.*, 1972; Schoeninger, 1979; Sillen, 1981; Elias *et al.*, 1982; Sillen et Kavanagh, 1982; Rheingold *et al.*, 1983; Sealy et Sillen, 1988; Gilbert, 1994). Ces indices sont ensuite complétés par d'autres éléments, plus secondairement utilisés, notamment le magnésium (Pharswan et Farswan, 2011) et le zinc (Rheingold, 1983; Pharswan et Farswan, 2011).

11.3.2.2.1. Strontium

Le strontium est un élément chimique désigné par le symbole Sr et doté du numéro atomique 38. Il appartient à la catégorie des éléments traces (ou oligoéléments) caractérisés par une concentration inférieure à 0,1 % dans le corps humain.

Il est repéré pour la première fois en 1790 par Adair Crawford et William Cruikshank, comme élément inconnu, entrant dans la composition de la strontianite, extraite d'une mine près du village écossais de Strontian. La même année, il est clairement identifié par Thomas Charles Hope, à partir de la reconnaissance de son oxyde (Strontianite-SrCO₃). Il est ensuite isolé en 1808 par Sir Humphry Davy (Angleterre).

Le strontium se forme naturellement dans la lithosphère sous forme de quatre isotopes naturels, ⁸⁸Sr (82,56 %), ⁸⁶Sr (9,86 %), ⁸⁷Sr (7,02 %), ⁸⁴Sr (0,56 %), avec une abondance relativement constante, à l'exception du strontium-87 dont les petites variations en quantité dépendent de la diminution du rubidium-87. Le ⁸⁷Sr se forme au fil du temps par la désintégration radioactive du rubidium. Les ratios isotopiques du ⁸⁷Sr dépendent donc de l'âge de la formation géologique, mais aussi du type de roche. Les roches plus anciennes ont un ratio ⁸⁷Sr/ ⁸⁶Sr plus élevé dans le présent. Les roches riches en argile (les schistes argileux, par ex.) ou les roches riches en silice (le granite, par ex.) ont un ratio élevé ⁸⁷Sr/ ⁸⁶Sr. À l'inverse les roches plus jeunes, comme le basalte, ont un ratio ⁸⁷Sr/ ⁸⁶Sr plus faible (Price *et al.*, 1994). Il existe aujourd'hui également 15 isotopes radioactifs issus des recherches sur le nucléaire, menées à partir des années.

Les éléments du groupe 2³³ de la classification périodique, auquel appartient le strontium, le calcium et le magnésium, forment des cations divalents dans des fluides biologiques, et ont divers degrés de liaison aux protéines dans les liquides biologiques comme le sérum ou le plasma. La liaison aux protéines de Sr dans le sérum ou le plasma est du même ordre de grandeur que celle du calcium (Braux, 2011).

La taille du rayonnement du strontium lui permet seulement d'être remplacé par du calcium, du baryum, du potassium et du plomb. La plupart du temps, la distribution géochimique du strontium est en corrélation avec le calcium.

Le strontium a une relation vitale au calcium dans son absorption et son incorporation dans les tissus durs. Ces réactions sont dépendantes de la concentration et de la disponibilité du calcium dans le corps.

Dans le corps humain, le strontium est principalement concentré dans les tissus osseux et conjonctifs. Contrairement au calcium, il n'est pas contrôlé de manière homéostatique. En fait, 99 % du strontium alimentaire est éliminé par les reins et n'atteignent jamais le squelette (Schoeninger, 1979 ; Schoeninger et Peebles, 1981).

Bien que le strontium et le calcium soient très proches chimiquement, leurs caractéristiques physiques telles que la solubilité ou l'ionisation sont différentes. En dépit de ces dissemblances, les plantes ne marquent pas de distinction dans l'absorption et l'utilisation du strontium et du calcium. Le strontium et le calcium sont unanimement reconnus comme ayant un lien direct et

33. Béryllium, Magnésium, Calcium, Strontium, Baryum, Radium.

étroit. De ce fait, toute discussion sur le rôle métabolique du strontium implique logiquement sa relation avec le métabolisme du calcium (Rosenthal, 1981).

Le strontium peut se substituer au calcium dans une grande variété de processus chez les mammifères. Il est incorporé dans les apatites dentaires et osseuses, et s'insère en remplacement d'ions calcium. Un ion strontium peut remplacer jusqu'à quatre ions calcium chez l'homme (Schoeninger, 1979).

La classification du strontium reste mal déterminée. Il pourrait être un élément non essentiel, car il ne semble pas avoir de fonction métabolique dépendante, sauf, peut-être, dans la calcification de la dent. Le calcium en revanche est un élément essentiel, constituant d'ailleurs la majeure partie des tissus durs dont le rôle dans les systèmes enzymatiques est fondamental. Cette différence de fonction justifie l'absorption préférentielle du calcium (40 % à 80 % du calcium ingéré par les humains adultes) par rapport au strontium (20 à 40 % du strontium ingéré par les humains adultes), par les animaux (Comar, 1963). Ce phénomène est lui-même attribué, en grande partie, au transfert des protéines dans l'intestin ayant une affinité relativement faible pour le strontium (Elliott, 1993).

La moyenne générale des apports en strontium dans l'alimentation est de 1 à 3 mg de strontium/jour, mais elle varie en fonction des propriétés de l'eau ingérée (en bouteille), ainsi que de la consommation de produits laitiers.

II.3.2.2.2. Calcium

Le calcium est un élément chimique représenté par le symbole Ca et portant le numéro atomique 20. Il s'agit du cinquième élément le plus abondant de la croûte terrestre. C'est un élément essentiel à l'organisme humain, et au bon développement de la matière organique dans l'ensemble du vivant, notamment la formation de l'os, des dents et des coquilles. Il est d'ailleurs le métal le plus abondant du corps humain et est principalement stocké dans le squelette.

Les produits laitiers constituent une source majeure pour les apports en calcium alimentaires, de surcroît sous une forme particulièrement bien absorbable par l'intestin, de l'ordre d'environ 30 %. Cependant pour se faire une idée de sa biodisponibilité réelle, il faut tenir compte des conditions influençant son élimination par l'organisme.

La fixation du calcium dans l'organisme est elle aussi soumise à plusieurs facteurs physiologiques, notamment hormonaux.

Le calcium est sujet à la diagenèse (Beck, 1985).

II.3.2.2.3. Baryum

Le baryum est un élément chimique de symbole Ba et numéro atomique 56. Ce métal est isolé en 1808 par l'anglais Sir Humphry Davy.

Chez les vertébrés, le squelette et les tissus conjonctifs contiennent environ 93 % du baryum total de l'organisme, ce qui permet d'utiliser sa concentration dans le squelette à la fois comme indicateur de la position trophique et comme élément de distinction entre les ressources alimentaires terrestres et marines avec le strontium (Pharswan and Farswan, 2011). Dans le cas de l'alimentation, la concentration de baryum par rapport au strontium est utilisée dans les tissus du squelette pour examiner la proportion d'aliments marins consommés dans la nutrition humaine.

En effet, nous savons que le baryum connaît un appauvrissement extrême (dans l'absolu, et par rapport au strontium) dans l'eau de mer, ce qui le pousse à s'associer à un élément plus abondant, le sulfate, pour acquérir une certaine stabilité. Les ions baryum ne sont donc pas libres (hormis dans les sédiments des profondeurs) et sont très faiblement exposés aux organismes marins, dont la plupart présentent eux aussi de basses concentrations en baryum (Burton et Price, 1990; Gilbert *et al.*, 1994).

II.3.2.2.4. Les éléments secondaires

II.3.2.2.4.1. Le zinc

Le zinc est un élément chimique de symbole Zn et portant le numéro atomique 30. Il s'agit d'un métal de transition, principalement présent dans un minerai appelé la sphalérite (sulfure de zinc) et qui a la particularité d'être chimiquement proche du magnésium.

Le zinc, élément essentiel, est le métal trace le plus abondant du corps humain (2-3g) (Pharswan et Farswan, 2011).

Le zinc possède les mêmes propriétés chimiques que le strontium lui permettant d'être intégré aux tissus osseux et dentaires. Le succès de l'utilisation du rapport Sr/Ca dans la détermination des régimes alimentaires végétariens/carnivores a encouragé les chercheurs à envisager l'utilisation du rapport Zn/Ca de la même façon, pour détecter les concentrations élevées de zinc (Gilbert, 1975). Il se retrouve en quantité variable dans l'alimentation. Les produits d'origine animale comme la viande, les œufs, les produits laitiers et les mollusques ont tendance à constituer une source de zinc bien plus importante que les végétaux. On pourrait donc supposer que les concentrations de zinc dans les tissus durs sont un indicateur de la proportion de nourriture protéinée dans le régime alimentaire des populations archéologiques (Schoeninger, 1979; Blakely et Beck, 1981; Sillen, 1981; Sillen et Kavanagh, 1982; Morgan et Schoeninger, 1989; Dolphin et Goodman, 2009). Mais il faut être prudent avec l'utilisation du zinc, car il peut, dans sa corrélation avec le strontium, être utilisé à tort pour la déduction de régimes alimentaires. Certains raisonnements hâtifs fondés sur l'analyse chimique des tissus durs affirment que les niveaux de zinc dans le squelette reflètent directement l'approvisionnement en zinc dans l'alimentation. Si le zinc résulte essentiellement de l'alimentation carnée, les niveaux attendus sont plus élevés que si celle-ci est d'origine végétale, notamment en raison des phytates qu'ils contiennent et qui inhibent l'absorption du zinc (Hatch et Geidel, 1985; Pharswan et Farswan, 2011). Les squelettes des carnivores contiennent donc de plus grandes concentrations de zinc que ceux des herbivores. Cependant, quelques facteurs affectent cette relation directe. Tout d'abord, certaines sources végétales, comme les noix, ou les fruits de mer fournissent des niveaux de zinc beaucoup plus élevés que les sources de viande. Il faut donc prendre en compte les sources de zinc possibles dans l'alimentation d'une population avant d'associer systématiquement ce dernier à un régime alimentaire carné. De plus, la relation entre la quantité de zinc consommée et la concentration dans les tissus durs peut être discutée (Pharswan et Farswan, 2011). Si Klepinger (1993) affirme qu'il existe des preuves solides qui attestent une corrélation directe entre les niveaux de zinc alimentaire, quelle que soit leur source, et les concentrations de zinc dans le squelette, d'autres auteurs sont plus sceptiques. Beck (1985) stipule que les valeurs locales de zinc sont très variables, bien plus que le strontium, ce qui rend

difficiles de plus amples généralisations (Beck, 1985). Les mécanismes d'assimilation du zinc par l'organisme et finalement dans les tissus durs sont mal connus (Jaouen *et al.*, 2015). D'abord, certains végétaux sont riches en phytates³⁴, lesquels ont la capacité d'inhiber l'absorption du zinc par l'organisme (Dolphin et Goodman, 2009; Pharswan et Farswan, 2011). De plus, le zinc étant un élément essentiel, il est soumis, dans une assez large mesure à une régulation interne par le corps, et de plus importants apports en zinc ne sont pas systématiquement indiqués par les concentrations osseuses. Nos incertitudes à ce sujet sont d'autant plus manifestes lorsque le zinc est soumis, dans l'organisme humain, à un état pathologique particulier comme les maladies (même si nous savons qu'une sévère privation de calcium affecte les niveaux de zinc), ou dans le cas de la femme enceinte ou allaitante (Dolphin et Goodman, 2009). Le zinc absorbé par les tissus durs est finalement déterminé à la fois par les facteurs alimentaires (tenant compte de sa biodisponibilité et de son inhibition) et par des facteurs physiologiques. Les concentrations analysées ne reflètent donc pas exactement l'alimentation, ce qui explique probablement les résultats divergents de différentes expérimentations fondées sur les analyses du zinc dans la détermination de la proportion de l'alimentation carnée dans un régime alimentaire (Dolphin et Goodman, 2009; Szostek, 2009).

Les expériences de Morgan et Schoeninger (1989) sur les sites d'Antilope Creek (États-Unis) dans le but de mettre en évidence la fiabilité du zinc, associées aux analyses de strontium pour la reconstruction de l'alimentation des mammifères, suggèrent une représentation précise et fidèle du modèle nutritionnel des populations anciennes avec cette démarche, en l'absence de diagenèse. Dans l'étude de Grupe (1986; citée par Huhne-Osterloh et Grupe, 1989) les valeurs maximums de strontium des os échantillonnés de jeunes enfants sont associées aux niveaux de zinc pour l'estimation de l'âge du sevrage, tandis que des ratios Sr/Ca et Zn/Ca bas sont associés à des bébés non sevrés. Les auteurs suggèrent que le zinc peut être un indicateur du sevrage. Dans les travaux de Huhne-Osterloh et Grupe (1989) la diminution marquée du zinc dans les échantillons osseux est corrélée avec le comportement des ratios Sr/Ca pour l'interprétation de l'âge du sevrage. Les recherches de Farnum et Benfer (1995; cités par Song, 2004) soulignent une diminution des niveaux de zinc dans les os des jeunes enfants, au milieu de la fin de l'enfance. Les valeurs de strontium ne peuvent pas être exploitées en raison d'une contamination osseuse. Les résultats ne permettent, finalement, pas de déterminer si les niveaux de zinc sont dus : au stress du sevrage; un allaitement prolongé et une supplantation en protéines inadéquate; ou encore, un stress lié à d'autres facteurs. De leur côté, Dolphin et Goodman (2009) ne trouvent pas de corrélation entre les variables alimentaires et les niveaux de zinc (rapport Zn/Ca) de l'émail prénatal et postnatal, d'une part, et au cours de la formation de l'émail postnatal, c'est-à-dire pendant la période d'allaitement, d'autre part.

Contrairement au strontium et au baryum, le zinc ne répond pas aux exigences idéales pour établir un modèle alimentaire quantitatif (Szostek, 2009). Les concentrations en zinc dans les tissus durs archéologiques ne reflètent, de façon fiable, ni la proportion carnée de l'alimentation

34. Les phytates sont des composés phosphorés qui se lient à certains métaux pour former des sels insolubles et empêchent leur absorption par l'intestin.

ni l'absorption de zinc par l'organisme et restent critiquées de façon argumentée par plusieurs auteurs (Sillen *et al.*, 1989; Burton et Price, 2000). Le zinc ne peut donc pas être utilisé, seul, ni pour la détermination du régime alimentaire ni pour la distinction du niveau trophique. Il semble que son association au strontium soit plus prudente et qu'il constitue plutôt un soutien aux interprétations des niveaux de strontium. En raison de son manque de fiabilité, nous n'avons pas retenu le zinc dans le travail présenté ici.

II.3.2.2.4.2. Le magnésium

Le magnésium est un élément métallique, alcalino-terreux de symbole Mg et de numéro atomique 12. Il est le 8^e élément le plus abondant de la croûte terrestre.

Il tient son nom d'une région grecque, la Thessalie, appelée Magnésia en grec et riche en magnésium. Reconnu en 1755 par Joseph Black, il faudra attendre 1808 pour qu'il soit isolé, lui aussi par Sir Humphry Davy.

Le magnésium endosse plusieurs rôles biologiques et intervient notamment, avec le phosphore et le calcium, dans la formation des os et des dents, en favorisant la fixation du calcium dans le squelette. On lui connaît également une action sur la croissance. La proportion de magnésium dans le squelette par rapport à la quantité totale dans le corps est estimée entre 60 % et 65 %.

L'utilité potentielle du magnésium dans les études paléonutritionnelles a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs (Blakely et Beck, 1981; Francalacci, 1989; Klepinger, 1990; Pharswan et Farswan, 2011). Elle réside dans le fait que le magnésium se trouve, de manière globale, en plus grande quantité dans les végétaux (comme le strontium et le manganèse) que dans la viande. Une alimentation végétarienne favorise une teneur plus élevée dans l'organisme (Klepinger, 1990; Bielinski, 2006; Pharswan et Farswan, 2011). Des études plus précises citent les fruits de mer, le cacao, les céréales complètes, les légumineuses, le poisson, les légumes verts en général (car le magnésium est l'atome central de la chlorophylle), les amandes et les bananes comme étant plus riches en magnésium que les autres aliments (Bielinski, 2006). Certains auteurs ont envisagé que le magnésium contenu dans l'os puisse servir de mesure pour le magnésium présent dans le corps d'individus en bonne santé, consommant différents niveaux de magnésium, toujours dans des limites adéquates et non toxiques. Dans ce cas, cet indice pourrait servir d'indicateur alimentaire pour les populations archéologiques. Cependant, des essais expérimentaux ont montré que les signes cliniques de carences ne se manifestent que dans des conditions extrêmes (comme le kwashiorkor³⁵ ou la famine). À l'inverse, les cas d'excès de magnésium ne sont pas connus en dehors d'interventions pharmacologiques (Klepinger, 1990). Le magnésium contenu dans l'os ne présente finalement pas de variabilités suffisamment significatives pour être un indicateur alimentaire efficace. Il ne permet de distinguer ni les niveaux trophiques, ni la proportion d'aliments carnés/végétaux dans la nutrition humaine (Klepinger, 1990; Pharswan et Farswan, 2011). Ce manque de performance peut, en partie, être expliqué par l'absence d'une relation définie entre les apports alimentaires et la teneur en magnésium de l'os. De plus, les informations obtenues à ce jour sont souvent le résultat d'expérimentations animales qui ne nous permettent

35. Syndrome de malnutrition protéino-énergétique sévère de la première enfance.

pas une analogie directe avec les populations archéologiques (Klepinger, 1990). La teneur en magnésium de l'os ne peut donc pas être utilisée dans les études de régime paléoalimentaire, si ce n'est dans des cas extrêmes, comme, par exemple, celui des Inuit, ou dans le cas de fortes malnutritions. En revanche, les variabilités liées au magnésium remarquées dans l'émail dentaire sont prometteuses pour les études paléoalimentaires. Deux facteurs d'erreurs sont susceptibles d'interférer l'interprétation alimentaire des niveaux de magnésium, d'abord ils peuvent être modifiés par des conditions de santé (dans des cas extrêmement rares), indépendamment de l'alimentation, et là encore l'altération par diagenèse est un facteur à surveiller, d'autant plus que le magnésium semble plutôt se trouver à la surface dans les tissus durs (Pharswan et Farswan, 2011).

II.3.2.2.4.3. Le manganèse

Le manganèse appartient, comme le zinc, à la série des métaux de transition. Il porte le symbole Mn et le numéro atomique 25. Le Magnésium est le quatrième minéral le plus abondant dans le corps humain. Il est omniprésent à travers les organismes vivants. Il est considéré depuis longtemps comme un élément essentiel pour ses fonctions physiologiques chez les mammifères, même si nous n'avons pas de preuves directes reconnues. Chez l'homme 40 à 50 % du manganèse présent dans l'organisme s'accumule dans les os (Schroeder *et al.*, 1966; Izczi *et al.*, 2013).

Le manganèse a tendance à être plus concentré dans les plantes, on s'attend donc à ce que les herbivores présentent des taux de manganèse plus élevés que les carnivores (Schroeder *et al.*, 1966; Francalacci, 1989; Velasco-Vasquez *et al.*, 1997; Izczi *et al.* 2013). Nous savons que le manganèse est présent dans le lait et qu'il passe la barrière placentaire. Sa concentration dans l'organisme humain ne varie pas en fonction de l'âge, excepté chez les nouveau-nés jusqu'à 6 semaines, où on le trouve en plus grande quantité (Schroeder *et al.*, 1966). Il est sensible aux altérations par diagenèse (Beck, 1985). Son utilisation dans les études de reconstruction paléoalimentaires fait débat. Par exemple, Hancock et ses collègues (1989) ont constaté dans leurs études que, dans la plupart des cas, les concentrations de manganèse n'étaient pas mesurables ou très proches des concentrations limites de détection. De plus, les études sur sa concentration dans le lait et son utilisation dans l'identification de l'allaitement sont trop limitées, ce qui conduit à un manque de données fiables pour que nous puissions l'utiliser dans cette étude. Pour ces raisons nous avons préféré laisser de côté le manganèse dans ce travail.

II.3.2.2.4.4. Le cuivre

Le cuivre est un élément métal de transition (comme le manganèse et le zinc), désigné par le symbole Cu et doté du numéro atomique 29.

Les concentrations en cuivre varient considérablement d'un tissu à l'autre, mais ne changent pas avec l'âge. La moitié du cuivre reçu par l'organisme humain par le biais de l'alimentation (2 à 5 mg) est absorbé par le système intestinal, et la majorité du cuivre est acheminée dans le foie, où sa distribution vers la bile ou le sang est régulée (Trocello *et al.*, 2009). Les ossements humains

d'individus en bonne santé contiennent approximativement 20 ppm³⁶ de cet élément (Byrne et Parris, 1987).

Les produits alimentaires connus comme étant parmi les plus riches en cuivre sont les fruits de mer, les noix et quelques organes animaux. La plupart des plantes fournissent très peu de cuivre (Underwood, 1977). Son utilisation aurait donc plutôt tendance à détecter une proportion relative de viande ou de fruits de mer, mais dans des limites restreintes. De plus, il existe des pathologies conduisant à une accumulation de cuivre dans l'organisme telle que la maladie de Wilson (Trocello *et al.*, 2009), ou la maladie de Mankès (Kanumakala *et al.*, 2002). Ces raisons expliquent probablement le fait que cet élément ne retienne pas une grande attention dans les études paléoalimentaires.

Plusieurs études indiquent qu'une absorption élevée des alcalino-terreux, comme chez les jeunes animaux, s'accompagne d'une faible discrimination du strontium. Lorsque l'absorption de ces alcalino-terreux est augmentée par une alimentation pauvre en calcium, la discrimination du strontium est moins importante (Thompson, 1963). Diverses études chez les animaux et les humains ont montré cependant que, tant que le niveau de calcium reste dans des limites physiologiques normales chez l'adulte, l'absorption relative de strontium et de calcium ne varie pas énormément (rapportées par Sillen et Kavanagh, 1982). Ainsi, des niveaux moyens ou élevés de calcium dans l'alimentation sont susceptibles de ne pas avoir d'effet sur l'application du rapport Sr/Ca, si la discrimination du strontium n'est pas affectée. Mais la technique ne doit pas être appliquée quand une carence extrême en calcium est suspectée. De plus, certaines études ont établi, à partir des analyses élémentaires, un contraste herbivores, carnivores, omnivores, insuffisant pour en déduire la nature du régime alimentaire des individus (Katzenberg et Schwactz, 1986). Une partie des difficultés concernant l'interprétation des analyses chimiques dans ses applications alimentaires semble liée à la complexité des structures des chaînes alimentaires (Sealy et Sillen, 1988), où des ratios identiques peuvent résulter de diverses positions trophiques.

11.3.3. Conservation chimique post-mortem

Après la mort d'un organisme vivant, son corps est exposé à une série de processus physicochimiques susceptibles d'influencer la qualité de sa préservation. Les conditions environnementales jouent alors un rôle fondamental sur les influences potentielles et le degré d'intervention.

Ce constat souligne donc l'importance de travailler à partir de l'évolution chronologique des éléments chez un individu non pas des taux bruts. Cela nous permet de passer outre les problèmes d'influence du milieu, comprenant notamment l'eau, l'air et le sol, principales influences sur la variabilité induite par l'environnement (qui se superpose à la variabilité individuelle).

36. Ppm signifie partie par million. Il exprime une fraction massique (1 ppm = 1 mg/kg) et correspond à un millionième.

II.3.3.1. Fossilisation et diagenèse : définitions

La diagenèse des tissus du squelette est couramment définie par des modifications physicochimiques et biochimiques dans les composantes organiques et inorganiques (Elliott, 1993) soumises à des pressions et des températures faibles, dans l'environnement de la subsurface (Boulvain, 2007). Les processus en application dans la diagenèse débutent avec la mort d'un organisme vivant, donnant lieu à l'arrêt du contrôle biologique sur les mécanismes physiologiques, à l'origine de la disparition des barrières membranaires. À partir de ce moment qui marque le début du processus de diagenèse, le squelette est exposé à des modifications élémentaires selon deux mécanismes. Une partie des changements chimiques est liée au remplissage par des ions élémentaires non biogéniques des espaces vides laissés par la décomposition de la matière organique et la perte d'eau, ce qui rend possible l'hydrolyse des protéines, selon un rythme régi par les propriétés physiques du sol et la température ambiante, qui détermine la vitesse de l'hydrolyse des protéines. Ces événements prédisposent les tissus du squelette à la seconde partie des transformations, les échanges minéraux entre ceux du squelette et ceux de l'environnement dus à des phénomènes tels que le lessivage par les eaux souterraines, les intempéries ou les attaques microbiennes, par exemple. Cet ensemble de substitutions se traduit alors par une contamination minérale (Elliott, 1993).

La fossilisation est également un processus de transformation physico-chimique des restes organiques permettant leur conservation (Susanne et Polet, 2005), constituant un cas particulier de la diagenèse. Aussi, un fossile peut être globalement défini comme une trace organique enfouie par des processus naturels et ensuite conservée de façon permanente, pour les tissus du squelette comme pour un certain nombre d'autres matériaux dotés de matière organique. La fossilisation peut avoir lieu par l'intermédiaire de plusieurs mécanismes, capables de conserver des composants organiques et/ou inorganiques, que l'état soit altéré ou pas. Parmi les exemples de préservation biologique, on peut citer les insectes piégés dans l'ambre et la momification dans la glace, ainsi que les impressions de méduses et empreintes de pas. Les exemples de matériaux inorganiques sont illustrés par les coquilles en calcite, ainsi que les dents (non modifiées), et, enfin, de l'os (modifié à des degrés variés). La préservation de l'os se produit par pétrification, résultant du remplissage des micropores du matériau ou bien par substitution, grossière ou moléculaire, de la matière d'origine du tissu par d'autres éléments similaires ou différents (Elliott, 1993).

Par conséquent, la fossilisation des os est un processus physico-chimique complexe comportant : la décomposition de composés organiques, par l'intermédiaire de l'autolyse et/ou l'activité microbienne et la mise en place et/ou l'échange de composants inorganiques dans la fraction minérale apatitique des tissus durs (Elliott, 1993).

La distinction entre fossilisation et diagenèse n'est pas toujours très claire. Bartsiokas et Middleton (1992) définissent la fossilisation comme procédé physico-chimique survenant naturellement et qui préserve la morphologie des structures (par échange ionique, augmentation de la taille des cristallites, perte de matière organique et de minéraux de remplissage), tandis que la diagenèse comprend en même temps un processus destructeur. D'autres suggèrent un lien

entre la limite de la diagenèse et le métamorphisme³⁷, identifié par Pate et Hutton (1988) comme des modifications diagénétiques correspondant à des variations de cristallinité alors considérées comme des étapes de la fossilisation, car elles transforment l'hydroxyapatite biologique. Mais la démarcation exacte, loin de faire l'unanimité, reste floue (Foucault Raoult, 1995), d'autant plus que les caractéristiques retenues du phénomène changent à travers les disciplines qui l'utilisent. En anthropologie biologique, le terme de fossilisation est traditionnellement utilisé pour des pièces anciennes qui se distinguent de récentes par leur plus grande dureté et densité (Susanne et Polet, 2005), et son attribution évoque généralement des spécimens issus de contexte préhistorique.

Le concept de la diagenèse a été initialement développé en géologie pour décrire les processus affectant les sédiments et aboutissant à la formation de roches sédimentaires après leur dépôt. Les anthropologues biologiques ont ensuite adapté ce terme, qu'ils orientent plus précisément pour définir les altérations post-mortem de la composition chimique du squelette après son enfouissement dans le sol.

Dans les cas qui nous intéressent, Les Grands Peupliers à Hières-sur-Amby, Saint-Laurent de Grenoble et Saint-Martin à Paris, le processus de diagenèse est à surveiller, mais la fossilisation, processus plus long, accéléré par des conditions environnementales et climatiques spécifiques extrêmes, ne semble pas être en question.

11.3.3.2. Diagenèse : état du problème

Lorsqu'un individu meurt, les éléments de son corps échappent à la gestion physiologique au profit des interactions directes avec son milieu extérieur. De ce fait, parallèlement à l'extension des recherches des différentes applications de la chimie en matière de paléonutrition, des études taphonomiques sur la préservation de l'intégrité physique et chimique des tissus durs se sont multipliées afin, essentiellement, de déterminer les phénomènes postdépositionnels environnementaux liés à des processus dits de diagenèse (Kyle, 1986; Pate et Hutton, 1988; Price *et al.*, 1992; Kohn *et al.* 1999).

Le terme de diagenèse englobe tous les processus physiques, chimiques et biologiques qui s'opèrent de façon post-mortem dans l'environnement du dépôt funéraire.

Dans le détail, il s'avère que les ions élémentaires non biogéniques sont capables de remplir les espaces vides laissés par la décomposition de la matière organique ou de remplacer des ions structuraux dans le cristal d'apatite, ou encore d'être absorbés en surface (Lambert, 1989). Ces transferts ioniques peuvent être favorisés par des phénomènes de réagencements internes de la structure cristalline qui impliquent la croissance de l'apatite minérale ce qui offre, au moment de la recristallisation, des occasions supplémentaires aux oligoéléments présents dans le liquide diagénétique environnant de se loger dans la structure apatitique cristalline (Denys *et al.*, 1996; Herwartz *et al.*, 2011). La structure cristalline de l'hydroxyapatite biologique présente de grandes surfaces, ce qui offre une disponibilité pour les échanges chimiques pouvant s'élever jusqu'à 25 %. Tous ces mécanismes et conditions entraînent une large variabilité d'altération des signaux chimiques d'origine des tissus du squelette (Elliott, 1993). Il est donc nécessaire de déterminer si

37. C'est-à-dire une modification à l'état solide, entraînant un réaménagement des minéraux à l'échelle atomique.

ce processus modifie significativement les données livrées par les analyses chimiques, de manière à influencer l'interprétation des résultats.

Pour estimer le degré de diagenèse subi par des échantillons il faut avoir conscience des facteurs et des mécanismes susceptibles d'intervenir et de modifier les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques. Une partie des facteurs à prendre en considération concerne les modalités et conditions d'inhumation ; les caractéristiques géologiques du sol, qui comprennent la porosité du sol ; la nature des eaux souterraines ; la nature du pH du sol plutôt favorable à la conservation de l'hydroxyapatite du squelette qui est relativement insoluble lorsque le pH est alcalin et augmente lorsqu'il atteint un pH d'environ 6.5/6 et la disponibilité des minéraux solubles chimiquement mobiles et aptes à la contamination. Les changements chimiques ne peuvent pas être évalués en fonction de la durée de l'inhumation, entre le moment du dépôt et le moment de l'exhumation (Klepinger *et al.*, 1986). Une autre série de paramètres à traiter s'exprime à travers les caractéristiques individuelles telles que l'âge à la mort de l'individu étudié. En effet, les immatures n'ayant pas une minéralisation tissulaire aussi aboutie que les individus matures, leurs tissus sont donc plus poreux. Ceci est clairement manifesté dans l'étude de Lambert *et al.* (1985) sur la population de Woodland sur laquelle il observe une augmentation inhabituelle de manganèse, potassium, aluminium et fer chez les jeunes enfants, mais aussi chez les personnes âgées. Parmi les variations individuelles, plusieurs chercheurs se sont interrogés sur le rôle du sexe sur les différences de concentration élémentaire. Il s'avère effectivement que certains phénomènes physiologiques comme la grossesse et l'allaitement, connus pour provoquer une perte du calcium sur le vivant (Price *et al.*, 1985), ou encore la décalcification favorisant l'infiltration d'ions venus de l'extérieur touchent plus fortement les sujets féminins ménopausés. Si on considère les possibilités d'infiltration, le type de matériau échantillonné a des répercussions incontestables et il est actuellement reconnu que, par exemple, les os spongieux, les os corticaux, la dentine ou l'émail n'ont pas la même prédisposition aux altérations (Mays, 2003 ; Song, 2004). À ces états de fait s'ajoute un certain nombre de mécanismes, parmi lesquels, le climat et la température environnementale, l'activité enzymatique du sol, la minéralogie et la texture du sol, les modalités de précipitation, le contexte bactérien, le mouvement des eaux souterraines (Hassan et Ortner, 1977 ; Pate et Hutton, 1988). Ces éléments de variations peuvent aussi bien enrichir, épuiser, se substituer à l'hydroxyapatite d'origine, à la faveur des éléments du sol, par les échanges ioniques (Kyle, 1986 ; Pate et Hutton, 1988). Par exemple, Hassan et Ortner (1977) ont mis en évidence la possibilité pour le calcium d'être introduit par le biais des précipitations sous forme de carbonate de calcium présent dans les eaux souterraines. On peut également citer le strontium, et, dans une moindre mesure, le baryum, tous les deux bien renseignés et connus pour leur présence significativement importante dans certaines roches métasomatiques ou magmatiques. Leur concentration est aisément incorporée par les eaux courantes, ce qui les rend dès lors particulièrement propices à une substitution du calcium dans le squelette (Denys *et al.*, 1996).

Dans l'absolu, on peut donc s'attendre à ce qu'un contexte climatique chaud et humide, ou encore, dans les zones où l'irrigation est couramment pratiquée, les transferts d'ions du sol vers le squelette soient favorisés. À l'inverse, des conditions climatiques arides vont jouer en faveur d'une certaine stabilité ionique (Lambert *et al.*, 1989).

À partir de ces observations, on peut alors affirmer que le signal biologique initial des ratios élémentaires est capable de disparaître, ce qui peut remettre en question les interprétations fondées sur les résultats des analyses chimiques.

Pour tenter de remédier aux problèmes posés par la contamination post-mortem il est donc préférable, comme plusieurs auteurs le suggèrent (Kyle, 1986; Arruda-Neto *et al.*, 2009), pour évaluer l'importance de la diagenèse, d'examiner, au cas par cas, la chimie des sols archéologiques, ainsi que les facteurs et les mécanismes les plus probablement en cause, et dans quelle mesure.

Une attention particulière doit être portée aux précipitations et autres mouvements d'eau, car les ions minéraux disponibles dans les sols ne sont pas tous disponibles pour la contamination. En effet, les échanges ioniques s'effectuent en solution. Or la composition du sol ne reflète pas la concentration ionique d'une solution en raison de la solubilité différentielle des divers minéraux (Pate et Hutton, 1988).

La substitution cationique du calcium se fait aisément et comprend généralement des éléments alcalino-terreux qui ont des rayonnements proches de lui, c'est-à-dire, potentiellement, le strontium, le baryum, le radium et le magnésium, en plus de quelques autres éléments tels que le plomb. Les substitutions anioniques, à l'inverse, sont moins fréquentes, car elles sont plus complexes (Elliott, 1993). Les ions carbone se substituent facilement aux ions phosphate et s'accompagnent parfois de sodium et de calcium (Elliott, 1993).

Les expérimentations de Kyle (1986) et Kohn (1999) arrivent à la conclusion que les éléments les plus concernés par les altérations d'une diagenèse dans le squelette humain sont le baryum, le calcium (aisément remplacé post mortem par le strontium, le baryum, le plomb, le magnésium, le potassium, et le sodium), le cuivre, le manganèse, le fer, l'aluminium, le phosphore (substitués par des ions carbone), le potassium et le silicium, que ce soit par perte ou par acquisition. À l'inverse, les éléments les plus résistants à une modification post-mortem sont le magnésium et le strontium (Lambert *et al.*, 1985; Kyle, 1986; Elliott, 1993; Kohn, 1999; Izci *et al.*, 2013). Plusieurs expérimentations mettant en œuvre des outils de détection de la diagenèse n'ont pas relevé d'altérations chimiques concernant le strontium (Sillen et Kavanagh, 1982) et les auteurs en ont déduit que le strontium n'était pas soumis aux processus de dégradations diagéniques. Par la suite, des indices de contamination de la teneur en strontium ont finalement été remarqués par quelques études. Les expérimentations d'Elliott (1993) ont pu confirmer l'étroite corrélation entre l'absorption du strontium et la stabilité de la matrice d'hydroxyapatite, une promotion des interactions dans des conditions alcalines et un modèle d'absorption au cours du temps présentant une assimilation rapide, au début du processus de diagenèse, qui diminue ensuite progressivement. La stabilité relative du strontium, responsable de la rareté de son altération chimique pourrait s'expliquer par le fait, soutenu par des analyses *in vitro* de Pate et Brown (1985), que cet élément ne peut pas être remodelé avant une déminéralisation complète, limitant ainsi les possibilités de dénaturation. Le cas du zinc, pour ce qui est de l'os et la dentine, est encore débattu, mais il apparaît relativement résistant à la diagenèse dans l'émail. Nous resterons néanmoins prudents, car les études isolées ne peuvent pas représenter des preuves pour des généralités (Bocherens, 1994; Sponheimer et Lee-Thorp, 2006).

La question de l'altération des signaux chimiques du strontium mérite d'être détaillée. La plupart des chercheurs en paléoalimentation ayant appliqué l'étude des éléments trace à des restes humains de la préhistoire suggèrent que le strontium reste stable et donc que son incorporation dans les phosphates de calcium de la matrice minérale n'est pas sujet à la diagenèse. Cependant, l'absence de changements diagénétiques postdépositionnels a continué d'intriguer certains auteurs (Sillen, 1981 ; Sillen et Kavanagh, 1982 ; Pate et Brown, 1985), et ce, malgré l'explication de l'impossible remodelage du strontium avant une déminéralisation complète. À cela s'ajoute une considération métabolique, car il faut rappeler que, lorsque le squelette est introduit dans un environnement géochimique il n'est plus soumis à la discrimination biologique contre le strontium telle qu'elle est décrite plus haut. Il n'en reste pas moins que l'altération postdépositionnelle avec le strontium est rare, conclusion d'ailleurs soutenue par Schoeninger (1979) qui précise et définit la position cationique du Sr et du Ca dans l'os minéral comme généralement non affectée par la diagenèse dans une large gamme de conditions.

On notera pour compléter cet exposé que les ions minéraux ont plus de facilités à se précipiter dans les vides laissés par la matière organique en décomposition, qu'à se substituer à d'autres ions minéraux. Cette observation mise en parallèle avec le fait que l'émail mature présente 4 % de matière organique, contrairement à l'os cortical par exemple qui dispose de 22 % de matière organique, ce dernier est indiscutablement plus sensible à d'éventuelles contaminations chimiques post-mortem. Le choix de l'émail comme matériau d'étude est ainsi justifié par la qualité de sa conservation, la meilleure du squelette, même s'il n'est pas complètement à l'abri des modifications.

Ce paragraphe a donc bien souligné et expliqué le problème de la diagenèse. Il a également mis en évidence la complexité, la variabilité et le caractère imprévisible de la modification diagénétique des différents tissus du squelette. La connaissance et la prise en considération de ce phénomène inévitable a conduit au développement d'un certain nombre de démarches visant à identifier et contourner le problème de contamination élémentaire (Price *et al.*, 1992), dans le but de réduire les effets négatifs de la diagenèse sur l'interprétation des résultats et d'améliorer la pertinence des recherches fondées sur les analyses élémentaires.

II.3.3.3. Identification et solutions

Ainsi, pour pallier les risques de confusion et interpréter la contamination, plutôt que les indicateurs physiologiques recherchés, les ions élémentaires accumulés pendant la période d'inhumation doivent être éliminés physiquement ou identifiés pour être pris en compte.

Sillen (1981) a d'abord attiré l'attention sur les changements de concentrations en calcium et en strontium au fil du temps, à partir de tissus durs provenant de sites préhistoriques³⁸, et donc sur le rapport Sr/Ca, rapidement attribué à un phénomène d'homogénéisation avec le milieu, par diagenèse. De leur côté, Lambert *et al.*, (1979), à propos des altérations par diagenèse, avaient suggéré la détection de l'aluminium, qui n'est normalement pas absorbé par l'os sur le vivant, et dont la présence devait indiquer une fossilisation post-mortem (Rheingold *et al.*, 1983).

38. Un site Natoufien (-12 000) et un site Aurignacien (- 20 000), tous les deux en Israël.

Cependant, l'absence ne peut pas être catégoriquement interprétée. Il s'est rapidement avéré que ces changements chimiques parvenaient à atteindre, selon les cas, des niveaux capables de fausser les indicateurs biogènes étudiés. À partir de là les recherches se développent dans trois directions : la détection de la contamination, le moyen de supprimer la contamination accumulée au fil des années, ainsi que la mise au point de facteurs de correction à appliquer aux altérations évaluées.

11.3.3.3.1. Le nettoyage

Schoeninger (1979) et Lambert *et al.* (1989 ; 1990) s'intéressent aux moyens de contourner la contamination élémentaire des squelettes par le sol d'inhumation et envisagent dans cette optique un nettoyage de l'os. Plusieurs techniques différentes sont utilisées. On distingue deux catégories : le nettoyage mécanique et le nettoyage chimique (Lambert *et al.*, 1990). Les premières tentatives de nettoyage sont chimiques. Elles comprennent la mise en poudre d'une partie osseuse, laquelle est ensuite soumise à une solution acide en vue d'une dissolution des contaminants dans une phase acide. Le nettoyage acide est initialement conçu pour supprimer le calcium et les carbonates, car ces éléments sont sensibles à l'acide et sont les plus abondants dans le sol. Ainsi, lorsque le matériel contaminé est trempé dans l'acide, la solution devient riche en calcium et en éléments alcalins, mais pauvre en phosphore. Par la suite Sillen approfondit sa démarche en développant une méthode séquentielle de lavage, sur la base de la solubilité différentielle de la diversité des apatites biologiques et géologiques. Cela permet donc de distinguer les apatites biogéniques des apatites diagéniques (Elliott, 1993).

Le nettoyage mécanique peut prendre deux formes, soit un simple brossage et lavage à l'eau distillée, soit un procédé plus agressif par abrasion des surfaces. Certains auteurs (Budd *et al.*, 1998 ; Wright et Schwarcz, 1998) ont également proposé un nettoyage aux ultrasons. Il est utilisé dans le but de supprimer, ou au moins diminuer les éléments inorganiques absorbés à la surface et ceux qui ont rempli les interstices vides, au cours de la période d'inhumation. Le nettoyage physique s'est révélé utile pour éliminer une série d'éléments présents dans les oxydes et les argiles des sols, en particulier le fer, le manganèse, l'aluminium, le potassium et le zinc, en quantité naturellement faible dans l'os intact, et qui contaminent de façon accentuée la surface de l'os. Cependant, ils ne sont pas en mesure d'agir sur une contamination uniforme et généralisée à l'ensemble de l'os. Or nous ne pouvons pas savoir, a priori, si la contamination d'une pièce osseuse est uniforme ou inégale (Lambert *et al.*, 1989 ; 1990). Nous comprenons dès lors l'intérêt de s'orienter vers d'autres moyens de nettoyage, comme les traitements chimiques. Il en existe deux techniques, utilisant dans les deux cas de la poudre d'os extraite de l'échantillon archéologique et de l'acide acétique. Ces préparations sont capables de supprimer de la matière diagénétique tout au long de l'os et de réduire significativement les niveaux de zinc, de cadmium, de potassium, d'aluminium, de fer et de manganèse dans l'os, mais les concentrations de sodium, calcium, magnésium, strontium et baryum restent inchangées. En outre, il arrive également que certains éléments biogènes disparaissent de la surface de l'os sous l'action de l'attaque acide (Lambert *et al.*, 1990). Le lavage chimique s'est avéré, au fil des diverses expérimentations, efficace pour minimiser les niveaux diagéniques de calcium et de phosphate (Elliott, 1993), sans affecter les

éléments insolubles dans l'acide, mais présente des risques (dont la mesure dépend du niveau de l'acide choisi pour l'opération) de suppressions élémentaires non diagéniques (Price *et al.*, 1992).

Plusieurs auteurs (Kyle, 1986) ont signalé ce problème de persistance de la contamination de la matière osseuse même après le nettoyage, quel qu'il soit, en démontrant que certains éléments (le magnésium, le potassium, le fer, par exemple) parmi les plus importants pour les problématiques liées à l'alimentation ne sont pas réceptifs aux traitements proposés. La meilleure solution semble donc de combiner nettoyage mécanique et nettoyage chimique doux multiélémentaire (contrairement aux premiers qui n'avaient testé que le strontium et le calcium) tout en ayant conscience de pas être complètement à l'abri, après cela, des altérations par diagenèse.

II.3.3.3.2. Cristallinité et solubilité

Cependant, cette solution ne semble pas envisageable pour l'émail dentaire sans une perte notable d'informations.

Pour tenter de composer avec cet obstacle, une des solutions envisagées est l'identification des phénomènes diagénétiques du fait de l'environnement post-mortem. La première démarche dans ce sens consiste en un examen de la microstructure des tissus du squelette à l'aide d'un microscope. Cette première observation, la plus simple à mettre en œuvre et la plus accessible, peut révéler des perturbations post-dépositionnelles dues à l'activité microbienne, laquelle peut avoir des incidences sur la composition chimique (Schoeninger *et al.*, 1989; Elliott, 1993). Il a également été remarqué que la décomposition de la matière organique et la modification chimique de l'apatite sont susceptibles d'avoir une incidence sur l'orientation des cristallites, détectable par l'observation du matériel sous lumière polarisée (Elliott, 1993). Mais, dans l'ensemble, il est assez complexe de déterminer la préservation de la fraction inorganique (et organique) des tissus durs du squelette sur la base de leur morphologie externe. L'utilisation de lames histologiques a également été proposée pour cette identification. Il s'est rapidement avéré que certains os fossilisés conservent leur structure à ce niveau d'observation alors qu'une altération chimique est fortement probable dans ce cas (Schoeninger *et al.*, 1989). Cette proposition est par conséquent vite abandonnée.

D'autres démarches s'orientent plutôt vers l'identification de la diagenèse, dans le but de la corriger afin de remonter aux niveaux initiaux. Sillen (1992) a tenté d'élaborer un protocole qui consiste à définir un « profil de solubilité », fondé sur les caractéristiques de solubilité de l'apatite, lui-même fonction de l'état de cristallinité des hydroxyapatites. Un changement global de la cristallinité se traduit par une modification de la netteté des motifs cristallins pendant la période d'inhumation (Kyle, 1986). Dans ce contexte, la progression de la cristallinité est considérée comme un reflet de l'augmentation de la taille des cristallites, ce qui révèle, au niveau chimique, une altération des concentrations élémentaires. La tendance la plus fréquemment observée est une augmentation de la taille des cristaux, qui traduit une accumulation de strontium (Tuross *et al.*, 1989; Elliott, 1993) et/ou de fluor (Bartsiokas et Middleton, 1992).

L'interprétation de l'intégrité de l'état de cristallisation (taille, perfection, organisation ...) des os ou des dents étudiés se fait couramment par la définition d'un profil de solubilité (Sillen, 1992). Le raisonnement s'appuie sur certaines caractéristiques reconnues de la chimie élémentaire.

Par exemple, il est avéré que la substitution des ions carbone aux ions phosphate augmente la solubilité des apatites (Koch *et al.*, 1992). De même, dans certains cas de fossilisation la teneur en sodium est réduite, ce qui augmente également la solubilité des cristaux (Elliott, 1993); alors que la substitution des ions fluor aux ions hydroxyle, réduit de cette manière la tension du cristal et, de ce fait, réduit la solubilité de l'apatite (Bartsiokas et Middleton, 1992; Koch *et al.*, 1992). Le même constat se fait au niveau de la solubilité de l'hydroxyapatite, dans le cas du phénomène de recristallisation. Ainsi la solubilité attendue de l'apatite diagénétique est différente de celle des apatites cristallines biologiques.

Si l'état de cristallisation est cohérent avec ce qu'on peut attendre du matériau traité, c'est-à-dire ressemblant à des valeurs modernes, cela indique, dans ce raisonnement, que les analyses chimiques peuvent être effectuées sans craindre une complexification de l'interprétation liée à une altération. Dans cette optique le profil de solubilité est parfois complété par d'autres critères tel que l'examen des rapports Sr/Ca ou Ca/P. L'augmentation de la teneur en strontium, qui s'accumule avec le temps, d'ailleurs démontrée dans l'étude de Tuross et ses collègues (1989), est suffisamment conséquente pour se répercuter significativement sur le ratio Sr/Ca. La question est désormais de savoir si l'état de cristallinité constitue une preuve indubitable de l'intégrité chimique de l'échantillon. Pour travailler à cette interrogation, certains auteurs (Sillen, 1981; Sillen et Kavanagh, 1982) ont démontré que des dépôts de carbonate de calcium et un changement dans le rapport Sr/Ca avaient eu lieu avec le temps, ce qu'ils ont attribué à la dissolution et la recristallisation de l'hydroxyapatite qui impliquent des échanges ioniques (Tuross *et al.*, 1989), notamment le strontium pour les ions calcium, dans la matière minérale.

La substitution d'ions étrangers au réseau apatitique est susceptible de provoquer des déficiences en calcium, dont il résulterait, logiquement, une diminution du rapport calcium/phosphore (Robinson *et al.*, 1995). De ce fait, le rapport Ca/P a souvent été utilisé comme indicateur de l'état de cristallisation, car une augmentation de ce ratio suggère qu'il y a eu recristallisation de l'hydroxyapatite par d'autres phosphates de calcium (Burton *et al.*, 1999; Elliott, 1993; Lee-Thorp, 2002; Antoine *et al.*, 2000; Mays, 2003). Le rapport Ca/P est aussi fréquemment mesuré dans les produits d'extraction suite au lavage chimique. Dans ce raisonnement, un ratio Ca/P élevé dans les solutions issues des premiers lavages est associé à une suppression des composants initiaux très solubles, dans un processus de diagenèse (Elliott, 1993).

De son côté, Schoeninger (1982) aboutit à la même conclusion à partir de ses expérimentations fondées sur des analyses isotopiques du strontium corrélées avec la taille des cristaux apatitiques.

D'autres chercheurs, dans une démarche courante, ont préféré utiliser la diffraction à rayons-X afin de mettre en évidence une éventuelle augmentation des cristaux, révélatrice du phénomène de dissolution et recristallisation de l'hydroxyapatite, et également capable de souligner les différentes phases minérales, ce qui permet de vérifier l'intégrité cristalline de l'os minéral (Kyle, 1986; Schoeninger *et al.*, 1989; Tuross *et al.*, 1989; Bartsiokas et Middleton, 1992), voire la spectroscopie infrarouge qui affiche la conservation des motifs histologiques (Kyle, 1986; Bartsiokas et Middleton, 1992; Price *et al.*, 1992) et qui semble donner de meilleurs résultats (Koch *et al.*, 1992). La diffraction par rayons-X se fait à partir d'échantillons réduits en poudre et les observations expérimentales montrent fréquemment des altérations extrêmement minimes,

qui n'impliquent pas pour autant une contamination chimique, mais la délimitation, avec une modification morphologique, susceptible de conduire à un résultat faussé des analyses, n'est pas définie (Schoeninger *et al.*, 1989). De plus, ces tests ne permettent pas directement de confirmer ou d'infirmer l'intégrité des éléments et de leurs ratios, car ils peuvent réussir ou échouer, que les concentrations analysées reflètent ou pas les proportions biologiques (Kyle, 1986; Burton *et al.*, 1999). Pour compléter l'examen de la cristallinité, il est possible de prendre en considération certains éléments indicateurs, ou contaminants connus, du phénomène de solubilité différentielle afin de mettre en évidence un changement probable diagénétique : le silicium, l'uranium, l'yttrium et les terres rares (Kyle, 1986). Leur présence suggère l'ajout vraisemblable d'autres éléments plus directement significatif pour les études archéométriques, notamment celles qui concernent l'alimentation du passé.

Les processus ne sont pas complètement éclaircis, mais on peut raisonnablement penser que le phénomène de recristallisation réduit la concentration en éléments trace dans l'hydroxyapatite, pendant que la contamination externe, de son côté, l'augmente par l'apport des ions environnants étrangers (Lee-Thorp, 2002). Ces remarques excluent les cas de calcinations osseuses, réactions chimiques provoquant l'augmentation des cristaux, et dont l'identification macroscopique ne fait aucun doute (Bartsiokas et Middleton, 1992).

Cependant, dans le cas où le test de cristallinité serait conforme à nos attentes nous n'aurions aucun moyen de savoir si cet état est primaire ou s'il résulte de conversions et reconversions microcristallines, qui peuvent comprendre des processus de dissolution, de remplacements minéraux, de recristallisation et de substitutions ioniques, aboutissant à un réseau structurellement intact, mais n'excluant aucunement la possibilité d'une altération chimique.

11.3.3.3.3. L'utilisation de ratios

Certains chercheurs mettent beaucoup d'espoir dans l'identification et la quantification de la diagenèse sur l'os grâce à l'examen des ratios isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Kyle, 1986). Cette orientation se justifie par les effets avérés de certaines roches, comme les minéraux argileux, certains « feldspath » ou encore les sédiments siliceux de zones particulières sur l'eau qui se charge de strontium environnemental, aboutissant dans le cas des contaminations osseuses à des valeurs significativement élevées des ratios $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Banner, 1995). À l'inverse, par exemple, les eaux traversant des roches volcaniques dissolvent le strontium, ce qui se traduit par un ratio $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ excessivement faible (Banner, 1995). Les applications de Schoeninger sont particulièrement démonstratives de la démarche proposée. En effet celle-ci utilise les isotopes de strontium sur deux sites différents, un site de Californie (ratio 0,70913) et le site de Western Greenland (ratio 0,746), avec une concentration significativement plus élevée, ce qui lui permet de souligner la probable contamination des ossements du site de Western Greenland (Pate et Brown, 1985). Les méthodes de lavages successifs empruntées à la technique du profil de solubilité et permettant d'examiner les résidus successifs peuvent être employées pour distinguer le strontium biologique et le strontium diagénétique dans le cadre du ratio $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Sillen, 1992). Ce facteur est important à prendre en compte, car, comme nous l'avons déjà évoqué, les risques de contamination par le strontium sont élevés (Lambert *et al.*, 1985; Turcoss *et al.*, 1989). De plus les infiltrations de strontium peuvent

être très inégalement réparties, ce qui ajoute une difficulté pour l'estimation de la proportion de strontium diagénetique en vue d'une correction pour un prélèvement microlocalisé (Koch *et al.*, 1992). En outre, les études sur le sujet ne sont pas assez nombreuses pour disposer d'un référentiel exhaustif des rangs de valeurs attendues, selon les régions, pour utiliser systématiquement et de façon fiable ce repère.

Les altérations des concentrations élémentaires, reflétant initialement des valeurs physiologiques, peuvent être détectées par l'application de certains ratios. Le phénomène avéré de biopurification qui encourage l'organisme à assimiler préférentiellement le calcium par rapport au baryum et au strontium nous permet d'approfondir la question des ratios Sr/Ca et Ba/Ca. En effet, s'ils sont trop élevés (en tenant compte de l'importante variabilité de ces relations élémentaires à travers les plantes) ils peuvent laisser envisager une contamination par le sol. Burton et ses collègues (1999) ont plus largement expérimenté les évolutions des rapports Sr/Ca et Ba/Ca qui, s'ils sont fortement corrélés entre eux, peuvent révéler des valeurs biologiques intactes. Si on accepte l'hypothèse selon laquelle le processus de diagenèse tend vers un équilibre des ossements, aligné sur les ratios du sol, c'est-à-dire que ces ratios aspirent à se rapprocher de ceux du sol, ils risquent d'être anormalement élevés, et ne seront plus proportionnellement corrélés entre eux. Ce point de repère implique que, si les ratios Ba/Ca et Sr/Ca sont corrélés, l'os est chimiquement intact (Burton *et al.*, 1999).

Le strontium étant l'un des éléments les plus sensibles à une modification par diagenèse, Sillen (1992) propose de confronter le ratio Sr/Ca de l'échantillon archéologique à la moyenne connue moderne du même taxon, car il est logiquement caractérisé par une diminution sur les os fossiles à cause de la tendance du squelette à s'équilibrer avec son environnement d'inhumation. Cette comparaison peut se révéler pertinente, à condition de respecter, à cet effet, l'unité géographique responsable des variabilités environnementales qui agissent sur l'individu de son vivant et pendant la période d'inhumation. Inversement, Ba/Ca étant moins élevé dans le sol que dans l'os, on s'attend à une diminution du rapport Ba/Ca dans l'os contaminé (Kyle, 1986).

D'autres chercheurs ont préféré observer les éléments trace en général pour évaluer ceux qui augmentent avec le temps, en comparaison avec des échantillons modernes. En considérant, par exemple, les rapports Sr/Ca et Mg/Ca plus élevés dans le sol que dans le squelette humain, la contamination par diagenèse devrait augmenter ce rapport dans l'os. Pour plus de certitude, Sponheimer et ses collègues (2005) suggèrent une comparaison du rapport Sr/Ca observé sur le matériel archéologique et celui de la faune moderne pour vérifier l'écart avec les niveaux biologiques. Les expérimentations de Bocherens (1994) et Denys (1996), en observant la même démarche, ont démontré aussi que le manganèse, le fer et le baryum sont de bons indicateurs d'une altération diagénetique.

Ainsi, ces raisonnements nous permettent d'avoir une estimation de l'intégrité du baryum et du strontium. Mais ils ne sont applicables que dans les contextes où l'alimentation est dominée par les produits issus de la mer, dont les concentrations en baryum et en strontium sont plus élevées que pour les modèles de concentration de ces éléments connus. De même il convient d'être prudent si l'environnement des sujets est différent de celui où ont été effectuées ces

expérimentations (boisé et tempéré), car nous ne savons pas si le modèle de corrélation établi peut être étendu (Burton *et al.*, 1999).

II.3.3.3.4. La réflexion par comparaisons

Certaines techniques quantitatives comprennent des comparaisons intra- et interosseuses, interindividus et interespèces :

- On peut comparer les valeurs chimiques intra- et interosseuses (en utilisant différents types d'os, avec, en conséquence, des sensibilités nuancées à la diagenèse, généralement les côtes et le fémur). Dans ce raisonnement, d'éventuelles variations traduisent l'absorption d'ions diagéniques (Elliott, 1993).
- On peut comparer les signaux chimiques inter-individus dans le but de définir une gamme de valeurs à laquelle on pourrait s'attendre, mais les complications en rapport avec les différences physiologiques et métaboliques, dont la plupart sont liées aux différences spécifiques dues à l'âge et au sexe, imposent d'importantes limites.
- On peut comparer les espèces afin de mettre en parallèle les composants chimiques des os humains avec ceux du matériel faunique (Sillen, 1981). Sur la base de cette confrontation, l'activité diagénétique est déduite à partir de l'observation des niveaux élémentaires déviés des valeurs attendues à partir de l'alimentation absorbée, en tenant compte des concentrations biogènes de la faune moderne ou contemporaine pour la reconstruction de l'alimentation humaine (Elliott, 1993).

Les différentes comparaisons évoquées peuvent donc être considérées comme des indices utilisables dans le cadre d'une réflexion plus large, mais ils demeurent trop imprécis pour constituer un argument solide soutenant à lui seul une démonstration.

II.3.3.3.5. Les solutions à développer

Certains chercheurs ont orienté leurs recherches vers l'examen du sol d'où ont été exhumés les squelettes étudiés (Lambert *et al.*, 1979; Pate et Hutton, 1988). Lambert et ses collègues (1979) ont procédé à plusieurs prélèvements qu'ils ont analysés. Cette démarche leur permet de comparer la composition de l'os et celle du sol, mais ces données ne peuvent que suggérer la possibilité d'une contamination, elles ne peuvent identifier l'altération de l'os. De leur côté, Pate et Hutton (1988), après leurs travaux sur les comportements des ions présents dans les sols, considèrent comme indispensable l'analyse des sols en contexte d'inhumation dans le but d'estimer la disponibilité des ions échangeables, plutôt que la composition exhaustive du sol. Pour défendre leur réflexion, ils s'appuient sur le principe selon lequel les ratios élémentaires des phases de substitution par diagenèse dans le squelette peuvent être calculés à partir des concentrations ioniques dans les solutions du sol, de l'affinité de ces ions pour la surface du tissu du squelette étudié ainsi que des structures internes du cristal. De cette manière, les parties altérées des restes osseux peuvent être distinguées de celles qui conservent les signatures chimiques du vivant.

Pate et Hutton (1988) attirent également l'attention sur le problème des détériorations microbiologiques, c'est-à-dire la possibilité de dissolution par acides organiques produits par des micro-organismes qui souvent attaquent les composants de la trame protéique des tissus durs

(Antoine *et al.*, 2000 ; Lee-Thorp, 2002). Mais, bien qu'elles soient reconnues, ces agressions sont très peu documentées et il n'existe pas de modèle de leur implication.

Une autre piste d'étude est ouverte par quelques géologues dont les expériences se sont portées avec plus d'attention sur la distribution et l'absorption des éléments terres rares (Barfod *et al.*, 2003 ; Herwartz, 2011), ou autres éléments radioactifs tels que l'uranium ou le thorium (Denys, 1996 ; Kohn *et al.*, 1999 ; Balter *et al.*, 2008).

L'uranium a la capacité d'interagir avec les tissus osseux soit par liaison ionique avec la matière organique, soit par absorption à la surface des cristaux minéraux d'hydroxyapatite, soit par incorporation en échange d'ions calcium. La mobilité et le transport des ions uranium dans le squelette sont dépendants de l'environnement d'inhumation, lequel est déterminé par son état d'oxydation. Dans tous les cas sa présence dans les ossements étudiés est un indicateur sans équivoque d'une action diagénétique (l'os intact contient rarement plus de 0.2 ppm d'uranium). L'absorption de l'uranium semble favorisée par un pH neutre et une température élevée. Le rapport calcium/uranium est lui aussi significatif en cas d'altération chimique, car les ions de ces deux éléments ont tendance à s'échanger de manière à aboutir à une diminution de ce ratio pendant la diagenèse (Elliott, 1993).

Herwartz et ses collègues (2011) suggèrent que l'utilisation des terres rares dans les analyses chimiques sur le squelette pourrait être un meilleur indicateur de l'altération chimique de l'apatite primaire à cause de sa tendance à l'augmentation générale des éléments terres rares avec le temps. On sait, par exemple, que le calcium est préférentiellement remplacé par l'yttrium dans la structure apatitique de l'os (Pate et Brown, 1985), on peut donc raisonnablement supposer qu'une diminution du calcium parallèle à une augmentation de l'yttrium reflète des changements chimiques post mortem. D'autres procédés se sont tournés vers l'observation du comportement du lutétium, du hafnium, du lanthane (Barfod *et al.*, 2003 ; Herwartz *et al.*, 2011). Ces recherches ont fait preuve d'un grand intérêt pour les questions de provenance, soutenues par les cartes de répartition des éléments terres rares (Barfod *et al.*, 2003). Cependant, les études, aussi prometteuses soient-elles sur le sujet, démontrent un problème d'absorption différentielle selon les échantillonnages, donnant ainsi un aspect ambigu aux interprétations (Herwartz *et al.*, 2011). En général plutôt axées sur les problèmes de datation des restes anthropologiques et zoologiques (Balter *et al.*, 2008 ; Herwartz *et al.*, 2011), les études montrent que les connaissances restent insuffisantes pour utiliser les terres rares pour la détection de la diagenèse.

Dans tous les cas les études pour lesquelles la diagenèse est un réel problème, en particulier pour l'interprétation paléalimentaire, sont ceux qui présentent des matériaux fossiles pour lesquels le processus aboutissant à cet état passe obligatoirement par des modifications chimiques. Malgré les doutes exprimés par certains chercheurs (Turcoss *et al.*, 1989) à l'égard de l'emploi des éléments trace en vue d'une restitution paléalimentaire, on peut espérer obtenir des résultats intéressants compte tenu des progrès qui se font sur la détection de la diagenèse, permettant la mise au point de modèles de correction correspondants. Il semblerait que, sauf conditions de sols extrêmement défavorables, les squelettes des périodes historiques ne soient pas suffisamment exposés en temps pour être atteints par ce type de dénaturation ou, dans tous les cas, pas de façon significative. Pour

une meilleure fiabilité, l'utilisation croisée de plusieurs de ces méthodes semble préconisée pour les études sur la chimie des os appliquée à l'alimentation du passé. En outre, travailler sur l'émail dentaire plutôt que sur l'os, et qui plus est sur des dents non fossilisées, apparaît comme un choix relativement à l'abri des phénomènes de diagenèse.

Compte tenu de l'importante source d'éléments diagénétiques dans l'environnement géologique, il est essentiel de comprendre la disponibilité et le comportement géochimique des oligoéléments ainsi que leur relation avec la nature physico-chimique du matériel inhumé.

La difficulté de définition des altérations post-mortem est donc un problème délicat pour les anthropologues travaillant sur des questions de reconstitution du régime alimentaire des individus issus de populations anciennes, à partir de la composition chimique du squelette. Certains chercheurs ont préféré abandonner la piste des ratios élémentaires jugeant trop périlleux la détection des éléments incorporés et la restitution des signaux originaux représentés par les signatures chimiques post-minéralisation. Et ce d'autant plus que la couche sous-jacente à la surface est connue pour sa sensibilité particulière aux échanges d'ions minéraux post mortem ou du vivant avec l'environnement buccal. Une autre partie des spécialistes de ces sujets, considérant l'émail pour sa plus grande résistance à la diagenèse par rapport à tous les autres tissus biologiques, pense qu'il présente un intérêt incontestable pour les analyses chimiques (Lee-Thorp, 2002), notamment grâce à sa haute minéralisation qui fournit une haute imperméabilité aux altérations post-mortem. Ces spécialistes persistent donc à voir l'émail dentaire comme un matériau archéologique précieux, en particulier pour la reconstruction de transitions alimentaires.

Les quatre premiers points de cette sous-partie sont focalisés sur la dynamique de l'os antemortem. À l'inverse le dernier point de cette sous-partie est consacrée à la dynamique post-mortem des tissus durs du squelette.

Dans tous les cas, les analyses quantitatives dans les études paléochimiques sont limitées par le manque de données de référence, que ce soit pour les populations préhistoriques, historiques ou modernes.

Compte tenu de la multitude des complications qui existent dans la définition de la teneur en strontium du squelette humain, on peut raisonnablement penser que la multiplication des sources d'informations (observations matérielles et géologiques, analyses isotopiques, par exemple) améliore les tentatives de reconstructions paléoalimentaires.

Dans ce travail, nous avons donc utilisé la dent, car, outre la chronologie de l'enregistrement biologique centrée sur l'enfance, la couronne dentaire en particulier est l'élément le plus résistant du squelette aux altérations physiques et chimiques. En ce qui concerne le nettoyage chimique, nous n'avons utilisé que de l'acide acétique après le prélèvement de l'échantillon, mais aucun agent plus agressif pour ne pas risquer la suppression d'éléments biogéniques. Pour ce qui est du nettoyage mécanique, nous avons eu recours à l'eau déionisée, aux ultrasons et au méthanol (*cf. infra* III. 1.3). Nous avons fait les choix de nettoyage qui nous ont semblé optimums pour privilégier la conservation de l'intégrité physique et chimique du matériel.



chapitre III

CHOIX MÉTHODOLOGIQUES

À ses débuts, la paléo-odontologie se concentre sur l'observation macroscopique des restes dentaires. Elle devient par la suite systématique et fait progresser nos connaissances sur les conditions de vies des populations anciennes. Ces observations concernent les pertes de dents (in vivo ou post mortem) et les rapports d'occlusion des maxillaires. L'examen de critères spécifiques des organes dentaires, comme la présence et la quantité de tartre, précise les notions d'hygiène et d'habitudes alimentaires; l'usure des parties occlusales et la présence de myolyses exprimant des habitudes alimentaires; la présence de caries, leur degré et leur localisation, deviennent des examens systématiques pour aborder les sujets de l'hygiène bucco-dentaire, de l'alimentation, des maladies et du stress. On note également l'importance accordée à l'état des tissus de soutien dentaires, qui peuvent présenter des traces de pathologies infectieuses, de fenestration, de kystes, de traumatismes ou d'abcès par exemple et la hauteur d'os alvéolaire résiduel pour mesurer le degré d'alvéolyse; tout cela nous permet d'évaluer la santé parodontale. En outre, d'éventuelles anomalies de constitution (taille, forme, nombre, structure, teinte), de position, d'éruption (agénésie, inclusion) sont des indices qui peuvent nous renseigner sur les carences alimentaires. Les hypoplasies de l'émail quant à elles sont également considérées comme un bon indicateur de stress (Dutour *et al.*, 2006).

Les observations macroscopiques ne sont pas les seules études dentaires possibles. En effet, les progrès techniques et scientifiques nous offrent l'opportunité d'envisager également la microbiologie, l'histologie et les analyses chimiques sur les vestiges dentaires. Les ressources offertes par la microbiologie, appliquée à la pulpe dentaire, ont, par exemple, permis d'identifier la signature moléculaire de vestiges ostéoarchéologiques provenant de sépultures de catastrophes en relation avec des épidémies de peste dans plusieurs travaux (Drancourt *et al.*, 1998). Toutefois nous avons laissé de côté cette discipline qui n'est pas adaptée à nos problématiques.

En revanche, l'histologie, appliquée à l'émail dentaire nous a semblé être une technique prometteuse dans le cas qui nous intéresse. Cette discipline nous permet d'examiner les microstructures de l'émail dentaire dont les caractéristiques sont liées à la formation du tissu.

Pour ce qui est des investigations utilisant la chimie des composants comme les travaux de Bocherens et Herrscher, évoqués plus haut, elles concernent essentiellement les problématiques de paléonutrition.

III.1. SÉLECTION ET PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

III.1.1. Problème de référentiel actuel

Au départ de notre recherche, nous avons collecté un certain nombre de dents déciduales auprès de parents se rappelant l'âge d'introduction de l'alimentation diversifiée et du sevrage définitif. Cette démarche devait nous permettre, d'une part, de disposer d'une collection de référence documentée favorisant la crédibilité de la démarche proposée et, d'autre part, d'avoir la confirmation du moment précis identifié à la lecture de la dent grâce aux signes optiques qui traduisent plutôt une alimentation devenue mixte où l'arrêt définitif de l'allaitement.

Cependant, les dents déciduales, probablement en raison du fait qu'elles n'ont pas fonction biologique à perdurer dans le temps, s'avèrent moins minéralisées que les dents définitives et, de ce fait, elles ne sont pas clairement visibles au microscope. En effet, même si la ligne néonatale, et éventuellement d'autres lignes causées par des stress, peuvent apparaître, les stries régulières sont quasi absentes et ne nous permettent pas de fournir une estimation en temps. Pour pallier cela, un certain nombre de traitements de la dent a été envisagé. Des échantillons ont ainsi été soumis à différents traitements acides (acétique, nitrique et teinture d'iode) supposés attaquer et donc assombrir les lignes de Retzius, mais nos expérimentations n'ont pas été satisfaisantes. Une autre alternative, elle aussi restée vaine, a été d'appliquer des colorants, tels que le bleu de méthylène, le bleu d'alcan ou l'alzarine. Une troisième tentative a consisté en l'association de ces deux méthodes, c'est-à-dire l'utilisation conjointe d'un acide pour attaquer la matière et permettre au colorant de s'infiltrer, mais là encore les stries de Retzius ne sont pas clairement apparues.

Après ces expériences improductives, nous avons recherché le moyen de constituer une collection de référence documentée de dents définitives. Les dents définitives de personnes âgées en vue d'une pose de prothèse dentaire constituent de maigres espoirs étant donné que sont trop abrasées à partir d'un certain âge de ce fait, les informations concernant le sevrage pourraient être perdues.

Nous avons envisagé l'utilisation des premières prémolaires extraites chez les adolescents pour la mise en place d'un appareil dentaire, mais les démarches auprès des orthodontistes ont été infructueuses. Cela s'explique avant tout par les problèmes posés par la réglementation du traitement des déchets biologiques.

Nous avons également tenté de nous tourner vers la faculté d'odontologie. Cependant, l'obtention de dents rencontre là aussi plusieurs obstacles d'ordre administratif. En effet, cette démarche nécessite d'abord la rédaction d'un protocole de recherche clinique avec les tests biochimiques prévus et le mode d'élimination de ces déchets biologiques selon un protocole réglementaire qui doit être validé par le département de la recherche clinique du CHU. Ensuite, il faut faire un dossier en vue d'obtenir l'autorisation du Comité de Protection des Personnes (comité d'éthique). Enfin, lorsque toutes ces démarches sont en règle, une déclaration de collection d'échantillons biologiques doit être faite. Les difficultés d'obtention de toutes ces autorisations préalables à la collecte des dents avec le recueil des consentements écrits des patients,

nous a contraint à abandonner ce projet. Le temps d'obtenir ces informations, les démarches ne pouvaient plus être mises en place pour des raisons de délais.

III.1.2. Choix du type de dent

La formation de l'émail commence peu de temps après le début de la mise place de la dentine et s'achève avant la fin de la formation de la dentine. Lorsque la formation de l'émail est terminée, la racine commence à se constituer. On comprend ainsi les limites chronologiques pendant lesquelles s'élabore l'émail. Cette période est spécifique pour chaque dent puisque leur formation respective se chevauche chronologiquement.

La première dentition se forme à partir de la sixième semaine embryonnaire, en commençant par les incisives supérieures, puis les incisives inférieures, suivies des prémolaires supérieures puis des prémolaires inférieures, et enfin les canines supérieures et inférieures (*cf. supra* II. 1.2). Ainsi, prises ensemble et regardées comme des enregistrements biologiques les dents constituent un miroir de l'enfance en général. Pour sélectionner le type de dent le plus approprié pour l'étude qui nous intéresse, il faut s'assurer de pouvoir y observer, à la fois, la ligne néonatale (qui constitue le point de départ pour l'estimation des âges) et celle du sevrage (ce qui signifie que l'émail de la dent étudiée doit être en cours de formation). De plus, il nous faut tenir compte du fait que, pour les populations du Moyen Âge, le sevrage attendu est, dans la majorité des cas, au moins, de un an. On ne pourra donc pas utiliser les incisives déciduales, car la formation de leur émail s'achève peu de temps après la naissance. De ce fait, l'enregistrement biologique de cette dent risque de ne pas couvrir la période d'introduction d'une alimentation mixte et de sevrage. Pour ce qui est des dents lactéales, nous préférons donc les canines, car, étant donné que ce sont les dernières à être formées, les probabilités d'y trouver les enregistrements de la phase de diversification alimentaire sont plus élevées qu'avec une autre dent. De même, pour travailler avec des dents définitives, il faut exclure l'utilisation des dents de sagesse et des molaires dont l'émail amorce sa formation après la naissance, nous privant ainsi de la ligne néonatale et donc de point de départ pour l'estimation de l'âge du sevrage. En conclusion, il faut opter pour une première molaire si l'on travaille avec des dents définitives, car elle dispose de la ligne néonatale et présente un des plus longs enregistrements de vie après la naissance (et donc de plus grandes chances de couvrir entièrement la période du processus de sevrage) (voir Figure 4).

En outre, nous avons choisi, dans la mesure du possible, des dents définitives plutôt que des dents déciduales, car leur microstructure est plus nette (observations personnelles qui confirment un problème déjà souligné par Fitzgerald *et al.*, 2005), offrent une meilleure lisibilité des coupes histologiques au microscope.

D'autres caractéristiques sont également à prendre en considération pour la sélection préliminaire de la dent, parmi lesquelles, principalement, l'état d'usure ante-mortem, l'état de conservation post-mortem et le stade de développement. En ce qui concerne l'état de conservation, sont exclues d'office les dents dont une moitié au moins n'est pas conservée, que la perte d'émail soit due à une usure naturelle liée à la mastication, ou une carie/un soin dentaire ou encore au détachement d'un pan d'émail dans le sol.

III.1.3. Protocole de préparation des échantillons

Nous allons décrire notre méthode de préparation des lames minces de coupes dentaires (environ 120 μm d'épaisseur), à partir de dents modernes ou archéologiques. Cette méthode s'appuie sur la démarche de Caropreso *et al.* (2000), qui eux-mêmes prennent comme point de départ une procédure décrite par Marks *et al.* (1996).

L'examen histologique des tissus durs, tels que ceux qui constituent la dent, nécessite le recours à la microscopie optique. Cela demande une préparation des lames minces standardisée.

Cette procédure étant destructive, les échantillons sont minutieusement enregistrés au préalable. Chaque dent est photographiée sur toutes ses surfaces, ce qui permet une documentation détaillée pour de futures recherches (Marks *et al.*, 1996).

Des protocoles précis ont déjà été définis, mais ils présentent des inconvénients notables. L'alternative que nous proposons ici tente de réduire les risques d'endommagement, d'améliorer l'exploitation optique et d'augmenter la sensibilité de la méthode analytique des échantillons. Les tissus durs déshydratés, devenus fragiles, demandent une attention particulière, surtout si l'objectif est de faire des coupes de moins de 200 μm . Une difficulté supplémentaire s'ajoute si le centre d'intérêt est l'émail, plus friable que le reste de la dent. En effet, bien que l'émail soit particulièrement dur et résistant, une atteinte à sa structure cristalline telle qu'une section peut entraîner la déstructuration du réseau cristallin et l'éclat de cristaux. Pour une meilleure préservation de l'échantillon, ce dernier est induré avant d'être sectionné, ce qui lui permet d'être contenu au moment de la coupe. Cependant, même en procédant de cette manière, la coupe dentaire ne peut être effectuée à la finesse souhaitée. La coupe obtenue par la procédure présentée ci-dessus est d'environ 200 μm , ce qui est trop épais. Cela correspond à une accumulation de couches amélares et ne permet pas la lisibilité claire d'une seule couche. Cette étape est donc suivie par l'abrasion de la coupe. L'abrasion se fait en deux temps. Une première étape, mécanique, enlève la plus grande partie de l'épaisseur à éliminer. La deuxième étape, manuelle, consiste en une abrasion plus délicate qui permet, à la fois, de réduire l'épaisseur en prenant moins de risque avec l'échantillon fragilisé par une plus grande finesse, et d'utiliser dans ce deuxième temps une lame céramique et un grain d'abrasion plus fin pour enlever les couches de surface qui présentent de nombreux artefacts laissés par la machine à abaser. La qualité de l'échantillon pourrait être augmentée avec l'application d'une résine neutre (de type baume du Canada) qui estompe les artefacts dus à l'abrasion, mais cette procédure ne peut pas être utilisée dans notre cas, car nécessitant un recouvrement de l'échantillon, elle générerait les prélèvements de matière en vue des analyses chimiques. La section doit être effectuée dans la zone centrale de la dent, ce qui nécessite une première coupe légèrement avant le milieu de la dent, puis une deuxième au niveau choisi. Aux différents niveaux de préparation des échantillons, des précautions sont prises (utilisation du méthanol, papier sans poussière) afin de préserver les caractéristiques chimiques d'une éventuelle contamination.

III.1.3.1. Matériel

- Résine (Araldite 2020, Escil, Huntsman)
- Catalyseur (Araldite 2020, Escil, Huntsman)
- Spatule dentaire pour la manipulation des résines
- Appareil de coupe équipé d'une lame diamantée (Isomet, Buehler)
- White spirit (pour le bon fonctionnement de l'appareil de coupe)
- Lames minces en verre (27 x 46 mm, 1,2 à 1,5 mm d'épaisseur)
- Rectifieuse (Buehler, Petrothin, Thin Sectioning System)
- Dispositif de nettoyage par ultrasons (Liarre, Starsonic 35)
- Lame céramique
- Acide acétique
- Méthanol (Fluka)
- Papier sans poussière (Kimtech)

III.1.3.2. Les étapes de la préparation des échantillons

III.1.3.2.1. Nettoyage

Tous les résidus organiques et inorganiques doivent être préalablement enlevés de la dent avant l'inclusion en résine. Pour cette opération, on recommande l'utilisation de l'acide acétique, de l'eau désionisée et du méthanol, répandu sur la surface de l'émail à l'aide d'un pinceau. La dent est ensuite séchée au moyen d'un papier absorbant sans poussière.

III.1.3.2.2. Induration

Chaque échantillon doit être fixé dans un moule de résine afin d'éviter la perte d'éclats de dent pendant la coupe. Les dents doivent être orientées avec exactitude dans le moule pour garantir la précision de la coupe (Marks *et al.*, 1996). On peut, par exemple, utiliser un moule cylindrique, forme adéquate pour l'emmanchement dans le bras de l'appareil utilisé pour la coupe. Le mélange résineux utilisé (Araldite 2020, Escil) est constitué de 4/5^{ème} de résine époxy, à laquelle on ajoute 1/5^{ème} de catalyseur pour favoriser le durcissement du produit. L'utilisation d'un agent séparateur dans le but de faciliter le démoulage du bloc de résine obtenu a été envisagée, mais il s'avère finalement déconseillé pour limiter les risques de contamination. Après avoir mis la résine dans le moule, on utilise de la pâte à fixe (préférable à la pâte à modeler, toujours pour des questions de limites à la contamination) pour garantir une orientation adéquate de la dent, en vue d'une coupe labio-linguale longitudinale, avant de l'insérer dans le mélange résineux. Chaque échantillon est minutieusement étiqueté (Marks *et al.*, 1996).

III.1.3.2.3. Procédure de coupe

Traditionnellement, la préparation des sections dentaires se fait au moyen d'une lame diamantée à faible vitesse (Marks *et al.*, 1996; Budd *et al.*, 1998; Caropreso *et al.*, 2000; Dolphin *et al.*, 2005; Antoine *et al.*, 2009; Cox *et al.*, 1996; Cucina *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 1999; Kang *et al.*, 2004). Après avoir inventorié et numéroté les blocs de résines au marqueur indélébile, les échantillons ont été sectionnés par un appareil de coupe (Buehler Isomet), équipé d'une lame

diamantée motorisée. Une fois le bloc fixé sur le dispositif de sciage, une première coupe enlève une moitié de la dent, afin de pouvoir faire la coupe utilisée pour la lame au milieu de la dent. Avant de procéder à la seconde coupe, la face exposée de la partie du bloc toujours fixé est soigneusement nettoyée au méthanol. Dans la mesure du possible, les molaires sont sectionnées à travers au moins une cuspide.

III.1.3.2.4. Montage de la coupe sur la lame en verre

Les coupes sont alors montées sur des lames de verre pour permettre leur observation au microscope à confocal. En ce qui concerne le collage de la coupe sur la lame, nous avons, dans un premier temps, envisagé l'utilisation du système adhésif dentaire emprunté à la dentisterie, dans le but d'améliorer la qualité et la finesse de la coupe, tout en réduisant le temps nécessaire pour la préparation des échantillons. En effet, ce système adhésif est efficace et présente un temps d'action très court (~ 30 secondes) (Caropreso *et al.*, 2000). Ces avantages permettent d'effectuer le collage de l'échantillon sur la lame juste avant la coupe, alors qu'il est déjà fixé dans le dispositif de coupe. De ce fait, nous pouvons obtenir une coupe initiale plus fine (grâce à la pression de la lame en verre), ce qui implique une étape de polissage moins agressive, et donc moins de risques de dégradations de l'échantillon. Cependant, ce produit s'est avéré considérablement pollué en éléments traces (information confirmée par les premiers essais d'analyses avec LA-ICP-MS que j'ai effectué). Or, la profondeur de l'ablation de l'équipement utilisé pour les analyses chimiques n'est pas réglable. En effet, le réglage se fait à partir de la puissance du tir laser et pas de la profondeur, il n'est donc pas possible de maîtriser avec certitude la profondeur de l'impact de l'ablation, et donc de s'assurer qu'il n'y a pas eu de dépassement dans la colle. L'utilisation de la colle dentaire a donc été exclue du protocole. Pour les mêmes raisons, nous avons exclu les adhésifs cyanoacryliques suggérés par Marks *et al.* (1996).

III.1.3.2.5. Polissage de la coupe

Les coupes sont ensuite réduites à environ 120 µm (Dean et Shellis, 1998), épaisseur choisie pour être assez fine en vue d'une observation satisfaisante, compte tenu de la superposition des couches d'émail qui ne doit pas être trop importante. À l'inverse, malgré les suggestions de certains auteurs (Shellis, 1998) qui recommandent des sections de 80 à 100 µm, les échantillons se sont avérés considérablement fragilisés en dessous de 120 µm, ce qui accentue significativement les risques d'arrachements de l'émail. De plus, une finesse excessive des sections minces peut, dans certains cas, nuire à la visibilité distincte des stries de Retzius.

Pour réduire l'épaisseur des coupes, nous avons utilisé une polisseuse motorisée, équipée d'un dispositif d'abrasion mécanique. Nous avons réduit les échantillons à environ 150 µm à l'aide de cet équipement. Pour achever l'affinage des échantillons, nous avons eu recours à une lame céramique, manuellement. Cette dernière étape a permis d'atteindre l'épaisseur souhaitée en éliminant les éventuelles stries d'abrasions, lesquelles auraient pu affecter la lisibilité de la lame mince au microscope et entraîner des incertitudes d'identification.

Les lames ainsi préparées sont ensuite passées dans un bain ultrasons (Budd *et al.*, 1998; Budd *et al.*, 2000; Cucina *et al.*, 2007; Hoffmann *et al.*, 2000; Hare *et al.*, 2011) avec de l'eau déminéralisée (Budd *et al.*, 1998; Dolphin *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 1999; Cucina *et al.*, 2007) et

nettoyées au méthanol, puis à nouveau séchées avec du papier sans poussière, afin d'éliminer les risques de contamination liés aux procédures de coupe et d'abrasion.

Plusieurs tentatives de protocoles ont été nécessaires pour arriver à ces choix. Cependant malgré le soin apporté à la préparation, leur caractère fragile lorsqu'il s'agit de coupes aussi fines et l'ancienneté du matériel sont à l'origine de problèmes techniques. Nous n'avons, dans certains cas pas pu empêcher l'arrachement de pan d'émail lors de la préparation, essentiellement au moment de la coupe et de l'abrasion.

III.2. TECHNIQUES D'OBSERVATION DES MICROSTRUCTURES AU MICROSCOPE

Les striations transversales peuvent être identifiées sur lames minces à l'aide du microscope traditionnel à lumière transmise, mais il arrive qu'elles soient obscures à certains endroits intéressants, il est donc préférable pour disposer d'une meilleure définition d'utiliser la microscopie polarisée, voire le microscope confocal.

III.2.1. Techniques écartées à partir des recherches bibliographiques

III.2.1.1. Microscopie optique

Chez l'homme, comme chez la plupart des mammifères, l'émail est prismatique. Or, les prismes se comportent à la manière des fibres optiques. Ils réagissent en fonction de l'angle d'incidence de la lumière (Tafforeau, 2004). Les variations de traitements de la lumière en microscopie peuvent mettre en évidence des informations différentes.

La technique la plus simple est l'observation à la loupe binoculaire. Le caractère prismatique de l'émail dentaire chez l'homme est déjà perceptible grâce à la plus simple des techniques optiques non-destructives, la loupe binoculaire. Son objectif grossissant permet de distinguer certaines caractéristiques de surface d'une dent, comme les périkymaties, mais en raison de sa lumière diffuse, elle est inefficace sur des lames minces, lesquelles nécessitent une lumière transmise.

L'observation au microscope électronique à transmission (MET ou TEM) donne un aperçu détaillé de la micromorphologie de l'émail dentaire, à partir de coupes histologiques comme nous l'avons fait dans ce travail. Elle fait ressortir les structures histologiques dentaires et met en évidence l'appartenance des monocristaux de l'émail à leur système apatitique hexagonal. Le TEM permet également de prendre des mesures précises de la largeur et de l'épaisseur des cristaux d'émail dentaire, mais il ne permet pas d'estimer la longueur avec précision (Daculsi *et al.*, 1984). L'utilisation de cet instrument nous laisse observer des effets de courbure, au niveau des décussations des prismes dont l'interprétation reste problématique. En effet, il est délicat de

déterminer si ces manifestations optiques sont des artefacts liés l'équipement ou si elles reflètent la flexibilité réelle des apatites biologiques (Daculsi *et al.*, 1984). Le TEM peut être utilisé pour obtenir des informations sur la conservation de la structure interne et mettre en évidence l'apparition de nouvelles phases cristallines, ce qui peut arriver dans certains cas de diagenèse (Reiche et Chadeaux, 2015). Cependant, comme nous l'avons vu dans le paragraphe consacré à la diagenèse (*cf. supra* II. 3.3.2) il peut y avoir un phénomène de diagenèse sans signe structurel, avec retour à l'état d'origine de la phase cristalline. Elle n'est donc pas un moyen efficace de statuer sur l'absence de diagenèse.

Le microscope électronique à transmission est un outil intéressant pour caractériser la morphologie de l'émail dentaire à l'échelle nanométrique, car elle permet d'observer l'organisation des cristaux d'hydroxyapatite, mais il n'est pas suffisant dans le cas qui nous intéresse.

Le microscope électronique à balayage (MEB, ou SEM en anglais pour *Scanning Electron Microscopy*) est un microscope électronique, fondé sur le principe des interactions électrons/matière. Dans ce système, les lentilles optiques sont remplacées par des lentilles électroniques (qui émettent un champ magnétique permettant à la fois d'éviter les électrons et de les guider) ; un faisceau d'électrons balaye la surface de l'échantillon, laquelle émet des électrons en réponse. L'analyse de ces particules permet la reconstruction de l'image en 3D de la surface de l'échantillon. Il fonctionne en utilisant une grande profondeur de champ. Le MEB est capable de produire des images de la surface d'un échantillon de haute résolution. Des recherches sur l'émail dentaire impliquent l'exploitation du MEB (Beynon *et al.*, 1991). Elles mettent en évidence la précision intéressante du MEB et la difficulté de traitement des grands échantillons.

Le MEB peut atteindre une meilleure résolution que la microtomographie à rayons X (*cf. infra* III. 2.1.2) mais cette dernière est non-destructive et permet une reconstruction en 3D de l'objet.

Sa résolution reste moins élevée que celle du microscope électronique à transmission.

III.2.1.2. L'utilisation des rayons X en microscopie optique

Au cours des dernières décennies, les recherches sur l'évolution des grands singes, des anciens hominidés et des hommes actuels ont connu un important déploiement. Cela a favorisé l'essor de l'un des aspects fondamentaux de cette discipline, à savoir les études dentaires. Pour étudier le développement dentaire, deux grands procédés ont été utilisés : les rayonnements X et les observations histologiques. Les rayons X, initialement utilisés par les chimistes et les physiciens, connaissent une extension dans les domaines biologiques, aboutissant ainsi à des résultats fructueux, notamment en anthropologie biologique. Dans ce domaine, ils sont exploités pour caractériser les propriétés moléculaires et structurales, les phases organiques et minérales des os et des dents.

Très rapidement, après la découverte des rayons X (1895), la radiographie a été exploitée comme outil pour l'étude des vertébrés en archéologie, car elle permet un examen rapide, détaillé et non invasif des squelettes. Elle rend accessibles des informations invisibles à l'œil nu. En anthropologie biologique, la radiographie donne lieu à de nombreuses études sur le développement dentaire qui

constituent un ensemble de travaux importants dans la documentation de diverses variations du développement de la dent, entre les différentes espèces de primates, ou au sein d'une population homogène (Liversidge et Molleson, 2004).

Les études radiographiques présentent plusieurs inconvénients (Beynon *et al.*, 1998a; Smith, 2008), mais elles ont été privilégiées en raison des informations importantes qu'elles apportent, particulièrement utiles pour les analyses comparatives, et pour leur caractère non destructif. L'approche par radiographies a été exploitée pour l'estimation du rythme de formation de l'émail (*cf. infra* III. 4.2.1) (Risnes, 1986; Beynon *et al.*, 1998a), mais, selon toute vraisemblance, elles auraient tendance à sous-estimer le temps de formation complet de la couronne dentaire (Fitzgerald *et al.*, 1998). Nous n'avons pas utilisé les examens radiographiques dans ce travail, car, outre les biais qu'ils introduisent, la résolution obtenue est insuffisante pour nos recherches. Les radiographies conventionnelles sont aujourd'hui largement remplacées par la tomographie qui offre une meilleure visualisation (Beynon *et al.*, 1998a).

La tomographie est une technique d'imagerie radiographique capable de reconstituer le volume d'un objet à partir de l'observation de la propagation d'ondes à travers l'échantillon analysé (coupes virtuelles). Elle permet également d'accéder à la vision interne de l'objet sans destruction matérielle. En paléoanthropologie, la tomographie offre de nouvelles possibilités d'analyses qualitatives et quantitatives, et une observation des structures dentaires en 3D à l'échelle du micron (Bayle, 2008; Tafforeau, 2004; Kullmer *et al.*, 2011). La microtomographie CT (Micro-CT) synchrotron, qui utilise la propagation des phases de contrastes par absorption, offre une meilleure visibilité de la structure interne de la dent que la tomographie conventionnelle et permet d'atteindre une résolution en dessous du micron (Reiche et Lebon, 2015).

Elle peut également procéder à l'extraction virtuelle d'éventuels dépôts sédimentaires agglomérés, rendant ainsi possible l'accès à des données morphologiques et morphométriques auparavant inaccessibles chez certains spécimens fossiles (Bayle, 2008). La micro-CT a facilité l'étude des structures internes dentaires et a permis d'améliorer nos connaissances fondamentales en la matière. Les données histologiques ainsi obtenues constituent une base solide et peuvent être utilisées pour des travaux s'appuyant sur les structures dentaires. Cette technologie est particulièrement intéressante pour traiter des problématiques taxonomiques ou évolutives. Elle peut également servir à obtenir des informations sur les modifications internes diagénétiques conduisant à une sélection efficace des échantillons en vue des analyses chimiques à effectuer (Smith et Tafforeau, 2008). Elle nécessite une bonne conservation de la dent (Tafforeau, 2004; Smith et Tafforeau, 2008).

Son utilisation systématique ne se justifie pas dans la démarche proposée dans ce travail, car elle ne donne pas accès aux analyses élémentaires associées aux structures histologiques. Elle ne permet donc pas la restitution chronologique de l'histoire alimentaire d'un individu. De plus, pour des raisons de conservation (à l'origine d'une représentativité biaisée), elle ne permet pas non plus une analyse à l'échelle de la population.

La diffraction au moyen des rayons-X peut être utilisée pour détecter une éventuelle augmentation globale de la cristallinité, utilisée comme indice d'altération chimique du squelette

(Kyle, 1986; Tuross *et al.*, 1989; Bartsiokas et Middleton, 1992). Si le résultat est positif, on peut supposer que l'os physiquement transformé a également subi des modifications chimiques. Mais, le raisonnement inverse n'est pas effectif (*cf. supra* II. 3.3.2). Inversement, il existe des mécanismes de croissance des cristaux, telle que la fusion des cristallites, qui modifient la morphologie des cristaux sans pour autant intervenir sur la composition élémentaire de manière significative. Le niveau de cristallinité peut être mis en parallèle avec le processus de fossilisation et ainsi servir l'estimation du degré de fossilisation, voire permettre de dater le vestige osseux (Bartsiokas et Middleton, 1992). La diffraction à rayon-X permet de déterminer la distribution spatiale des paramètres cristallographiques de base de l'hydroxyapatite à l'intérieur de la phase minéralisée des tissus, les variations de texture dans l'émail dentaire et la dégradation de l'orientation des cristaux. Ces données peuvent être intéressantes dans le but de détecter des zones d'émail affectées par rapport à des zones où le tissu est sain. L'émail ainsi touché peut traduire une cause pathologique (Al-jawad *et al.*, 2012). Ce type de microscopie, malgré ses diverses applications, n'est approprié ni pour les caractéristiques histologiques ni pour l'étude de la composition chimique de l'émail.

III.2.2. Techniques testées sans succès ou à l'efficacité insuffisante

III.2.2.1. La microscopie à cathodoluminescence

Le microscope à cathodoluminescence a été envisagé en raison de son potentiel avéré sur les structures cristallines minérales. La cathodoluminescence est un phénomène optique et électrique. Il se produit lorsqu'un faisceau d'électrons bombarde un échantillon en phosphore. Le microscope à cathodoluminescence est utilisé en géologie, car il met en évidence la structure cristalline interne des minéraux. L'émail ayant une structure cristalline, il m'a semblé intéressant de tester cette technologie sur des sections dentaires (CNRS, CEREGE UMR 7330, Aix-en-Provence). Malheureusement, dans le cas de l'émail la cathodoluminescence ne permet pas de discerner les microstructures internes. Cette ressource a donc été écartée du protocole.

III.2.2.2. La microscopie en lumière polarisée

Le microscope à lumière polarisée (microscope optique à lumière transmise) est l'une des techniques répandues dans les études sur la microstructure de l'émail dentaire (Fitzgerald *et al.*, 1998). Ce microscope est doté de deux filtres polarisants. Il est largement utilisé en pétrographie pour l'étude des minéraux dans les roches. La lumière est une onde électromagnétique qui se disperse dans toutes les directions sur le plan perpendiculaire. Lorsque la lumière traverse les filtres polarisants, elle ne vibre plus que dans une seule direction. Ce type de lumière est particulièrement intéressant pour traiter les matériaux dont la structure est cristalline. L'émail étant composé d'un ensemble de cristaux orientés, il est optiquement actif lorsqu'il est observé avec une lumière polarisée. Cette technique permet de définir l'organisation des cristaux entre eux, de déterminer leur arrangement selon des plans ou des alignements et d'observer la manifestation des différents marqueurs de croissance (Smith *et al.*, 2003; Reid et Dean, 2006; Reid et Ferrell, 2006). Lors de mes expérimentations, la lumière polarisée s'est avérée relativement intéressante pour l'observation des sections dentaires. Elle s'est révélée plus performante que le microscope à

lumière réfléchi, sans lumière polarisée, pour l'examen des microstructures de l'émail dentaire. Cet éclairage permet de voir les prismes d'émail, la ligne néonatale et les marqueurs de croissance. Toutefois, la lumière polarisée ne permet pas toujours de distinguer l'intégralité des marqueurs de croissance de l'émail dentaire, ce qui induit une certaine marge d'erreur lorsque l'on recherche des informations chronologiques. Fitzgerald *et al.* (1998) ont également noté que l'identification des stries de croissance peut être incorrecte lorsque l'obliquité au niveau de la coupe des prismes est trop importante. De plus, la démarche associée à cet équipement nécessite plusieurs clichés (30 à 40) à un grossissement X25 ou X50 qu'il faut ensuite assembler par ordinateur et traiter informatiquement (par exemple avec Photoshop). Cette étape, qui permet de reconstituer en une seule photo la partie de la dent enregistrée par l'appareil, nous aide à ajuster les niveaux de couleurs et les contrastes pour une meilleure visibilité de la microstructure de l'émail. La mise au point ne pouvant être exactement la même pour chaque photo, cette étape de montage photo introduit des imperfections dans l'image finalement reconstituée pouvant être des sources d'erreurs. Nous avons donc recherché un équipement plus efficace.

III.2.3. Microscope confocal

Le microscope confocal est un microscope optique à lumière réfléchi (le plus souvent, parfois à fluorescence) qui balaye un échantillon en envoyant et recevant de la lumière à travers une petite ouverture, dite en trou d'épingle. Il réalise des images de très faible profondeur de champ, appelées coupes optiques et permet la reconstruction tridimensionnelle de l'objet par ordinateur. Les avantages d'une faible profondeur de champ sont argumentés par Boyde et ses collègues (1983).

Le principe de la microscopie confocale est d'éliminer la lumière dispersée, réfléchi ou fluorescente provenant des plans hors focus. Ainsi, seule la lumière provenant du plan focal de l'objectif est utilisée pour la formation de l'image. L'image obtenue résulte d'un ensemble de plans focaux ainsi traités, puis compilés. Pour se faire, des trous d'épingles sont situés à la source de la lumière (un laser, le plus souvent) et en avant du détecteur. Un diaphragme est placé devant le détecteur, dans le plan focal conjugué au plan focal de l'objectif. De cette manière, la lumière qui provient des zones hors focus est rejetée et seule la lumière provenant du plan focal atteint le détecteur. Le rayon lumineux est concentré de manière à ce que les zones non focalisées ne reçoivent aucune luminosité. Ainsi, les reflets des espaces environnants ne viennent pas parasiter l'image ciblée.

Le microscope confocal permet, par superposition d'images, de recomposer une image en 3D dans toute la profondeur de l'objet et révèle les types d'arrangements géométriques des prismes de l'émail avec une résolution intéressante (Boyde *et al.*, 1983; Haydenblit *et al.*, 1999; Fitzgerald *et al.*, 1998). D'autres études ont souligné une meilleure distinction des marqueurs de croissance (striations transversales et stries de Retzius) (Girija et Stephen, 2003; Bromage *et al.*, 2005; Bromage *et al.*, 2007), sur des dents modernes et archéologiques. Dumont (1996) utilise la microscopie confocale pour l'étude de la microstructure de l'émail dentaire, notamment l'espacement entre les prismes, dans le cadre de réflexions taxonomiques. Dans leur étude, Bromage *et al.* (2007) utilisent cette technologie pour évaluer sur un hominidé fossile le temps

de formation de la couronne dentaire, les variations dans le rythme d'extension de l'émail et pour observer les striations périodiques. Ils soulignent l'avantage qu'il apporte au niveau de la visibilité par élimination du flou induit par les reflets de la lumière diffuse et fluorescente.

Pour le présent travail, nous avons utilisé un microscope confocal, mis à notre disposition par le laboratoire de géologie du CEREGE (CNRS, UMR 7330 Université d'Aix-Marseille, France). L'acquisition des photographies a été réalisée avec un grossissement $\times 100$. L'utilisation du logiciel Zen 2009 a permis le traitement des photographies et la prise des mesures. La proportion d'émail interne/externe postnatal a été évaluée à partir de l'identification de la ligne de croissance néonatale. L'identification de la ligne néonatale se fait sur la base des critères suivants : épaisseur, longueur et couleur de la ligne de croissance néonatale (Weber et Eisenmann, 1971), la position attendue de la ligne néonatale en fonction de la dent (Skinner et Dupras, 1993; Teivens, 1996), la différence d'aspect, traduisant une différence de qualité, de l'émail de part et d'autre de la ligne néonatale (Humphrey, 2007; Zanolli *et al.*, 2011), la corrélation avec le comportement du rapport Sr/Ca au niveau de la ligne néonatale (Krachler *et al.*, 1999; Rossipal *et al.*, 2000).

Cependant, le microscope confocal ne nous a pas permis de distinguer tous les cernes de croissance de nos échantillons. Pour l'estimation du temps, nous avons donc utilisé le rythme de formation de l'émail (*cf. infra* III.4.2.2).

III.3. TECHNIQUES D'ANALYSES ÉLÉMENTAIRES

En raison de l'impact de la santé dans la prime enfance sur le statut sanitaire général d'un individu et sur la survie d'une population, de nombreuses approches tentent d'identifier les modalités d'allaitement et de sevrage dans les populations anciennes. Les méthodes traditionnelles comprennent :

- Les approches paléogéographiques s'appuyant sur les rythmes de mortalité infantile (Knodel et Kintner, 1977; Katzenberg *et al.*, 1996; Herring *et al.*, 1998).
- Les indicateurs non spécifiques de stress tels que l'hypoplasie de l'émail dentaire (Moggi-Cecchi *et al.*, 1994; Goodman *et al.*, 1987; Wright, 1990; Hillson, 2008) (*cf. supra* II. 2.2.1) ou les stries pathologiques de Retzius (*cf. supra* II. 2.2.2).

Cependant, de telles études comportent des problèmes méthodologiques. Elles sont gênées par les variations dans le développement des tissus durs et présentent alors des résultats contradictoires, ou elles sont soumises au nombreux biais des échantillons anciens (notamment la sous-représentation des immatures) et sont insérées dans les problématiques de réflexion sur la santé « réelle » du squelette (un squelette avec des séquelles pathologiques peut être en bonne santé puisqu'il a survécu à un âge avancé malgré cela; à l'inverse un squelette présentant peu de séquelles peut avoir succombé à ses maux avant que ces derniers n'aient le temps de laisser des lésions osseuses).

Pour mieux comprendre les effets du comportement alimentaire sur les tissus durs, des méthodes d'analyses chimiques ont été mises en œuvre pour tracer l'absorption du lait maternel.

La chimie analytique permet d'acquérir des informations sur un matériau ou un échantillon et d'en définir la composition chimique (élémentaire, moléculaire) à l'aide de méthodes scientifiques. Les analyses chimiques comprennent la recherche des isotopes stables (*cf. supra* II. 3.1) et des éléments traces. Compte tenu des problèmes rencontrés par les études isotopiques (*cf. supra* II. 3.1.4) et de la difficulté de mesurer les compositions isotopiques sur une très faible quantité de matière, j'ai choisi d'examiner les oligoéléments.

III.3.1. L'équipement : une combinaison de méthodes

Les équipements destinés à l'analyse élémentaire sont généralement l'association d'un moyen de prélever la matière et d'un appareil qui l'analyse.

Le choix de la méthode de prélèvement en vue d'une analyse élémentaire est particulièrement important, car elle va définir la résolution spatiale des mesures intradent et la précision des mesures chimiques, compte tenu de la faible densité des éléments à détecter et à quantifier. Plusieurs études ont procédé par dissolution de l'échantillon, ou d'une partie de l'échantillon, pour déterminer, par la suite, les éléments qui composent l'émail dentaire. L'inconvénient de cette démarche est qu'elle donne un résultat général sur toute la période correspondant à la dent choisie et fait perdre le bénéfice d'une résolution spatiale précise offerte par la croissance régulière et marquée de l'émail. Elle ne permet donc pas, non plus, d'observer l'évolution des signaux chimiques dans le temps. Pour ces raisons, j'ai choisi de me tourner vers des méthodes capables de traiter les échantillons solides. Il existe trois grandes méthodes pour l'analyse chimique des échantillons solides, la sonde ionique, la vaporisation électrothermique, et l'ablation laser. Dans ce travail, nous avons utilisé l'ablation laser, que nous avons jugée plus performante en précision (*cf. infra* III. 3.3.1).

Pour l'analyse de la composition de la matière, nous nous appuyons sur la spectroscopie qui analyse des interactions de différents types de rayonnement avec la matière. Cette science est exploitée au moyen d'une technique, la spectrométrie, qui mesure ces interactions, formes d'énergie constituée d'ondes (caractérisés par une vitesse de propagation, une fréquence et une longueur d'onde). Ainsi, la spectrométrie permet d'obtenir des informations sur la structure atomique et/ou moléculaire de la matière irradiée et/ou de les mesurer. Les différentes approches spectroscopiques forment la base des techniques analytiques. Les techniques spectroscopiques peuvent être classées selon le processus de mesure : absorption, émission et diffusion du rayonnement électromagnétique. Les rayonnements utilisés peuvent être des faisceaux d'électrons, de neutrons, ou de photons.

III.3.2. Les combinaisons de méthode écartées à partir des recherches bibliographiques

De nombreuses techniques ont été développées dans le but d'analyser des matériaux solides. La microscopie électronique à balayage (MEB), la spectroscopie infrarouge, la spectroscopie d'émission optique sur plasma induit par laser (LIBS), la spectrométrie de fluorescence X

(XRF), l'émission de rayons X induite par protons (PIXE), la spectrométrie d'émission atomique (LA-ICP-AES ou LA-ICP-OES), la spectroscopie d'absorption atomique (LA-ICP-AAS), ou encore la spectrométrie de masse à ionisation secondaire (SIMS), font partie de ces techniques qui permettent d'accéder aux compositions élémentaires des matériaux.

III.3.2.1. Microscopie électronique à balayage

Le MEB est un microscope optique (*cf. infra* III. 2.1.1) et analytique. Les interactions entre les électrons et la matière génèrent différents signaux, dont certains (électroniques) sont utilisés pour reconstruire des images et d'autres (rayons X) pour restituer la composition chimique de l'échantillon. Le faisceau d'électrons balaye la surface de l'échantillon, ce qui donne lieu à la réémission de certaines particules en réponse, comme nous l'avons vu. Ces particules fournissent des informations sur la matière qui forme l'échantillon, l'énergie émise étant caractéristique de la nature chimique des atomes et des ions. Les atomes les plus lourds (ceux ayant un nombre important de protons) réémettent plus d'électrons que les atomes plus légers. Le MEB peut déterminer les concentrations élémentaires avec une précision de l'ordre de 1 % (Castaing, 1973). Cette technologie est capable de localiser *in situ* les divers composants minéraux et de détecter de faibles variations de concentration. Cependant, sa limite de détection est insuffisante pour permettre la mise en évidence des éléments en très faible quantité (Tressaud *et al.*, 1973) et certains éléments, tels que le lithium ou l'hydrogène, sont trop légers pour être accessibles (le rayonnement X de fond empêche la détection des éléments en dessous de 100 ppm) (Castaing, 1973).

La microscopie électronique à balayage n'est pas utilisée dans le travail présenté ici pour des raisons de limite de détection. En effet, compte tenu de l'étroitesse nécessaire de la zone analysée pour conserver une précision optimum de la chronolocalisation et de la finesse des sections dentaires (indispensable pour l'observation des caractéristiques histologiques optiques), la zone d'interaction serait insuffisante pour offrir une analyse quantitative satisfaisante. Il faudrait une zone d'interaction laissant un cratère d'environ 50 microns, diamètre trop important qui affecterait la précision des estimations chronologiques. En conséquence, la quantité de matière prélevée dans ces conditions, en vue d'une analyse élémentaire, est insuffisante pour détecter certains éléments à l'état de traces, ou avec un manque de précision trop important qui rendrait les données inexploitable.

Après la mise au point du laser dans les années 1960, plusieurs voies ont été explorées pour l'analyse élémentaire qualitative et quantitative des échantillons solides. Les années qui ont suivi ont vu se développer les recherches impliquant les combinaisons de l'échantillonnage par laser avec les différentes sources d'excitation capables de fournir une analyse multiélémentaire.

III.3.2.2. Spectrométrie d'absorption atomique (ICP-AAS) et spectrométrie d'émission atomique (ICP-AES)

Parmi les méthodes de chimie analytique souvent utilisées en vue de reconstruire un modèle de paléonutrition, on peut évoquer la spectrométrie atomique. Deux types d'équipement en

particulier ont retenu l'attention des chercheurs, la spectrométrie d'émission atomique et la spectroscopie d'absorption atomique.

La spectrométrie d'absorption atomique s'appuie sur l'absorption des photons par des atomes libres. On mesure l'absorbance de la lumière par les atomes. La longueur d'onde de la source lumineuse est choisie pour faire passer les atomes de l'état fondamental à un état excité par absorption de la radiation lumineuse. Le degré d'absorption permet de caractériser les atomes. Cette technologie permet d'analyser une soixantaine d'éléments chimiques à l'état de trace. Elle est souvent utilisée pour des raisons pratiques, notamment sa facilité d'accès et de fonctionnement. L'analyse AAS présente peu d'interférences spectrales, et celles qui existent sont bien connues. Elle a été utilisée pour déterminer des concentrations de strontium osseux chez l'homme (Schoeninger, 1979; Blakely, 1989) et les proportions de plusieurs oligoéléments dans l'émail humain (Stermer *et al.*, 1996, Reitznerová *et al.*, 2000). Dans ces démarches, elle a fourni des résultats interprétables. On note qu'elle présente moins d'interférences chimiques pour le strontium que la spectroscopie d'émission atomique (voir ci-dessous), et une gamme d'éléments analysables comparable (Lee, 1983). Cependant, l'existence d'interférences chimiques importantes est avérée pour le calcium et le phosphore. De plus, malgré l'amélioration des limites de détection, la correction des absorptions non spécifiques et l'apport de l'informatique qui ont permis de perfectionner considérablement les performances de cette méthode d'analyse, elle reste insuffisante.

L'une des méthodes de spectroscopie par absorption souvent citée dans la littérature est la spectroscopie infrarouge. Elle exploite les vibrations des molécules dont la fréquence est propre aux atomes. La spectroscopie infrarouge a été utilisée dans le cadre de travaux archéologiques sur les os (Lebon *et al.*, 2008; Thompson *et al.*, 2009; Weiner et Bar-Yosef, 1990). Elle donne accès à des informations sur la composition et la structure de la matière minérale de l'os. Elle constitue un outil efficace et intéressant pour exploiter les os brûlés (notamment pour approcher les températures auxquelles le squelette a été exposé et l'indice de cristallinité de l'os), mais pour l'émail dentaire qui ne contient que 3 % de matière organique, elle n'est pas adaptée (d'autant plus qu'elle nécessite une quantité importante, 1g, de matière analysable, ce qui n'est pas compatible avec les microprélèvements envisagés dans la méthode proposées).

La spectrométrie d'émission atomique (ICP-AES) s'appuie sur la mesure de la quantité de photons. Les photons sont convertis en courant électrique. L'émission atomique est un procédé intéressant pour l'analyse des tissus durs, car le problème de la migration des ions les plus légers, et donc les plus mobiles, qu'elle implique est assez limité dans ce cas (Lefevre, 1973). Cette technique peut être améliorée avec la détection des ions secondaires issus de la pulvérisation de la matière par bombardement ionique primaire (SIMS). Elle permet d'explorer la totalité des éléments chimiques, propose une sensibilité particulière pour les éléments alcalino-terreux et offre à la fois une meilleure qualité d'image et une répartition spatiale plus précise que l'examen des ions primaires uniquement.

La précision améliorée et la sensibilité accrue de l'analyse ionique par rapport à la microsonde électronique sont liées à l'absence de spectre parasite continu de fond (Castaing, 1973). L'analyse ionique permet l'identification de la composition globale d'un prélèvement, y compris des éléments présents à l'état de trace (Tressaud *et al.*, 1973). Certains éléments peuvent être analysés avec une plus grande sensibilité et moins d'interférences qu'avec l'ICP-AAS.

L'ICP-AES a rapidement été considérée comme une technique polyvalente de quantification multiélémentaire, utilisable dans différents types de matrices. L'ablation laser associée à cet équipement permet de traiter les échantillons solides. Sa capacité à détecter plusieurs éléments dans l'émail dentaire, dont le strontium, a été démontrée (Reitznerová *et al.*, 2000). Cependant, la quantité de matière prélevée avec l'ablation laser n'est pas suffisante pour une détection précise au moyen de l'ICP-AES (Masson, 2014), nous ne l'avons donc pas envisagé.

SIMS a été envisagé pour l'analyse de l'émail dentaire humain (Stermer *et al.*, 1996) et a fourni une bonne résolution spatiale, ainsi qu'une sensibilité exprimée à l'échelle ppm. Cependant, la quantification reste particulièrement difficile à cause de très gros effets de matrice (Becker *et al.*, 2010; 2014).

Compte tenu des arguments qui viennent d'être exposés, l'émission atomique n'a pas été retenue dans ce travail.

III.3.2.3. Spectrométrie sur plasma induit par laser (LIBS)

La LIBS s'appuie sur l'analyse du spectre d'émission plasma créé en surface par un impact laser. Elle utilise, le plus souvent, un laser pulsé de faible énergie et une lentille de focalisation pour générer un plasma qui vaporise une petite quantité de l'échantillon. Une partie de la lumière du plasma est recueillie et un spectromètre disperse la lumière émise par type d'ions et d'atomes excités par le plasma. Un détecteur enregistre les signaux émis et prend le relais électronique pour numériser et afficher les résultats. La LIBS est capable d'estimer des concentrations d'éléments trace sur des tissus calcifiés, notamment les dents, avec des destructions matérielles très limitées (Samek *et al.*, 2001; Alvira *et al.*, 2010). L'intégration d'un laser dans ce dispositif pourrait permettre de proposer une répartition spatiale des quantifications élémentaires intéressante. Il a été noté, antérieurement, que la difficulté majeure de cette technologie est la calibration des analyses élémentaires (Cremers et Radziemski, 2006). Dans certains cas, la sensibilité de la LIBS peut être insuffisante pour détecter des éléments en ultra trace (Samek *et al.*, 2001). Les performances potentielles de la LIBS impliquent le développement et l'optimisation des méthodes statistiques pour interpréter leurs spectres de données complexes. Par conséquent, la limite de détection de cet équipement est bien plus élevée que pour LA-ICP-MS (Nanci, 1989). La LIBS n'est donc pas satisfaisante pour répondre à nos exigences.

III.3.2.4. Les techniques à rayons X

Plusieurs méthodes d'analyses ont exploité les rayons X. On peut citer, par exemple, l'émission de rayons X induite par protons (PIXE), ou la fluorescence à rayons X (XRF), l'analyse dispersive en énergie (EDX). Dans ces dispositifs, les éléments sont bombardés par des rayons X. L'énergie et le nombre de rayons réémis servent à identifier et quantifier les éléments.

L'analyse PIXE a montré ses capacités multiélémentaires d'analyse sur les dents humaines, mais a révélé des problèmes de variances avec certains éléments et s'est avérée moins sensible que AAS et LA-ICP-MS (Cohen *et al.*, 1981 ; Ferguson et Purchase, 1987).

Le principe de la technologie XRF est le bombardement de la surface par rayons X et l'analyse des rayons X réémis. Cette méthode a été testée sur la dent humaine, notamment par Oprea *et al.* (2009), dans le but de détecter l'exposition des individus aux métaux lourds. La sensibilité de l'appareillage s'est révélée suffisante pour les radio-isotopes. Cependant, les statistiques multivariées sont à développer. Elle est aussi limitée par les effets de matrices que LA-ICP-MS, et moins sensible pour la détermination quantitative des éléments trace (Ferguson et Purchase, 1987 ; Claverie, 2009 ; Masson, 2014).

L'EDX permet une analyse élémentaire par détection des photons générés par l'interaction entre un faisceau électronique et les atomes à la surface de la matière. Sous l'effet du champ électrique produit par le faisceau, les ions migrent et provoquent des impulsions de courant. Chaque élément émet une énergie caractéristique, sous forme de photons. L'EDX est une analyse qualitative et quantitative, qui offre également une résolution spatiale. Son potentiel a permis de l'envisager pour l'étude de l'émail dentaire humain, mais une étude pilote a mis en évidence la trop faible sensibilité des analyses par EDX pour ce type de travaux (Stermer *et al.*, 1996).

Les techniques d'analyse qui utilisent les rayons X ont, de manière générale, une limite de détection moins performante que LA-ICP-MS, ne sont pas aussi sensibles, et présentent souvent des problèmes de quantification (Ferguson et Purchase, 1987 ; Becker *et al.*, 2009 ; Becker *et al.*, 2014).

III.3.2.5. Vaporisation électrothermique –ICP-MS (ETV-ICP-MS)

L'ETV est un dispositif d'introduction directe de l'échantillon solide dans un spectromètre (Masson, 2014). L'échantillon est introduit dans un accessoire de vaporisation électrothermique (ETV) et en sort atomisé dans un plasma d'hélium ou d'argon, en vue d'une analyse élémentaire. La combinaison d'équipement ETV-ICP-MS permet l'analyse d'un petit volume d'échantillon (Grünke *et al.*, 1996).

Elle constitue une analyse multiélémentaire avec une bonne limite de détection, comme le confirme l'étude de Grünke et ses associés (2016). Comme LA-ICP-MS, ETV-ICP-MS possède une grande vitesse d'opération, utilise une faible quantité de matière et est soumis aux problèmes d'étalonnage et d'effets de matrice. Elle peut répondre à des problèmes analytiques complexes, difficiles à résoudre par d'autres stratégies. Cependant, l'ablation laser présente de meilleures qualités en termes de résolution spatiale et de quantification (Masson, 2014).

Les études utilisant des techniques de microscopie électronique autorisent une bonne analyse qualitative au niveau de la hiérarchie structurelle de l'organisation prismatique et interprismatique de l'émail à l'échelle microscopique. Cependant, la microscopie électronique se révèle moins performante que les techniques utilisant la spectrométrie en général, et la spectrométrie de masse en particulier.

En ce qui concerne les analyses élémentaires des tissus durs, la plus populaire est l'absorption atomique en raison de sa facilité d'accès et d'application. Cependant, son efficacité est limitée

par son incapacité à quantifier de multiples éléments en même temps (Song, 2004). L'AES est plus performante que le MEB, tant au niveau de la résolution spatiale que de la résolution en profondeur, ou encore au niveau de la sensibilité de détection des éléments à l'état de traces. De plus, les spectres et les statistiques qui en découlent offrent une meilleure lisibilité. Cependant, les émissions ne sont pas exactement proportionnelles ce qui rend l'analyse quantitative délicate dans le cas des éléments traces, présents en faible concentration (Castaing, 1973).

Gratuze *et al.* (2001) ont comparé LA-ICP-MS à plusieurs méthodes analytiques, sur différents matériaux archéologiques (obsidienne, verre, émail, silex) et suggèrent qu'elle peut remplacer les analyses XRF, PIXE et MEB, en offrant une meilleure sensibilité et moins de destruction matérielle. LA-ICP-MS présente de meilleures performances pour la quantification et une meilleure sensibilité pour les éléments traces, grâce à une limite de détection plus basse (à 1 µg g⁻¹), que le MEB, les techniques à rayons X (PIXE et EDX) et SIMS (Becker *et al.*, 2010; Becker *et al.*, 2014; Outridge *et al.*, 1995).

LA-ICP-MS permet une meilleure limite de détection que les sondes à électrons ou à protons avec les rayons-X, approchant des valeurs inférieures à 1 ppm pour la plupart des éléments périodiques (Outridge *et al.*, 1995). Elle est la méthode la plus efficace pour la quantification (Becker *et al.*, 2010). De plus, elle est moins sensible aux effets de matrice (Becker *et al.*, 2014).

Dans le but d'identifier et de quantifier les oligoéléments, les méthodes d'analyses sont nombreuses, et nous n'avons cité que les principales. Après avoir passé en revue la littérature sur les différents types d'instruments, j'ai choisi d'utiliser la spectrométrie de masse à plasma induit couplée à l'ablation laser (LA-ICP-MS).

III.3.3. Protocole défini dans ce travail : spectrométrie de masse à plasma induit couplée à l'ablation laser (LA-ICP-MS)

Dans notre étude, l'analyse quantitative des composants de différentes séquences de minéralisation de l'émail dentaire a été effectuée grâce à l'utilisation de l'ablation laser (LA) femtoseconde, couplée à un dispositif de spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-MS). Le laser prélève la matière sur une ligne droite et continue préalablement définie. La matière ablatée est extraite de la chambre par un flux continu d'hélium et directement transférée dans la source ICP, puis analysée par un spectromètre de masse. Ce dernier décompose la matière ablatée afin de mesurer l'intensité des différents éléments à chaque ablation. Les intensités, d'abord déterminées en coups par seconde, sont ensuite converties en concentrations (ppm), utilisables pour le calcul de ratios.

L'utilisation de l'ablation laser comme moyen d'échantillonnage sur un matériau solide, en vue d'un couplage en spectrométrie de masse, jusque-là couramment utilisé sur des échantillons préparés en solution, a été initiée par Gray (1985). Ce dispositif comprend :

- l'ablation laser (LA) qui effectue l'échantillonnage par échauffement du matériau généré par l'interaction laser-matière;
- une chambre d'ablation qui accueille l'échantillon;

- son couplage à une torche plasma (ICP), responsable du conditionnement de la matière, par la formation d'un aérosol ;
- un système de transport de l'aérosol formé ;
- en vue de l'atomisation/ionisation et la détection par spectrométrie de masse (MS).

L'ablation laser couplée à l'ICP-MS offre un accès immédiat à l'analyse quantitative et qualitative de l'échantillon avec un niveau élevé de sensibilité (Durrant, 1999 ; Günther et Hattendorf, 2005). Cette association d'équipement a permis de réaliser des analyses multiélémentaires sur des échantillons solides en améliorant les limites de détection, laquelle dépend, en partie, de la technique d'introduction de l'échantillon dans le spectromètre de masse (Denoyer *et al.*, 1991 ; Goodman *et al.*, 2003). L'utilisation de l'ICP-MS en combinaison avec l'ablation laser présente l'avantage de séparer l'étape d'échantillonnage et le processus d'ionisation. De ce fait, ils sont tous les deux indépendamment contrôlés et optimisés (Denoyer *et al.*, 1991 ; Günther et Hattendorf, 2005). La gamme d'application de LA-ICP-MS s'est rapidement développée grâce à une meilleure compréhension des facteurs qui influencent l'analyse quantitative et s'est ainsi également étendue à l'étude du matériel biologique. En effet, avec l'utilisation de la LA-ICP-MS, les travaux présentés ici élargissent les champs de recherches des questionnements bioarchéologiques. Cette technologie est adéquate pour la quantification des éléments traces (Gao *et al.*, 2002) sur les tissus biologiques, les échantillons environnementaux, géologiques et alimentaires. À ce jour, elle s'est révélée efficace pour tracer la pollution environnementale, l'origine et les migrations animales, les migrations humaines, la contamination des tissus durs, la provenance de matériaux archéologiques, la nutrition, et également dans le cadre des sciences médico-légales (pour la caractérisation des sols, des verres, par exemple). Les matériaux utilisés pour de telles études incluent les os et les dents animaux et humains (Hoffmann *et al.*, 2000 ; Castro *et al.*, 2010, 2013 ; Dolphin *et al.*, 2013 ; Hanč *et al.*, 2013), les défenses, les tissus mous, les mollusques, les otolithes de poisson, les écailles, les cernes d'arbres, les poteries anciennes, l'or (Song, 2004). Le microéchantillonnage par ablation laser révèle des variations intradentaires. La LA-ICP-MS est donc largement justifiée et avantageuse pour les analyses dentaires. Elle fournit des marqueurs chimiques à travers la dent, produisant une « carte » des signatures chimiques. Ces signatures chimiques peuvent être interprétées en matière de nutrition. Et, en raison des cernes naturels de l'émail, elles peuvent être associées à un âge de l'enfant en développement. Ainsi, les profils chimiques fournis par LA-ICP-MS livrent des données documentant la santé et la nutrition, attribuables à des âges connus du développement de l'enfant, tel que le sevrage, et pouvant être corrélé avec l'âge grâce à la microscopie optique.

Avec cette technologie appliquée à l'analyse des tissus durs humains, la démarche visant à la reconstruction de modèles paléonutritionnels à partir des signatures chimiques présente deux difficultés clés : l'interprétation nutritionnelle des éléments détectés ; et l'isolation de la composition chimique pour préciser l'âge de l'enfant. LA-ICP-MS nous permet de traiter cette deuxième difficulté.

Cette association d'équipements quantifie les concentrations des éléments à partir du ratio masse atomique/charge (m/z). Les différentes étapes de traitement de l'échantillon menant au

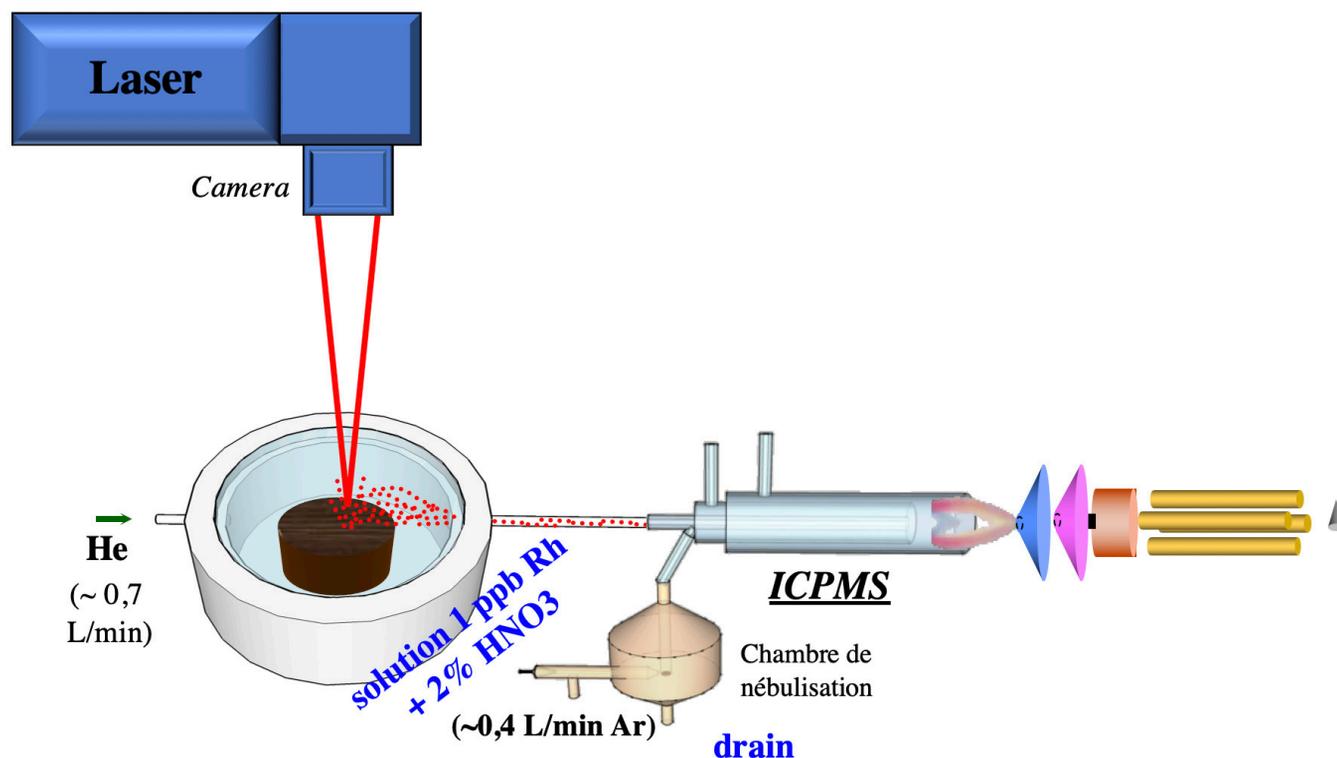


Fig. 13. Schéma de principe du couplage ablation laser femtoseconde/ICPMS utilisé en plasma humide (d'après Pécheyrans, communication personnelle)

spectre dépendent des caractéristiques de l'aérosol, lui-même influencé par l'ablation, laquelle est contrainte par les propriétés du laser, de la matière et de leur interaction.

La figure 13 schématise les composantes instrumentales mises en place pour la LA-ICP-MS. Un faisceau laser pulsé est concentré sur l'échantillon solide placé dans une cellule fermée. Le matériau vaporisé résulte de l'interaction du faisceau laser avec le flux d'hélium dans le plasma de l'ICP-MS.

III.3.3.1. Expérimentation: mode opératoire pour l'ablation laser

Le laser³⁹ est un outil qui doit soit nom au principe sur lequel il repose, à savoir, l'émission d'un rayonnement parfaitement délimité dans le temps et l'espace à partir d'un rayonnement de longueur d'onde donné amplifié. Le prélèvement de matière par ablation laser implique un faisceau laser pulsé à la surface d'un échantillon solide, placé dans une cellule fermée. Ensuite, l'énergie du laser transforme la matière solide touchée par le rayon, en gaz ionisé appelé plasma⁴⁰ qui s'échappe de l'échantillon. L'ablation est ainsi d'une extrême précision.

39. Acronyme anglais de « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ».

40. Le plasma décrit un état de matière.

III.3.3.1.1. Les caractéristiques de l'instrumentation

L'instrumentation pour l'ablation laser comprend :

- Un dispositif d'ablation laser (Alfamet, Novalase S.A., France), intégrant une source laser femtoseconde, et doté d'un système de focalisation et de régulation de la puissance du faisceau laser.
- La source laser S-Pulse (Amplitude Systemes, France) utilisée est un amplificateur laser femtoseconde (fs) à haute cadence de tir. Le milieu actif est un cristal de KGW dopé à l'ytterbium pompé par une diode laser. Il émet un faisceau directionnel et monochromatique de longueur d'onde de 1030 nm, avec une durée d'impulsion de 360 fs. L'énergie fournie est de 100 μ J par pulse. Cette source laser permet également de travailler sur une très large gamme de fréquences, allant de 1 à 10 000 Hz. Il est réglé à 1000 Hz dans les travaux présentés ici.
- Un prisme $\lambda/2$ fixé sur une monture motorisée et placée sur le trajet du faisceau laser permet un réglage précis de la puissance de 0,1 % à 100 %.
- La cellule d'ablation présente un volume interne de 9,5 cm³. Elle est montée sur une platine XYZ motorisée, permettant de déplacer l'échantillon dans les trois directions de l'espace avec une résolution inférieure à un micron. Un système de deux caméras, macroscopique et microscopique ($\times 110$), mis en place pour gérer les déplacements nécessaires à l'orientation du tracé du microprélèvement, permet de cibler avec précision la zone à impacter.

Le mode opératoire utilisé pour insérer l'échantillon de manière optimale dans l'appareil LA-ICP-MS dans ce travail est :

- Placer la section dentaire dans la chambre d'ablation ;
- Orienter la dent de façon à suivre le tracé des prismes de l'émail ;
- Déterminer les réglages appropriés pour le laser et le spectromètre de masse à l'aide des programmes informatiques qui fonctionnent avec le dispositif utilisé ;
- Régler les coordonnées du tracé à la surface de l'échantillon dentaire.

Le laser échantillonne la matière au moyen d'un tracé en ligne droite, depuis la jonction émaildentine vers la surface de la dent. Les transepts d'ablations varient en longueur en fonction de la morphologie de la dent (variabilités individuelles, dent déciduale/dent définitive, type de dent) et de l'usure dentaire (érosion dentaire pendant le vivant).

Une ablation laser est définie par son énergie, sa longueur d'onde, sa durée d'impulsion et son rythme de répétition.

L'énergie de l'impulsion par unité de surface, ou fluence (s'exprime en J.cm⁻²), délivrée par laser, interagit avec la plupart des matériaux solides à la surface de l'échantillon, convertissant l'énergie photonique en énergie thermique. Ses caractéristiques influencent la quantité de matière ablatée, et, par conséquent, la sensibilité de la détection et le fractionnement élémentaire. Le dispositif d'ablation laser que nous utilisons se distingue par l'intégration d'une source laser femtoseconde à haute cadence de tir, qui délivre l'énergie sur une durée dix mille fois plus courte que celle des lasers nanosecondes généralement utilisés en microchimie (soit en 10⁻¹⁵ secondes). Ces impulsions ultras brèves permettent d'obtenir une ablation athermique (froide), ce qui limite significativement

les effets thermiques lors de l'interaction laser/matière. Cette caractéristique présente plusieurs avantages. D'abord, lorsque la durée de l'impulsion est très inférieure au temps de transfert de l'énergie des électrons du laser à l'échantillon, l'énergie reste concentrée sur un volume proche de celui de la tache focale. La température des électrons est très élevée et ceux-ci communiquent rapidement leur énergie au reste du milieu. Cela conduit à un processus de transition direct solide-plasma, sans passer par une phase liquide (comme dans le cas d'une durée d'impulsion plus longue), car la nouvelle solidification de la matière qui s'ensuit peut nuire à la propreté de l'ablation (Fogarassy, 2001). Ensuite, on bénéficie d'une qualité d'usinage supérieure avec peu d'effet de bord⁴¹. De plus, une durée d'impulsion plus courte permet une perte d'énergie moins importante entre deux ablations, il en résulte une meilleure reproductibilité (Claverie, 2009). On souligne également que le matériau subit peu de dommages puisque les effets thermiques et la zone touchée sont limités. Un autre atout important de cette ablation laser est l'amélioration de la résolution spatiale (Pécheyran *et al.*, 2005), car le faisceau produit est étroitement focalisé, ce qui permet de réaliser des microprélèvements entre 5 µm et 30 µm de diamètre. Nous obtenons, en conséquence, une information spatiale très précise. Ce procédé donne lieu à des analyses élémentaires microscopiques, exploitables pour cartographier la composition élémentaire de la surface de l'échantillon en général, et en particulier sur une lame mince. La courte durée de l'impulsion laser améliore les performances analytiques du couplage, notamment en réduisant la vaporisation sélective lors de l'ablation, et en produisant des nanoparticules facilement atomisées dans le plasma ICP. Ceci permet de minimiser le phénomène de fractionnement élémentaire par rapport aux lasers nanoseconde, et à d'améliorer ainsi la justesse analytique des résultats (Denoyer *et al.*, 1991 ; Pécheyran *et al.*, 2005).

La haute cadence de tir associée à un balayage rapide du faisceau laser permet de réaliser de la mise en forme virtuelle du faisceau laser en ajustant la forme apparente du faisceau à la morphologie de l'échantillon ; cette approche permet d'améliorer la sensibilité par rapport aux lasers nanosecondes (Pécheyran *et al.*, 2005).

La longueur d'onde est impliquée dans l'interaction laser/matière puisqu'elle régit la pénétration du faisceau en fonction du matériau ablaté. Elle influence, de cette manière, la manifestation d'altérations thermiques de l'échantillon (craquelures, matière fondue). La diminution de la longueur d'onde réduit les risques d'altérations (cette amélioration est liée à une augmentation de l'énergie laser) et améliore la précision de l'analyse en agissant sur la taille des particules produites, c'est-à-dire le fractionnement élémentaire (Günther et Hattendorf, 2005). L'utilisation d'une longueur d'onde courte permet des analyses ne subissant pas ou peu de fractionnement, ce qui représente un avantage particulier dans le cas des étalonnages sans matériau de référence certifié de même matrice (Claverie, 2009).

La durée d'impulsion joue un rôle important sur le phénomène de l'ablation. Elle intervient notamment sur la perte d'énergie pendant le processus d'ablation, la formation et la répartition des particules, ainsi que sur les différentes phases d'état de la matière au cours de l'ablation.

41. L'effet de bord est lié au phénomène d'instabilité sur les bords, près des parois.

Le rythme de répétition est la durée entre deux impulsions ($1/T$; T étant la durée entre deux impulsions).

L'ablation laser a été appliquée à différents domaines de recherche que ce soit à basse résolution spatiale (avec un point d'impact entre 80-350 μm), ou pour des analyses locales nécessitant une résolution spatiale élevée (avec un point d'impact entre 4-80 μm) (Song, 2004). L'ablation laser, utilisée dans notre étude, échantillonne l'émail par une énergie laser localisée. Cette alternative offre plusieurs avantages en comparaison avec les méthodes d'analyses chimiques conventionnelles plus répandues : elle est plus rapide; elle permet de procéder à des analyses multiélémentaires et isotopiques; elle présente une limite de détection basse (sensibilité élevée); elle rend la résolution spatiale possible; et elle pratique une destruction matérielle minimum.

L'efficacité du transport de la matière ablatée dépend, en partie, de la cellule d'ablation. Sa géométrie et son volume affectent la dispersion du signal et donc l'amplitude du rapport signal/fond (Günther et Hattendorf, 2005). La plupart des dispositifs LA-ICP-MS, comme celui que nous utilisons, utilisent un système motorisé pour le déplacement des échantillons dans la cellule.

Une fois ablaté, l'émail vaporisé est balayé de la chambre d'ablation vers une source plasma par un flux d'hélium, plus favorable que l'argon pour la sensibilité de nos analyses (*cf. infra* III. 3.3.2), puis transporté dans le spectromètre de masse par un tube de transfert pour la quantification des éléments.

La figure 14 témoigne de la disposition du laser par rapport à l'ensemble de l'installation.

Constructeur	Novalase (Pessac, France) – Amplitude Systèmes
Longueur d'onde	1030 nm
Durée d'impulsion	360 fs
Énergie Maximum/pulse	100 μj /impulsion
Cadence de tirs	1000 Hz
RSD énergie	0,5%
Taille du spot	10 μm
Vitesse scanner	1 μ /seconde
Vitesse platine	5 μ /seconde
Chambre d'ablation	Volume interne de 9,5 cm^3
Gaz vecteur	He

Fig. 14. Caractéristiques du système d'ablation laser

Les facteurs qui affectent l'échantillonnage à la torche ICP (l'intensité du signal élémentaire, par exemple) du matériau et la quantification des éléments comprennent la dureté de l'échantillon, la position de l'échantillon dans la chambre d'ablation ou la dérive instrumentale dans l'ICP-MS pendant plusieurs heures ou plusieurs jours. Les limites instrumentales, tels que la diminution du signal (sensibilité) ou le fractionnement élémentaire sont attribués aux phénomènes thermiques

liés au point d'impact de l'ablation (Gratuze *et al.*, 2001). Pour diminuer ces effets, Gratuze *et al.* (2001) suggèrent de récolter les données sur trois pistes au moins. Chaque échantillon a fait l'objet, au minimum, d'un double prélèvement, sur deux axes parallèles afin de comparer l'aspect de la courbe de tendance, dans le but de confirmer l'information sur les ratios élémentaires utilisés. Les ablations laser sont faites selon une ligne continue, à intervalles réguliers (tous les 10 μm), selon une vitesse scanner de 1 $\mu\text{m}/\text{sec}$. et une vitesse platine de 5 $\mu\text{m}/\text{sec}$. Chaque ablation est à l'origine d'un cratère de 10 μm de diamètre.

III.3.3.1.2. Le tracé de l'ablation

La zone d'émail à ablater est elle aussi choisie avec soin. La résolution spatio-temporelle est à la fois influencée par le modèle de minéralisation de l'émail, la direction des fronts successifs de minéralisation et la durée du processus de minéralisation. Il est préférable de ne pas centrer son attention sur l'extrémité cuspidienne, car l'émail y est souvent nettement moins visible, ce qui pourrait constituer une source d'erreur pour le décompte, à la fois des stries régulières de Retzius et des striations transversales, pour l'estimation du rythme de formation, et pour l'identification de la ligne néonatale (Smith *et al.*, 2006). La zone du collet est elle aussi à éviter, car son étroitesse réduit le champ d'enregistrement disponible.

La position apparente d'une strie accentuée de Retzius peut être affectée par des facteurs tels que le plan de section et l'orientation de la strie de Retzius.

Plusieurs auteurs ont souligné les problèmes potentiels impliqués par l'obliquité des sections (Antoine *et al.*, 2000; Smith *et al.*, 2006). Elle empêcherait d'obtenir des plans de section représentant l'épaisseur axiale réelle, la longueur effective du prisme, et elle restituerait un rythme de sécrétion quotidienne visiblement exagéré. L'obliquité de la coupe pourrait également participer à une faible définition des lignes de Retzius (Smith *et al.*, 2006). Ces facteurs sont susceptibles de provoquer des illusions d'optique pouvant inclure une ou plusieurs striations transversales (Antoine *et al.*, 2009). Pour pallier ces biais il est préférable de choisir des zones éloignées de l'extrémité cuspidienne de la dent, car il semble que les facteurs d'erreur y soient plus faibles (Antoine *et al.*, 2009), en évitant néanmoins de se positionner sur le collet, la lisibilité y étant nettement moins claire. Le prélèvement se fait donc dans la partie centrale (verticalement) de la couronne.

III.3.3.2. Expérimentation: mode opératoire pour le spectromètre de masse

La détection élémentaire a été effectuée par spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-MS), outil de plus en plus privilégié pour l'analyse des éléments traces dans les échantillons solides (Denoyer, 1991), et également exploité pour les échantillons biologiques (Amarasiriwardena *et al.*, 1997). La spectrométrie de masse est une technique instrumentale fondée sur la séparation, l'identification et la quantification des éléments qui composent l'échantillon. Elle examine les ions ou les molécules chargées dans des conditions appropriées et étudie les spectres d'intensité relative en fonction du rapport entre la masse et la charge de chaque espèce d'ion (Browning, 1974). Les équipements développés à cet effet s'appuient sur le couplage d'une torche à induction

plasma (ICP) et d'un spectromètre de masse. La torche plasma génère des ions chargés à partir de l'échantillonnage vaporisé par excitation, sous une température élevée (entre 6 000 et 10 000°C). Le spectromètre de masse (MS) sépare les ions en fonction de leur masse pour la détection et la quantification des éléments. Ce choix est justifié par sa capacité à analyser directement tout type d'échantillons, y compris les matériaux biologiques (Péchevran *et al.*, 2005). L'ablation laser, à laquelle elle est associée dans notre travail, n'exige pas la mise en solution de l'échantillon ce qui est indispensable, dans le cas qui nous intéresse pour utiliser la chronologie du développement de l'émail dentaire. En outre, l'absence de préparation soluble facilite la mise œuvre de l'analyse et minimise les risques de contamination (Péchevran *et al.*, 2005).

Un ICP-MS (ELAN DRC II, Axial Field Technology) quadripolaire équipé d'une cellule de collision a été utilisé (X7 série CCT, Thermo Electron, Winsford, UK). La spectrométrie de masse des éléments est déterminée au moyen d'un analyseur quadripolaire qui sépare les substances de la matière traitée en fonction de leur masse atomique par rapport à la charge (ratio m/z), et ainsi permet l'identification des éléments qui constituent l'échantillonnage. À l'heure actuelle, la majorité des systèmes d'ICP-MS associé à l'ablation laser emploient des spectromètres de masse quadripôles, comme c'est le cas dans notre travail. Ils autorisent une analyse rapide du spectre de masse et une résolution temporelle de plusieurs spectres par seconde, pour une large série d'éléments (Günther et Hattendorf, 2005). Néanmoins, la qualité des spectres obtenus par l'analyse reste tributaire de la compréhension des processus fondamentaux qui influencent la formation de l'aérosol. Ces dernières années, de nets progrès en la matière ont été faits (même si les données utilisées s'appuient sur des essais à partir de solutions de nébulisation et non d'aérosol, elles apparaissent directement transférables), ce qui nous laisse confiants vis-à-vis de nos interprétations (Günther et Hattendorf, 2005). Une torche à double entrée (dual mode, Thermo Electron) a été installée dans l'appareil. Celle-ci permet le mélange de l'aérosol sec en provenance du système d'ablation laser et le transport par un flux d'hélium avec de l'aérosol liquide induit par la nébulisation d'une solution à 2 % d'acide nitrique. Un nébuliseur concentrique pneumatique 1 ml/min (Glass Expansion) a été utilisé. Lorsque des échantillons sont ablatés, la solution d'eau (18,2 M Ω) acidifiée avec 2 % d'acide nitrique est nébulisée afin d'obtenir les conditions de plasma adéquates (Péchevran *et al.*, 2005). Lors des réglages instrumentaux (étalonnage en masse, optimisation des lentilles et de débit de gaz vecteur, etc.), une solution multiélémentaire à 1 ppb est nébulisée tandis que le laser est à l'arrêt. Cette procédure permet une optimisation facile et complète de l'ICP-MS.

L'utilisation de l'hélium comme gaz vecteur (et non l'argon), conduit à un meilleur signal chimique et des effets de fractionnement élémentaires amoindris (Günther et Hattendorf, 2005). En effet, parmi les phénomènes de fractionnement élémentaire (cf ci-dessus), il existe un problème de distribution par taille des particules, pouvant entraîner une atomisation incomplète, ce qui a un impact sur les signaux ioniques de l'ICP-MS. La suppression sélective des particules de grande taille dans l'aérosol introduit un biais dans ces signaux ioniques. Or, le processus de formation des atomes et des ions, qui diffère selon les éléments, est influencé par le gaz utilisé pour le transport vers l'ICP-MS de la matière ablatée. Le gaz le plus souvent utilisé pour les plasmas en chimie

analytique est l'argon (Cox *et al.*, 1996, Cucina *et al.*, 2007, Hare *et al.*, 2011, Hoffmann *et al.*, 2000). Il constitue une très bonne source d'atomisation et d'ionisation. Ce gaz rare produit un spectre simple et ne se recombine pas. L'efficacité de l'ionisation est proche de 100 % pour plusieurs éléments et d'environ 90 % pour la moitié des éléments de la table de classification périodique. Cependant, l'argon, en raison de sa mauvaise conductibilité thermique, est moins stable que l'hélium (mais souvent plus accessible, car moins coûteux que l'hélium). L'hélium dans le cadre d'expérimentations avec LA-ICP-MS a été testé (Pécheyran *et al.*, 2005; Castro *et al.*, 2010). L'utilisation de l'hélium comme gaz vecteur, à la place l'argon, conduit à un meilleur signal chimique et des effets de fractionnement élémentaire amoindris (Günther et Hattendorf, 2005). Cela permet également d'éviter les interférences isobariques entre le ^{86}Sr et le ^{86}Kr , ce dernier étant présent à l'état de traces dans l'argon (Song, 2004). Les performances du couplage LA-ICP-MS sont détaillées dans la figure 15.

Caractéristiques	Performances de LA-ICP-MS
Quantification	étalons solides requis
Limites de détection	0,0001 – 0,1 $\mu\text{g/g}$ (solide)
Précision (élément trace)	$\pm 1 - 10 \%$
Résolution spatiale	$> 5 \mu\text{m}$
Résolution en profondeur	0,02 à $9 \mu\text{m}$
Risque de contamination	Faible
Limitations	Interférences, hétérogénéité

Les éléments analysés comprennent le Mg^{24} , Mg^{26} , P^{31} , Cl^{35} , Ca^{43} , V^{51} , Mn^{55} , Co^{59} , Cu^{63} , Cu^{65} , As^{75} , Sr^{86} , Sr^{88} , Mo^{95} , Mo^{98} , Rh^{103} , Ba^{135} , Ba^{138} , Pb^{208} , Hg^{202} , Cd^{111} , Cd^{114} . Ces éléments ont été sélectionnés selon trois critères : leur pertinence dans le but d'obtenir des informations sur l'alimentation, l'exposition à différents éléments toxiques (en vue de futures études sur la population) et de réduire les interférences polyatomiques.

Fig. 15. Performances du couplage LA-ICP-MS pour l'analyse de matériau (d'après Claverie, 2009, Tableau 1)

À partir de recherches antérieures, Beck (1985) propose cinq critères de sélection pour le choix des oligoéléments analysés dans le cadre de travaux visant à développer un modèle d'étude de l'alimentation. Premièrement, ils doivent être documentés sur les relations directes entre leurs niveaux dans l'alimentation et dans les tissus analysés. Deuxièmement, les niveaux des tissus du squelette doivent être adéquats pour permettre des mesures exactes et cohérentes. Troisièmement, les concentrations élémentaires ne doivent pas être affectées par une ou des maladies. Quatrièmement, les tissus durs analysés ne doivent pas avoir subi de changement par diagenèse ni lessivage ni enrichissement, pendant la période d'inhumation. Enfin, les niveaux ne doivent pas être sujets à une trop grande fluctuation liée à l'âge, au sexe, ou à la variabilité individuelle.

Pour chaque individu, nous observons les teneurs en strontium (en enregistrant les isotopes ^{86}Sr , ^{88}Sr) et en calcium (en enregistrant l'isotope ^{43}Ca). Le strontium est un excellent indicateur de l'alimentation. Les isotopes de ^{86}Sr et ^{88}Sr ont été préférés, car ce sont deux des quatre isotopes

naturels les plus abondants dans l'environnement, ce qui réduit la marge d'erreur. De plus, les petites variations en quantité ne dépendent pas de la diminution du rubidium-87, contrairement au Sr^{87} . L'utilisation de deux isotopes du strontium, en parallèle, permet de confirmer une même tendance de leur évolution dans le temps.

Pour chaque individu, nous avons également observé le calcium, car le strontium est étudié par rapport au calcium. Le calcium est l'élément majeur de la matrice le mieux approprié pour servir d'étalon interne, en raison de la faible influence des effets de substitution par diagenèse et de sa présence dans la matrice de l'émail (hydroxyapatite) relativement stable et élevée.

Le strontium répond aux cinq critères énoncés ci-dessus pour les modèles de détermination de l'alimentation. Le calcium répond à quatre des cinq critères. En effet, il peut être sujet à la diagenèse, mais comme nous l'avons vu, le recours à l'émail dentaire nous protège fortement de ce problème. Le choix du rapport Sr/Ca répond donc au mieux aux exigences suggérées par Beck (1985).

Le Rhodium a été mesuré pour le suivi de la stabilité du plasma l'ICPMS. Le rhodium était contenu dans une solution d'eau ultra pure contenant 2% d'acide nitrique (HNO_3) (*cf. ci-dessus*). Cette solution est nébulisée en continu à l'aide d'un flux d'argon, pour former un aérosol liquide qui ne passe pas par le laser. Lorsque le laser ablate les échantillons solides, il produit un aérosol sec transporté par le flux d'hélium. Nous avons mélangé le flux d'hélium transportant cet aérosol sec avec le flux d'argon transportant l'aérosol humide juste avant la torche à plasma. Ce montage permet d'identifier d'éventuelles sources de dérive de sensibilité. Ainsi, si une dérive de sensibilité est observée lors de l'ablation d'un échantillon, deux explications sont à étudier. La dérive de sensibilité peut être due soit à l'ICPMS (obstruction des cônes, encrassement d'une lentille ionique, etc.), soit au laser (dérive en énergie, problème de focalisation, etc.). Si la dérive est observée de la même manière sur le rhodium, dont le signal est indépendant du laser, alors le problème vient de l'ICPMS, sinon il provient du laser.

L'ICP-MS, initialement, a été développé pour des échantillons sous forme de solution et équipé d'un nébulisateur pneumatique ou ultrasonique. Il est désormais capable de prendre en charge une plus grande variété de sources de matériel, à condition que la matière échantillonnée puisse être entraînée dans un flux gazeux, sous forme de vapeur, ou d'aérosol de particules solides, ou de gouttelettes liquides. L'ICP-MS permet une analyse à pression atmosphérique, il n'est donc pas nécessaire de conditionner l'échantillon sous vide. L'ablation laser à laquelle l'ICP peut être associée représente une nouvelle approche d'échantillonnage. Dans le cas qui nous intéresse, elle conditionne le matériel, l'émail, sous forme d'un flux gazeux qui est accepté par l'ICP. La combinaison de ces équipements offre à la fois un microéchantillonnage localisé et un profilage élémentaire de surface grâce à l'ablation laser, une analyse multiélémentaire quantitative extrêmement sensible permise par l'ICP-MS. L'ablation laser permet de passer outre les complications liées à la séparation de l'émail tel que le grattage, le forage, et permet un accès direct à l'échantillon sans phase de dissolution à l'acide et limite les risques de contamination de la surface de l'émail. Pour toutes ces raisons, l'ablation laser est un mode de prélèvement particulièrement adapté à l'échantillonnage sur lame mince.

III.3.3.3. Expérimentation : mode opératoire pour l'étalonnage

Les imperfections d'ordre analytique peuvent être compensées par l'étalonnage, interne et externe, des résultats d'analyses.

III.3.3.3.1. Étalonnage externe

Malgré l'important potentiel de LA-ICP-MS quelques subsistent, notamment du fait du fractionnement élémentaire. Un des moyens habituellement utilisés pour mesurer le degré de fractionnement consiste à évaluer un indice de fractionnement élémentaire (EFI). Pour cela, le domaine de l'ablation laser a recours à des verres de référence certifiés, c'est-à-dire des matériaux de référence dont la composition est similaire à l'échantillon. Leur composition élémentaire est parfaitement homogène en surface et en profondeur. Ce sont généralement des verres certifiés du NIST⁴², dont les données sont comparées avec celles de l'échantillon. Cependant, il existe un nombre limité de matériaux de référence certifiés, ce qui présente un obstacle à la justesse des analyses par LA-ICP-MS, comme cela a été souligné par plusieurs chercheurs (Evans *et al.*, 1995; Cox *et al.*, 1996; Castro *et al.*, 2010; Hare *et al.*, 2011; Hanč *et al.*, 2013). Il n'existe d'ailleurs pas de verre certifié de même composition que l'émail dentaire humain. D'autres standards de référence de composition proche, à base de poudres carbonatées compressées, ont été utilisés pour calibrer les données de LA-ICP-MS collectées dans ce travail. Dans le cas de l'émail dentaire, ce sont des NIST de la série 600, contenant du calcium et du silicium⁴³. Nous avons calculé le ratio Sr/Ca à partir des NIST 610 (Lee *et al.*, 1999; Castro *et al.*, 2010; Hare *et al.*, 2011; Hanč *et al.*, 2013), NIST 612 (Goodman *et al.*, 2003; Kang *et al.*, 2004; Dolphin *et al.*, 2005; Hare *et al.*, 2011), NIST 614. Un étalon de référence d'os broyé, NIST 1486 (Grünke *et al.*, 1996; Uryu *et al.*, 2003; Castro *et al.*, 2010; Hare *et al.*, 2011; Hanč *et al.*, 2013), a également été utilisé pour valider la justesse de nos mesures. Nous avons procédé aux mesures sur les standards de référence matin et soir, afin que les mesures prises sur les échantillons puissent être ajustées en fonction des étalonnages les plus pertinents dans le temps (voir figure 16). Dans nos conditions de travail, la limite de détection du strontium est de l'ordre de 10 ng/g.

L'utilisation de ces étalons de référence ne supprime pas le fractionnement élémentaire, mais ce dernier s'opère de la même manière dans l'échantillon et dans l'étalon, ce qui permet de le compenser (Claverie, 2009).

	Sr 86 - étalonnage matin	Sr 88 - étalonnage matin	Sr 86 - étalonnage soir	Sr 88 - étalonnage soir
Ratio mesuré CRM	0,0010	0,0010	0,0009	0,0009
Ratio certifié ou de référence	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
Écart à la valeur certifiée	3,6%	3,6%	10,1%	8,5%
Concentration mesurée ppm	254,74	254,92	239,68	243,29
Concentration certifiée ppm	264,00	264,00	264,00	264,00

Fig. 16. Tableau d'estimation des valeurs attendues et des valeurs mesurées sur le NIST 612

42. National Institute of Standards and Technology.

43. Souvent pris comme éléments de référence en chimie analytique.

III.3.3.3.2. Étalonnage interne

Les effets de matrice peuvent être limités par la normalisation des signaux à l'aide d'un étalon interne. L'étalonnage interne (ou normalisation), c'est-à-dire la quantification d'un élément ou d'une série d'éléments par rapport à un autre élément de référence, est un recours dont on ne peut savoir, à l'avance, s'il est nécessaire, compte tenu du manque de références standard. L'élément choisi comme étalon interne doit être présent à la fois dans l'échantillon et dans l'étalon externe certifié dont les concentrations sont connues avec précision⁴⁴. De récentes recherches ayant utilisé l'ablation laser couplée à l'ICP-MS, insistent sur l'importance des procédures de quantification, telle que les méthodes de calibration de la matrice (Outridge *et al.*, 1995, Günther *et al.*, 2000). Elles suggèrent l'utilisation de la normalisation interne, car celle-ci permet d'améliorer la sensibilité des analyses chimiques par LA-ICP-MS. Outridge et ses collaborateurs (1995) estiment que la normalisation, dans des conditions instrumentales optimales, doit permettre d'atteindre une précision analytique de moins de 10 % pour les éléments entre 0,1 et 1 ppm et de moins de 5 % pour les éléments dont l'abondance est supérieure à 1 ppm comme le strontium (dans le cas des matériaux homogènes). Dans leurs expérimentations Günther *et al.* (2000) ont noté une amélioration de la précision des résultats de 5 à 25 % pour les concentrations élémentaires, grâce à l'étalonnage interne.

La question de l'hétérogénéité dans l'échantillonnage par ablation, qui impacte la variabilité de la quantité de vaporisation du matériel (que ce soit à cause de la densité de la matière ou l'intensité du laser) et de la quantité de matière entrant dans le flux échantillonné, a attiré l'attention des chercheurs (Evans *et al.*, 1995). Il semble que, dans le cas de l'émail dentaire, l'étalonnage interne au calcium résout un certain nombre de problèmes de variations d'échantillonnage. D'ailleurs, quelques résultats préliminaires à partir d'ablations effectuées sur des canines humaines anciennes rapportent une composition homogène (Goodman et Song, données non publiées; citées par Song, 2004), à condition que le matériel présente une bonne conservation, avec une contamination minimale, limitant ainsi les risques d'anomalies dans l'échantillonnage.

Nous avons donc retenu le calcium comme étalon interne pour la normalisation. Dans notre étude, les niveaux de strontium sont interprétés en fonction de l'abondance de calcium. Ce choix est justifié par trois raisons principales : il est l'élément majeur de la composition de la matrice amélaire; sa présence dans la matrice est stable; il est impliqué dans le phénomène de biopurification (*cf. supra* II. 3.1.2). Le calcium est donc particulièrement approprié pour servir d'étalon interne dans l'analyse de l'émail dentaire. Certains chercheurs ont utilisé le ⁴⁴Ca (Evans *et al.*, 1995; Hoffmann *et al.*, 2000; Kang *et al.*, 2004; Hare *et al.*, 2011) ou le ⁴⁶Ca (Budd *et al.*, 1998). Cox et ses collègues (1996) ont également proposé le phosphore comme étalon interne, mais cette suggestion n'a pas retenu l'attention des chercheurs dans ce domaine. Le ⁴³Ca, est l'élément préférentiel pour la normalisation interne, dans le cas des analyses chimiques au moyen de LA-ICP-MS sur la dent humaine (Outridge *et al.*, 1995; Dolphin *et al.*, 2005; Cucina *et al.*, 2007; Cox *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 1999; Goodman *et al.*, 2003; Uryu *et al.*, 2003; Castro *et al.*,

44. Le comportement de l'élément choisi doit être le même au cours de l'analyse de l'échantillon que pour l'étalon certifié; ce qui n'est pas le cas lorsqu'il y a une fragmentation élémentaire différente entre l'échantillon et l'étalon certifié.

2010; Hanč *et al.*, 2013; Farrell *et al.*, 2013; Song, 2004). Malgré sa faible abondance isotopique (0,13 %), ^{43}Ca a été choisi, car il n'est pas sujet à des interférences isobariques et polyatomiques majeures dans l'ICP-MS (par exemple ^{40}Ar sur ^{40}Ca , $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$ sur ^{44}Ca). La faible abondance de cet isotope fournit un signal de calcium adéquat, facile à manier et nous a permis de ne pas saturer le détecteur de l'ICP-MS lors de l'ablation des dents, le calcium étant un élément majeur constitutif de la matrice de nos échantillons.

III.3.3.4. Le problème de la diagenèse

Comme nous l'avons expliqué précédemment (*cf. supra* II. 3.3), la composition majoritairement inorganique de l'émail fait de la dent un support faiblement sujet à la diagenèse, cependant l'altération de la surface de la dent par des échanges ioniques avec plusieurs éléments de l'environnement est une possibilité. La contamination post-mortem des tissus durs peut altérer significativement les valeurs chimiques et, par conséquent, perturber la reconstruction des modèles alimentaires. Pour pallier cet obstacle nous avons procédé à un nettoyage mécanique : nous avons lavé les échantillons en surface avec de l'eau déionisée et du méthanol, et nous les avons passés aux bains ultrasons (*cf. supra* III. 1.3.1) Les nettoyages à l'acide nécessitent une réduction en poudre des échantillons, ce qui n'est pas adapté à nos objectifs. Les solutions proposées dans la littérature pour évaluer l'intégrité chimique des échantillons (l'observation des cristaux sous lumière polarisée, la détermination d'un profil de solubilité) ne sont pas satisfaisantes ou pas applicables dans notre démarche (*cf. supra* II. 3.3.2). Par précaution, dans ce travail, l'interprétation des valeurs Sr/Ca de la partie externe de l'émail (à partir de la surface qui était au contact du sol) a été exclue sur une profondeur d'environ 140 μm .

III.3.3.5. Expérimentation : mode opératoire pour le traitement des données

L'acquisition des signaux chimiques est gérée par la configuration TRA Profile du logiciel Plasmalab (Electron). Ce programme informatique est conçu pour des applications industrielles, il n'est donc pas parfaitement adapté à l'utilisation analytique pour laquelle nous l'employons, malgré les nombreuses améliorations qu'il a connues à cet effet (Claverie, 2009).

Les données sont mesurées comme des intensités en coups par seconde. Visuellement, les abondances élémentaires à travers le tracé de l'ablation laser peuvent être reportées sur un graphique avec, en ordonnée, les intensités élémentaires et, en abscisse, « un temps en secondes » qui correspond aux distances sur l'émail dentaire, dans notre cas. Pour une meilleure interprétation des données, et permettre leur comparaison et le calcul de ratios élémentaires, les intensités sont converties en concentration (partie pour million, ou ppm). Ces dernières valeurs servent de base pour le calcul des ratios.

III.3.3.6. Les limites de LA-ICP-MS

Malgré les nombreux atouts de cette technique, elle se heurte encore à quelques problèmes d'ordre analytique et technique. Les limites analytiques sont liées à l'interaction rayonnement - matière (qui lui-même dépend du matériau échantillonné et des caractéristiques du rayonnement

laser utilisé). Les principaux obstacles sont : le fractionnement élémentaire, la sensibilité et la limite de détection en microanalyse, l'étalonnage interne et externe (Pécheyran *et al.*, 2005). Les limites techniques sont liées au dispositif optique pour le repérage des zones à ablater sur l'échantillon.

Plusieurs études (Rodushkin *et al.*, 2002; cités par Günther et Hattendorf, 2005) ont démontré un phénomène de fractionnement non représentatif de la concentration massique du matériau analysé. Il altère la qualité des mesures, ce qui modifie les concentrations effectives des éléments étudiés (Pécheyran *et al.*, 2005). Ce terme englobe les mécanismes affectant la précision de l'analyse pouvant intervenir dans les différentes étapes du dispositif LA-ICP-MS (principalement : formation, transport, atomisation). Ces phénomènes peuvent résulter de deux sources différentes : soit une évaporation préférentielle des éléments volatils dans le gaz vecteur, soit la distribution par taille des particules dans l'ICP-MS (liée à une atomisation incomplète). L'aérosol analysé étant produit par l'interaction laser/matière, l'ampleur des conséquences du fractionnement élémentaire est directement liée à la capacité d'absorption du laser, aux propriétés du matériau et au gaz vecteur utilisé.

Finalement, malgré ces limites, cette technique produit de précieuses informations quantitatives sur la distribution élémentaire des dents, à condition de mettre au point une stratégie d'étalonnage appropriée.

Pour notre étude, un des problèmes rencontrés lors de l'expérimentation du protocole développé, et qui a déjà été soulevé antérieurement (Lee *et al.*, 1999), est la visualisation claire des structures internes de la dent dans les conditions d'échantillonnage liées à la technique LA-ICP-MS. Ainsi, l'axe des prismes de l'émail dentaire, qui traverse les lignes de croissance et qui correspond à une ligne chronologique de minéralisation de l'émail est difficile à suivre. Or, cet axe est déterminant dans le tracé de l'ablation laser. Nous avons donc choisi de déterminer le tracé d'ablation à partir de l'angulation par rapport à l'EDJ, défini en fonction de la position du prélèvement dans la hauteur de la dent (Beynon *et al.*, 1991).

III.4. INTERPRÉTATION DES DONNÉES

La mise en évidence des étapes du processus de sevrage s'appuie sur deux approches :

- l'analyse élémentaire, qui permet d'identifier l'évolution de la composition chimique de l'émail à travers l'enfance. Elle s'effectue à partir de microprélèvements par ablation laser, analysés en ligne par la spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-MS) ;
- l'examen des indices histologiques de l'émail dentaire, à la fois réguliers et pathologiques, qui permettent de mettre en relation les changements chimiques de l'émail dentaire et les événements de la vie de l'individu. Parmi les événements identifiables optiquement, il est important de pouvoir repérer le moment de la naissance afin d'obtenir un point de départ pour l'estimation de l'âge de l'enfant au moment des variations chimiques révélées par les analyses élémentaires. L'âge de l'enfant est calculé à partir de nos connaissances sur le rythme de formation de l'émail.

III.4.1. Interprétation des marqueurs chimiques

III.4.1.1. Comportement du strontium et du calcium dans le corps humain

Le calcium et le strontium sont incorporés dans les dents au cours de leur développement. Leur concentration dans l'émail dentaire reflète ainsi leur concentration dans l'organisme qui, elle-même, reflète les concentrations élémentaires présentes dans l'alimentation absorbée. La relation entre les concentrations en strontium et en calcium dans l'alimentation et celles assimilées par le squelette est constante. Entre le strontium alimentaire et le strontium présent dans le squelette, après sa métabolisation par le tractus gastro-intestinal et son intégration dans les tissus osseux, on observe une baisse comprise entre 18 et 27 % (Sillen et Kavanagh, 1982; Sillen et Smith, 1984).

Cependant, les variations d'assimilation du strontium et du calcium par la dent sont dépendantes du degré de minéralisation et de l'assimilation par l'organisme avant d'atteindre l'émail. De ce fait, des variations de concentrations élémentaires existent en l'absence de changement environnemental ou alimentaire.

Les analyses de la distribution du Sr/Ca révèlent une tendance sous-jacente indépendante de l'alimentation et de l'exposition au milieu pendant la période de formation de l'émail. Elle ne peut donc pas être prise en compte dans l'interprétation des changements alimentaires. En effet, on observe une augmentation des valeurs Sr/Ca, de la partie occlusale de la couronne vers le collet (Humphrey *et al.*, 2008). Cette tendance sous-jacente est cohérente avec les variations de densité minérale de l'émail de la dent humaine et reflète la variation du degré de minéralisation dans les différentes parties de la couronne dentaire (Wilson et Beynon, 1990). Le modèle proposé dans ce travail pour l'incorporation différentielle du strontium et du calcium pendant la formation de l'émail est compatible avec cette tendance sous-jacente. En effet, nous tenons compte du fait que, dans les zones d'émail plus minéralisées, les teneurs en calcium sont plus élevées et le rapport Sr/Ca plus bas. La position du tracé de l'ablation (*cf. supra* III. 3.3.1) prend cela en considération.

Les variations d'assimilation du strontium et du calcium dans l'organisme humain sont sous l'influence d'un processus physiologique : le passage complexe des ions à travers les différentes membranes, lui-même sous contrôle métabolique. L'assimilation diffère selon l'organe traversé, qui fonctionne comme un filtre par rapport aux ions qui le traversent. Dans le cas qui nous intéresse, les organes concernés sont essentiellement le placenta, la glande mammaire et le tube digestif (immature ou mature).

III.4.1.2. Le rôle du strontium et du calcium dans la reconstruction paléonutritionnelle

La composition chimique du squelette fournit effectivement un « signal biogénique », dans lequel l'apport alimentaire d'un individu occupe une place importante. Cette découverte a été exploitée par les anthropobiologistes dans le but de reconstruire le régime alimentaire des

populations du passé. Les études alimentaires à partir de la composition chimique du squelette reposent sur l'hypothèse largement acceptée selon laquelle les éléments mineurs et traces sont distribués de façon différentielle en fonction des niveaux trophiques. Les applications les plus répandues de cette hypothèse s'emploient à la détermination de la part végétale et animale de l'alimentation des individus de périodes anciennes (Schoeninger, 1979; Sillen, 1981), ou encore à l'estimation de la dépendance aux ressources terrestres par rapport aux ressources marines (Schoeninger et Peebles, 1981; Sillen et Kavanagh, 1982; Sealy et Sillen, 1988; Burton et Price, 1990). Dans ces démarches, le strontium est l'élément le plus largement utilisé pour quatre raisons principales. Tout d'abord, l'utilisation du strontium s'appuie sur son omniprésence bien connue dans l'environnement. Deuxièmement, le schéma de biopurification (*cf. supra* II. 3.1.2) qu'il respecte lors de son évolution dans les niveaux trophiques est un outil important. Ce facteur est soutenu par un autre fait appréciable, à savoir les différences de métabolisme du strontium entre les animaux et les végétaux. Et, pour finir, la relative stabilité chimique du strontium une fois incorporé dans le squelette est un avantage considérable. Le strontium est utilisé sous la forme ratio Sr/Ca, qui reflète de façon fiable la proportion de strontium ingérée par l'intermédiaire de l'alimentation.

Les autres éléments utilisés sont évalués pour leur potentiel de discrimination alimentaire et leur résistance relative aux changements diagenétiques (Byrne et Parris, 1987). Ils sont généralement mesurés par rapport au strontium, ou dans le but de compléter l'information acquise au moyen du strontium.

Le travail présenté ici apporte des précisions nouvelles en matière de chimie paléonutritionnelle en utilisant la sensibilité chronologique des tissus durs dentaires et l'analyse de microprélèvements localisés à travers des périodes connues du développement de l'émail dentaire. L'utilisation et l'association de ces deux aspects représentent une démarche précise pour les comportements d'alimentation, d'allaitement et de sevrage d'enfants de populations anciennes, à des âges spécifiques du développement.

III.4.1.2.1. Biopurification du calcium et rapports élémentaires

L'assimilation préférentielle du calcium au détriment de certains éléments, notamment du strontium, du magnésium et du baryum, pour ce qui est des éléments chimiquement similaires au calcium sont connus pour être incorporés aux tissus durs proportionnellement aux quantités présentes dans l'alimentation (Schroeder *et al.*, 1972; Elias *et al.*, 1982; Rheingold *et al.*, 1983). Cela s'explique par le fait que le passage du strontium et du baryum dans les flux sanguins sont particulièrement affectés par la discrimination du système digestif des mammifères terrestres (Schroeder *et al.*, 1972). Leur transfert est donc moins efficace que le passage du calcium, ainsi une grande quantité de calcium est absorbée contrairement au strontium qui n'est assimilé qu'à environ 20 % du calcium (Burton et Wright, 1995). Le phénomène de biopurification se traduit par une réduction des ratios Ba/Ca et Sr/Ca dans l'organisme, et par conséquent dans le squelette, par rapport aux apports alimentaires (Burton *et al.*, 1999).

La biopurification est un phénomène qui se produit à chaque étape de la chaîne alimentaire (Burton et Wright, 1995). Par conséquent, la tendance à la discrimination du baryum, du magnésium et du strontium, en particulier, en faveur du calcium se traduit par des ratios Sr/Ca, Mg/Ca et Ba/Ca, dans les tissus durs des individus, inférieurs à ceux de l'alimentation ingérée (Kyle, 1986). Ce processus est répété à chaque niveau trophique. La diminution des ratios Sr/Ca, parallèle à l'évolution de la chaîne alimentaire, supporte l'idée que les herbivores ont des ratios plus faibles que ceux des plantes qu'ils consomment, de même les carnivores qui s'en nourrissent ont des ratios inférieurs à ceux des herbivores (Schoeninger, 1979; Sillen, 1981; Elias *et al.*, 1982; Sillen, 1992; Burton *et al.*, 1999; Burton et Wright, 1995). Les niveaux de strontium dans les tissus durs animaux sont donc en relation directe avec la quantité de strontium dans l'alimentation. Cependant, il est à noter que la teneur en strontium est nécessairement liée à la compréhension de la contribution du calcium total absorbé. Le calcium, en tant qu'élément essentiel est fermement régulé dans le corps et connaît une absorption qui dépend de la balance entre les niveaux de calcium dans le sang et les fluides extracellulaires. Comparativement, le calcium, le strontium et le baryum sont absorbés selon un rapport 10 : 5 : 1 (Marcus et Wasserman, 1965; cités par Gilbert *et al.*, 1994). De ce fait lorsque le rapport Sr/Ca diminue dans les niveaux trophiques, le ratio Ba/Ca subit une plus forte réduction.

Plusieurs études ont cherché à estimer l'évolution des proportions élémentaires selon les différents métabolismes qu'ils traversent (Elias, 190; Elias *et al.*, 1982; Sillen et Kavanagh, 1982; Price *et al.*, 1985; Burton *et al.*, 1999). En général, les plantes ont une concentration en calcium approximativement trois fois supérieure à celle du strontium concentré dans les tissus mous des animaux qui les consomment (Schroeder *et al.*, 1972). À chaque niveau trophique le ratio Sr/Ca des tissus durs diminue d'environ 1/5^e par rapport au Sr/Ca présent dans l'alimentation (Brown, 1973; Burton et Wright, 1995). Ainsi, Elias et ses collègues (1982) estiment une réduction par quatre du rapport Sr/Ca entre les feuilles ingérées et les campagnols qui s'en nourrissent, ainsi qu'une diminution par six entre le campagnol et son prédateur.

Plusieurs expérimentations menées sur des chaînes alimentaires du sud de l'Afrique (Gilbert *et al.*, 1994) ont mis en évidence l'évolution du ratio Sr/Ca à travers les niveaux trophiques. Alors que les plantes ont un rapport Sr/Ca situé entre 2,05 et 41,79 (avec 80 % entre 2,05 et 10,26), les os d'herbivores ont un ratio Sr/Ca compris entre 0,96 et 5,52, et ceux des carnivores entre 0,39 et 2,31 (Voir figure 17). On note dans ces résultats que les ratios Sr/Ca et Ba/Ca des herbivores et des carnivores se chevauchent. On remarque également que, dans les deux cas, la diminution du ratio Ba/Ca est plus importante que celle du ratio Sr/Ca, car le métabolisme des mammifères discrimine plus le baryum que le strontium (Elias *et al.*, 1982). En général les rangs de Sr/Ca sont cohérents avec les différences entre plantes et consommateurs dans d'autres études de la même région (Sillen, 1992).

III.4.1.2.2. Régimes alimentaires

Cependant, l'utilisation du ratio Sr/Ca pour la détermination de la position dans la chaîne alimentaire le réduit à un schéma proie/prédateur. Or, son potentiel d'information est plus

Chapitre III. Choix méthodologiques

Espèce	échantillon	Ba (ng/ml)	Sr (ng/ml)	Ca ($\mu\text{g/ml}$)	Sr/Ca ($\times 1000$)	Ba/Sr	Ba/Ca ($\times 1000$)
Animaux marins (os)							
Pachymeton blochii (poisson hottentote)	4089	6,37	988,13	278,81	3,54	0,01	0,02
	4090	5,75	1052,3	283,68	3,71	0,01	0,02
Gasterochisma melampus (poisson maquereau)	4366	5,62	270,48	130,31	2,08	0,02	0,04
Chrysolephus laticeps (sparidae)	4367	5,78	691,79	210,48	3,29	0,01	0,03
Sparodon durbanensis (sparidae)	4372	5,11	778,57	226,48	3,44	0,01	0,02
Diomedeidae (albatros)	4093	6,02	545,49	270,96	2,01	0,01	0,02
	4092	3,14	68,54	255,02	0,27	0,05	0,01
phalacrocorax capensis (cormoran du Cap)	4377	4,89	170,03	284,2	0,6	0,03	0,02
	4140	4,12	77,8	199,81	0,39	0,05	0,02
Phalacrocorax carbo (grand cormoran)	2280	2,65	90,34	266,34	0,34	0,03	0,01
Haematopus moquini (huître de moquin)	4376	4,55	237,12	231,65	1,02	0,02	0,02
Arctocephalus pusillus (otarie à fourrure d'Afrique du sud)	4348	5,12	177,88	217,78	0,82	0,03	0,02
	2289	13,89	385,51	283,15	1,36	0,04	0,05
	2290	36,64	151,7	300,05	0,5	0,24	0,12
Herbivores terrestres (os)							
Hystrix afracaestraustralis (porc-épic du Cap)	4082	50	700,26	266,17	2,63	0,07	0,19
Taurotragus oryx (éland du Cap)	737	5,6	16,86	6,3	2,68	0,33	0,89
	4379	36,79	273,47	194,54	1,41	0,13	0,19
Chersina angulata (tortue à soc d'Afrique)	4380	74,08	1215,58	239,72	5,07	0,06	0,31
Procapra capensis (Daman du Cap)	3922	107,63	1117,04	237,63	4,7	0,1	0,45
	3924	79,35	1068,16	286,88	3,72	0,07	0,28
	4383	14,57	1093,25	242,68	4,5	0,01	0,06
Antidorcas marsupialis (springbok)	4387	57,14	171,01	163,18	1,05	0,33	0,35
	4386	130,47	164,21	171,91	0,96	0,79	0,76
Raphicerus campestris (steenbok)	2066	50,6	298,28	241,44	1,24	0,17	0,21
	2069	5124	388,35	252,81	1,54	0,13	0,2
Raphicerus melanotis (Raphicère du Cap)	2111	189,11	398,55	214,26	1,86	0,47	0,88
Carnivores terrestres (os)							
Panthera pardus (léopard)	1895	6,71	259,68	222,41	1,17	0,03	0,03
	1892	81,57	434,12	188,07	2,31	0,19	0,43
	1890	24,38	468,1	227,27	2,06	0,05	0,11
Vulpes chama (renard du Cap)	1716	23,12	120,64	255,3	0,47	0,19	0,09
Canis mesomelas (chacal à chabraque)	1717	58,28	126,11	240,41	0,52	0,46	0,24
	1718	88,51	320,06	288,31	1,11	0,28	0,31
Felis caracal (caracal)	1719	15,39	252,31	228,89	1,1	0,06	0,07
	1720	13,65	251,68	274,29	0,92	0,05	0,05
Felis (chat sauvage d'Afrique)	1721	27,35	145,22	248,28	0,58	0,19	0,11
	1722	6,56	109,48	217,59	0,5	0,06	0,03
Hyaena brunnea (hyène brune)	1841	69,22	339,97	275,89	1,23	0,2	0,25
Oiseaux terrestres (os)							
Francolinus capensis (francolin criard)	4083	14,71	217,64	314,14	0,69	0,07	0,05

Fig. 17. Résultats d'analyses du baryum, du strontium et du calcium pour des échantillons modernes (d'après Gilbert *et al.*, 1994 ; table 1)

Espèce	échantillon	Ba (ng/ml)	Sr (ng/ml)	Ca (µg/ml)	Sr/Ca (× 1000)	Ba/Sr	Ba/Ca (× 1000)
Tytonidae (chouette)	4084	4,5	141,57	280,03	0,51	0,03	0,02
	2294	3,82	284,51	249,95	1,13	0,02	0,02
Numididae phasianidae (pintade de Guinée)							
Animaux marins							
Jasus lalandii (langoute du Cap)	818	4,03	396,94	33,92	11,7	0,01	0,12
	4099	13,27	2197,05	12,21	179,94	0,01	1,09
Pseudactinia (anémone de mer)	4095	7,37	464,42	3,23	143,78	0,02	2,28
Holothuroidea (concombre de mer)	4096	13,12	1481,77	305,3	4,85	0,01	0,04
Arctocephalus pusillus (otarie à fourrure d'Afrique du sud)	4378	33,71	1081,2	145,1	7,45	0,03	0,23
Laminaria (varech)	4087	114,18	8377,49	9,75	859,23	0,01	11,71
	4088	76,18	7934,9	7,75	1023,86	0,01	9,83
Ulva (laitue de mer)	4085	18,53	454,74	7,45	61,04	0,04	2,49
	830	10,18	500,98	75,35	6,65	0,02	0,14
Haliotis midae (ormeau)	1019	4,5	116,35	6	19,39	0,04	0,75
Choromytilus meridionalis (moule noire)	1013	8,34	376,03	35,88	10,48	0,02	0,23
	1017	19,54	485,15	33,23	14,6	0,04	0,59
Patella granatina (patelle)	1020	8,76	469,47	59,52	7,89	0,02	0,15
	4103	11,35	787,85	9,81	0,01	1,16	
Patella granularis (patelle)	1021	8,04	457,65	64,21	7,13	0,02	0,13
Donax serra (moule blanche)	4100	4,92	364,82	2,65	137,67	0,01	1,86
Aulacomya atra (moule côtelée)	4102	20,33	326,96	40,9	7,99	0,06	0,5
Plantes terrestres							
Moraea fugax (corne)	756	116,22	198,75	36,48	5,45	0,58	3,19
Pronium serratum (tiges et feuilles)	758	141,24	93,97	32,35	2,9	1,5	4,37
Aponogeton distachyos (fleurs)	887	85	251,35	38,31	6,56	0,34	2,22
Hoodia sp. (tiges et feuilles)	890	411,34	928,67	90,51	10,26	0,44	4,54
Oxalis spp. (tiges et feuilles)	4114	249,31	612,47	109,97	5,57	0,41	2,27
	1045	475,3	389,5	9,32	41,79	1,22	51
Watsonia pyramidata (corne)	4106	371	142,73	33,05	4,32	2,6	11,23
	4107	134,72	391,48	97,31	4,02	0,34	1,38
Albuca spp. (tiges et feuilles)	4116	315,54	388,65	74,63	5,21	0,81	4,23
massonia depressa (corne)	4117	200,05	1036,63	56,84	18,24	0,19	3,52
Trachyandra (fleurs)	4120	57,78	257,18	110,33	2,33	0,22	0,52
Osyris compressa (baie)	4110	35,26	59,61	29,07	2,05	0,59	1,21
Viande terrestre							
Lepus capensis (lièvre du cap)	728	32,65	105,88	5,68	18,64	0,31	5,75
Taurotragus oryx (éland du Cap)	737	11,82	18,61	5,03	3,7	0,64	2,35
	4379	10,35	29,339	4,92	5,97	0,35	2,1
Antidorcas marsupialis (springbok)	4386	15,34	9,59	4,17	2,3	1,6	3,68
	4387	18,24	12,17	5,71	2,13	1,5	3,19
Numididae phasianidae (pintade de Guinée)	4383	4,43	5,64	3,31	1,7	0,79	1,34

Fig. 17 (suite). Résultats d'analyses du baryum, du strontium et du calcium pour des échantillons modernes (d'après Gilbert *et al.*, 1994 ; table 1)

étendu. Lorsqu'il est appliqué à l'être humain, ce rapport Sr/Ca peut refléter la proportion de viande dans l'alimentation (Schoeninger, 1982 ; Sillen et Kavanagh, 1982). Par exemple, dans les travaux de Hühne-Osterloh et Grupe (1989), le ratio Sr/Ca calculé sur des ossements d'adultes, est supérieur à la moyenne, ce qui suggère, selon les auteurs, une alimentation riche en protéines. Cependant, les informations recueillies sur les variations plus fines de l'alimentation, liées à des différences plus subtiles dans le modèle de subsistance, sont limitées. Cela est dû, en partie, au fait que les études médicales et nutritionnelles, qui étudient les relations entre l'alimentation et la teneur élémentaire du corps, ne concernent pas le squelette (Beck, 1985).

Afin d'apporter plus de certitude aux interprétations, les recherches se sont tournées vers l'étude d'autres éléments pouvant exprimer une particularité alimentaire. Nous savons que les aliments d'origine végétale contiennent des niveaux élevés de strontium, manganèse, magnésium et calcium. À l'inverse, les aliments d'origine animale détiennent généralement des concentrations élevées de zinc (à quelques exceptions près, comme le foie de porc ou de bœufs, les escalopes de poulet, voir figure 19) et de cuivre, car ils sont plus facilement absorbés par la faune que la flore (Underwood, 1977). À la suite des expérimentations qui ont conduit à ces résultats, des recherches complémentaires suggèrent d'utiliser le strontium et le baryum pour révéler une alimentation herbivore et de considérer le zinc et le cuivre comme des indicateurs d'une alimentation carnivore (Hatch et Geidel, 1985). En effet, selon Rheingold et ses collaborateurs (1983), les herbivores ont une concentration moyenne en zinc dans l'os d'environ 100 ppm, tandis que les carnivores s'approchent des 250 ppm (soit 2,5 fois plus) et les omnivores une position intermédiaire. Inversement, le manganèse, le strontium et le vanadium sont observés ensemble pour mettre en évidence une alimentation dominée par les ressources végétales. Néanmoins, il s'est avéré que la consommation de baies et surtout de noix est capable de perturber ce schéma (Beck, 1985). Afin de tenir compte de cette information, Hatch et Geidel (1985) proposent quatre modèles nuancés :

- un régime végétarien et sans noix, caractérisé par de hauts niveaux de manganèse, de strontium et de vanadium, ainsi que par des concentrations faibles en cuivre et en zinc ;
- un régime végétarien incluant la consommation de noix, caractérisé par des niveaux élevés de manganèse, de strontium, de vanadium, de cuivre et de zinc ;
- un régime riche en viande et dépourvu de noix, caractérisé par de hauts niveaux de cuivre et zinc, et de faibles concentrations de manganèse, strontium, vanadium
- un régime riche en viande et incluant la consommation de noix, caractérisé par de hauts niveaux de manganèse, strontium cuivre et zinc, mais avec une faible teneur en vanadium.

Parmi les aliments, la concentration de strontium ($\mu\text{g/g}$ ou ppm) est plus abondante dans les épices et les noix, légèrement moins dans les produits de la mer, les racines et les légumes à feuilles suivis, dans l'ordre décroissant, par les légumes, les céréales, les fruits, la viande, les produits laitiers, et enfin, les graisses et les huiles (Schroeder, 1972) (voir figure 18).

C'est donc essentiellement l'échelonnage des niveaux trophiques, et l'évolution du ratio Sr/Ca qui en découle, qui constituent un outil important pour les archéologues et les paléoanthropologues qui cherchent à évaluer la proportion d'alimentation végétale/carnée dans un régime alimentaire.

Types d'aliments	strontium (µg/g)
Aliments issus de la mer	
Palourdes	25,93
Crevettes	6,18
Flétan	4
Anchois (conserven)	16,46
Sardine (conserven)	5,77
Morue salée	3,42
Aiglefin	5,14
Viande	
Bœuf et gras	1,44
Steak haché	1,89
Côtelette d'agneau	1,82
Longe de porc	1,09
Foie de porc	0,76
Foie de bœuf	0,76
Rognons de bœuf	1,25
Escalope de poulet	0,52
Cuisse de poulet	1,24
Produits laitiers	
Fromage américain 0,80	0,8
Lait de vache 0,50	0,5
Lait maternel 6,04	6,04
Céréales et graines	
Blé 3,46	3,46
Sarrasin 3,84	3,84
Avoine 3,01	3,01
Millet 1,29	1,29
Orge 0,98	0,98
Maïs frais 0,52	0,52
Légumes	
Haricots de Lima	4,38
Lentilles sèches	5,07
Haricots sec	1,1
Haricots verts	1,09
Haricots rouges	0,65
Laitue	3,39
Scarole	2,84
Céleri	1,72
Persil	6,2
Choux de Bruxelles	0,59
Chou-fleur	0,52
Brocoli	1,04

Types d'aliments	strontium (µg/g)
Légumes racines	
Pomme de terre	1,08
Patate douce	1,09
Betterave	2,38
Feuilles de betterave	3,34
Carotte	2,65
Navet	1,98
Panais	4,21
Oignon	0,65
Ail	3,48
Fruits charnus	
Poivron vert	0,29
Courge butternut	0,94
Courge d'été	0,77
Tomate	0,48
Concombre	0,5
Champignons	0,54
Fruits	
Raisin	1,72
Banane	0,88
Myrtille	0,59
Fraise	2,29
Prune	0,74
Noix	
Noix du Brésil 107,43	107,43
Noix de pécan 13,63	13,63
Graisses et Huiles	
Beurre	0,8
Huile de maïs	<0,09
Huile de coton	0,11
Huile de Carthame	0,05
Huile de foie de morue	10
Condiments et épices (secs)	
Noix de muscade	13,9
Cannelle	118,75
Piment	79,17
Thym	90,3
Cacao	29,88
Feuilles de thé (rouge, rose)	35,09

Fig. 18. Strontium contenu dans une sélection de denrées alimentaires (D'après Rosenthal, 1981, table 4 ; Schroeder *et al.*, 1972, table 7)

La complémentarité de l'utilisation conjointe du strontium et du zinc est à souligner, car ils varient indépendamment l'un de l'autre (Rheingold *et al.*, 1983) et mesurent donc deux continuums nutritionnels distincts.

Dans le cas de l'allaitement maternel, d'un point vu trophique, une mère qui allaite constitue un « producteur » de lait maternel, lequel correspond à la « proie » consommée par le nourrisson qui, de ce fait, se place comme « consommateur ». On peut donc s'attendre à ce que le rapport Sr/Ca diminue de la mère au jeune enfant.

III.4.1.2.3. Le problème de l'alimentation issue de la mer

Les produits de la mer ont été supposés très riches en strontium, plus que les ressources terrestres, en raison du haut niveau de strontium relevé dans l'eau de mer. Il s'agit d'ailleurs de l'élément trace le plus abondant dans l'eau de mer, avec 8 ppm (Schroeder *et al.*, 1972). Ces hautes concentrations en strontium sont corrélées avec la salinité, la profondeur et la température (White, 1986). En partant de ces informations, et en supposant que la consommation d'aliments marins ainsi enrichis en strontium élève le niveau des tissus du consommateur, plusieurs chercheurs ont examiné le strontium des tissus durs pour évaluer la consommation des produits ingérés issus de la mer (Schoeninger et Peebles 1981 ; Burton et Price, 1990).

Pendant, ce comportement attribué au strontium a rapidement été remis en question (Sealy et Sillen, 1988). Bien que l'eau de mer présente une teneur élevée en strontium, sa concentration diminue avec l'augmentation de la position trophique dans l'environnement marin, de la même manière que pour la chaîne alimentaire terrestre. Ainsi, tous les produits de la mer n'ont pas des concentrations égales en strontium (Burton et Price, 1999). De plus, l'abondance du strontium dans les produits marins est due aux composés présents dans les coquilles tels que l'aragonite ou la strontianite, qui accumulent le strontium, mais ne reflète pas les concentrations de l'eau de mer environnante (Schoeninger et Peebles 1981). À cela s'ajoute une localisation ciblée de la majorité du strontium dans certaines parties des organismes marins. Ainsi, les coquilles laissent peu de strontium dans les parties molles, c'est-à-dire dans les portions comestibles. De ce fait, la majorité du strontium ne se retrouve pas dans l'alimentation du consommateur. Sillen et Kavanagh (1982) précisent d'ailleurs que les tissus mous des poissons et des gastéropodes marins ne totalisent que 0,1 % du strontium des tissus marins.

Finalement, les recherches en reconstruction paléalimentaire humaine montrent que la consommation de fruits de mer est très peu susceptible d'augmenter le rapport Sr/Ca du squelette. De plus, une accentuation des niveaux de strontium est plus probablement liée à des phénomènes diagénétiques associés aux amas coquilliers marins environnants (dans les contextes qui le permettent), en raison de la solubilité du strontium dans le squelette (Sealy et Sillen, 1988). En outre, si la consommation de certains aliments issus de la mer a un effet significatif sur les tissus, les signaux élémentaires du strontium et du rapport Sr/Ca peuvent être confondus avec la consommation de viande. Une alimentation comprenant beaucoup de produits marins peut aussi être complétée par une grande quantité de viande, et ainsi donner lieu à un rapport Sr/Ca comparable à celui des carnivores et des omnivores terrestres (Schoeninger et Peebles, 1981 ; Burton et Price, 1999). La quantité de strontium et le rapport Sr/Ca ne peuvent donc pas être

Types d'aliments	zinc (ppm)	Types d'aliments	zinc (ppm)
Aliments issus de la mer		Légumes racines	
huîtres fraîches		pommes de terre	8,7
crevettes (surgelées)		carottes	5,2
aiglefin (surgelés)		oignon	0,9
thon (consERVE)		betterave	0,5
sardines (consERVE)		radis	0,2
		navet blanc	12,1
Viande		Fruits charnues	
rouelle de bœuf	56,6	tomate (consERVE)	0,1
steak haché	25	concombre	1,2
foie de bœuf	39,2	Fruits	
côtelettes d'agneau	53,3	mandarine	1,5
longe de porc	18,9	abricot (consERVE)	0,1
côtelettes de porc	3,6	banane	0,2
cuisse de poulet	29,1	orange (jus)	0,7
Produits laitiers		raisin (jus)	3,1
lait homogénéisé	0,1-0,5	Noix	
œuf entier	20,8	cacahuète	32,4
blanc d'œuf	0,3	noix du Brésil	42,3
jaune d'œuf	35,5	noix de Pécan	45,3
Céréales et graines		noix	29,9
blé complet	31,5	noisette	24,4
pain au blé complet	5,3	noix de coco	0,5
pain blanc	1,2	amande	31,1
sarrasin	25,5	Graisses et huiles	
avoine (flocons)	32,3	huile d'olive	2,8
orge	4,4	beurre	1,1-2,5
maïs sec	18,2	Condiments et épices	
farine de maïs	9	poivre noir	18,3
seigle	32,5	cumin (graines)	2,8
riz complet	6,5	cannelle	13,4
Légumes		thé (infusion)	0,3
haricots de lima	31,5	sucre brut	8,7
haricots frais	1,3		
haricots rouges	0,8		
haricots verts (consERVE)	0,1		
haricots bruns (consERVE)	12,6		
lentilles	1,8		
laitue	1,6		
chou-fleur	3,4		
chou	1,8		
épinard	2,2		

Fig. 19. Zinc contenu dans une sélection de denrées alimentaires (D'après Sandstead, 1973, table 2)

utilisés comme indicateurs fiables des ressources marines, en vue d'une distinction ressources terrestres/marines, car la différence entre les signaux traduisant une alimentation carnée et ceux résultant d'une alimentation marine peut ne pas être suffisamment marquée pour être significative.

Néanmoins, Burton et Price (1990) suggèrent que les mesures Ba/Sr sur le squelette pourraient être d'une aide non négligeable pour déterminer la dépendance aux ressources marines des populations anciennes. Ce calcul semble prometteur, mais, à ce jour, on déplore un manque flagrant de données de référence sur la distribution du baryum dans les chaînes alimentaires terrestre et marine.

III.4.1.2.4. Nutrition et interprétations sociales

Parmi les études sur l'alimentation, on relève plusieurs réflexions sur l'association entre l'alimentation et le niveau social. Les travaux de Brown (1974) sont pionniers en la matière et ont inspiré de nombreuses études postérieures qui ont souvent pour but de mettre en évidence des associations entre des modèles alimentaires identifiés et des facteurs sociaux (Schoeninger, 1979; Elliott, 1993). Les analyses de Brown (1973)⁴⁵, à partir des variations en strontium observées dans des sépultures, révèlent un lien entre âge, sexe et statut social (Price *et al.*, 1985). En effet, la qualité de l'alimentation pour certains individus par rapport à d'autres, dans une même population, est souvent révélatrice d'un rang social (Peebles et Kus, 1977; Schutkowski *et al.*, 1999). Dans la plupart des sociétés, l'accès en quantité aux protéines animales est un privilège plus largement réservé aux individus d'un certain niveau social. Pour remonter à l'information suggérant la qualité de l'alimentation, plusieurs études associent un niveau de strontium osseux élevé, s'exprimant par un ratio Sr/Ca élevé, à un statut social individuel bas, car ces valeurs sont considérées comme le résultat d'une grande quantité de végétaux absorbée, et donc peu de nourriture carnée. De la même manière, une basse teneur en strontium dans le squelette est traditionnellement mise en relation avec une importante disponibilité des ressources animales (Brown, 1974; Schoeninger, 1979; Sillen, 1981). Le statut social peut être lié à des niveaux hiérarchiques propres à une société, au sexe ou à l'âge, par exemple.

Ainsi, Schoeninger (1979) a mis en parallèle des niveaux de strontium particulièrement faibles sur des squelettes issus d'un même site préhistorique à Chalcatzingo (Mexique), inhumés avec du mobilier funéraire de prestige (figurines, jade, céramiques, pierres polies). L'hypothèse formulée à partir de ces observations suggère que les individus appartiennent à un rang hiérarchique élevé et qu'ils ont un bon accès aux protéines animales. À l'inverse, les tombes qui présentent du mobilier funéraire pauvre sont corrélées avec les squelettes révélant de hautes concentrations en strontium, lesquelles sont imputées à une grande dépendance aux végétaux (maïs) pour leur alimentation.

Le raisonnement est repris et approfondi pour l'étude des sites protohistoriques de King⁴⁶ et Etowah⁴⁷ (Nord-Ouest de la Géorgie, U.S.A.) par Brown et Blakely (1985) qui utilisent un ensemble d'éléments traces (le strontium, mais aussi le calcium, le magnésium, le zinc,

45. Brown A. (1973), Bone strontium content as a dietary indicator in a human skeletal population. Ph.D. dissertation, Ann Arbor: University of Michigan.

46. Dans la plaine alluviale de la rivière Coosa.

47. Sur la rive nord de la rivière Etowah.

par exemple parmi les treize éléments sélectionnés) comme indicateurs de l'alimentation. Ils établissent une relation entre alimentation carnée et statut social en s'appuyant sur des indices issus d'expérimentations ethnologiques et archéologiques, sur des chefferies nord-américaines, méso-américaines, Africaines et Philippines, qui indiquent une consommation de viande nettement plus importante et une alimentation plus variée chez les individus de statut social élevé. Le strontium est donc utilisé dans ce cas comme indicateur de position sociale individuelle et, plus largement, d'une organisation hiérarchique de la population. Cependant, la mise en relation entre l'importance de la proportion d'alimentation carnée et le statut social doit être interprétée avec précaution et en tenant compte du contexte social. Toutes les sociétés ne considèrent pas la viande comme un aliment privilégié, c'est le cas, par exemple, pour le Japon féodal. Dans ce type d'études, les résultats des analyses élémentaires sont fréquemment mis en parallèle, quand les conditions l'autorisent, avec le traitement de l'inhumation, en acceptant l'hypothèse selon laquelle il existe un lien entre la qualité de l'inhumation et le statut social (Schoeninger, 1979; Blakely et Beck, 1981).

Le strontium peut aussi, dans certaines conditions, être utilisé comme un indice de discrimination en fonction du sexe. En effet, un certain nombre de facteurs métaboliques liés au sexe (grossesse, lactation, ménopause, par exemple) peuvent induire des distinctions significatives de niveaux élémentaires. Mais les différences entre ces valeurs peuvent aussi, dans certains cas, être expliquées par une discrimination sexuelle. Il s'avère que les populations archéologiques où les femmes se voient accorder un statut socio-économique moins élevé que celui des hommes sont nombreuses (Sillen et Kavanagh, 1982). Les variations en fonction du sexe peuvent alors s'expliquer par la prise en compte des besoins nutritionnels estimés supérieurs chez l'homme, en raison d'une activité physique plus intense, en particulier dans les sociétés agraires. Ce comportement est, de manière générale, plus fréquent dans les contextes où les ressources sont limitées. Dans ces situations, les femmes sont souvent défavorisées par rapport aux hommes et/ou aux enfants que ce soit en terme de quantité ou de types de nourriture (notamment moins riche en protéine, c'est-à-dire la plupart du temps en aliments carnés). Si les différences de consommation sont significativement marquées, cela peut se traduire, dans les analyses des éléments traces, par des niveaux de strontium généralement plus élevés dans les squelettes féminins. Dans ce cas, la relation entre les valeurs Sr/Ca et le statut alimentaire, ce dernier traduisant le statut social peu élevé des femmes (Song *et al.*, 2004) peut être prise en compte pour mettre en évidence un accès différentiel à l'alimentation carnée, ce qui en fait un indicateur du statut social associé au sexe (Sillen et Kavanagh, 1982).

III.4.1.2.5. L'utilisation des ratios élémentaires pour l'exploitation des données

Le strontium est un outil important pour les recherches paléonutritionnelles, mais l'utilisation du strontium comme seul élément ne reflète que l'importance de l'apport végétal, en dehors de tout repère (Beck, 1985).

Si plusieurs auteurs suggèrent l'utilisation des valeurs absolues de strontium (en ppm), le calcium étant plus largement sujet à l'altération post-mortem (Beck, 1985), d'autres préfèrent avoir recours au ratio Sr/Ca, notamment White (1986). Après avoir examiné les deux types de données, il constate que les modèles fondés sur des ratios reflètent bien les valeurs absolues du strontium (et la bonne conservation du calcium), malgré la complexité du métabolisme du strontium qui rend les valeurs des rapports Sr/Ca des tissus durs humains dépendant non seulement du régime alimentaire, de l'âge (le tractus intestinal ne traite pas les éléments ingérés de la même manière à tous les âges), du sexe (l'assimilation des oligoéléments dans l'organisme et dans le squelette peut être différente chez les hommes et les femmes, du statut sanitaire de l'individu (la santé d'un individu peut influencer l'absorption de certains oligoéléments, mais aussi d'événements postdépositionnels (c'est-à-dire les phénomènes responsables des échanges ioniques entre le squelette et le sol après l'inhumation, influencés par la nature du sol, le climat, les fluctuations des eaux souterraines, par exemple).

III.4.1.2.5.1. Sr/Ca

L'intérêt de l'utilisation ratio Sr/Ca dans les tissus durs, en vue d'une étude de paléonutrition, est liée au niveau du ratio Sr/Ca dans la chaîne alimentaire, ainsi que par le nombre étapes discriminatoires auxquelles les oligoéléments sont soumis avant d'être incorporés au squelette humain (Song, 2004). C'est pourquoi il est important de connaître l'abondance des éléments dans l'alimentation consommée.

Dans l'os, le niveau de strontium n'est pas proportionnel à la quantité de strontium de l'alimentation, mais c'est le rapport entre Sr/Ca de l'os et l'alimentation qui l'est. En d'autres termes, c'est la quantité de strontium par rapport à la quantité totale disponible de cations ostéogènes⁴⁸ qui détermine le pourcentage de strontium dans la matière minérale osseuse. Par exemple, lorsque deux prédateurs de la même espèce consomment la même espèce de proie, dans des quantités différentes, les quantités de strontium absorbées sont également différentes, alors que le rapport Sr/Ca, présent dans leurs tissus durs, demeure identique, car la proportion de strontium par rapport au calcium reste la même (Burton et Wright, 1995).

Nous avons donc considéré, dans ce travail qu'il est plus approprié de traiter l'absorption du strontium par rapport à l'abondance du calcium. De plus, l'utilisation de l'évolution relative du rapport Sr/Ca permet de passer outre les variations imputables aux variabilités individuelles. En effet, l'étude des variations permet de travailler sur des modèles d'évolution chronologiques pouvant être comparés entre les individus, indépendamment des concentrations individuelles.

III.4.1.2.5.2. Ba/Ca

Le système intestinal discrimine l'absorption de baryum, chimiquement proche du strontium, encore plus fortement qu'il ne le fait à l'encontre du strontium. Par conséquent, le rapport Ba/Ca se comporte de la même manière que le Sr/Ca. Il diminue lui aussi au fur et à mesure que

48. (Ca + Sr + Ba + Pb - Ca)

progresses la chaîne alimentaire, dans des proportions plus importantes que le rapport Sr/Ca (Elias *et al.*, 1982; Francalacci, 1989; Burton *et al.*, 1999).

Le baryum est aussi utilisé pour l'identification de l'origine marine ou terrestre des ressources alimentaires dominantes. Selon plusieurs études (Burton et Price, 1990; Gilbert *et al.*, 1994; Burton *et al.*, 1999), les niveaux de baryum attendus sont faibles chez les espèces marines et élevés chez les animaux terrestres. Les rapports Ba/Ca sont donc plus bas chez les sujets marins que chez les individus terrestres.

Le rapport Ba/Ca apparaît donc intéressant dans certains cas de reconstructions paléonutritionnelles, mais n'est pas pertinent pour l'identification des signatures chimiques laissées par le lait maternel.

III.4.1.2.5.3. Ba/Sr

Le rapport Ba/Sr est un indice retenu pour distinguer la proportion des ressources terrestres par rapport aux ressources marines dans l'alimentation des populations archéologiques, en raison du déficit avéré en baryum dans les tissus durs des espèces marines, qui les distingue facilement des mammifères terrestres (Burton et Price, 1990; Gilbert *et al.*, 1994). Les données publiées révèlent un ratio Ba/Sr égal à environ 1 dans l'environnement terrestre, alors qu'il est inférieur à 0.001 dans l'eau de mer. De ce fait, les organismes marins présentent un ratio Ba/Sr bien plus faible que les organismes terrestres. De plus, l'importante teneur en sulfate de l'eau de mer et l'insolubilité du sulfate de baryum éliminent efficacement le baryum de l'eau de mer, tandis que cette dernière reste relativement bien enrichie en strontium (Burton et Price, 1990).

Pour déterminer si les différences de ratios Ba/Sr sont utilisables comme indicateur paléoalimentaire, plusieurs études s'appuient sur la comparaison d'ossements humains, issus à la fois de sites à l'intérieur des terres, où le régime alimentaire est dominé par les ressources agricoles et privé de ressources marines, et de sites côtiers dont l'alimentation est majoritairement composée de produits issus de la mer (Burton et Price, 1990). L'eau de mer a effectivement révélé un ratio Ba/Sr nettement inférieur à celui des plantes et des animaux terrestres. Le rapport Ba/Sr, appliqué à l'os archéologique, distingue aisément les différents niveaux de dépendance aux produits de la mer, à condition que la quantité de produits marins ne soit pas trop faible. Cependant, d'autres facteurs, tels que la variabilité de ce ratio dans la viande et les plantes, ou encore la diagenèse, nécessitent une application critique de la méthode (Burton et Price, 1990).

La biopurification, c'est-à-dire les phénomènes biologiques de discrimination de certains éléments, dont le strontium, au profit du calcium, à chaque étape de la chaîne alimentaire, nous permet de mettre en relation l'alimentation et les concentrations élémentaires mesurées dans les tissus durs. Pour ces raisons, cette étude s'appuie sur le rapport Sr/Ca, car c'est la quantité de strontium par rapport à la quantité de calcium absorbée qui nous renseigne les aliments consommés. En effet, un apport particulièrement élevé en calcium peut avoir des effets disproportionnés sur le rapport Sr/Ca observé dans les tissus durs, tandis qu'une faible quantité de calcium incorporée aura tendance à avoir des conséquences négligeables, voire inversée sur le ratio Sr/Ca des tissus durs (Burton et Wright, 1995). Le rapport Sr/Ca permet de détecter et/ou rééquilibrer des estimations biaisées et sont susceptibles de se révéler particulièrement intéressants dans les problématiques

liées à l'alimentation lactée, riche en calcium, et à ses transitions. Les informations chimiques ainsi obtenues peuvent être utilisées pour distinguer des différences de régimes alimentaires. Ces distinctions sont susceptibles de nous donner des indications sur d'éventuelles différences de mode de subsistances, d'habitudes alimentaires culturelles, de statuts sociaux, ou encore de changements d'alimentation (à l'échelle de l'individu ou de la population).

III.4.1.3. Le rapport Sr/Ca : marqueur chimique des transitions alimentaires du jeune enfant

III.4.1.3.1. Le rapport Sr/Ca dans l'organisme

La distribution du rapport Sr/Ca correspond, dans le cas qui nous intéresse, à un modèle d'incorporation différentielle du strontium et du calcium sous l'influence des mécanismes biologiques et des conditions environnementales, pendant les différentes phases de formation de l'émail dentaire (Humphrey *et al.*, 2007). Plusieurs recherches sur l'incorporation différentielle du strontium et du calcium ont abouti au même constat : le calcium connaît un transport préférentiel par rapport au strontium, ce fait s'explique par plusieurs phénomènes biologiques. D'abord, il s'avère que, dans l'alimentation, le strontium est moins efficacement absorbé que le calcium. De plus, une importante proportion de strontium est éliminée par l'organisme (Comar *et al.*, 1963).

Concernant le lait maternel, les éléments alcalins sont absorbés à un rythme plus élevé qu'avec d'autres apports nutritionnels, ce qui permet une meilleure absorption des alcalins par le biais du lait qu'avec une alimentation solide (Marcus et Lengemann, 1962). L'absorption du strontium à partir du lait maternel augmente proportionnellement par rapport au calcium, car il est favorisé par le lactose, la vitamine D, les acides aminés (lysine et arginine) contenus dans le lait (Comar *et al.*, 1957). Cependant, l'absorption relative du strontium reste peu élevée chez les enfants par rapport aux adultes, car la quantité absolue de strontium disponible dans le lait est significativement plus basse que dans l'alimentation adulte à cause de la discrimination par la glande mammaire (Lough *et al.*, 1963 ; Twardock, 1963). Selon les études de Rosenthal, 1981) le transfert du strontium, du sang vers le lait, soit 10 à 14 fois moins important que celui du calcium. De plus, le lait humain possède des valeurs déjà particulièrement élevées de calcium, contrairement au strontium dont la moyenne se situe entre 0,14 et 0,35 mg Sr/g Ca, ce qui donne un ratio Sr/Ca de $0,14-0,35 \times 10^{-3}$ dans le lait maternel (Rosenthal, 1981).

Ainsi, les ratios Sr/Ca des tissus vivants sont inférieurs à ceux de l'alimentation (Comar *et al.*, 1963), dans tous les cas.

Dans le cas d'une population dont les adultes consomment du lait animal, l'apport moyen est d'environ 1,4 mg de strontium / g de Ca (soit un ratio Sr/Ca de $1,4 \times 10^{-3}$) par jour. Ceux qui n'en consomment pas et s'appuient, en compensation, plus largement sur les ressources céréaliers, présentent une moyenne située entre 207 et 4,9 mg de strontium/g de calcium (soit un ratio Sr/Ca entre $2,7-4,9 \times 10^{-3}$) (Rosenthal, 1981).

Plusieurs études mettent en évidence le transport préférentiel du calcium par rapport au strontium, à travers la glande mammaire pendant la lactation, et pendant la grossesse à travers le placenta pour le développement du fœtus. De récents travaux suggèrent qu'il y a un transfert

plus actif du calcium dans la glande mammaire et le placenta, alors que le transfert du strontium suit simplement les gradients de concentrations (Krachler *et al.*, 1999; Rossipal *et al.*, 2000). Ces travaux sont également cohérents avec des études antérieures qui avançaient, sans analyses statistiques des ratios Sr/Ca, un ratio Sr/Ca plus élevé dans le sérum maternel que dans le sérum du cordon ombilical ou dans le colostrum. Dans tous les cas, il est clair que le lait a un faible ratio Sr/Ca en comparaison avec tous les autres aliments (Rosenthal, 1981).

III.4.1.3.2. Le rapport Sr/Ca dans les tissus durs

Chez les humains adultes, la relation entre le rapport Sr/Ca, dans l'alimentation d'une part, et dans l'os du consommateur, d'autre part, ne fait plus débat (Comar *et al.*, 1957; Elias *et al.*, 1982). Pour quantifier le parcours métabolique du strontium, Comar (1963) propose de calculer ce qu'on appelle couramment dans la littérature le ratio observé (OR), qui est une mesure de la discrimination du strontium en faveur du calcium (ou la distribution différentielle du strontium dans la chaîne alimentaire).

$$\text{L'observation ratio (OR)} = \frac{\text{Sr/Ca de l'échantillon (os ou dent)}}{\text{Sr/Ca du précurseur (alimentation)}}$$

Le ratio observé est utilisé pour exprimer la relation Sr/Ca entre la plante et le sol, le lait et l'alimentation, l'os ou la dent et l'alimentation (Sillen et Kavanagh, 1982). L'OR, chez l'homme est connu, il est spécifique à l'âge et au tissu analysé.

Les valeurs OR des plantes expriment la relation entre le ratio Sr/Ca dans le sol et diverses plantes et parties de plantes (ou différences de distribution de Sr et Ca dans les plantes), plutôt que la discrimination contre le strontium (Song *et al.*, 2004).

Dans ce travail, nous utilisons la capacité du strontium à tracer l'absorption du lait maternel par rapport à l'alimentation de supplémentation, à partir des travaux de Sillen et Smith (1984). Les humains adultes ont une $OR_{\text{os-alimentation}}$ d'environ 0.18 et chez la femme allaitant l' $OR_{\text{lait-alimentation}}$ est inférieure à 0,1 (Mays, 2003). L' $OR_{\text{fœtus-mère}}$ se situe autour de 0,5 (Comar *et al.*, 1963). Rosenthal (1981) avait déjà présumé un rapport Sr/Ca peu élevé chez les enfants, causé par la consommation massive de lait qui présente lui-même un faible ratio (entre 0,47 et 1,1 mg Sr/g Ca). Le sevrage peut être considéré comme une transition alimentaire majeure. Dans un premier temps, Sillen et Smith (1984) démontraient l'existence d'un lien entre l'augmentation du rapport Sr/Ca mesuré sur des échantillons osseux provenant de squelettes juvéniles et leur âge. Ces auteurs ont mis en évidence des ratios Sr/Ca relativement plus élevés dans l'alimentation adulte par rapport au lait humain. En comparaison, le lait humain, riche en calcium et pauvre en strontium, montre des valeurs Sr/Ca (calculées en nanogramme de Strontium par gramme de calcium, ng Sr/g Ca⁴⁹) de l'ordre de $0,14-0,35 \times 10^{-3}$ (Rosenthal, 1981), alors que dans d'autres aliments, tels que le maïs, ces ratios sont significativement plus élevés avec des valeurs de $1,129 \times 10^{-3}$ (Wright, 1994; cité par Song, 2004), 2×10^{-3} (LaVigne, 2002; cité par Song, 2004), et $7,14 \times 10^{-3}$ (Schacklette, 1980; cité par Song, 2004), par exemple, en fonction des conditions géographiques. Cela justifie

49. Certains auteurs rapportent les valeurs Sr/Ca en $\mu\text{g Sr/mg Ca}$, ou ng Sr/g Ca , ou encore $\text{Sr/Ca} \times 10^{-3}$. Ces différents formats sont directement comparables.

l'observation de la variation entre le lait humain et les autres aliments pour tracer l'évolution de l'alimentation non lactée pendant le processus de sevrage.

Dans leurs travaux sur des échantillons d'os de squelettes médiévaux juvéniles (Méditerranée orientale) Sillen et Smith (1983, 1984) avaient mis en évidence un lien entre l'augmentation du rapport Sr/Ca et l'âge des individus. Dans leur examen, ils détectent une augmentation graduelle du rapport Sr/Ca après la naissance. Ils remarquent également que les individus entre 1,5 et 3,5 ans ont des valeurs plus élevées que l'ensemble de la population. Ces analyses ont ensuite été mises en rapport avec d'autres études sur le lait maternel qui établissaient le rapport Sr/Ca entre 0,14 et 0,35 mg de strontium par gramme de calcium (Rosenthal, 1981), ce qui est plutôt bas; en comparaison, ce même rapport est plutôt élevé dans l'alimentation solide. Ces constats leur avaient permis d'envisager l'utilisation du rapport Sr/Ca pour suivre l'évolution de l'introduction de l'alimentation non lactée au cours du processus de sevrage.

L'évolution du strontium chez les jeunes enfants est reflétée par les valeurs de l'observation ratio (OR⁵⁰) osseuse à différents âges. Les études de Sillen et Smith (1984) révèlent une OR de 1,0 chez les nouveau-nés; de 0,6 à 1 an; de 0,25 à 3 ans; de 0,23 à 5 ans; de 0,18 à 10 ans et chez les adultes (voir figure 20).

Âge (années)	N	ng Sr/ μ gCa ($\times 10^{-3}$)	Rang
Naissance	2	1,50	1,4-1,6
0,5	3	1,75	1,5-2,0
1	10	2,25	1,5-3,0
2	2	2,50	1,7-2,9
3	5	2,25	1,8-2,8
8	11	1,60	1,3-2,3
Adulte		1,80	

Fig. 20. Évolution du rapport Sr/Ca osseux dans l'échantillon de Dor, Israël (Katzenberg et al., 1996, Table 2; d'après les données de Sillen et Smith, 1984).

Les auteurs suggèrent que les résultats sont cohérents avec les données ethnographiques sur les traditions des femmes Arabes palestiniennes qui allaitent les enfants jusqu'à 2/3 ans. Par la suite, les valeurs Sr/Ca diminuent jusqu'à atteindre des niveaux qui perdurent à l'âge adulte. Ces faibles concentrations sont supposées refléter la discrimination du strontium qui s'opère avec l'âge par le tractus gastro-intestinal devenant mature (humphrey et al., 2008b).

Huhne-Osterloh et Grupe (1989) examinent les concentrations de strontium sur des os d'individus juvéniles jusqu'à 6 ans, d'une population médiévale (XI^e-XII^e siècle) du nord de l'Allemagne (Schleswig) pour estimer l'âge du sevrage. Ils détectent des valeurs de Sr/Ca élevées chez les enfants de 6 mois à 2 ans. À partir de ces résultats, ils postulent une alimentation mixte

50. L'observation ratio correspond au ratio Sr/Ca des os des individus par rapport au ratio contenu dans l'alimentation (cf. *supra* III. 4.1.2).

entre 6 mois et 2 ans. Dans les groupes d'âge suivants, comme dans les analyses de Sillen et Smith (1984), les niveaux de strontium osseux déclinent.

Par la suite, Mays (2003) établit une corrélation entre l'allaitement maternel et le comportement du rapport Sr/Ca à partir d'échantillons osseux de l'Angleterre médiévale (site de Wharram Percy). L'examen du Sr/Ca osseux indique également dans cette étude des changements notables en fonction de l'âge des enfants, pouvant être associés à l'allaitement maternel, la supplantation et le sevrage complet. En particulier l'augmentation significative du ratio Sr/Ca entre un et 2 ans peut représenter une période de supplantation significative. Par la suite, on observe un déclin régulier du Sr/Ca entre 2 et 8 ans, jusqu'à atteindre des valeurs semblables à celles des adultes. Les interprétations proposées sont soutenues par l'analyse des isotopes stables de l'azote sur cette population. Ainsi, les deux méthodes suggèrent un arrêt de l'allaitement maternel entre 1 et 2 ans.

Cette démarche s'est avérée efficace pour la distinction des régimes alimentaires homogènes (distinction herbivore/carnivore). Compte tenu du fait que les niveaux de Strontium dans l'os reflètent quantitativement ceux de l'alimentation, on s'attend à ce que les carnivores aient un ratio plus bas que les herbivores puisque les animaux assimilent de préférence le calcium, lorsque l'on aborde les questions de régime alimentaire, dans la lignée des travaux pionniers de Toots et Voorhies (1965). En effet, la discrimination du système digestif contre le strontium s'applique également aux animaux qu'ils ont ingérés. De même, en ce qui concerne la nutrition humaine, on peut présupposer que plus l'alimentation est riche en viande, plus le ratio Sr/Ca est faible (Schoeninger, 1979, 1982; Sillen, 1981; Sillen et Kavanagh, 1982; Pate et Brown, 1985). Cette démarche a permis d'élargir la portée des données archéologiques obtenues par la chimie, à partir du strontium, à des réflexions sur l'économie de subsistance d'une population, de détecter des transitions de système de subsistance (Rheingold *et al.*, 1983; Katzenberg et Schwarcz, 1984; Beck, 1985). Cependant, dans le cas d'une nutrition multi composants la correspondance n'est plus aussi simple et linéaire entre le rapport Sr/Ca de l'alimentation et celui du squelette. Cette méthode n'est pas adéquate, non plus, pour des variations alimentaires mineures (Sealy et Sillen, 1988).

On note que, contrairement aux isotopes stables utilisés pour des questions nutritionnelles, qui eux reflètent les éléments métaboliques actifs disponibles dans le placenta maternel pendant la gestation (Clayton *et al.*, 2006), les micronutriments sont, généralement, régulés dans une faible variabilité par l'organisme de la mère pendant la grossesse et l'allaitement. Les valeurs de départ ne sont donc pas soumises à l'influence du régime alimentaire maternel au cours de la grossesse.

À chaque transport actif du calcium et du strontium à travers les membranes biologiques (par exemple, l'absorption gastro-intestinale, la lactation, le placenta) le calcium est transporté plus facilement que le strontium. De son côté, le strontium, contrairement au calcium (Comar, 1963), a une autorégulation de ses proportions par l'organisme. De ce fait, la quantité totale de strontium dans le corps est le reflet direct de l'environnement et de l'alimentation (ce qui n'exclut pas la possibilité d'une influence des hormones ou des niveaux calcium) (Nielsen, 2004).

III.4.1.3.3. Le rapport Sr/Ca dans l'émail dentaire

L'objectif de notre étude est de démontrer que la chronologie des étapes du processus de sevrage, dans les populations historiques, peut être approchée par l'analyse élémentaire des proportions du rapport Sr/Ca dans l'émail dentaire qui enregistre l'absorption du lait maternel en la distinguant de l'alimentation de supplémentation (Sillen et Smith, 1984). Ainsi l'analyse des tissus dentaires fournit la preuve directe des étapes de sevrage (Herring *et al.*, 1998 ; Humphrey *et al.*, 2008a,b). Ce raisonnement s'appuie sur plusieurs observations concernant le comportement du strontium et du calcium chez l'homme.

Humphrey *et al.* (2008b) ont utilisé la technique de LA-ICP-MS qui consiste en une analyse des éléments traces à intervalles réguliers sur la microstructure interne de l'émail à partir de microprélèvement par ablation laser (*cf. supra* III. 3.3), sur des babouins. Les résultats de cette étude ont mis en évidence un modèle de variation du ratio Sr/Ca entre l'émail pré- et post-natal, associé à un changement d'alimentation lié à la naissance. Ces mêmes résultats ont également montré des variations élémentaires entre l'émail formé avant et après l'introduction de la diversification alimentaire par rapport à une alimentation uniquement lactée, ainsi qu'une dernière modification correspondant à la période de sevrage définitif. Cela s'explique par les caractéristiques d'assimilation des éléments traces lors de la formation de l'émail (*cf. supra* II. 1.4.1).

Les observations sur les transitions alimentaires du jeune enfant suivent le découpage en quatre sous-périodes d'assimilation naturelle utilisé dans les études sur les comportements d'allaitement et de sevrage : la période prénatale, la période d'allaitement exclusif, la période d'alimentation mixte et la période post-sevrage définitif (Humphrey *et al.*, 2008b) (voir figure 21).

Les distinctions permettant d'interpréter les variations chimiques en termes de pratique de sevrage sont les suivantes.

Avant la naissance, le fœtus est exclusivement nourri par sa mère, par l'intermédiaire du placenta. Le placenta se comporte comme une membrane entre le sang maternel et le sang du fœtus (Rossipal *et al.* 2000), par laquelle les ions sont acheminés vers les tissus en formation. Le ratio Sr/ca, avant la naissance, est en général assez bas, à cause de la sélection placentaire qui discrimine significativement le strontium pendant le développement fœtal, plus que la glande mammaire pendant l'allaitement (Sillen et Smith, 1984). Le strontium subit une diminution légère et régulière avant et après la naissance, il constitue donc une constante dans l'évaluation des ratios Sr/Ca (Comar *et al.*, 1957, Humphrey *et al.*, 2008b).

Après la naissance, le nourrisson connaît en général une période plus ou moins longue d'allaitement exclusif. Les rapports Sr/Ca sont attendus en baisse chez les nouveau-nés exclusivement nourris au lait maternel. Cette modification est une traduction directe de la transition du transport du calcium et du strontium, entre le passage à travers le placenta avant la naissance et par le biais de la glande mammaire immédiatement après la naissance (Rossipal *et al.*, 2000). Chez les nouveau-nés, le strontium continue à être discriminé par la glande mammaire de la mère (Comar *et al.*, 1957). Par contre, le transfert du calcium dans ces conditions est soumis à

des mécanismes actifs bien plus importants que dans le placenta et le cordon ombilical (Krachler *et al.*, 1999 ; Rossipal *et al.*, 2000). De ce fait, le rapport Sr/Ca, déjà légèrement en baisse, diminue de façon plus abrupte à la naissance. Pendant toute la période d'allaitement exclusif, le rapport Sr/Ca est attendu en baisse graduelle (Humphrey *et al.*, 2008b). Ce changement est démontré par de récentes analyses du rapport Sr/Ca entre l'émail formé avant la naissance et le tissu constitué immédiatement après la naissance, dans le cas des nouveau-nés exclusivement nourris au lait maternel (Humphrey *et al.*, 2007), et par un rapport Sr/Ca relativement bas chez les nouveau-nés allaités au sein (Comar, 1963). Ce ratio de faible valeur peut être lié à une demande élevée en calcium pendant la croissance rapide du jeune enfant (Sillen et Kavanagh, 1982). On s'attend également à ce que le rapport Sr/Ca enregistré pendant l'allaitement exclusif soit inférieur à celui mesuré au moment de la supplantation (Song, 2004).

L'augmentation de la quantité de calcium absorbée dans l'alimentation conduit à une diminution des niveaux d'absorption et de rétention du strontium, et donc une baisse du ratio Sr/Ca. À l'inverse, une disponibilité réduite du calcium se traduit par une plus grande absorption du strontium (Thompson, 1963). Cette discrimination au détriment du strontium est la cause d'un rythme d'absorption relativement faible, associé à une élimination efficace par l'organisme du strontium par rapport au calcium. La majorité du strontium est essentiellement éliminée par les reins, ou sous l'effet de la lactation, ou encore par transfert placentaire chez la femme enceinte. Il résulte de ces mécanismes une quantité réduite de strontium circulant dans le sang, disponible pour une éventuelle incorporation dans les tissus durs (Song, 2004).

Le rapport Sr/Ca est relativement plus bas dans le lait maternel que dans tous les autres aliments (Rosenthal, 1981 ; Sillen et Smith, 1984). Cela est dû au fait que les aliments sont plus pauvres en calcium et enrichis en strontium, en comparaison avec le lait maternel. L'introduction d'une alimentation non lactée doit donc se traduire par une augmentation du rapport Sr/Ca. En pratique, la transition alimentaire de l'allaitement maternel vers une nutrition adulte admise dans toute sa diversité peut inclure des variations complexes. Le modèle hypothétique présenté s'appuie sur une situation dans laquelle un équilibre alimentaire intermédiaire est atteint avant l'établissement d'un régime alimentaire complètement adulte. Il suppose également que la teneur en strontium du régime provisoire est inférieure à celui de la nutrition adulte (Humphrey *et al.*, 2008b). On note également qu'une diversification alimentaire effectuée à partir de lait animal (chèvre, brebis, vache) sera chimiquement interprétée comme tout une alimentation différente du lait maternel, car ces aliments sont également enrichis en strontium par rapport au lait maternel (Widdowson *et al.*, 1960).

Suivant cette logique, le rapport Sr/Ca doit atteindre son seuil maximum à l'arrêt définitif de l'allaitement maternel (Humphrey *et al.*, 2008). Après cette étape, le ratio diminue légèrement avant de se stabiliser, ce qui s'explique par le développement de la capacité de discrimination du strontium par le système gastro-intestinal chez l'enfant. Contrairement aux adultes, le tractus gastro-intestinal de l'enfant discrimine faiblement le strontium. De ce fait, le ratio Sr/Ca a tendance à diminuer avec l'âge, durant la petite enfance (Sillen et Smith, 1984 ; Mays, 2003). Le

tube digestif des nouveau-nés absorbe tout le strontium, contrairement à celui des adultes qui le défavorise environ quatre fois plus. Chez l'homme, le tube digestif atteint son fonctionnement adulte vers 4 ans (Lough *et al.*, 1963, Humphrey *et al.*, 2008b). De ce fait, le processus de maturation implique une diminution progressive de cet élément, et donc une diminution progressive du rapport Sr/Ca. Le rythme de progression de cette maturation n'est pas clairement établi. En effet, on trouve des avis divergents dans la littérature, par exemple Humphrey (2007) soutient une progression régulière alors que pour Sillen et Smith (1984) l'action gastro-intestinale montre un développement significatif après 1 an.

Ces observations suggèrent que le rapport Sr/Ca doit être pris en considération conjointement avec l'âge correspondant à la zone dentaire examinée afin de ne pas interpréter l'évolution du rapport en fonction de l'âge, mais bien en fonction des transitions alimentaires.

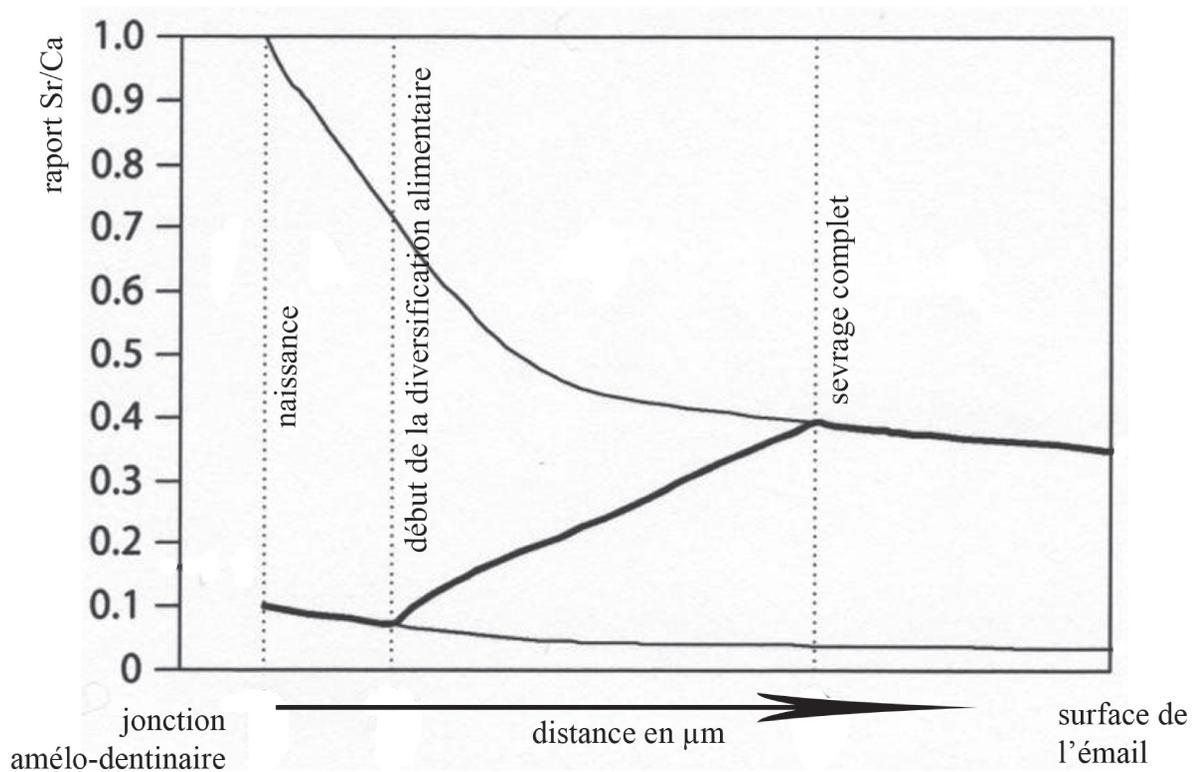


Fig. 21. Évolution du rapport Sr/Ca dans l'émail dentaire pendant l'allaitement exclusif et lors du processus de sevrage (d'après Humphrey *et al.*, 2008b).
 Modèle de variation des rapports Sr/Ca dans un processus de sevrage théorique, selon deux modèles de développement : une transition régulière, linéaire, à partir d'un allaitement maternel exclusif vers une alimentation adulte.
 La limite inférieure du modèle reflète une situation hypothétique dans laquelle le nourrisson est exclusivement allaité depuis la naissance, la limite supérieure reflète une situation hypothétique dans laquelle le nourrisson suit un régime alimentaire adulte dès la naissance, et la trajectoire intermédiaire représente une transition intermédiaire moyenne.
 Les lignes épaissies illustrent les changements attendus des rapports Sr/Ca en fonction de l'âge et des apports alimentaires, à chaque étape nutritionnelle.

L'analyse élémentaire de l'émail dentaire constitue donc un moyen direct pour la reconstruction du modèle de nutrition dans l'enfance en contexte archéologique. Elle fournit un complément d'information précieux aux données obtenues à partir de sources écrites, archéologiques et anthropologiques.

III.4.1.4. Les facteurs d'influence sur le rapport Sr/Ca dans les tissus durs

Les quantités élémentaires déposées dans les organismes animaux sont tributaires, de l'alimentation (responsable de la quantité disponible dans le sang), mais aussi de facteurs externes qui influencent la quantité disponible des éléments dans l'environnement local, ainsi que de divers facteurs biologiques responsables de la proportion élémentaire retenue par l'organisme par rapport à la quantité disponible et ingérée.

III.4.1.4.1. Les variations environnementales

Toutes les variables intervenant dans un environnement local sont susceptibles d'avoir une incidence sur la quantité absolue ou sur le rapport des alcalino-terreux⁵¹. Dans l'environnement, le strontium naturel est introduit au niveau de la plante par le biais des sols. Les plantes contiennent généralement le même rapport Sr/Ca que les sols où elles poussent (Nielsen, 2004). L'eau et l'air sont les principaux facteurs qui déterminent les concentrations élémentaires des sols et qui se répercutent ensuite dans l'évolution de la chaîne alimentaire. Les variables dans les substrats géologiques sous-jacents de l'environnement local participent aussi à la concentration de strontium disponible pour les plantes et les animaux (Tooth et Voorhies, 1965). La composition locale des sols est déterminée par celles des eaux souterraines, des précipitations, de l'air, parmi les principales variations complexifiant les reconstructions paléonutritionnelles. Les facteurs environnementaux qui affectent les minéraux disponibles dans l'environnement comprennent la concentration en éléments traces et la solubilité des roches, le rythme et l'ampleur de l'érosion, le drainage des sols et les caractéristiques des eaux souterraines et de surface, le taux d'évaporation, la salinité, le pH du sol. (Sillen et Kavanagh, 1982).

Par exemple, les roches telles que le schiste argileux ou le granite ont des ratios Sr/Ca élevés, alors que le calcaire (carbonate de calcium), malgré une concentration de strontium brut élevée, a un ratio Sr/Ca bas en raison de la forte teneur en Ca (Sillen et Kavanagh, 1982). Les Dolomites et les roches non volcaniques ont des valeurs Sr/Ca relativement basses. On souligne que, en général, Sr/Ca reste constant dans la majeure partie d'un cours d'eau et dans le système de drainage d'un lac. Différents travaux sur la teneur en strontium dans l'émail, comprenant une grande diversité d'origines géographiques et de périodes chronologiques ont souligné la large disparité des concentrations avec des valeurs allant de 13 ppm, au minimum, jusqu'à 1400 ppm dans l'émail de certaines dents permanentes (Lane et Peach, 1997). Des comparaisons entre la teneur en strontium osseux de différents échantillons, exposés aux mêmes conditions, ont révélé

51. Les alcalino-terreux sont les six éléments du deuxième groupe du tableau périodique, à savoir, le béryllium, le magnésium, le calcium, le strontium, le baryum et le radium.

un coefficient de variation de 32,08 % avec une fourchette comprise entre 21,6 % et 47,8 % (Sillen et Kavanagh, 1982).

De nombreuses enquêtes ont été menées, notamment au Royaume-Uni, sur les niveaux de strontium et de calcium dans l'eau, l'alimentation et les os humains des populations correspondantes. Il en résulte une variabilité attendue au sein d'une population dont les individus sont soumis aux mêmes caractéristiques environnementales, qui correspond à la variation présente naturellement chez les mammifères lorsque le régime alimentaire est constant (Sillen et Kavanagh, 1982).

Le modèle saisonnier des ressources disponibles peut, dans certaines circonstances, être à l'origine de fluctuations dans les apports élémentaires nutritionnels (Sponheimer *et al.*, 2006), notamment le rapport Sr/Ca, dans l'émail formé à partir de l'introduction de l'alimentation non lactée. Les variations saisonnières sont probablement influencées, entre autres, par la nature des végétaux (arbres à feuilles caduques ou à feuilles persistantes) responsable par exemple de la proportion de feuilles disponibles pour l'alimentation et par la nature des végétaux environnants qui détermine la quantité des différents éléments des plantes disponibles (graines, racines, tubercules, etc.) en fonction des saisons.

À partir de ces informations, plusieurs scientifiques ont noté qu'il existait une relation de proportionnalité entre la teneur élémentaire d'un sol et des végétaux qui y poussent, similaire au rapport entre les végétaux et leurs consommateurs. Il est donc communément accepté que, si la nourriture absorbée contribue en grande partie à la concentration élémentaire chez les humains, la géologie et des sources d'eau peuvent, dans certaines régions, avoir une grande importance. En effet, l'eau, qui peut contribuer à une proportion substantielle de certains éléments comme le strontium, est aussi un des facteurs déterminants pour le strontium absorbé dans la chimie des tissus durs (Schroeder *et al.*, 1972; Wolf *et al.*, 1993).

III.4.1.4.2. Les paramètres métaboliques et biologiques

Comme nous l'avons évoqué, il est maintenant clair que l'utilisation de la quantification des éléments et le calcul de leurs ratios sont efficaces si l'on tient compte des facteurs externes et internes qui agissent sur les variations significatives des concentrations. Ces biais, importants pour l'interprétation des résultats lors des recherches en paléonutrition, concernent la quantité de strontium et de calcium entrée dans la chaîne alimentaire par l'intermédiaire de l'eau et des aliments aux différentes étapes (en fonction des espèces et de la disponibilité environnementale), ainsi que les facteurs et les degrés de discrimination auxquels sont soumis les éléments avant d'être incorporés au squelette humain. Schoeninger (1979) suggère un coefficient de variabilité de 20 % au sein d'une population qui est exposée au même environnement et consomme la même alimentation. Cette estimation souligne l'importance des facteurs métaboliques influençant la quantité de strontium et de calcium qui traverse la muqueuse intestinale pour être absorbée par les tissus du squelette. Le métabolisme impose donc des contraintes théoriques quant à l'utilisation du calcium et du strontium pour les reconstructions paléoalimentaires.

Parmi les conditions métaboliques les plus significativement actives sur les fluctuations des niveaux de strontium incorporés au squelette, on peut citer l'âge, lié au stade de développement gastro-intestinal, le sexe et le statut reproductif.

L'âge est un paramètre biologique à prendre en compte dans l'interprétation des analyses élémentaires. En effet, l'un des facteurs importants affectant l'absorption des métaux alcalinoterreux est le stade de développement du système gastro-intestinal qui régit la discrimination et l'absorption relative des éléments de cette classe de minéraux (Comar *et al.*, 1963). Or, le stade de maturité du système gastro-intestinal est lié à l'âge. L'interprétation du ratio Sr/Ca dans les tissus du squelette des mammifères est complexifiée par la capacité progressive, en fonction de l'âge, du système gastro-intestinal à défavoriser l'absorption du strontium par l'organisme.

Chez les enfants, avec le temps, le strontium est de plus en plus discriminé en faveur du calcium. Ce phénomène est dû à la maturation des reins et du système digestif après un an (Sillen et Kavanagh, 1982). L'âge est donc l'un des facteurs qui a des implications métaboliques parmi les plus importantes à prendre en compte dans le but d'estimer l'absorption relative des alcalinoterreux chez les êtres vivants.

Plusieurs études ont documenté systématiquement une plus faible discrimination du strontium, donc un taux d'absorption plus élevé chez les jeunes individus de différentes espèces, y compris l'homme. La quantité absolue de strontium est généralement plus faible tant que les tout jeunes individus sont exclusivement ou majoritairement allaités, car le lait a une faible teneur en strontium à cause de la discrimination par la glande mammaire (Sillen et Kavanagh, 1982; Humphrey, 2007).

Ce phénomène évolue progressivement dans le temps pour arriver à un comportement adulte. Il en résulte une grande variabilité dans les rapports Sr/Ca entre 4 et 13 ans (Sillen et Kavanagh, 1982), ce qui empêche de procéder à des travaux efficaces sur l'alimentation générale des individus de moins de 14 ans, en dehors des questions de transition alimentaire d'une alimentation lactée à une alimentation adulte. Le système gastro-intestinal de l'enfant atteint sa maturité complète entre 4 et 10 ans. La discrimination contre le strontium est alors améliorée, ce qui entraîne des valeurs réduites du rapport Sr/Ca chez les subadultes, proche de celle des adultes. La variabilité individuelle du rythme de développement du système gastro-intestinal est à l'origine d'une importante fluctuation des rapports Sr/Ca chez les enfants, en particulier entre 4 et 13 ans (Sillen et Kavanagh, 1982). Les variations aléatoires les plus importantes ne concernent donc pas notre échantillonnage puisque les dents prélevées dans le cadre de cette étude sont uniquement des premières molaires définitives et leur enregistrement biologique s'arrête entre 2 et 3 ans. Dans l'étude de Sillen et Smith (1984) l'observation des ratios Sr/Ca chez les jeunes enfants, montre une diminution régulière avec l'âge, de 1,0 chez les nouveau-nés; de 0,6 à 1 an, 0,25 à 3 ans; 0,23 à 5 ans; 0,18 à 10 ans et chez les adultes. Cette baisse est interprétée comme le reflet de la maturation du système digestif. Les travaux de Mays (2003) mettent en évidence le rôle du système digestif immature des nouveau-nés et jeunes enfants (moins de 2 ans) sur le comportement du ratio Sr/Ca avec des valeurs plus élevées que pour les individus plus âgés, puis un déclin du ratio Sr/Ca constant entre 2 et 8 ans, et enfin des des valeurs adultes stables.

Les niveaux de strontium et de calcium montrent des fluctuations relativement réduites chez l'adulte, mais ils varient considérablement chez les individus âgés, ainsi qu'au cours de la croissance et du développement des immatures (Underwood, 1977; Sillen et Kavanagh, 1982; Humphrey *et al.*, 2007). Les différentes études sur cette problématique s'accordent sur le raisonnement théorique, mais elles divergent sur les fourchettes d'âges, situées entre 2 et 20 ans pour les os jeunes et 50 et 73 ans pour les os des personnes dites âgées (Rosenthal, 1981; Price *et al.*, 1985). Une période de stabilité des niveaux de strontium est donc communément admise entre 20 et 50 ans. Le tube digestif des individus immatures absorbe la totalité du strontium consommé, contrairement à celui des adultes, ce qui défavorise fortement le strontium. La capacité du système digestif humain à discriminer le strontium se manifeste progressivement pendant les quelques premières années de la vie, pour finalement multiplier par quatre la discrimination du strontium du nouveau-né à l'adulte (Lough *et al.*, 1963; Sillen et Smith, 1984; Humphrey *et al.*, 2007). Malgré ce phénomène, les nourrissons peuvent parfois montrer des niveaux de strontium inférieurs à ceux des adultes. En cause, les quantités absolues de cet élément à leur disposition dans leur régime alimentaire qui peuvent être plus faibles. Ceci est particulièrement vrai pour les nourrissons non-sevrés dont le régime alimentaire, entièrement constitué de lait maternel, est faible en strontium en raison de l'action discriminatoire des glandes mammaires. En fait, un degré élevé de variabilité est observé dans les os des individus en croissance (Sillen et Kavanagh, 1982), ce qui se répercute sur les aspects méthodologiques de choix des tissus à analyser pour les études sur l'alimentation.

À partir d'un âge adulte avancé (entre 50 et 73 ans), la discrimination intestinale est à nouveau réduite, ce qui provoque une légère augmentation des niveaux de strontium, mais dans une moindre mesure par rapport aux subadultes (Sillen et Kavanagh, 1982).

La variabilité du strontium dans les ossements d'enfants et d'adolescents est plus large que parmi les adultes. De ce fait, dans le cas des adultes, le strontium contenu dans l'os ne peut qu'être un outil de comparaison entre adultes. Quant à la variabilité observée chez les enfants, lorsqu'elle est étudiée au regard des analyses chimiques dentaires, c'est un élément de comparaison important dans le cadre de recherches en paléonutrition, en vue d'estimer les différences de nutrition dans l'enfance, à travers le temps et l'espace.

En termes de variations liées au sexe de l'individu, les résultats ne sont pas unanimes. Lambert et ses collègues, dans leur étude publiée en 1979, ont noté des niveaux de strontium significativement élevés chez les hommes (Song, 2004). De leur côté, Price *et al.* (1986) observent, au contraire, des concentrations élevées de strontium chez les femmes. Dans un troisième avis contradictoire, les études de Sillen et Kavanagh (1982) sur des populations contemporaines occidentales ne montrent pas de différence significative de ratio Sr/Ca, traduisant à priori des valeurs absolues de strontium stables, entre hommes et femmes, dans les tissus durs.

L'étude de Blakely (1989) a souligné une diminution du rapport strontium/calcium entre, d'une part, les os des femmes en âge de procréer et, d'autre part, ceux des femmes ménopausées et des hommes adultes provenant de deux sites préhistoriques. Cette variation est alors attribuée au processus physiologique de la ménopause, ce qui n'exclut en aucun cas l'interférence d'autres

variables intervenant dans cette tendance. Inversement, plusieurs études (Blakely 1989; Sillen, 1981; Vuorinen *et al.*, 1996) ont mis en évidence sur les tissus durs de squelettes anciens et modernes, des valeurs Sr/Ca relativement élevées pour les femmes adultes par rapport aux hommes. Des réflexions approfondies sur ces constats ont permis de relier l'expression des niveaux élevés de strontium qui s'opèrent pendant la grossesse et la lactation dans les tissus durs des femmes subissant ces changements métaboliques. La grossesse et l'allaitement maternel font partie des processus métaboliques qui compliquent l'interprétation de la relation entre le l'apport alimentaire en strontium et sa concentration dans les tissus durs (Sillen et Kavanagh, 1982; Blakely, 1989; Humphrey *et al.*, 2007). Les différentes études, à la fois *in vitro* et *in vivo*, ont montré que ces événements augmentent le taux de strontium et diminuent le taux de calcium dans les tissus osseux de la mère, ce qui aboutit à un rapport Sr/Ca relativement élevé. Ce taux s'explique par au moins deux processus : d'une part, la discrimination du strontium en faveur du calcium dans les transferts ioniques à travers le placenta et la glande mammaire (plus élevée par rapport au reste du corps) et, d'autre part, par le fait que la grossesse et l'allaitement favorisent l'absorption des éléments de la catégorie des alcalino-terreux, à laquelle appartient le strontium (Blakely, 1989).

Pour ce qui des comparaisons entre les différentes populations analysées, il se pourrait qu'elles ne soient pas comparables entre elles. Effectivement, par exemple, les statuts reproductifs étant reconnus comme agissant sur les concentrations élémentaires, notamment le strontium et le calcium, il n'est pas pertinent de mettre en parallèle, sur le même plan, les femmes occidentales contemporaines et les femmes préhistoriques que l'on suppose plus régulièrement enceintes et en lactation (Sillen et Kavanagh, 1982).

Un autre facteur métabolique intervient sur les concentrations élémentaires que nous détectons dans l'émail dentaire, les échanges ioniques post-formation de l'émail, ante-mortem. Dans les dents émergées, des échanges ioniques *in vivo* s'opèrent dans la dentine d'une part, via la cavité pulpaire approvisionnée en sang et dans l'émail, d'autre part, par l'intermédiaire de la salive (Song, 2004). Des études (Reitznerová *et al.*, 2000) ont mis en évidence ce phénomène en détectant des changements élémentaires significatifs dans les 100 à 150 μm de profondeur à partir de la surface de la dent. Ces variations notables suggèrent une incorporation du strontium à la surface de l'émail, à partir de l'environnement buccal, après éruption de la dent (Vrbič *et al.*, 1987). Les processus mis en cause dans le cas de telles altérations consistent en une déminéralisation et une reminéralisation en surface, dues à l'environnement buccal. En effet, les cristaux d'émail sont en équilibre physico-chimique avec les fluides qui les baignent. Ainsi, un effet de marée se produit constamment, dans lequel les cristallites d'émail sont dissoutes puis recristallisées. La composition élémentaire dans la couche d'émail peut donc être affectée par la salive (Reitznerová *et al.*, 2000).

III.4.1.5. Les oligoéléments : carences et excès

Les oligoéléments peuvent être répartis en trois catégories au regard de la santé : essentiels, non essentiels, toxiques.

Les oligoéléments dits essentiels ont un rôle dans la santé humaine. Une proportion inadéquate de ces éléments (en excès ou en déficit) peut donc impacter la santé des individus. Les dents peuvent être utilisées (pour certains éléments peu ou pas autorégulés par l'organisme) comme indicateur de la quantité élémentaire absorbée par l'organisme et peuvent fournir des informations nutritionnelles. Les carences et les excès alimentaires, ainsi que leurs conséquences pathologiques, forment depuis quelques années une approche anthropologique indépendante. Ces études extraient des informations sur l'alimentation et la santé humaine des populations anciennes, sur la base de signes caractéristiques de maladie sur le squelette. Plus récemment, des études qui ont combiné des analyses morphologiques, pathologiques et chimiques peuvent identifier de mauvaises quantités d'éléments absorbés, et donc une mauvaise alimentation. Avec ce raisonnement, il est possible d'identifier, par exemple, une anémie en fer par la mise en évidence d'une hyperostose porotique, carence éventuellement soutenue par des preuves de maladies infectieuses (Klepinger, 1986).

Les oligoéléments non essentiels n'ont pas de fonction propre identifiée dans l'organisme. Ils ne sont pas indispensables, mais leur présence, quelle que soit la quantité, n'affecte en rien la santé de l'individu. Dans certains cas (comme le strontium) ils peuvent se substituer à un autre élément en insuffisance pour assurer ses fonctions.

D'autres éléments sont strictement toxiques pour l'organisme, même en très faible quantité, et sont susceptibles d'affecter les fonctions biologiques.

III.4.1.5.1. Carences

La déficience nutritionnelle concerne aussi bien la malabsorption que la perte excessive de composants essentiels. Plusieurs études (revues par Brown *et al.*, 2004) ont détecté des carences nutritionnelles à l'aide de l'analyse de la composition chimique des dents. Ces renseignements peuvent avoir un impact sur la période critique de l'enfance, sur le plan de la croissance et de la survie. Dans le cadre de l'étude des pathologies liées à l'alimentation, plusieurs chercheurs ont proposé l'application d'analyses chimiques élémentaires, en complément des observations micro- et macroscopiques (Price *et al.*, 1985). Les indices osseux de malnutrition s'expriment par des modèles de remodelage de l'os (dépôt ou résorption), un schéma de croissance des os longs excessivement dévié (courbe de croissance pour les immatures et stature pour les adultes, en fonction de la population étudiée), des porosités accrues liées à des attaques infectieuses, des hypoplasies de l'émail dentaire, l'expression d'une *cribra* (le plus souvent *orbitalia*) et/ou des lignes de Harris. L'interprétation de ces dernières doit être pondérée à l'aide de l'examen de l'ensemble du squelette, et non restreintes aux uniquement aux carences alimentaires (Quatrehomme, 2015). Ces manifestations sont des réponses aux anémies et diverses agressions subies par l'organisme, mais il faut rester prudent quant à l'interprétation alimentaire, car il existe aussi des anémies héréditaires (très rares). Les analyses chimiques laissent espérer l'ouverture d'une piste pour répondre à cette interrogation.

Dans le cas du sevrage, en revanche, des signes d'anémie chez les nouveau-nés, avant 6 mois, peuvent indiquer une déficience à une période où le lait maternel devrait être capable de subvenir à tous les besoins nutritionnels de l'enfant, signe d'un sevrage précoce.

Une carence en zinc peut être tenue pour responsable d'un retard de croissance ou de formations osseuses anormales (Aitkens, 1976). À l'inverse, au-delà d'une certaine dose (qui varie selon les espèces), cet élément trace peut être toxique. Les concentrations de zinc dans l'alimentation semblent affecter les niveaux de zinc chez les animaux en croissance. En revanche l'utilisation du zinc pour affiner l'étude d'un régime alimentaire et, à plus forte raison les problèmes de carence chez l'adulte est controversée. En effet, il semble qu'une augmentation ou une diminution des niveaux de zinc par l'alimentation, par rapport à la moyenne naturelle chez l'adulte, ne modifie pas significativement les niveaux de zinc présents dans le squelette (Pharswan et Farswan, 2011).

III.4.1.5.2. Empoisonnements

Bien que les carences alimentaires soient plus courantes, un excès d'oligoéléments ou l'accumulation d'éléments toxiques peut avoir des effets négatifs sur le développement de l'enfant et favoriser la mortalité infantile, réduire l'espérance de vie, avoir une action cancérogène (Nowak et Chmielnicka 2000; Alomary *et al.*, 2006). Certains éléments, comme le plomb, le cadmium ou le mercure sont considérés comme toxiques, car ils semblent n'avoir aucun rôle biologique dans le corps humain et peuvent être nocifs en petite quantité (Underwood, 1977; Ericson *et al.*, 1991; Alomary *et al.*, 2006; Kern et Mathiason, 2012). De plus les métaux s'accumulent dans l'organisme et ils sont très difficiles à éliminer.

Le mercure n'est pas concerné par les études archéologiques, car il se fixe de préférence dans les tissus mous et très peu dans les tissus durs. Nous n'avons donc pas accès aux concentrations en mercure et aux indices d'éventuels empoisonnements.

Les principaux organes qui retiennent le cadmium sont les reins et le foie (Alomary *et al.*, 2006). Le cadmium peut se substituer à certains éléments essentiels dans les enzymes, tel que le zinc, et les rend biologiquement inefficaces. Une faible quantité se retrouve néanmoins dans les tissus calcifiés, mais la littérature sur ce sujet n'est pas encore suffisante pour qu'on puisse en tenir compte en anthropologie biologique.

Le plomb intéresse particulièrement l'anthropologie biologique, car il se fixe préférentiellement dans les tissus durs. Le plomb ingéré par les humains s'intègre dans les cristaux d'hydroxyapatite des tissus durs. De ce fait, la teneur en plomb du squelette est un indicateur approprié de l'exposition d'un individu et reflète, en partie, l'exposition par le biais de l'alimentation et de l'environnement (Vuorinen *et al.*, 1990). Le plomb pouvant impacter la mortalité infantile et la durée de vie, la teneur en plomb est intéressante lorsqu'on s'interroge sur ces questions. L'accumulation de plomb peut affecter les concentrations de zinc et de cuivre dans le corps humain, ainsi que leur fonction biologique (Kern et Mathiason, 2012). Le plomb est également capable de se substituer facilement à certains éléments essentiels tels que le calcium, en cas de carence (Arruda-Neto *et al.*, 2009).

III.4.1.5.3. Le cas du strontium

Le strontium fait partie des éléments dits non essentiels puisque son absence totale de l'organisme, dans lequel il assume ou participe à plusieurs fonctions, ne provoque pas la mort. Certaines expérimentations sur les animaux ont démontré que son absence de l'organisme

provoque un ralentissement de la croissance chez les jeunes sujets, ainsi qu'une carence en calcium dans les tissus durs (Song, 2004).

Le strontium se substitue facilement au calcium, dans les apatites biologiques. Il est donc, de façon générale, facilement incorporé à la structure apatitique (Legeros, 1977). Lorsque ce phénomène de substitution prend des mesures disproportionnées par rapport à l'équilibre biologique établi, les conséquences peuvent être les suivantes : une déficience en calcium dans les cristaux d'apatite (Nielsen, 2004); des changements de propriétés physiques et chimiques des apatites d'émail, et une limitation de l'incorporation de carbonate⁵². Ce dernier a tendance à affecter la structure apatitique de manière à augmenter sa réactivité à l'acide, ce qui est associé à des défauts cristallins dans l'émail (le strontium freine alors la dislocation et l'augmentation de la solubilité et la dissolution). La substitution du strontium au calcium est donc susceptible de réduire la dissolution de l'émail, soit par augmentation de la taille de surface, soit par réduction de l'incorporation des carbonates.

Une quantité anormalement élevée de strontium a pu, dans quelques expérimentations, être associée à des symptômes rachitiques. En effet, le strontium est connu pour influencer l'absorption du calcium. Or, une déficience en calcium peut favoriser le rachitisme. Ce constat laisse envisager deux hypothèses : soit une déficience en calcium, liée à sa bioaccessibilité qui peut entraîner un dépôt préférentiel du strontium dans les dents, soit un excès de la biodisponibilité du strontium qui peut inhiber le dépôt du calcium dans les dents (Rosenthal, 1981 ; Brown *et al.*, 2004). Ces questionnements soulignent l'importance, quand cela est possible, de l'observation complémentaire des signes osseux pouvant indiquer des carences alimentaires, pour une meilleure interprétation, ou dans le but d'éviter une éventuelle contre-interprétation, des données élémentaires.

À ce jour aucun symptôme toxique n'a été observé chez l'homme du fait d'un excès de strontium (Nielsen, 2004; Braux, 2011). Il n'a pas, non plus, été démontré comme cause de mortalité en cas de carence ou d'absence. Il semble que les apports en strontium alimentaire puissent varier de façon considérable sans provoquer de perturbations biologiques (Nielsen, 2004).

Le strontium, bien qu'il ne soit pas un élément essentiel, a des fonctions physiologiques importantes et prend en charge des fonctions similaires au calcium. De ce fait, il peut être considéré comme important, notamment pour la nutrition humaine, même si les phénomènes ne sont pas clairs. Il semble qu'une carence en strontium puisse aboutir, à différents degrés, à des fonctions biologiques sous-optimales (Song *et al.*, 2004).

Les signatures chimiques dont on vient d'expliquer l'interprétation sont examinées à la lumière des marqueurs histologiques.

III.4.2. Utilisation et interprétation des marqueurs histologiques

Dans ce travail, nous admettons la régularité du rythme de développement de l'émail et la périodicité des cernes de croissance présents dans l'émail dentaire. Nous nous appuyons sur cette

52. Mélange de carbone et d'oxygène.

hypothèse largement démontrée pour réfléchir à la relation entre la distance d'émail, sur un axe allant de la jonction amélo-dentinaire vers la surface, et le temps de formation de l'émail.

L'examen histologique auquel nous avons procédé dans ce travail s'appuie sur trois principaux constats.

Les tissus dentaires (l'émail et la dentine) matures préservent, dans leur structure, un enregistrement des traces de leur rythme de formation. La formation de l'émail dentaire se fait par accumulation de couches qui correspondent aux fronts successifs de minéralisation et observe une périodicité régulière (Boyde, 1963; Dean, 1987; Fitzgerald, 1998; Smith, 2006; Antoine *et al.*, 2009). Elle est caractérisée, chez l'homme, par un double rythme, journalier, qui correspond à la formation des prismes d'émail, qui se matérialise par des striations transversales, et hebdomadaires, qui se matérialisent par des cernes de croissance (stries de Retzius). Les cernes de croissance ont un rythme allant de 5 à 12 jours chez l'être humain. À l'échelle individuelle, il est possible de déterminer ce nombre de jours en fonction du nombre de prismes sur chaque ligne.

Lorsque les indices structurels de croissance ne peuvent pas être nettement distingués, il est possible de s'appuyer sur le rythme de formation de l'émail. Le calcul du temps de formation de l'émail sur une distance donnée tient compte de l'extension du rythme de formation. C'est-à-dire qu'il prend en considération la différence de rythme de formation de l'émail entre l'émail « interne » (partie de l'émail accolée à la jonction émail-dentine) et l'émail « externe » (partie de l'émail jouxtant la surface de la dent). Le calcul du temps représenté sur une distance est donc différent selon que l'on se trouve dans l'émail interne ou l'émail externe (Beynon *et al.*, 1991).

L'accumulation régulière des couches d'émail forme des cernes de croissance. Les stress enregistrés pendant la croissance, notamment celui de la naissance, se manifestent par des cernes de croissance plus larges (Dirk *et al.*, 2002; Fitzgerald et Saunders, 2005; Schwartz *et al.*, 2006). Pour estimer l'âge à un moment donné de la formation de la dent, qui correspond à des variations dans les signaux chimiques dans notre cas, on peut citer, parmi les démarches courantes décrites dans la littérature, le décompte des cernes de croissance et l'estimation du temps de formation de l'émail dentaire. Dans les deux cas, le décompte s'appuie sur un cerne de croissance spécifique celui du stress de la naissance, qui marque la séparation entre l'émail prénatal et l'émail postnatal (voir figure 12). En ce qui concerne le décompte des marqueurs réguliers de croissance, l'estimation de l'âge d'un individu à un moment précis du développement de l'émail peut être effectuée par le décompte des périkyrmies, extrémités des stries de Retzius qui constituent une manifestation externe des cernes de croissance. Elles sont identifiables, sous forme de points à la surface de l'émail, en ayant recours à un microscope à balayage avec un grossissement compris entre 36 et 55. Dans un premier temps, les chercheurs ont utilisé une technique d'empreinte/contre-empreinte pour étudier les stries de Retzius. Elle leur permet d'observer et de compter les périkyrmies. Mais cette méthode est faussée par l'usure normale des dents qui efface, dès l'éruption de la dent, une quantité importante de périkyrmies (Bacon 1989). Nous pouvons donc douter de la précision de la datation, malgré les stratégies mises au point pour estimer et compenser les périkyrmies

manquantes. De ce fait, l'application de cette méthode semble devoir être limitée à des germes dont la couronne est encore en formation, avant que l'usure ne fasse disparaître un trop grand nombre de périkymaties. Toutefois, cette sélection réduirait considérablement le potentiel de la démarche qui, de plus, ne tient pas compte de la variabilité interindividuelle concernant la fréquence d'apparition des cernes. L'intervalle de temps entre les stries de Retzius successives est estimé à 7 jours (moyenne la plus communément admise, même s'il est avéré que cet intervalle peut aller de 5 à 12 jours selon les individus). Très vite, en raison de ces limites, les chercheurs ont préféré étudier directement les striations à partir de sections dentaires longitudinales.

Sur le même principe, une meilleure information peut être obtenue par le décompte des cernes de croissance à partir de coupes histologiques, lorsqu'elles sont clairement observables. L'intervalle entre deux stries est défini, en général, par le nombre de prismes (striations transversales) entre ces deux lignes, qui traduit le nombre de jours dans cet intervalle. Lorsque les marqueurs ne sont pas visibles intégralement, comme cela a été relevé par plusieurs chercheurs (Fitzgerald et Saunders, 2005), l'estimation du temps sur une distance donnée s'appuie sur l'estimation du rythme de formation de l'émail. Lorsque le décompte des stries de Retzius peut être utilisé (dent intacte, bonne minéralisation, bonne visibilité, etc.), cette méthode est préférable aux autres, car elle offre une meilleure précision de l'estimation de l'âge à l'apparition d'évènements stressants, elle présente moins de facteurs d'erreurs et s'affranchit des incertitudes sur les estimations du temps de formation de l'émail (Fitzgerald et Saunders, 2005).

Lorsque le décompte des stries de Retzius ne peut pas être effectué, nous avons recours à des méthodes de calcul pour estimer la relation distance/temps dans l'émail dentaire, elles sont fondées sur des travaux qui déterminent le rythme de formation de l'émail. Les méthodes d'estimation du temps de formation de l'émail, que ce soit dans le but d'obtenir une information sur la formation de la dent d'une espèce, ou pour des comparaisons inter espèce, ou encore la détermination de l'âge à la mort, ont suscité plusieurs raisonnements.

Des recherches approfondies ont établi que le rythme de formation de l'émail varie selon les zones de la dent (Beynon *et al.*, 1991 ; Shellis, 1998). Shellis (1984c) suggère que les rythmes initiaux d'extension de l'émail sont plus élevés au début et diminuent progressivement, de la jonction amélo-dentinaire vers la surface de l'émail, sur les dents humaines permanentes. L'espace entre deux stries de Retzius correspond aux différents rythmes de sécrétion suivis par les améloblastes, lesquels sont liés aux différentes étapes de leur cycle sécrétoire (*cf. supra* II. 1.4.1). Il est désormais largement admis que l'augmentation du temps de minéralisation correspond à une augmentation de la taille des cristallites, plutôt qu'à un accroissement en nombre des cristallites, comme cela avait été avancé antérieurement (Daculsi *et al.*, 1984). Ces phénomènes sont à l'origine d'une formation de l'émail interne plus rapide que celle de l'émail externe (Beynon *et al.*, 1991). La littérature évoque l'extension du rythme de formation de l'émail, pour traduire ce phénomène. Le rapport entre une distance et l'estimation du temps de formation qui lui correspond n'est pas identique à tous les niveaux de la longueur de l'axe EDJ-surface de l'émail (qui correspond à l'axe de sécrétion des améloblastes qui forment les prismes). On note également des variations

du rythme de formation de l'émail au sein de l'émail interne et externe, entre les zones occlusale, latérale et cervicale, dont les limites sont définies de façon pertinente par Beynon *et al.* (1991). En effet, le rythme de sécrétion amorce une diminution régulière de la région occlusale vers le collet.

Shellis (1984, 1998) suggère que les rythmes d'extension de l'émail sont clairement en rapport avec l'angle formé par une strie de Retzius avec la jonction amélo-dentinaire. Ce raisonnement l'amène à s'appuyer sur les mesures d'angles pour calculer les rythmes de formation de l'émail. Il propose un modèle trigonométrique pour estimer la chronologie de la formation de l'émail. Cette démonstration est fondée sur l'inclinaison des prismes et des stries de Retzius par rapport à la jonction amélo-dentinaire. À partir de la définition de ces paramètres de croissance, il calcule le temps de formation de la couronne en divisant la longueur de la jonction amélo-dentinaire par les rythmes d'extension des appositions successives de l'émail. Le raisonnement proposé pour procéder aux mesures du rythme quotidien d'extension de l'émail (c) se traduit par l'équation suivante :

$$c = d ((\sin I/\tan D) - \cos I) \mu\text{m}/\text{d}$$

Dans ce modèle, d correspond aux périodes des striations transversales, I est l'inclinaison du prisme par rapport à l'EDJ et D représente l'inclinaison des stries de Retzius par rapport à l'EDJ.

Mais un autre facteur lié au rythme d'extension doit être considéré, l'effet d'étirement dû au fait que les améloblastes nouvellement différenciés semblent s'étendre sur une plus grande longueur dans l'émail de surface que dans l'émail interne. De ce fait, ce phénomène agit sur la zone où les améloblastes sécrétoires sont actifs, et donc sur la taille des prismes, induisant un étirement (S) que l'on peut calculer de la façon suivante :

$$S = 1/ (\cos D - (\sin D/\tan I))$$

Shellis applique cette équation au calcul des changements de rythme d'extension de l'émail dans la dent humaine qui, selon ses résultats, diminue de 20 μm par jour dans la région cuspidienne et de 4 μm par jour dans la zone cervicale. Cette méthode présente plusieurs limites. D'abord, il est impossible de l'appliquer à des dents dont les lignes d'accumulation de l'émail sont mal conservées ou mal identifiables. Ensuite, on note un manque de précision au niveau des zones où les angles présentent une faible empreinte d'intersection entre les stries de Retzius et la jonction amélo-dentinaire.

Enfin, certains auteurs (Macho *et al.*, 2003) ont récemment suggéré que l'estimation du temps de formation de la couronne, dérivée des comptes et mesures des aspects de la croissance par accumulation, peut être invalidée. En effet, les améloblastes sont supposés avoir un déplacement linéaire sur un plan en deux dimensions de la dentine vers la surface ; mais le mouvement réel des cellules en question se fait en trois dimensions. En outre, ce modèle ne prend pas en compte l'élargissement avéré de la couronne dentaire (Guatelli-Steinberg, 2012). Les travaux ultérieurs sur l'estimation du rythme de sécrétion de l'émail ont donc mesuré la longueur des prismes, l'inclinaison des prismes par rapport à la jonction amélo-dentinaire et l'inclinaison des stries de Retzius par rapport à la jonction amélo-dentinaire. Ces mesures ont été prises dans l'émail interne, central et externe, puis dans l'émail occlusal, latéral et cervical (Dean et Shellis, 1998).

D'autres chercheurs estiment l'âge correspondant à une strie de Retzius en prenant des mesures de distance sur l'axe des prismes. L'estimation du temps de formation de la longueur totale leur sert de base pour calculer le temps correspondant à la proportion occupée entre la ligne néonatale et la ligne dont on cherche à estimer l'âge (Fitzgerald et Saunders, 2005). Dans cette optique, Dean et Shellis (1998) proposent de mesurer ensemble les prismes présents entre deux stries de Retzius, puis de diviser le total par le nombre de prismes, ce qui permet de déterminer une largeur moyenne au réalisme optimisé, en prenant en compte de légères variabilités complexes, telles que les modèles des gaines des prismes ou la forme des prismes qui risquent de pas être prises en compte par de simples mesures bidimensionnelles (Dean et Shellis, 1998). Cependant, cette démarche générale suppose que le rythme d'extension de croissance de l'émail est linéaire et uniforme durant l'intégralité de sa formation. Or, le rythme de sécrétion de l'émail appositionnel varie avec le temps et la distance par rapport à la jonction amélo-dentinaire. Pour pallier le problème de l'extension du rythme de formation de l'émail, nous pouvons diviser l'émail en deux parties, externe et interne pour lesquels on applique un rythme différent de formation de l'émail dans les calculs ; et en tenant compte de l'émail imbricationnel (au collet) et appositionnel (couronne), plus rapide (Beynon *et al.*, 1991, Fitzgerald *et al.*, 1998).

Les valeurs trouvées dans l'étude de Beynon *et al.* (1991), pour l'homme, dans l'émail cuspidien et latéral de dents permanentes sont de $2,6 \pm 0,3 \mu\text{m}$ pour l'émail interne et $5,5 \pm 0,8 \mu\text{m}$ pour l'émail externe. Ces intervalles sont en accord avec les recherches antérieures de Shellis (1984). Fitzgerald et Saunders (2005) proposent un rythme très proche, de $2-3 \mu\text{m}/\text{jour}$ dans l'émail initialement formé, et de $5-6 \mu\text{m}/\text{jour}$ dans les périodes finales. Ils envisagent le recours à l'utilisation d'un rythme moyen de formation du prisme de $4 \mu\text{m}/\text{jour}$. En revanche, ces résultats divergent légèrement des valeurs obtenues par Martin (1983) qui décrit un rythme lent à $2,5 \mu\text{m}$ par jour et un rythme rapide de 5 à $7 \mu\text{m}$ par jour.

Les caractéristiques de la coupe histologique, liées à différents facteurs (conservation, préparation des échantillons, affection dentaire du vivant de l'individu, etc.), peuvent être responsables du choix de la méthode utilisée. En effet, l'approche appositionnelle nécessite une section histologique, non oblique, ainsi qu'une demi-dent intacte où il ne manque pas d'émail. L'utilisation des calculs du rythme d'extension nécessite que la section ne soit pas oblique, ce qui, le cas échéant, peut provoquer, par effet optique, une sous-estimation des mesures (Smith *et al.*, 2006).

Dans notre travail, l'estimation du rythme de sécrétion quotidien est effectuée dans la partie latérale de la dent, dans l'émail interne et externe. Cette procédure est répétée plusieurs fois. Nous avons mesuré la longueur de l'émail entre la jonction amélo-dentinaire et la surface de l'émail, selon l'axe des prismes. Nous avons ensuite divisé en deux cette longueur afin de distinguer l'émail interne et l'émail externe. Pour estimer le temps dans l'émail interne, nous avons appliqué le rythme rapide de $2,6 \pm 0,3 \mu\text{m}$ et pour estimer le temps dans l'émail externe le rythme lent de $5,5 \pm 0,8 \mu\text{m}$ (Beynon *et al.*, 1991). Cette démarche a été utilisée à la fois pour estimer l'âge correspondant aux signaux chimiques de l'introduction d'une alimentation autre que le lait maternel, et pour l'âge des signaux associés à la cessation complète de l'allaitement maternel.



chapitre IV

APPLICATION

ARCHÉOLOGIQUE

IV.1. PRÉSENTATION DES SITES SÉLECTIONNÉS

IV.1.1. Saint-Martin-des-champs, Paris

IV.1.1.1. Situation géographique

Le prieuré de Saint-Martin-des-Champs se situe à Paris, dans le 3^e arrondissement, là où se trouve aujourd'hui le Conservatoire National des Arts et Métiers (voir figure 22).

L'édifice primitif de Saint-Martin-des-Champs est érigé au bord du *cardo*, du Paris romain. Il se trouve actuellement au sud du tracé de l'ancien bras nord de la Seine. L'édifice prend place sur une butte d'anciennes alluvions qui forment l'île de Saint-Martin. Il est implanté le long de la route qui relie Notre-Dame et Saint-Denis, à l'extérieur de la ville, et il restera suburbain jusqu'à la construction de l'enceinte par Charles V (2^e moitié du XIV^e siècle).

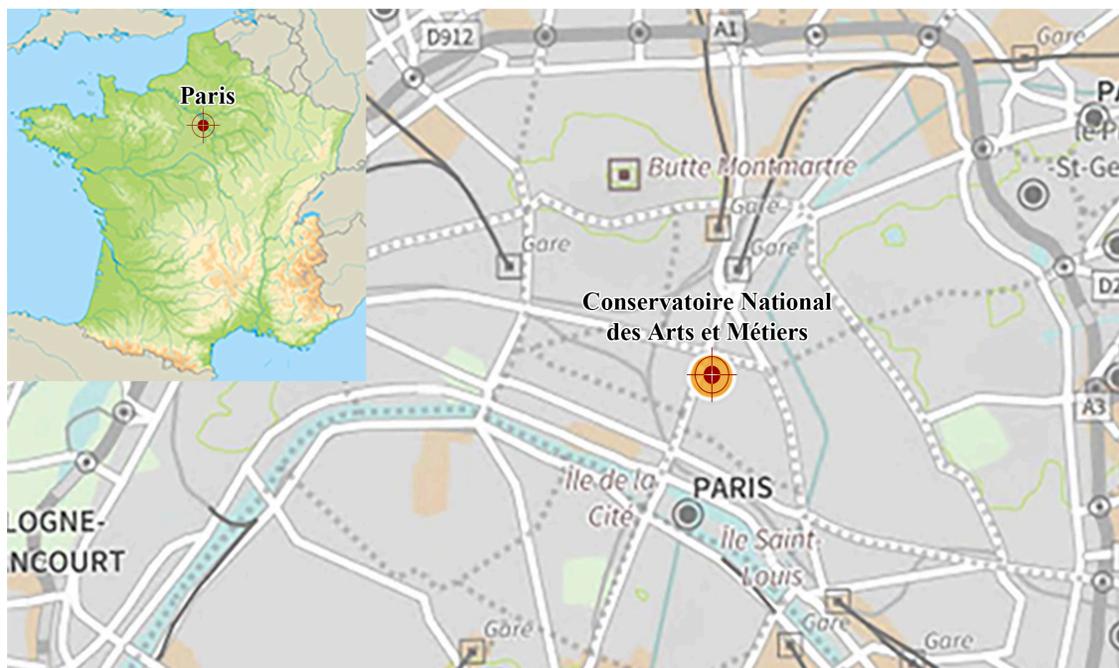


Fig. 22. Localisation de Saint-Martin-des-Champs (Données cartographiques © ESRI France, IGN)

IV.1.1.2. Fouilles

Entre 1798 et 1843, le Conservatoire national des arts et métiers (CNAM) s'installe dans l'édifice Saint-Martin, devenu prieuré au XI^e siècle. À cette occasion, des travaux de rénovation et de transformation sont entrepris (Brut, 1993; 2001). Du milieu du XIX^e siècle au milieu du XX^e siècle, plusieurs opérations de fouilles archéologiques ponctuelles sont menées sur le site du prieuré. Le squelette (CNAM 466b) de notre étude provient de la campagne de fouille menée en 1993 et 1994 (à la suite de sondages effectués en 1992). Ces fouilles de sauvetage ont été confiées aux équipes de la commission du vieux Paris. Elles sont à l'origine de la découverte de plusieurs sarcophages mérovingiens en calcaires et en plâtre, et participent à une définition plus précise du plan de l'église primitive.

Lors de cette campagne, une trentaine de sarcophages sont mis au jour dans le chœur actuel de l'église et une vingtaine dans le transept. Plusieurs autres sarcophages mérovingiens réutilisés au Moyen Âge sont découverts sous la nef gothique. L'ensemble funéraire ne présente qu'un seul sarcophage d'enfant, mais plusieurs sarcophages d'adultes ont été réutilisés pour inhumer des enfants. Au total, la campagne de fouille 1993-1994 a permis d'exhumer une centaine de sarcophages dont le style est du VI^e-VII^e siècle. La faible quantité de matériel funéraire peut être liée aux réutilisations des sarcophages (Mercier, 2012).

Les dernières opérations de réaménagement sont effectuées en 1998 et 1999, ce qui donne lieu à la réouverture de quelques zones remblayées (à partir de 1994) et la découverte des derniers matériaux archéologiques.

IV.1.1.3. Aperçu Historique

Dans son *Histoire des Francs*, Grégoire de Tours mentionne l'existence, au VI^e siècle, d'un oratoire Saint-Martin, mais n'atteste pas formellement qu'il s'agirait de l'édifice primitif du site de Saint-Martin-des-Champs dont il question ici. La mention précise la plus ancienne d'une basilique funéraire dédiée à Saint-Martin, sur la rive droite, est une charte de Childebert III datée de 710. Il s'agit du seul document diplomatique mérovingien connu où l'église de Saint-Martin est mentionnée en tant qu'« abbaye séculaire ».

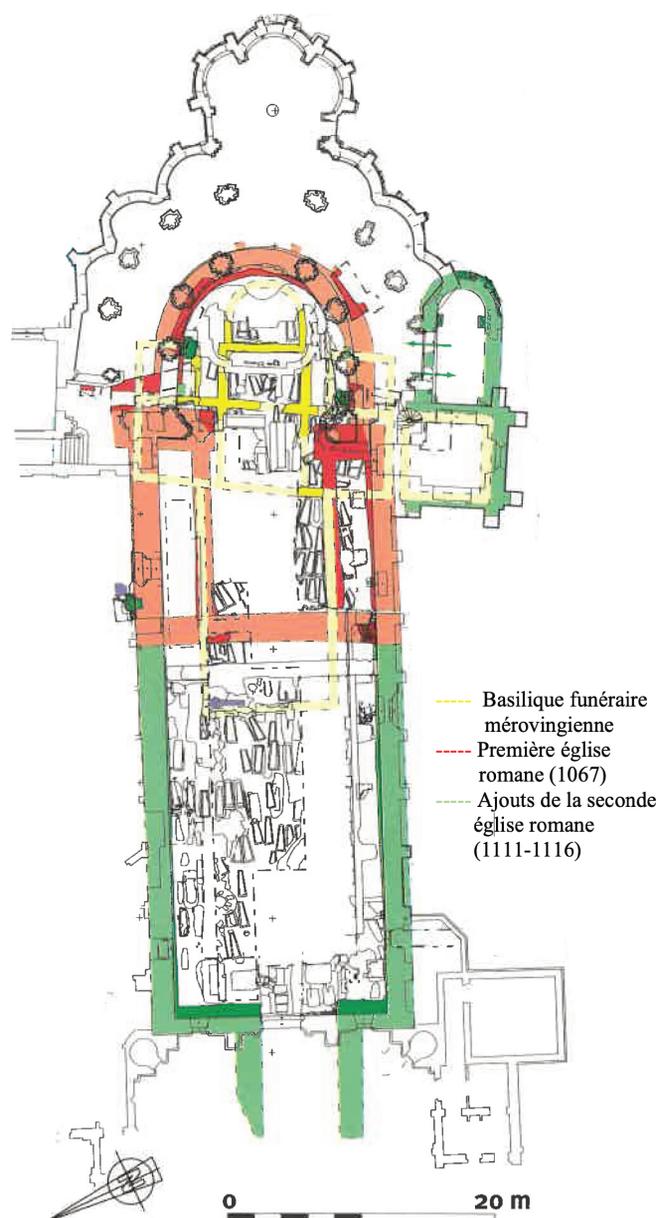


Fig. 23. Plan des vestiges de l'église de Saint-Martin-des-champs de la première moitié du Moyen Âge, avec les tombes dans l'église (d'après Brut, 2001)



Fig. 24. Ancienne église abbatiale Saint-Martin-des-Champs, aujourd'hui Musée des arts et métiers (commons.wikimedia.org)

Aucun élément ne démontre une occupation antérieure à la seconde moitié du VI^e siècle (datation établie à partir de l'étude d'un sarcophage de pierre). Les vestiges de construction attribués au monde mérovingien indiquent une basilique de grande dimension. Elle se compose d'une nef principale, d'un transept divisé par au moins deux murs transversaux alignés sur ceux de l'avant-chœur, d'une abside principale laissant supposer que le chevet comprenait un avant-chœur et une abside majeurs, encadrés par deux constructions similaires de taille plus réduite. Les nombreux sarcophages exhumés de la nef centrale témoignent de la fonction funéraire de cette basilique mérovingienne (Brut, 2001).

Elle subit d'importants dommages lors d'une attaque des Normands dans la seconde moitié du IX^e siècle, et sa réhabilitation, après une période d'abandon, n'intervient qu'au XI^e siècle, avec la décision d'Henri I^{er} de créer une collégiale à partir de l'église préexistante (Brut, 1993). Sur les bases de cet édifice primitif, une église romane, qualifiée de basilique dans les textes, est reconstruite entre 1039 et 1060 (Brut, 2001). Le diplôme de fondation de cet édifice est daté de 1059-1060. La chartre stipule que l'église primitive est entièrement détruite et que l'on reconstruit une plus grande à proximité d'une porte de Paris (Mercier, 2012). Elle est ensuite placée sous l'autorité de l'abbaye de Cluny, en 1079, et devient un prieuré. À ce moment, le chœur de l'église est à nouveau restructuré. La fonction funéraire de la basilique est maintenue au début de l'époque carolingienne. On note la présence d'inhumations d'enfants, principalement dans le chœur, l'avant-nef et l'aile sud des anciens cloîtres (voir plan figure 23). Les réaménagements opérés par la suite (revêtement de plâtre sur le sol et les murs) témoignent de la perte de la fonction funéraire, liée à la séparation entre le lieu de culte et le cimetière qui s'opère à cette époque (Brut, 2001) (voir figure 24) .

IV.1.2. Les grands Peupliers, Hières-sur-Amby

IV.1.2.1. Situation géographique

La commune de Hières-sur-Amby se trouve au nord du département de l'Isère, à environ 40 km à l'est de Lyon. Elle se situe à la jonction de l'Isle-Crémieu et de la plaine Est du Lyonnais, dans les plaines du Bas Dauphiné, entre les falaises calcaires du massif de l'Isle-Crémieu et le Rhône (voir figure 25).

L'Isle-Crémieu appartient à l'ensemble géologique du Jura méridional dont les phases de formation, soulèvements et affaissements, sont à l'origine de l'inclinaison ouest-est du massif. Hières-sur-Amby appartient à trois milieux géographiques différents : la plaine alluviale, les vallées, et le plateau. Le glacier est responsable du creusement de larges vallées profondes, issues de failles du plateau, surcreusées par les divers ruisseaux, qui forment des dépressions occupées par des lacs de retrait würmien, colmatés par les sables, les argiles ou les craies lacustre. Parmi les

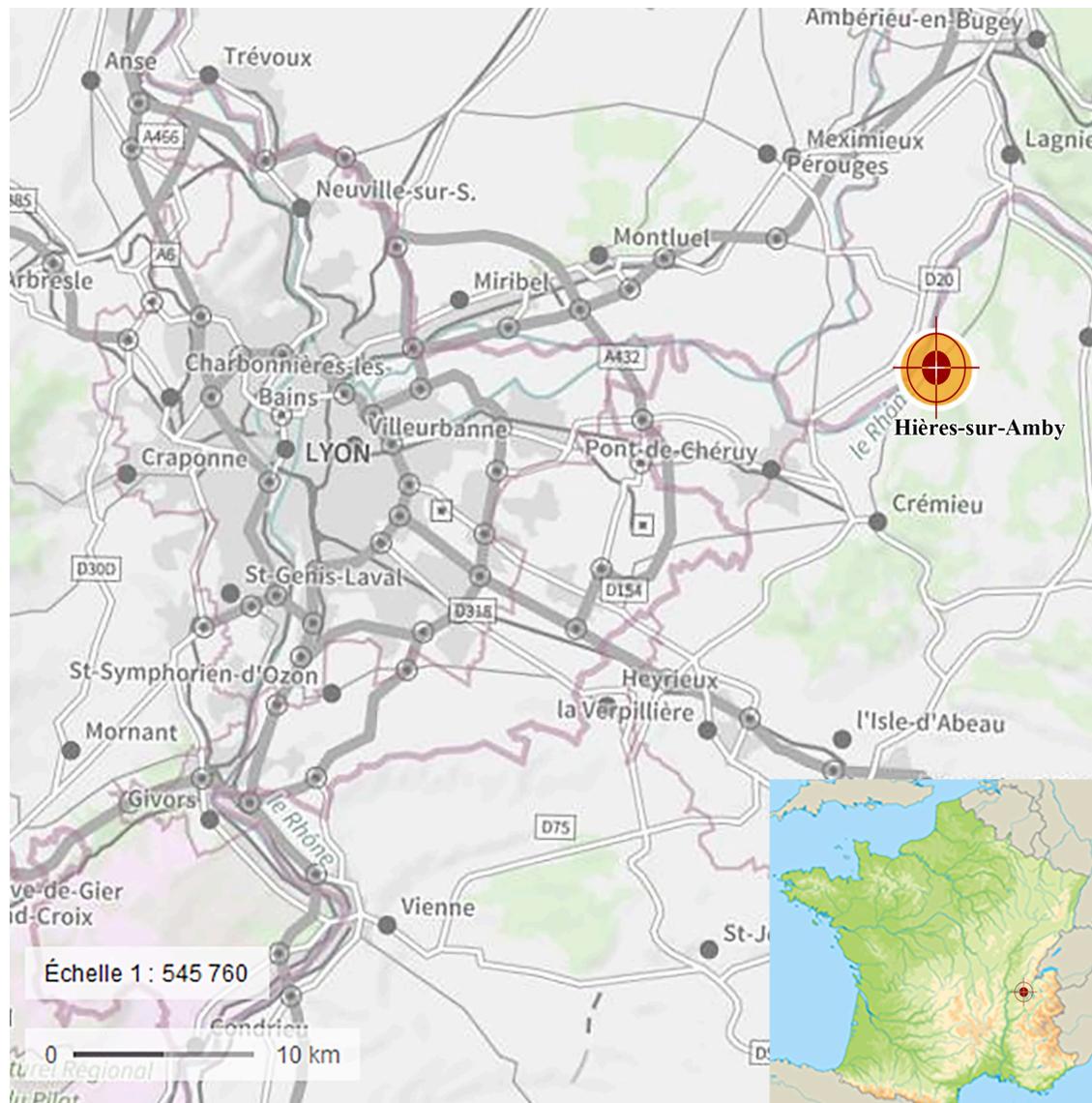


Fig. 25. Localisation de Hières-sur-Amby (Données cartographiques © ESRI France, IGN)

lignes de faille qui en résultent, on remarque la faille occidentale soulignée par des falaises limitant le plateau à l'ouest. D'autres failles ont permis la naissance d'étroites vallées, dont l'Amby, qui mettent en contact le plateau et la plaine. La plaine constitue une profonde dépression entre les socles anciens du Massif Central et des Alpes. Cette dernière est progressivement comblée par des dépôts du glacier et les apports de la Chartreuse et de l'Isère-Drac, et finalement modelée par les avancées



Fig. 26. Photo de la nécropole de Hière-sur-Amby (porte et Buchet, 1985, fig. 12b)

et reculs glaciaires du quaternaire. Ces caractéristiques sont, en partie, responsables de l'occupation de l'Isle-Crémieu. Hières-sur-Amby se développe sur les restes de moraines et de terres argileuses ou sableuses, au pied des falaises. La stratigraphie de Hières-sur-Amby présente d'importantes ressources en calcaire et en lauze dont on conserve plusieurs traces d'utilisation. Cela a pu être un élément favorisant l'occupation humaine à cet endroit. En revanche, bien que la présence de gisements de minerai de fer soit attestée anciennement et qu'ils soient exploités sporadiquement, ces gisements ne semblent pas être, d'un point de vue archéologique et historique, un facteur favorisant la présence humaine. Dans la plaine, la vallée fluviale est divisée en deux ensembles pédologiques dans lesquels on distingue des peuplements d'inégale importance. La plus grande partie est représentée par une série de terrasses fluvio-glaciaires successives, abondamment pourvues de galets et recouvertes d'un sol fersialitique et particulièrement perméable (Bocquet, 1967 ; Porte, 2011).

La nécropole des Grands Peupliers (voir figure 26) occupe le rebord de l'une de ces terrasses fluvio-glaciaires würmiennes, à 209 mètres d'altitude, parallèle au cours actuel du Rhône dont elle est séparée par la plaine alluviale holocène sablo-limoneuse où coule le fleuve. La terrasse du site est entaillée par un ancien vallon en berceau partiellement fossilisé et prolongé à l'ouest par un glacis d'épandage qui se fond dans la plaine alluviale inondable. Plusieurs glacis alluviaux prolongent la nécropole à l'ouest. Le rebord abrupt résulte de l'ancienne berge d'érosion holocène du fleuve. Le substrat du site est constitué d'un sol rubéfié sur matériel caillouto-sableux. Cette terre graveleuse contient une grande quantité de galets, qui traversent des bancs de sable gris (Porte et Buchet, 1985).

Les divers ruisseaux qui creusent les vallées, tel l'Amby, ont généralement un fond étroit et instable, ce qui donne lieu à des milieux humides, contraignant les voies à passer sur les coteaux aux flancs pentus, dès la protohistoire.

La région nord-est du bas Dauphiné dans son ensemble est régie par un climat rigoureux et humide, en partie responsable d'un sol peu fertile en dehors des plaines alluviales.

Depuis la protohistoire, les hommes sont un obstacle au boisement du territoire, au profit de l'agriculture et de l'élevage. Les études palynologiques ont mis en évidence une déforestation générale sur le territoire d'Hières-sur-Amby, à l'époque romaine, responsable de la disparition de plusieurs espèces d'arbres au profit de la vigne et d'arbres cultivés, tels que le noyer ou le châtaignier. Parallèlement, la céréaliculture est largement développée sur les espaces défrichés. Au début du Moyen Âge, la céréaliculture existe toujours, mais moins présente qu'à l'époque romaine. Après l'an mil, une nouvelle phase de déforestation s'opère (qui s'étend jusqu'à nos jours), avec une nouvelle intensification de la céréaliculture (Porte, 2011).

IV.1.2.2. Fouilles de la nécropole

La fouille de la nécropole d'Hières-sur-Amby a été conduite dans le cadre d'un programme de recherche sur l'histoire du peuplement d'une microrégion, la côte ouest du massif de l'Isle Crémieu, durant le haut Moyen Âge. En 1980, des travaux le long de la CD 65 qui relie Crémieu à Balme-les-grottes, révèlent la présence de sépultures. Deux campagnes de fouilles entreprises en 1982 et 1983 ont permis de fouiller l'ensemble de la nécropole et les terrains environnants (Porte et Buchet, 1985).

La zone où est établie la nécropole a pu être perturbée au cours du temps, entre la fin de son utilisation et le siècle dernier, par divers travaux d'aménagement et la mise en culture de la terrasse alluviale. Toutefois, la délimitation de l'espace funéraire et le plan des sépultures laissent penser que la quasi-totalité de la nécropole subsistait. Quelques tombes, probablement moins d'une dizaine, ont été détruites, suite à l'implantation d'une gravière. En outre, quelques tombes présentant des os déplacés, des squelettes incomplets, voire seulement quelques fragments d'os, ont sans conteste été pillées.

Un ensemble de 47 sépultures a été fouillé, livrant un total de 45 individus (Porte et Buchet, 1985).

IV.1.2.3. Aperçu historique

La Côte ouest de l'Isle-Crémieu connaît une occupation humaine dès la préhistoire, mais le peuplement se développe surtout à partir de la protohistoire. Quelques vestiges du paléolithique et du mésolithique ont été découverts à proximité, dans l'Isle, notamment dans la grotte de Balme, ainsi que quelques vestiges néolithiques (de culture chasséenne) sur le site de Larina (Porte, 2011). Durant la protohistoire sont édifiés deux oppida contrôlant l'accès des vallées à l'intérieur du plateau. Quelques sépultures de même époque ont été découvertes (Porte et Buchet, 1985 ; Porte, 2011).

L'agglomération d'Hières-sur-Amby, qui comprend deux sites archéologiques, celui de Larina (pour lequel on distingue la Motte et le Mollard) et celui des Grands Peupliers, est en territoire allobroge jusqu'à sa conquête par Rome au II^e siècle. À l'époque romaine, l'importante densité des établissements gallo-romains dans la plaine laisse envisager une intensification du peuplement. Plusieurs de ces établissements bordent la côte sur la plaine, en particulier en suivant la voie nord-sud, parallèle au fleuve ; l'emplacement de leur installation est le plus souvent déterminé par les voies terrestres ou fluviales. D'autres domaines sont implantés en retrait de la

voie principale, dans la plaine entre le Rhône et le pied de la falaise. Une partie des établissements a pu être identifiée comme des *villae*⁵³, grands domaines ruraux qui structurent le paysage rural gallo-romain. En parallèle, se développent quelques *vic*⁵⁴, habitats groupés constituant de petites agglomérations secondaires. D'autres établissements antiques, témoignant de l'importance économique du fleuve par leur nombre, sont mal caractérisés; plutôt à vocation économique et artisanale, ils sont souvent en liaison avec des gués ou des petits ports (Porte, 2011). Cependant, le site des Grands Peupliers n'a pas, à ce jour, livré de traces gallo-romaines. L'importance réduite des nécropoles et la petite superficie des gisements nous incitent à supposer l'existence de petites exploitations, de deux ou trois maisons, ce qui place le site dans un contexte d'habitat dispersé et un mode de vie rural.

Les voies de communication qui entourent et pénètrent dans Hières-sur-Amby, tant à vocation régionale que locale, sont nombreuses; on peut citer les routes venant de Méditerranée, au sud, des plaines lyonnaises à l'ouest, du Bugey à l'est, et des plaines de l'Ain et, au-delà, de la Bourgogne, au nord (Porte, 2011). Le fleuve constitue la voie de communication principale. De manière générale, ces routes traduisent l'importance et l'attractivité du territoire. La présence de ce réseau de communications, dans l'Antiquité et durant le haut Moyen Âge, est probablement à l'origine de l'installation de l'habitat et de la nécropole des Grands Peupliers (Porte et Buchet, 1985).

Le territoire sur lequel est située Hières-sur-Amby, pendant l'antiquité tardive et le haut Moyen Âge, s'insère dans un contexte où la population est relativement dense, sous l'influence de la cité de Vienne, mais aussi de la Colonie de Lyon. Dans la phase de transition entre ces deux périodes, le peuplement de l'Isle-Crémiu est plus lié à l'installation du christianisme qu'aux migrations « barbares ». Au haut Moyen Âge, Hières-sur-Amby connaît une courte phase d'occupation burgonde. Par la suite, elle appartient au monde mérovingien, dont la nouvelle aristocratie s'établit sur le site de Larina, dans un habitat fortifié de hauteur. Il comprend une enceinte, renfermant des bâtiments d'habitation et d'exploitation, des nécropoles et des champs cultivés. Hières-sur-Amby s'inscrit toujours dans un contexte d'habitat rural traditionnel. La céréaliculture demeure une activité importante, mais l'élevage, en particulier celui des ovins et des caprins, semble devenir une priorité dans le développement économique (Porte et Buchet, 1985; Porte, 2011). Cette information est pertinente pour le sujet qui nous intéresse, car elle donne de la cohérence à l'interprétation d'un remplacement du lait maternel par des laits animaux. En effet, la composition chimique d'un lait d'origine animale est identifiable dans les échantillons analysés sur ce site.

Par de nombreux aspects, le peuplement au haut Moyen Âge se fait dans la continuité avec l'époque précédente. Le réseau des voies de communication reste inchangé. Cependant, l'habitat évolue vers une organisation autour des *villae* et devient un habitat dispersé. Cette nouvelle occupation du territoire est caractérisée par l'association des nécropoles aux maisons. En effet, les points de peuplement gallo-romains subsistent, mais cinq nouveaux établissements, répartis entre

53. Grands domaines qui organisent tout le territoire dont ils maîtrisent la propriété, et constituent la base de l'habitat dispersé.

54. Vicus: habitat groupé.

Hières-sur-Amby et Verna, viennent s'ajouter pendant le haut Moyen Âge, tous associés à une petite nécropole (Porte et Buchet, 1985).

Le contexte du haut Moyen Âge à Hières-sur-Amby est également marqué par la christianisation générale des campagnes.

À partir du X^e siècle, la société féodale se met en place, notamment par une hiérarchisation des pouvoirs grandissante.

L'interprétation archéologique du site a mis en évidence le caractère villageois de l'établissement des Grands Peupliers et l'étude palynologique confirme que l'agriculture céréalière constitue l'activité principale du secteur pour cette époque (Porte et Buchet, 1985). Des sources écrites soulignent le caractère plutôt dur du climat et l'exposition au vent (Porte, 2011), qui ont probablement influencé les choix d'exploitation du sol.

L'étude anthropologique a mis en évidence un état nutritionnel satisfaisant, sans carences, de la population d'Hières-sur-Amby (Porte et Buchet, 1985). Ces observations sont cohérentes avec les conditions économiques décrites plus haut pour cette époque. À l'inverse, l'état sanitaire de la population semble médiocre, les dentures présentent un mauvais état général, avec une fréquence élevée de kystes et une perte précoce des dents.

IV.1.2.4. La nécropole

La terrasse fluvio-glaciaire constitue une surface plane, orientée nord-ouest/sud-est, en légère pente vers l'est, et surplombant à l'ouest l'actuelle terrasse du fleuve. La nécropole est implantée parallèlement à la pente sur la partie la plus haute de la terrasse, au niveau de l'insertion d'un vallon fossilisé et de la plaine alluviale. Les tombes se trouvent donc alignées perpendiculairement au rebord ouest de la terrasse fluvio-glaciaire et organisées selon deux grandes rangées parallèles orientées nord-sud. La régularité de cette disposition est parfois interrompue, comme, par exemple, au centre de la nécropole, où plusieurs sépultures s'organisent autour de la tombe d'un enfant (S.6), ou, plus au nord, autour de la sépulture 38. On observe également, dans certains cas, un agencement des sépultures en relation avec les tombes voisines. À l'extrême sud de la nécropole, on remarque qu'une seule rangée, ouest, est implantée (Porte et Buchet, 1985).

Les limites de la nécropole sont définies, à l'ouest par le versant abrupt de la terrasse, contre lequel s'aligne une série de sépultures, et au sud par le retour vers l'intérieur des terres sur un vallon fossilisé qui limite l'extension du site au niveau des dernières tombes fouillées. À l'est et au nord, les extrémités ne sont pas matérialisées, mais peuvent être interprétées par l'absence de vestiges identifiés lors des opérations de décapage sur plusieurs dizaines de

	VIII ^e -IX ^e siècles	% d'individu sans les fosses vides	% d'individu avec les fosses vides
Adultes	31	58	60
Enfants	22	42	40
Fosses vides d'enfants	0		
Fosses vides d'adultes	2		

Fig. 27. Inventaire des squelettes des Grands Peuplier (d'Émilie Pérez, 2014)

mètres après les dernières tombes fouillées. Il semblerait qu'à partir d'un groupe primitif, le développement progressif des inhumations se soit fait vers le sud et surtout vers le nord, dans un espace plat et ouvert, sans entraves géographiques (Porte et Buchet, 1985).

Les fosses d'installation des tombes ont été creusées sur une profondeur allant de 0,40 à 0,60 m. La grande majorité des coffres de la nécropole est constituée de lauzes, mais on trouve aussi un certain nombre de coffres en moellons, ainsi que quelques coffres en bois. Les plans des sépultures peuvent être rectangulaires, trapézoïdaux ou ovoïdes, voire irréguliers dans quelques cas. Tous les corps sont inhumés en décubitus dorsal avec, la plupart du temps, les mains repliées sur le pubis, ou éventuellement les bras le long du corps. Toutes les tombes sont orientées, sensiblement nordouest/sud-est. Les immatures ont reçu le même traitement funéraire que les adultes, que ce soit pour la forme de la sépulture, la position d'inhumation, ou l'orientation de la tombe (Porte et Buchet, 1985).

IV.1.2.5. Les squelettes

L'ensemble des observations anthropologiques et démographiques laisse supposer l'existence d'un groupe restreint, qui pourrait compter quatre à cinq familles au maximum, ayant occupé le site pendant trois ou quatre générations, soit environ un siècle, entre le IX^e et le X^e siècle, c'est-à-dire entre la fin de l'époque mérovingienne et le début de l'époque carolingienne. Au total, les fouilles de la nécropole ont livré 21 squelettes immatures ainsi qu'une fosse vide attribuée à un enfant de 8-12 ans (Perez, 2013), et 31 adultes, dont 10 femmes et 17 hommes (Porte et Buchet, 1985) (voir figure 27).

L'étude démographique ne fait pas apparaître de personnes âgées, ni d'enfants morts en très bas âge (pas d'enfants entre 0 et 1 an) (Perez, 2013). Toutefois, il faut garder présent à l'esprit le biais bien connu de la sous-représentation générale des nourrissons dans les vestiges archéanthropologiques et les destructions liées à la gravière.

L'échantillon retenu dans notre étude comprend 5 immatures (Sép. 7, 18, 19, 38.1, 48), provenant de différents endroits de la nécropole.

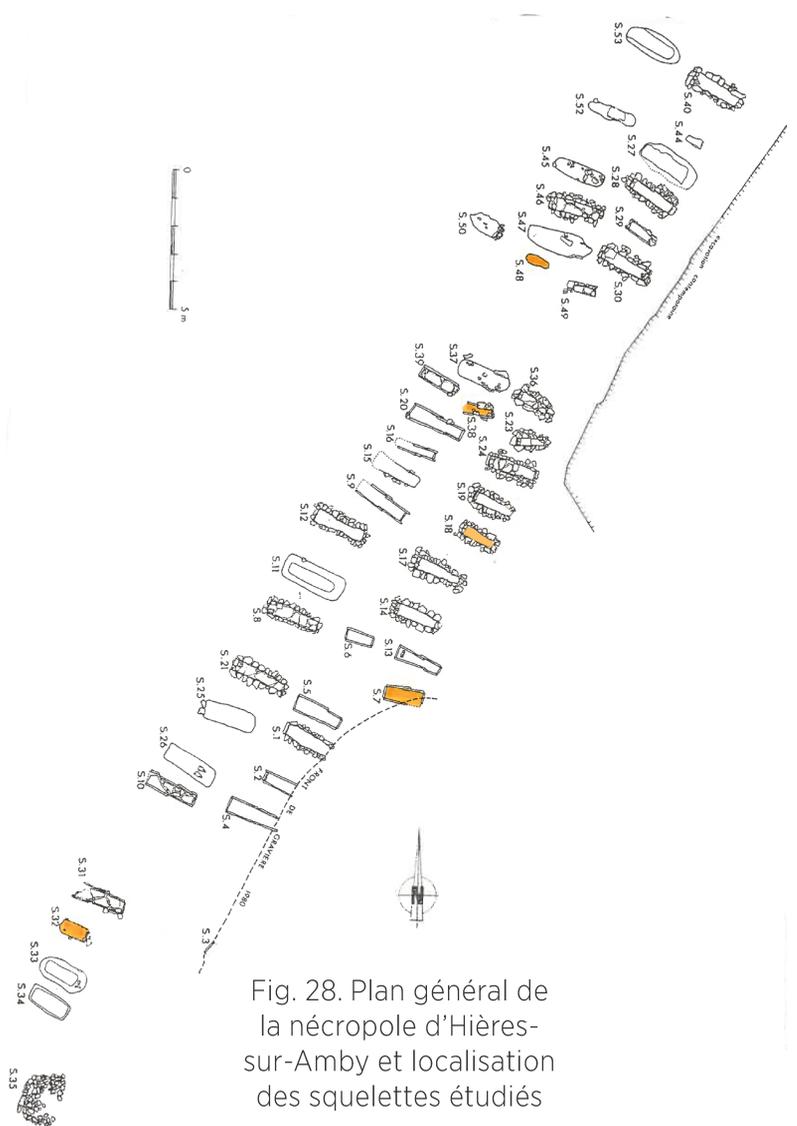


Fig. 28. Plan général de la nécropole d'Hières-sur-Amby et localisation des squelettes étudiés

IV.1.3. Saint-Laurent-de-Grenoble

IV.1.3.1. Situation géographique

L'église de Saint-Laurent est située à Grenoble (Isère, France), ville des Alpes du Nord établie à la confluence des vallées de la Drac et de l'Isère (voir figure 29).

C'est une ville de moyenne montagne (210 m d'altitude), cernée par les massifs du Vercors à l'ouest et au sud-ouest, les derniers contreforts de la Chartreuse au nord, le Taillefer au sud-est et la chaîne de Belledonne à l'est. Elle est établie sur un dôme alluvionnaire, à l'intérieur du sillon alpin qui sépare les hauts massifs centraux cristallins des Préalpes calcaires (Jospin, 2005 ; Colardelle, 2008). Grenoble s'est développée dans un site contraint par la géographie et sa morphologie. Son histoire et son modèle d'occupation sont intimement liés à sa position spécifique.

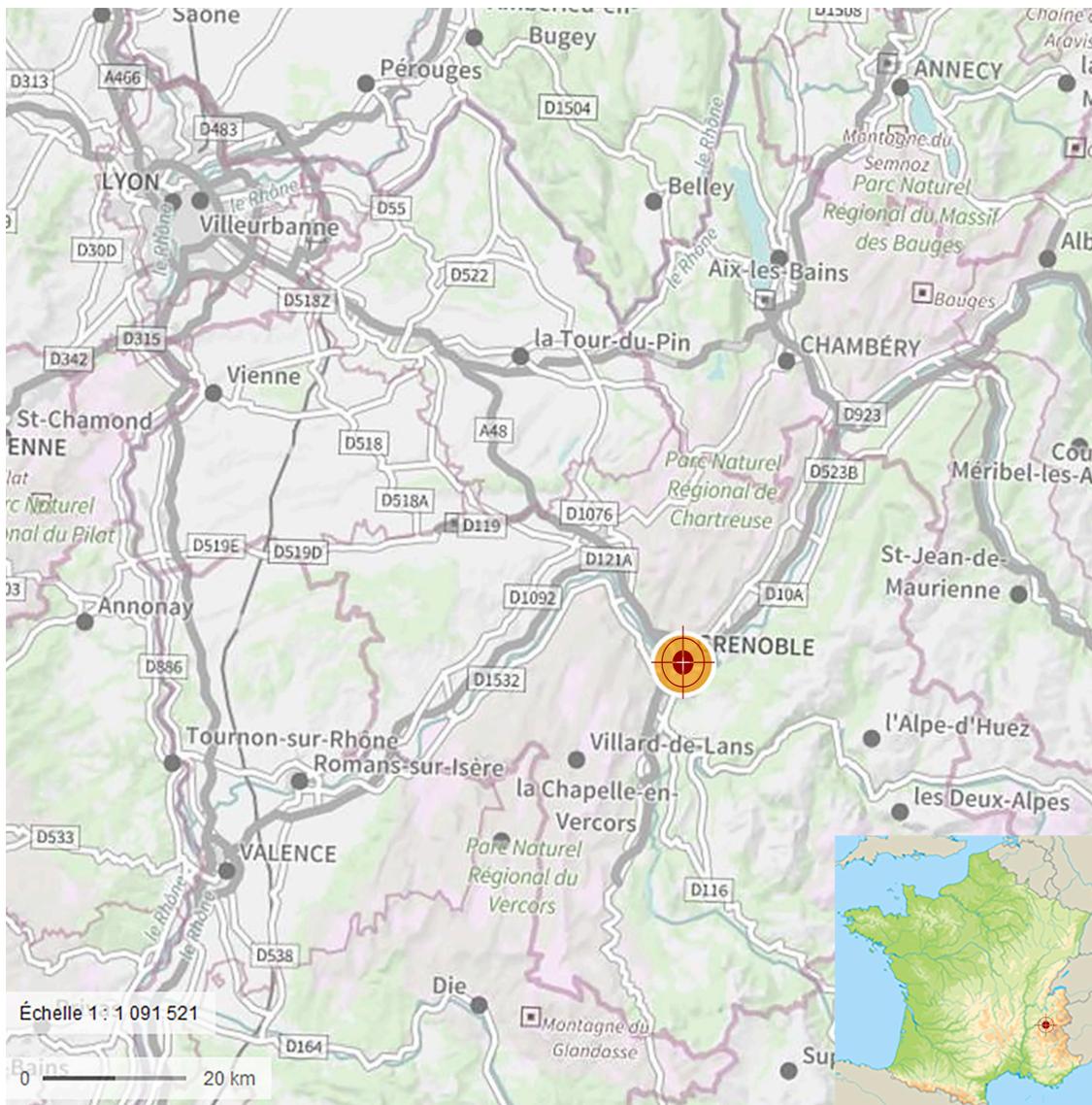


Fig. 29. Localisation de Saint-Laurent de Grenoble (Données cartographiques © ESRI France, IGN)

La formation montagnaise se fait essentiellement par le soulèvement des Alpes qui fait surgir de nouveau le massif de Belledonne, ce qui entraîne un glissement de la couverture sédimentaire vers l'ouest. Ces mouvements donnent naissance au sillon alpin entre la chaîne primaire et son ancienne couverture calcaire. Elle est elle-même composée de deux blocs, le massif de la chartreuse au nord-est et le plateau du Vercors au sud-ouest (Jospin, 2005)⁵⁵. L'activité des glaciers a façonné un carrefour de profondes vallées dans lesquelles l'Isère et le Drac fusionnent. Le cône de déjection du Drac canalise l'Isère dans un seul lit (contrairement aux cours d'eau environnants), favorisant, de ce fait, l'installation humaine sur un point de passage de la rivière au niveau de Grenoble (Jospin, 2005). Ces zones sont donc préférentiellement occupées par des habitats permanents à l'époque gallo-romaine et au XI^e siècle, avec la stabilisation des communautés villageoises attirées par une situation à l'abri des crues et au milieu de terroirs particulièrement fertiles (Colardelle, 2008).

Partant de la vallée de l'Isère, une pente, interrompue par des terrasses, s'élève vers le nord. La nécropole se développe entre une terrasse alluviale et la rupture de pente qui marque le début du versant sud du mont Rachais, environ 10 mètres au-dessus du niveau moyen de la rivière. À l'est, le relief rocheux rend difficile le passage le long de l'Isère (au moins en période de crue), ce qui lui donne un rôle déterminant dans la position principale de la nécropole de Saint-Laurent. Cette situation impose plusieurs contraintes aux voies de communication qui contribuent à définir la future ville. Les voies conduisant aux villes alentours, Lyon et Vienne d'un côté, Chambéry et Genève de l'autre, ainsi que vers les Alpes au sud doivent trouver au sortir de la ville un parcours évitant, à la fois, l'abrupt des falaises et les zones marécageuses laissées par les fluctuations des cours d'eau. Ces entraves poussent l'essentiel des voies de communication à se développer sur la rive droite, au nord, après le franchissement de l'Isère par un pont.

IV.1.3.2. Fouilles de Saint-Laurent

Les premières fouilles archéologiques du site sont engagées entre 1959 et 1974 par Raymond Girard. Puis, une deuxième campagne est entreprise par Renée Colardelle entre 1978 et 1995. Le site est fouillé par zones et chaque période bénéficie d'études stratigraphiques et architecturales systématiques des tombes et des autres structures ainsi que d'une abondante documentation sur les sépultures (Herrscher, 2003).

La chronologie du site repose sur la stratigraphie relative des phases architecturales et d'inhumations. Dix-huit phases d'inhumations ont été distinguées à partir de la position stratigraphique des tombes. Elles sont inscrites dans une chronologie absolue à l'aide de datations au radiocarbone effectuées sur des squelettes en connexion anatomique (Herrscher, 2003). Les vestiges anthropologiques étudiés dans ce travail datent de la fin du Moyen Âge. Ils appartiennent à trois phases d'inhumation allant du XII^e siècle au début du XVI^e siècle : phases 13 (1220/1310/1320 ap. J.-C.), 14 (1320-1430 ap. J.-C.) et 15 (1430 ap. J.-C. - début XVI^e siècle).

55. En effet il est reconnu que l'on franchit plus facilement une rivière au point où les eaux sont rassemblées en un seul lit, ce qui constitue un point fixe pour la traversée, que lorsqu'elle se disperse en plusieurs bras, changeant de place à chaque crue. MÜLLER, H. 1930. Les origines de Grenoble. Sa formation depuis l'époque gauloise jusqu'au VII^e siècle, d'après les documents extraits du sous-sol. *Revue de Géographie Alpine*, 18, 451-489.

IV.1.3.3. Aperçu historique

L'agglomération de Grenoble s'est installée sur une légère éminence, protégée des crues des cours d'eau, en amont d'un gué qui, depuis la préhistoire, permet le passage et qui est remplacé par un pont quasiment permanent à l'époque romaine (Herrscher, 2003 ; Colardelle, 2008 ; De Montjoye, 1988). Les plus anciens vestiges d'une installation permanente datent d'environ 70 avant J.-C.

À cette époque, la ville de Grenoble se nomme Cularo. Elle est considérée comme un territoire allobroge s'étendant jusqu'à la vallée de la Romanche (Dangréaux, 1986). Agglomération de taille moyenne, de statut administratif secondaire, elle est une subdivision de la cité de Vienne. Chef-lieu administratif et religieux, elle tire une part importante de ses revenus des droits d'accès (comme le péage du pont), car elle bénéficie d'une situation favorable au commerce à travers le sillon alpin (Colardelle, 1996). À la fin du III^e siècle et au début du IV^e siècle, la ville marque une phase d'essor, notamment avec l'édification d'une enceinte fortifiée (l'une des premières en Gaule). Mais elle prend véritablement son essor lorsqu'elle devient un chef-lieu de cité en 379 et prend le nom de Gratianopolis⁵⁶ (Dangréaux, 1986). Sa dimension chrétienne est également accentuée comme en témoignent l'édification d'un groupe épiscopal primitif et la dotation d'un évêque, attestée dès 381 (Colardelle, 1996). Finalement, l'évolution de l'administration, du commerce et des fonctions religieuses, ainsi que l'accueil d'un casernement, contribuent à l'accroissement de la population et au développement d'une classe aisée, dont témoigne, notamment, la richesse de la nécropole de Saint-Laurent (Colardelle, 1996).

À l'échelle de la région, la création, en 855, du royaume de Provence, dont faisait partie le Viennois, ne semble avoir aucune conséquence notable pour Grenoble qui demeure une ville marginale comparée aux grandes villes rhodaniennes qui cristallisent les enjeux politiques et économiques. L'Église, en accentuant son pouvoir, parvient à exercer un pouvoir comtal (même si l'évêque n'en a pas le titre) et l'évêque de Grenoble est le principal détenteur de l'autorité publique.

Au XI^e siècle, sous l'impulsion des comtes d'Albon, Grenoble devient la capitale du Dauphiné, état indépendant dans le Saint-Empire romain germanique. Ce nouveau statut amorce un essor économique de la ville. La densité de la population augmente, entraînant l'apparition de faubourgs comme Saint-Laurent dont la nécropole abrite principalement des artisans et des petits commerçants (Herrscher, 2003). À cette époque, la concurrence entre l'autorité laïque du comte du Viennois et l'autorité ecclésiastique de l'évêque de Grenoble entraîne de nombreux conflits politiques et sociaux (Colardelle, 2008).

Après l'essor économique du XIII^e siècle, le XIV^e siècle marque pour Grenoble un passage difficile. L'autorité des dauphins est quasi-absente, les crues de la Drac (répercussions du « petit âge glaciaire ») perturbent les conditions environnementales, la situation économique se détériore du fait de l'éloignement des grands circuits commerciaux.

56. Du nom de son bienfaiteur, Gratien.

À cela s'ajoute les effets de la guerre de 100 ans, l'assaut des Grandes Compagnies⁵⁷ en 1374 et des épidémies de peste (notamment la grande peste de 1348), tous responsables de pertes humaines importantes. Pendant cette période, le peuple connaît une profonde misère, aussi bien dans les villes que dans les campagnes. Au XV^e siècle, ce déclin s'accroît et la ville connaît une succession d'épidémies de peste (1410, 1420, 1427, 1467 et 1482) (De Montjoye, 1988), des périodes de disette, ainsi que des inondations à répétition (Colardelle, 2008). Le Dauphiné et le royaume de France sont finalement réunis en 1461, après l'accession au trône de Charles VII, ce qui met fin aux conflits politiques et libère en même temps le territoire national de la présence des Anglais.

Douze ans avant la peste noire de 1348, l'ensemble des zones alpines et subalpines présente une densité de population élevée, voire très élevée (Herrscher, 2003). Mais, entre 1339 et 1474, en partie à cause de l'épidémie de peste, le Dauphiné perd 60 % de sa population (Demurger, 1995) et la démographie reste faible longtemps.

Dès la fin du XV^e siècle, et jusqu'au milieu du XVI^e siècle, la France est marquée par les guerres d'Italie⁵⁸. La situation géographique de Grenoble en fait un point de passage des armées françaises qui commettent de nombreux pillages, favorisent le développement des épidémies de peste et causent une détérioration de l'état sanitaire.

La réforme protestante pendant la seconde moitié du XVI^e siècle provoque des troubles religieux dans l'ensemble du Dauphiné donnant lieu à des vagues d'arrestations, d'exécutions, d'abjurations et d'émigrations. Finalement, les protestants ont la mainmise sur les institutions d'une cité isolée au milieu d'une campagne restée catholique.

IV.1.3.4. Grenoble et son contexte funéraire

L'organisation des nécropoles de Grenoble, leur développement et leur transformation sont étroitement liés aux limites géographiques évoquées plus haut. L'évolution de la topographie chrétienne et funéraire de Grenoble a pu être précisée grâce à l'étude des vestiges archéologiques et des sources historiques. En dehors de la ville, au sens strict, une large bande d'occupation funéraire s'étirait sur la rive droite de l'Isère, de Saint-Ferréol à Saint-Antoine, sur la montée Chalemont et le long des voies menant à Lyon et Chambéry. À partir des V^e-VI^e siècles, des nécropoles et des églises funéraires s'échelonnent le long des voies d'accès à la ville, à l'abri des crues de l'Isère, sur environ 1,5 km. À partir du VI^e siècle, les tombes se regroupent progressivement autour du sanctuaire cruciforme nouvellement construit. Les six principales églises funéraires sont : Saint-Ferréol, la porte Traine, Saint-Antoine, Saint-Oyand, Saint-Sixte, et Saint-Laurent (Colardelle, 2008).

Saint-Ferréol est placée sur le dôme alluvial de La Tronche, près de l'Isère et succède directement à une nécropole à incinération, païenne, antérieure au III^e siècle. C'est d'ailleurs, avec Saint-Laurent, la seule nécropole attestée avec certitude pour le Bas-Empire, sous le nom de « Villa

57. Les Grandes Compagnies sont des bandes de mercenaires de tous pays, anciens soldats démobilisés recrutés par la France pendant la première partie de la guerre de Cent Ans.

58. Succession de conflits menés par les souverains français en Italie pour faire valoir ce qu'ils estimaient être leurs droits héréditaires sur le royaume de Naples et le duché de Milan.

Belledonne » (Colardelle, 1996). Mais compte tenu des données démographiques, elle ne devait pas être l'unique espace d'inhumation durant le haut Empire. Sa distance par rapport à la ville pose la question, non tranchée, de son appartenance aux nécropoles suburbaines de Grenoble ou de l'existence d'une agglomération secondaire, ou encore d'une grande villa suburbaine dont elle pourrait être la chapelle privée. Vers l'an mille, l'entrée des morts dans la ville, au plus près de la cathédrale urbaine, met fin à l'utilisation de la plupart des espaces d'inhumations suburbains, sauf Saint-Ferréol et Saint-Laurent devenus cimetières paroissiaux (Colardelle, 1996).

La porte Traine (ou porte romaine), au sortir de l'enceinte, sur la rive gauche de l'Isère, à une centaine de mètres de Saint-Ferréol, est un autre site possible d'inhumation, d'après la présence de tombes contenant du mobilier funéraire du Bas-Empire (Jospin, 2005). L'imprécision des fouilles archéologiques anciennes, les remaniements de terrain et l'absence de matériel conservé, empêchent toute interprétation plus précise de ces sépultures. Il ne devait s'agir que d'une très petite nécropole, compte tenu du manque de place à cet endroit (Colardelle, 1996).

Plus loin vers l'ouest, sensiblement à l'emplacement qui sera repris par la chapelle Saint-Antoine, se trouvait un espace d'inhumation paléochrétien, avec une basilique funéraire suburbaine le long de la voie menant à Vienne et Lyon, dont l'existence peut raisonnablement être envisagée à partir du VI^e siècle (Colardelle, 1996; 2008).

Le site de Saint-Oyand occupe une terrasse alluviale très proche de l'Isère. Il présente une chapelle orientale chrétienne, cruciforme, datée du V^e siècle, dont l'axe reprend strictement celui d'un mausolée semi-hypogée antérieur (Colardelle, 1996).

Une autre basilique funéraire paléochrétienne, Saint-Sixte, est supposée à 250 mètres à l'est de Saint-Laurent, en raison de la découverte de tombes paléochrétiennes à cet endroit (Colardelle, 1996; 2008).

L'église Saint-Pierre (voir Figure 28), à l'extérieur des murs de la porte Traine, apparaît à la fin du XI^e siècle en tant que dépendance du monastère viennois de Saint-André. Elle est confiée aux dominicains en 1288 et accueille dès lors de nombreuses inhumations des habitants de la ville (Colardelle, 1996).

IV.1.3.5. Le site de Saint-Laurent

Les échantillons du premier ensemble de notre analyse sont issus de sépultures fouillées autour de l'église Saint-Laurent.

Saint-Laurent est un site religieux et funéraire situé dans un des faubourgs, sur la rive droite de l'Isère. L'église funéraire se caractérise par une succession d'ensembles de bâtiments de grande ampleur sur une période ininterrompue du IV^e au XVIII^e siècle. Cet ensemble de constructions est complété, à partir du XIV^e, par une série de fortifications de la ville (Colardelle, 2008).

Les plus anciennes tombes sont datées par le mobilier funéraire de la fin du IV^e siècle/début V^e. Dès le courant du IV^e siècle apparaît une série de mausolées, dont certains sont rigoureusement alignés dans l'axe de l'église actuelle, alors que d'autres se répartissent perpendiculairement, selon un plan moins rigoureux, du côté de la colline. Cette organisation de l'espace résulte probablement d'un parcellaire plus ancien. À la fin du IV^e siècle, ou au début du V^e, un grand



Fig. 30. Église de Saint-Laurent de Grenoble (d'après Wikimedia Commons)

mausolée rectangulaire est ajouté à l'ensemble architectural, là encore dans l'axe de la future église. On note que c'est à ce moment que les tombes prennent une orientation est-ouest quasi systématique (Colardelle, 1996).

Le site de Saint-Laurent occupe, dès le IV^e siècle une position clé, à 50 mètres de la future église de Saint-Laurent en direction de la ville. La première église funéraire est bâtie au VI^e siècle durant un royaume burgonde. Mais ce n'est qu'en 1012 qu'apparaît la mention écrite du patronyme de Saint-Laurent. Il s'agit d'un édifice cruciforme à absides multiples, doté d'une crypte. Il s'appuie sur un des mausolées primitifs plus anciens, le plus grand et le plus tardif, dans l'alignement principal des structures funéraires évoquées ci-dessus. L'étagement sur deux niveaux, les multiples absides, la présence d'escaliers et de couloirs symétriques témoignent de la fonction essentiellement funéraire de l'église. Les plus anciennes sépultures de cet édifice religieux appartiennent à la période burgonde. Saint-Laurent est le premier site d'inhumation chrétien de Grenoble, probablement le lieu d'inhumation des premiers évêques. Il reste utilisé jusqu'en 1800. Dans un second temps, des murs perpendiculaires à la pente du terrain délimitent des terrasses utilisées pour des inhumations, de chaque côté de l'église. Les tombes sont disposées de manière relativement organisée. Les sarcophages sont regroupés dans le narthex, dans l'église et sur la plus haute terrasse, alors que les tombes plus humbles, en coffrages de bois ou de dalles, occupent le reste de l'espace.

Une église carolingienne est construite au IX^e siècle sur les bases de la première église funéraire. L'édifice présente alors une nef unique, ce qui semble indiquer une plus grande importance des offices eucharistiques que des cultes funéraires, à cette époque. Puis, au XII^e siècle, une nouvelle église, de style roman, qui comprend un mausolée, une nef, un chœur et un cloître, est édifiée sur l'église carolingienne par les moines (Colardelle, 2008).

Dès le XI^e siècle, l'essor urbain se traduit à Grenoble par l'apparition progressive de faubourgs, à proximité des remparts, et au voisinage des édifices religieux suburbains. Saint-Laurent est le

premier à se développer au sein d'une paroisse urbaine, dès 1100 (Colardelle, 1996). C'est entre le XI^e et le XIV^e siècle que le cimetière paroissial se met en place. Quelques tombes occupent la nef, mais la plupart des sépultures sont établies autour de l'église, en rangs serrés, et superposés, près du cloître au sud de l'église et sur la place Saint-Laurent.

En résumé, l'essor de la ville, aux IV^e et V^e siècles, entraîne le développement d'un espace funéraire le long des voies de communication principales, à la sortie de la ville. Le pôle aristocratique de cette vaste nécropole se situe à Saint-Laurent. Puis, au V^e siècle, avec le développement de la communauté chrétienne et sous l'essor de l'épiscopat, apparaissent quatre lieux d'inhumations principaux, chacun autour d'une basilique. Le plus important est Saint-Laurent, suivi de Saint-Ferréol, puis Saint-Sixte et une basilique inconnue rebaptisée ultérieurement Saint-Antoine.

L'entrée des morts dans la ville se fait, semble-t-il, très tôt. Dès l'Antiquité Tardive, les premières tombes se rapprochent de la ville, sans véritablement y entrer, agglomérées vers la porte viennoise et à l'extérieur et contre le rempart, attirées probablement par le groupe épiscopal. Mais, c'est vers l'an mille qu'elles sont véritablement intégrées, comme dans la plupart des villes d'occident, lorsqu'un cimetière paroissial, Saint-Vincent/Saint-Hugues, est installé *intra-muros* devant la cathédrale, lequel perdure jusqu'à la fin du XVII^e. Parallèlement, ne subsistent, sur la rive droite, que les cimetières devenus, eux aussi, paroissiaux de Saint-Ferréol et Saint-Laurent (Colardelle, 1996; 2008).

Saint-Laurent, et dans une moindre mesure Saint-Ferréol, sont des lieux privilégiés d'inhumation de notables pendant le haut Moyen Âge et l'on suppose qu'il accueille les évêques jusqu'à la fin de l'époque mérovingienne, voire carolingienne. À partir du X^e - XI^e siècles, la cathédrale *in-muros* devient certainement le lieu de sépulture le plus recherché et il accueille désormais les hautes personnalités de la ville ainsi que les évêques. Dans le même temps, Saint-Laurent reste un lieu d'inhumation en fonction, mais plutôt à destination d'une population plus humble. À ce moment, les cimetières se densifient comme en témoignent, par exemple, les divers réemplois et recoupements qui en résultent (Colardelle, 1996).

Nous disposons au total, pour ce site, de plus de 1500 sépultures réparties sur 13 siècles.

IV.1.3.6. Les squelettes de l'église Saint-Laurent

Les trois phases d'inhumations qui nous concernent totalisent 282 tombes (245 sépultures individuelles et 37 sépultures multiples). Le nombre minimum d'individus est estimé à 336, dont 179 squelettes en connexion anatomiques et 57 sujets réinhumés (Herrscher, 2003) (Figure).

Les observations archéologiques révèlent plusieurs types dans les modes d'inhumation à Saint-Laurent à la fin du Moyen Âge (inhumations en « pleine terre », inhumations associées à la présence de clous, caveaux, tombes anthropomorphes, les cercueils, coffrages de planches). L'orientation des tombes varie selon la période. Au XIII^e siècle, elles sont toutes dans l'axe est-ouest, dans la cour du cloître, alors qu'à la phase suivante apparaît une disposition systématique nord-sud. Au XV^e siècle les inhumations se font à nouveau dans la direction est-ouest, jusqu'à la fin de l'utilisation du cimetière, sauf dans la galerie du cloître (Colardelle, 1996).

	Phase 13		Phase 14		Phase 15		Nb de sépultures	
	1220-1310/1320		1320-1430		1430-début XVI ^e s.		N	%
	N	%	N	%	N	%		
Sép. à un sujet	107	86,9	76	88,3	62	84,9	245	86,9
Sép. à plusieurs sujets	16	13,1	10	11,6	11	15	37	13,1
Nb sépultures	123	42,5	86	30,4	73	25,8	282	-

Fig. 31. Répartition des sépultures (sep.) à un seul sujet et à plus d'un sujet par phase d'inhumation (d'après Herrscher, 2003).

Pour ce qui est de la localisation, les sépultures sont présentes dans trois secteurs distincts : au sud (dans le cloître), au nord-est du chevet (sur la place Saint-Laurent) et à l'ouest du clocher (sous le porche d'entrée, dans l'axe de la porte réaménagée) (Herrscher, 2003). L'espace claustral est réservé aux classes aisées, on y trouve notamment des commerçants, des artisans, des juristes. Les moines et les prêtres sont inhumés dans la galerie du cloître.

Les trois phases d'où sont issus nos échantillons totalisent 252 adultes (hommes et femmes) et 84 enfants et adolescents. Nous avons sélectionné, pour les analyses élémentaires et l'observation des stries de Retzius, quinze adultes des deux sexes, exhumés au sud de l'église et place Saint-Laurent, et un immature, exhumé au sud de l'église. L'ensemble des individus étudiés se situe chronologiquement entre le XIII^e et le début du XVI^e siècle.

IV.2. PRÉSENTATION DU CORPUS

IV.2.1. Intérêt des collections

Dans le cadre d'une démarche expérimentale prenant en compte la nature des aliments ingérés, il m'a semblé nécessaire, dans un premier temps, d'utiliser une collection chimiquement documentée par ailleurs. Les squelettes de Saint-Laurent de Grenoble et Saint-Martin-des-champs s'y prêtaient bien puisqu'ils avaient fait l'objet d'analyses isotopiques systématiques dans le cadre de travaux sur l'alimentation de ces populations (Herrscher, 2001 ; Herrscher *et al.*, 2012). Toutefois, pour ce qui est des questions concernant l'allaitement maternel plus particulièrement, la recherche des isotopes stables n'avait été effectuée que sur les enfants.

Dans un premier temps, quatre échantillons, provenant de quatre enfants différents, ont été préparés pour le site de Saint-Martin-des-Champs. Malheureusement trois d'entre eux n'ont pas été exploitables à cause de problèmes techniques (arrachement d'émail lors de la préparation des échantillons) et nous ne pouvons présenter les résultats que d'un seul échantillon.

En ce qui concerne Saint-Laurent-de-Grenoble, compte tenu des dents disponibles (nous avons choisi de prélever des dents de squelettes dont la dentition était presque complète) et des contraintes nécessaires pour le choix du matériel (conservation, stade de développement), seulement deux dents d'enfants ont pu être sélectionnées pour l'analyse élémentaire. De plus, à la suite de manipulations impliquant plusieurs problèmes techniques (arrachement d'émail

lors de la préparation des échantillons), il n'est finalement resté qu'une seule dent d'immaturation utilisable (1327).

L'examen des adultes du même site est justifié par la volonté d'élargir l'échantillonnage sur une même aire culturelle, bien que l'homogénéité puisse être relative du fait de la longue durée d'occupation de la nécropole (les échantillons utilisés s'étendent du XIII^e au XVI^e siècle). De plus, l'émail dentaire permet d'étudier la nutrition infantile aussi bien sur la denture des enfants morts avant d'atteindre l'âge adulte que sur des sujets l'ayant atteint.

Les dents de Saint-Laurent de Grenoble et de Saint-Martin-des-champs ont été prélevées, étudiées et stockées au LAMPEA (UMR 7269, CNRS, Marseille, France). Compte tenu de l'échantillonnage réduit acquis pour ce site et du choix de la dent pour notre étude (la première molaire définitive) et du matériel endommagé lors de la préparation des échantillons, nous ne disposons que d'une dent infantile par site, pour Saint-Laurent de Grenoble et Saint-Martin-des-champs. Pour ce qui est des adultes, les dents ont été collectées sur les individus présentant au moins une autre première molaire définitive, pour le maintien de la représentation des restes dentaires de la population en vue d'éventuelles recherches futures. Vingt échantillons ont été initialement prélevés, mais à la suite du protocole technique de préparation des échantillons, 4 ont été endommagés. Nous disposons donc au total de seize individus, quinze adultes et 1 enfant. Les dents d'adultes appartiennent aux deux sexes.

Le site des « Grands peupliers » comporte un pourcentage d'immaturation supérieur (40 %) à celui que l'on observe généralement dans les nécropoles du haut Moyen Âge. Cependant, étudier un échantillon composé uniquement d'immaturation implique un biais sur la relation entre les pratiques d'allaitement et de sevrage avec l'état sanitaire et la mortalité infantile, car ne figurent que des individus décédés avant d'avoir atteint l'âge adulte. Les échantillons ont été prélevés au CEPAM (UMR7264, Nice, France) où sont conservés les restes anthropologiques des trois sites d'Hières-sur-Amby (les « Grands peupliers » ; Larina, « la Motte » ; Larina le « Mollard »). La présence de la première molaire définitive a permis de récolter six échantillons parmi les enfants. La procédure de préparation ayant endommagé un échantillon, nous disposons donc, pour ce site, de cinq échantillons infantiles.

Les dents ont été indistinctement prélevées sur la mandibule et le maxillaire, sans tenir compte de la latéralité.

IV.2.2. **Corpus**

Le corpus exploité dans ce travail comprend trois sites, Saint-Martin-des-Champs, les Grands Peupliers, Saint-Laurent de Grenoble. Nous avons étudié un échantillon du site de Saint-Martin-des-Champs, cinq échantillons du site des Grands Peupliers, seize échantillons du site de Saint-Laurent de Grenoble. L'échantillonnage est composé de 15 adultes et sept enfants. Nous avons donc étudié, au total, vingt-deux spécimens (voir figure 32).

Numéro d'individu	Enfant/Adulte	Sexe	siècle
Saint-Martin-des-Champs			
CNAM 466b	enfant	ind.	VIII ^e -X ^e
Les Grands Peupliers			
GP 07	enfant	ind.	IX ^e -X ^e
GP 18	enfant	ind.	IX ^e -X ^e
GP 32	enfant	ind.	IX ^e -X ^e
GP 38.1	enfant	ind.	IX ^e -X ^e
GP 48	enfant	ind.	IX ^e -X ^e
Saint-Laurent-de-Grenoble			
48	Adulte	F	1320-1430
124	Adulte	M	13 ^e / début 14 ^e
154	Adulte	M	1320 / 1430
262	Adulte	M	1320 / 1430
287	Adulte	F	13 ^e / début 14 ^e
304	Adulte	M	13 ^e / début 14 ^e
327	Adulte	?	13 ^e / début 14 ^e
526	Adulte	M	1320 / 1430
531	Adulte	?	1430 / début 16 ^e
538	Adulte	F	1320 / 1430
557	Adulte	F	1430/début 16 ^e
558	Adulte	M	13 ^e / début 14 ^e
593	Adulte	F	13 ^e / début 14 ^e
946	Adulte	?	1320 / 1430
1144	Adulte	F	1430/début 16 ^e
1327	enfant	Ind.	1430/début 16 ^e

Fig. 32. Corpus

IV.2.3. L'intérêt de la diversité entre les collections étudiées

De tout temps, s'alimenter n'est pas seulement une nécessité biologique, c'est également un geste socioculturel. De ce fait, la diversité, à la fois chronologique, régionale et sociale des sites étudiés conduit à des réflexions contextuelles différentes.

IV.2.3.1. Contexte socio-économique et culturel au cours du Moyen Âge

Au haut Moyen Âge, les facteurs les plus marquants de la construction d'une entité culturelle sont la christianisation, les contacts avec les populations germaniques et le monde arabe. Le passage de l'Antiquité au Moyen Âge s'accompagne d'une évolution culturelle ; d'un monde centré autour de la Méditerranée, le centre de gravité se déplace vers le Nord. Ce glissement géographique des tendances culturelles implique, notamment, l'insertion d'influences germaniques qui impactent les pratiques alimentaires (Flandrin et Montanari, 1996). En même temps, la confrontation avec

le monde arabe conduit, par opposition, à l'affirmation d'une identité culturelle chrétienne, elle-même soumise à certaines influences, notamment par l'introduction de nouveaux aliments inconnus jusqu'alors par le biais de l'ouverture de nouveaux espaces commerciaux. Parallèlement, avec la progression de la christianisation, la religion prend une place importante dans l'évolution des comportements alimentaires. Les répercussions les plus notables s'observent notamment sur la consommation de viande que le christianisme considère comme « impure ». Cependant, d'un point de vue culturel, la viande, et en particulier la viande de porc, tient une place importante dans le système de subsistance de l'Europe occidentale du haut Moyen Âge, d'abord parce qu'elle domine largement l'économie sylvo-pastorale de l'époque, et parce qu'elle constitue un élément identitaire distinctif, notamment en opposition aux préceptes de l'Islam (Flandrin et Montanari, 1996). Le statut de la viande dans l'alimentation, du point de vue des mentalités, mais aussi au regard de l'évolution chronologique des pratiques de consommation, est donc à interpréter avec prudence.

Sur le plan économique, l'élément déterminant est le développement du système de subsistance. Le fonctionnement des sociétés du haut Moyen Âge s'appuie sur un système économique agrosylvo-pastoral. Les ressources variées et sélectionnées sont constituées de produits agricoles (céréales, légumineuses, légumes) et de produits issus des terres non cultivées (gibier, bétail, poisson). On assiste, à cette époque, à la construction cohérente et consciente d'un modèle de production dépendant étroitement des espaces incultes, soutenu par le contexte social et juridique qui favorise l'exploitation systématique des ressources sylvo-pastorales (Fossier, 1990). De plus, les espaces cultivés (champs potagers, prés, bois) s'infiltrèrent dans les cités selon la logique de la « consommation directe » qui régit les sociétés de cette époque. On voit également l'expansion des terres cultivées. Les habitations dispersées s'organisent autour des terres cultivées, principalement exploitées pour des ressources céréalières, dans une large gamme de variétés, conditionnées par la nature des sols et le climat. Il en résulte une alimentation caractérisée principalement par une variété des ressources et des produits consommés, assurant à une grande partie de la population du haut Moyen Âge européen « une nourriture plus équilibrée qu'à d'autres époques, passées ou futures, où les céréales constituaient la base de l'alimentation » (Flandrin et Montanari, 1996). La complémentarité des ressources animales et végétales est globalement attestée par la composition chimique des os. En découle aussi l'idée selon laquelle il semble difficile que tous les secteurs de production des ressources puissent être en crise en même temps dans un système aussi diversifié. Ainsi, il est généralement admis que, dès la fin du IV^e siècle, et pendant tout le haut Moyen Âge, on assiste à une période de forte production et de prospérité, avec de grands domaines exploités pour leurs ressources « sauvages » et cultivées, une agriculture forte (aidée par le développement des équipements) et un commerce extérieur très actif (soutenu par l'importance des transports fluviaux et maritimes) (Fossier, 1994). Des sources écrites mentionnent néanmoins quelques épisodes de disettes et d'autres auteurs envisagent même une relative malnutrition (Garcin, 2009). Au cours des X^e et XI^e siècles, l'économie de subsistance traditionnelle caractéristique du haut Moyen Âge se transforme en une économie de marché à l'origine d'une modification des modes de production (Flandrin et Montanari, 1996). Ce modèle économique provoque

une augmentation de la production agricole, assurant ainsi une quantité suffisante d'aliments disponibles. Peu avant l'an mil, cette évolution est favorisée par des progrès techniques liés à la gestion de l'eau (d'où une meilleure irrigation des terres dans certaines zones), ainsi qu'à l'utilisation d'un fer de meilleure qualité et à la généralisation du ferrage des bêtes, qui permettent le travail de sols jusque-là délaissés, notamment des terroirs le long des rivières (Vernet, 1997). Du point de vue du paysage et par conséquent, des ressources environnementales disponibles, la période entre le X^e et le XII^e siècle connaît une nouvelle phase de déforestation (mouvement amorcé dès la Préhistoire) (Vernet, 1997), ce qui provoque une diminution de la proportion des ressources naturelles environnementales dans l'alimentation, notamment la production liée à la sylviculture et la diminution de l'élevage. Le système de subsistance du plein Moyen Âge (XI^e-XIII^e siècles) se caractérise, du point de vue du système de subsistance, par l'affirmation d'une économie agraire. En effet, on assiste, dès lors à une extension de la mise en culture du territoire et l'amélioration du rendement, favorisés par les progrès techniques et sidérurgiques, Cette évolution se fait au détriment du système agro-sylvo-pastoral. À cela s'ajoute la difficulté d'exploitation des ressources du fait de la privatisation des terres incultes et la mise en place de lois concernant la chasse et le pâturage, Le développement de la mise en culture résulte de deux facteurs. Le premier est la petite poussée démographique détectée en Europe entre le X^e et le XIII^e siècle (Chédeville, 2004). Du fait de cette croissance démographique, l'exploitation des ressources naturelles des terres incultes est devenue insuffisante pour assurer l'alimentation de la population. En effet, il semblerait que le système sylvo-agro-pastoral n'ait été possible que du fait de la faible pression démographique du haut Moyen Âge. Ainsi, il est probable que l'augmentation du nombre d'individus à nourrir ait incité à la mise en culture de terres jusque-là incultes. L'accroissement démographique a une autre conséquence, celle de l'augmentation de la main-d'œuvre disponible pour le travail aux champs, ce qui constitue un facteur décisif pour le développement de l'agriculture. Le deuxième facteur est la mise en place des cadres de la société féodale naissante, entre le X^e et le XII^e siècle, qui provoque l'émergence d'une catégorie de grands propriétaires terriens qui vont exercer une forte pression. Ces derniers sont détenteurs de pouvoirs politiques et influent sur les pouvoirs administratifs et judiciaires qui les soutiennent, au détriment du pouvoir central.

Parallèlement, la reprise des échanges monétaires et du commerce se répercute sur les structures économiques et les rapports sociaux, en favorisant une économie de marché qui se superpose à l'économie de subsistance en place. Par voie de conséquence, les changements qui s'opèrent dans l'économie de subsistance favorisent l'essor d'une économie agraire, laquelle entraîne l'accumulation de réserves de céréales, la pratique du stockage permettant d'alimenter les circuits commerciaux.

Les céréales deviennent, entre le X^e et le XII^e siècle, la source principale de l'alimentation paysanne, et en particulier le blé à partir du XII^e siècle, aux dépens des ressources forestières et de la consommation de viande. Avec le temps, la coexistence d'une économie de marché et de l'accroissement de la population semble provoquer une rupture dans l'équilibre entre population et production. La production céréalière continue de croître, mais moins rapidement que la population, et cela au détriment de l'élevage (Demurger, 1995). Les systèmes de production deviennent donc insuffisants pour satisfaire les besoins de toute la population. L'une des

conséquences de ces mécanismes est que les différences entre le régime alimentaire des classes paysannes et celui des classes privilégiées s'accroissent de façon très nette.

De ce fait, au milieu et à la fin du Moyen Âge, deux classes sociales profitent d'un privilège alimentaire : l'aristocratie, par tradition, et, désormais, les populations urbaines, protégées par la politique d'approvisionnement des autorités de la ville, qui s'engagent à garantir la présence de denrées alimentaires sur le marché urbain (Flandrin et Montanari, 1996). Dans les classes sociales défavorisées, les aliments d'origine végétale, et en particulier les céréales, sont prédominants dans l'alimentation aux dépens de la viande. Leurs régimes alimentaires perdent, pendant le plein Moyen Âge, la variété caractéristique du haut Moyen Âge.

Les mécanismes précédemment cités, qui se mettent en place pendant le plein Moyen Âge, ont désormais, dans la dernière partie du Moyen Âge, une assise stable. De ce fait, en France, au bas Moyen Âge, l'alimentation est essentiellement d'origine végétale, dominée par les céréales, en majeure partie représentée par le blé. Les légumes et les légumineuses jouent un rôle complémentaire dans la nutrition, notamment en période de crise. Quant à la consommation de fruits, elle est extrêmement limitée, bien qu'en augmentation.

Les différences d'époque s'accompagnent de différences dans les structures sociales et familiales. Le haut Moyen Âge voit évoluer des populations qui ne sont pas encore entrées dans le système féodal, avec des habitudes culturelles encore sous l'influence, à la fois, du monde romain et des coutumes locales et familiales (Fossier, 1990). Dans ce contexte, la famille, au sens élargi du terme, a une place prépondérante. Plus on avance dans le Moyen Âge, plus on entre dans un système féodal. Cette structuration de la société s'accompagne d'un détachement des héritages anciens romains et locaux. Cette évolution se fait sous l'influence marquée de la construction de la chrétienté qui impacte tous les aspects de la vie quotidienne, que ce soit la place de l'enfant, celle de la mère ou l'alimentation. Dans cette nouvelle organisation de la société, la famille perd de son importance et c'est le couple qui devient le noyau de la structure familiale.

Les différences régionales, quant à elles, s'accompagnent d'impératifs culturels, agricoles et économiques différents. Les traditions culturelles régionales peuvent influencer sur les aliments privilégiés ou la proportion de viande dans l'alimentation. Ces choix alimentaires sont importants pour le sujet qui nous intéresse, car ils constitueront la base de l'alimentation de substitution au lait maternel chez les jeunes enfants. Les habitudes alimentaires ne sont pas toujours, ou pas complètement, choisies librement. En effet, elles sont dépendantes de l'environnement (fertilité des terres, clémence du climat) qui impacte la qualité et la quantité des récoltes. Enfin, la gestion économique d'un terroir entre également en jeu dans les choix des récoltes et l'accès aux aliments.

Les différences sociales peuvent prendre deux aspects. On notera une différence d'alimentation en fonction du statut économique et social de la famille, mais aussi en fonction de son mode de vie, rural ou urbain. En effet, plus le niveau socio-économique de la famille est élevé, plus son accès à une alimentation variée (diversités des produits cultivés et accès à la viande) est facilité.

Durant le haut Moyen Âge, l'espace urbain, qui prédomine à l'époque romaine, est progressivement supplanté par un territoire plus rural, avec sa mosaïque de terres cultivées et incultes. Le processus de ruralisation du territoire semble lié, à la fois, aux diverses migrations, à l'installation des populations « barbares » et au déclin des cités romaines (Graham, 1987). Entre la fin du IV^e siècle et le début du VI^e siècle, la ville s'étiole et les gros bourgs ruraux continuent à se dépeupler, au profit de l'habitat dispersé dans les campagnes, provoquant un remodelage urbain. Avec cette ruralisation, le rôle de redistribution des villes disparaît. Mais si la ville a perdu son activité économique, elle continue à imposer les directives politiques et religieuses (Fossier, 1990). Elle conserve également quelques fonctions centralisatrices (la tenue des procès, ou encore l'accueil des foires et des marchés), maintenues par l'installation des palais royaux ou des résidences des comtes de la cité et des évêques, et reste un lieu de rencontre et d'échanges pour toutes les populations rurales rattachées à la cité. Ainsi, la ville est très rurale jusqu'au VIII^e-IX^e siècle. À la fin du haut Moyen Âge, 90 % des hommes demeurent à la campagne, travaillent dans les champs et vivent de l'agriculture. Selon Jean-Louis Flandrin (Flandrin et Montanari, 1996), historien de l'alimentation, le haut Moyen Âge est circonscrit par des conditions de vie générales plutôt favorables, bien que l'on distingue quelques épisodes de famine et d'épidémies (*cf. infra* IV. 2.3.1).

À partir du XI^e siècle, on assiste à une expansion et une intensification du monde urbain. Cette évolution est en partie liée à l'essor rural, puisque le commerce, fonction essentielle de la ville, permet d'abord de vendre le surplus de la production rurale, favorisée par d'importants progrès techniques. Les villes deviennent des centres politiques, économiques et religieux. L'ascension des élites marchandes, l'essor du grand commerce oriental, la vente pour les seigneurs de produits de luxe, les marchés locaux, le développement du bâti, le développement de l'artisanat, en font des zones de forte attractivité. Dans ce contexte, l'essor des villes va de pair avec une croissance démographique qui engendre la disparition des espaces agricoles à l'intérieur des villes et le développement de bourgs qui s'agglomèrent à la ville.

Pour le sujet traité dans ce travail, la différence entre un mode de vie urbain et rural impacte surtout la disponibilité et la volonté de la mère pour l'allaitement, l'exposition au pathogènes (beaucoup plus important en ville), et la facilité d'accès à des laits animaux pour la substitution au lait maternel pendant le processus de sevrage. Pour ce qui est des femmes de statut socioéconomique élevé, l'activité quotidienne consiste à gérer la maison et la domesticité. En ce qui concerne les femmes de classes sociales inférieures, on note des différences entre les villes et les campagnes. Dans les villes, le travail des femmes est souvent lié au travail des matériaux (les cuirs, les peaux, le textile -aux différents stades de fabrication et de commercialisation-), de l'alimentation (boulangerie, poissonnerie, etc.). Ces activités éloignent souvent les mères de leur domicile ce qui constitue un obstacle pour le maintien de l'allaitement maternel. À l'inverse, dans les campagnes, elles travaillent à l'entretien de la maison, du potager, du verger, du poulailler, à la production textile pour la famille, à la traite des vaches, à la fabrication du beurre et du fromage ; elles peuvent aussi participer aux travaux des champs, ce qui leur permet, lorsqu'elles sont mères, d'allaiter leur

nourrisson à la demande. Dans ces conditions, le maintien de l'alimentation exclusif et partiel est, dans la pratique, plus aisé.

Lorsqu'on s'interroge sur la qualité de l'alimentation de supplantation lors du sevrage au lait maternel, on observe plusieurs différences dues à l'évolution du système d'exploitation des ressources entre le début et la fin du Moyen Âge. On peut raisonnablement penser que cette transition fut mieux supportée par les nourrissons du haut Moyen Âge, du fait d'un meilleur équilibre nutritionnel de l'adulte qui bénéficiait de ressources largement diversifiées (végétaux et alimentation carnée). Cet équilibre devrait logiquement se répercuter dans la nutrition introduite chez l'enfant progressivement privé du lait maternel. À l'inverse, l'alimentation du milieu et de la fin du Moyen Âge est largement dominée par la production céréalière et se caractérise par une raréfaction des différentes viandes dans le régime alimentaire. Cette évolution se ressent de façon plus marquée dans les classes populaires, comparativement aux classes sociales plus privilégiées, et plus fortement, et plus rapidement, dans les campagnes qu'en milieu urbain. Cependant, la relation entre qualité de l'alimentation de supplantation, dans le cadre du sevrage, et santé de l'enfant, ne peut expliquer à elle seule un phénomène soumis à de multiples facteurs.

IV.2.3.2. Contexte environnemental et sanitaire

Les évolutions culturelles, sociales et économiques sont tributaires des impératifs agricoles, eux-mêmes soumis à des contraintes, telles que la propriété des terres cultivées ou le climat, qui impactent la qualité et la quantité des récoltes. Le climat de l'Europe présente des températures moyennes. Dans l'ensemble, les territoires qui bordent la Méditerranée sont soumis à des étés chauds et pluvieux et à des hivers pluvieux. En s'éloignant des rivages, vers le nord, les étés restent chauds, mais deviennent moins pluvieux. Quant aux hivers, ils sont plus secs en Europe centrale et deviennent plus froids en se rapprochant des frontières de l'Est (Labeyrie, 1985). Si l'on considère le climat dans son évolution à travers le temps, bien qu'il soit globalement plus rude au haut Moyen Âge que durant l'Antiquité (avec des températures inférieures à celles du début du XX^e siècle), aucune période particulièrement froide (Bodri et Čermác, 1995; 1997; Pfister *et al.*, 1998) ni d'hiver très rigoureux (Pfister *et al.*, 1998; cités par Garcin, 2009) ne sont enregistrés comme lors du « petit âge glaciaire » aux XVI^e-XVIII^e siècles. En fait, depuis le début de notre ère, l'histoire du climat en Europe occidentale est marquée par deux vagues de froid, l'une débutant vers le VII^e siècle, l'autre vers le XIV^e siècle. Ces deux phases sont séparées par une période plus clémente, avec une augmentation des températures, à partir du VIII^e-IX^e, couramment appelée par les climatologues « petit optimum médiéval » qui s'étendrait jusqu'au XIII^e-XIV^e siècle (selon les données historiques, archéologiques et environnementales), mais les spécialistes restent prudents sur les limites spatio-temporelles de cet épisode inhabituellement chaud (Brochier, 1983; Alexandre, 1987; Le Roy Ladurie et Rousseau, 2012). Il se caractérise par une longue série d'étés chauds et secs en Europe occidentale, qui favorisent l'agriculture et donc l'alimentation. De ce fait, dans la seconde partie du haut Moyen Âge, l'ancienne Gaule Narbonnaise, qui intègre le site d'Hières-sur-Amy, présente un climat globalement plus sec et moins contraignant pour les activités agropastorales implantées en milieux fluviaux (Berger et

Bravard, 2012). Le climat semble donc clément pendant le haut Moyen Âge, ce qui pourrait avoir favorisé la diversité et la quantité des ressources disponibles, d'où de rares épisodes de famine.

Si on admet que le régime alimentaire est équilibré pendant le haut Moyen Âge, la faible espérance de vie et la familiarité avec la mort semblent liées à l'importance des maladies infectieuses (Flandrin et Montanari, 1996). La plus redoutée d'entre elles, la peste, devient endémique en Méditerranée à partir de la seconde moitié du VI^e siècle (Dumézil, 2013).

De plus, certaines études ont mis en évidence de mauvaises conditions sanitaires liées à l'urbanisation, comme l'accumulation des déchets, la pollution de l'eau, l'augmentation de l'exposition aux agents pathogènes infectieux et aux parasites (Betsinger, 2007). On peut, inversement, envisager que la ruralisation du territoire serait plutôt un facteur favorable aux conditions sanitaires d'une population, mais cela reste à démontrer.

Le XIII^e siècle européen est marqué par un incident climatique violent, souvent qualifié de « poussée glaciaire du XIII^e siècle ». Le début du XIV^e connaît une brusque dégradation des températures, qui constitue un prélude à une période de froid prolongée appelée « petit âge glaciaire » par les climatologues, et qui perdure jusqu'à la fin du XVII^e siècle dans le nord de l'Europe occidentale (Le Roy Ladurie et Rousseau, 2012), et jusqu'à la moitié du XIX^e siècle (Alexandre, 1987) plus au sud. Il se caractérise, pendant les années les plus rudes, par des accidents céréaliers, une diminution des récoltes, des périodes de disette/famine, une hausse des prix, une baisse de la natalité et de la nuptialité, une augmentation de la mortalité (Le Roy Ladurie et Rousseau, 2012). Parallèlement, aux XII^e et XIII^e siècles, bien que la peste ne s'abatte pas sur l'Europe, plusieurs fléaux, moins meurtriers, mais significatifs, affectent le continent. Plusieurs maladies comme la lèpre ou le mal des ardents (une intoxication provoquée par l'ergot de seigle) sont bien documentées dans les sources écrites. Si les maladies qui causent le plus de morts sont les infections, les maladies carenciales et les affections osseuses congénitales ou accidentelles, ont causé, elles aussi, de nombreux décès (Flandrin et Montanari, 1996). De façon générale, la famine (et donc la sous-alimentation) n'est pas la cause directe principale de la mort, mais ce sont plutôt des maladies liées à la sous-alimentation, telles que le typhus, la dysenterie ou les fièvres qui sont responsables d'une bonne partie des décès.

Le XV^e siècle est moins froid que le précédent, mais reste affecté par la rigueur du « petit âge glaciaire ».

Pendant la première moitié du XVI^e siècle, le climat se radoucit légèrement, contrairement à la seconde moitié où un climat rafraîchi est défavorable à l'agriculture (Le Roy Ladurie et Rousseau, 2012).

L'observation du climat nous apporte donc des arguments expliquant certains comportements alimentaires sans prétendre, à elle seule, expliquer l'évolution de l'alimentation dans le temps, ni l'expansion ou la diminution des populations humaines.

Dans un contexte d'expansion démographique, d'ouverture économique, de transformation de l'encadrement de la main d'œuvre et de transformation de l'exploitation des ressources, s'opère, à partir du plein Moyen Âge, une modification des systèmes alimentaires. L'augmentation continue d'une population semble favoriser la malnutrition lorsque les systèmes de production deviennent

insuffisants au regard de l'accroissement de la population, ce qui peut provoquer des problèmes de croissance des enfants (Betsinger, 2007). Cependant, il est difficile de déterminer à partir de quel seuil, et dans quelle mesure, l'augmentation continue de la population entraîne des insuffisances quantitatives et qualitatives sur le plan de la nutrition.

Certains symboles alimentaires hérités de la culture méditerranéenne, tels que la viande, et notamment la viande de porc, caractérisent, malgré le glissement culturel vers le nord, la culture européenne continentale chrétienne. Le pain, aliment de base islamique, déjà présent dans la culture romaine, prend dans le monde médiéval européen une valeur caractéristique de l'alimentation chrétienne.

Au cours de la seconde moitié du Moyen Âge européen se développe, concrètement et symboliquement, une opposition entre les modèles alimentaires rural et urbain. Ce contraste oppose, dans le Moyen Âge européen l'économie de subsistance et le marché.

Le Moyen Âge impose des codes sociaux alimentaires en identifiant certains types de denrées comme des attributs attachés à une classe sociale. Parallèlement, chaque catégorie sociale s'approprie une part inégale de l'ensemble des ressources agraires, sylvicoles et pastorales disponibles, et leur donne des valeurs symboliques différentes, ce qui aboutit à la construction de systèmes alimentaires propres (Flandrin et Montanari, 1996). La nourriture devient alors représentative de l'ordre établi.

Si l'on prend en compte ce qui précède, les populations du haut Moyen Âge d'Hières-sur-Amby et de Saint-Martin-des-Champs évoluent dans une période relativement stable, entrecoupée de phases d'instabilité liées aux mouvements de populations des IV^e-V^e siècles et IX^e-X^e siècles, et aux guerres internes au VI^e siècle. La population, majoritairement rurale, a une alimentation largement dominée par les ressources sauvages d'une grande diversité, aussi bien végétale que carnée, et complétée par une agriculture à dominante céréalière. Le climat semble avoir été clément dans l'ensemble et contribuer à la définition d'un environnement propice à la production des ressources naturelles. Il en résulte un cadre politique, alimentaire et sanitaire général plutôt favorable à la santé de la population.

De leur côté, les populations du bas Moyen Âge, à l'exemple de celles ayant vécu à Grenoble entre le XIII^e et le XVI^e siècle, ont dû s'adapter à un contexte particulier défini par des périodes d'instabilité politique, économique, climatique et sanitaire, pour trouver un équilibre entre les modes de consommation et les systèmes de production (Flandrin et Montanari, 1996; Herrscher, 2003).

IV.3. RÉSULTATS

IV.3.1. Saint-Martin-des-champs

IV.3.1.1. Échantillon CNAM 466b

Le rapport Sr/Ca témoigne d'une période d'allaitement exclusif, dont la durée est estimée entre 12 et 15 semaines. Ensuite, la courbe du ratio Sr/Ca augmente jusqu'à 23 à 31 semaines après la naissance, ce qui indique l'âge du sevrage complet. Cependant, la courbe augmente à nouveau 6 à 8 semaines après le sevrage complet, ce qui peut suggérer la reprise de l'alimentation lactée.

L'enfant de Saint-Martin-des-Champs, mort entre 2 et 4 ans, a connu une période d'allaitement exclusif courte, confirmée par les deux méthodes biochimiques (l'analyse isotopique et l'analyse des oligoéléments) et précisée par l'observation des oligoéléments 12 et 15 semaines. Elle est suivie d'une période d'alimentation mixte jusqu'à 25-31 semaines. Les analyses semblent refléter une reprise de l'allaitement maternel entre 31 et 39 semaines. L'observation des cernes de croissance dans la microstructure de l'émail témoigne de nombreux stress durant l'enfance (d'origine physiologique ou psychologique) qui traduisent un état de fragilité de l'enfant. La reprise éventuelle de l'allaitement maternel peut être liée à cet état.

N° d'individu	classe d'âge	sexe	siècle	Début de la diversification alimentaire	sevrage	Âge au décès
CNAM 466b	enfant	ind.	VIII ^e -X ^e	12-15 sem	23-31 sem	2-4 ans

Fig. 33. Tableau des résultats pour Saint-Martin-des-Champs

IV.3.2. Les Grands peupliers

IV.3.2.1. Échantillon GP 07

Le rapport Sr/Ca est en baisse jusqu'à un âge estimé entre 28 et 36 semaines, ce qui indique que l'enfant est nourri au lait maternel dès la naissance et qu'il reçoit une alimentation diversifiée vers 7-9 mois. La courbe du rapport Sr/Ca connaît ensuite une tendance à la baisse qui débute entre 42 et 55 semaines et qui traduit l'âge du sevrage complet. On note que l'enfant a survécu au sevrage puisque l'âge au décès est estimé à 10 ans.

IV.3.2.2. Échantillon GP 18

Le rapport Sr/Ca est en baisse jusqu'à un âge estimé entre 37 et 47 semaines, signe d'un allaitement exclusif jusqu'à cet âge, c'est-à-dire au-delà de 8 mois. La courbe du rapport Sr/Ca change alors de tendance, ce qui traduit l'introduction d'une alimentation diversifiée. La courbe reste en hausse jusqu'à la fin de l'enregistrement dentaire, ce qui indique que l'enfant recevait

encore une alimentation mixte au moment de la fin de l'enregistrement estimé à 44-57 semaines. On note qu'il s'agit d'un enfant n'ayant pas survécu au-delà de 10 ans.

IV.3.2.3. Échantillon GP 32

Le rapport Sr/Ca est en baisse avant la naissance et jusque 29 à 36 semaines, ce qui indique un allaitement exclusif à partir de la naissance et pendant toute cette période. La courbe commence ensuite à augmenter, suggérant le début d'une alimentation diversifiée. Cette tendance continue jusque 33 à 44 semaines, âge auquel elle marque une nouvelle tendance à la baisse, ce qui traduit l'âge du sevrage complet.

IV.3.2.4. Échantillon GP 38.1

Le rapport Sr/Ca est en diminution au moment de la naissance, ce qui traduit un allaitement exclusif à partir de la naissance. Cette tendance perdure jusqu'à la fin de l'enregistrement dentaire dont nous disposons (du fait de la période de l'enfance pendant laquelle se forme l'émail et compte tenu de l'usure de la dent qui détruit la fin de l'enregistrement présent dans l'émail disparu), estimé entre 39 et 51 semaines, ce qui suggère que l'enfant n'a pas reçu d'alimentation autre que le lait maternel avant cet âge. Par ailleurs, l'âge au décès de cet enfant est estimé à 5 ans, on peut donc supposer que la mort n'est pas directement liée à cet allaitement prolongé.

IV.3.2.5. Échantillon GP 48

Le rapport Sr/Ca est en baisse jusqu'à 18-23 semaines, ce qui indique un allaitement exclusif de moins de 6 mois. La courbe du rapport Sr/Ca augmente ensuite, traduisant l'introduction d'une alimentation diversifiée. Une nouvelle tendance à la baisse entre 22 et 28 semaines marque l'arrêt définitif de l'allaitement maternel (Figure 7b). L'estimation de l'âge au décès n'a pas été possible.

N° d'individu	classe d'âge	sexe	siècle	Début de la diversification alimentaire	sevrage	Âge au décès
GP 07	enfant	ind.	IX ^e -X ^e	28-36 sem.	44-55 sem.	10 ans
GP 18	enfant	ind.	IX ^e -X ^e	37-47 sem.		moins de 10 ans
GP 32	enfant	ind.	IX ^e -X ^e	29-36 sem.	33-44 sem.	
GP 38.1	enfant	ind.	IX ^e -X ^e			5 ans
GP 48	enfant	ind.	IX ^e -X ^e	18-23 sem.	22-28 sem.	estimation impossible

Fig. 34. Tableau des résultats pour les Grands Peupliers

IV.3.3. **Saint-Laurent-de-Grenoble**

IV.3.3.1. Échantillon SL 48

Il s'agit d'une femme adulte inhumée au sud de l'église, datée entre 1320 et 1430.

Le rapport Sr/Ca diminue dès avant la naissance et jusqu'à 15-20 semaines après la naissance, puis il augmente ensuite. Nous interprétons cette variation comme l'indice de l'introduction d'une alimentation différente du lait maternel. Dans cette hypothèse, l'individu a donc été allaité exclusivement 4 à 5 mois. Après une tendance à la hausse, la courbe des valeurs Sr/Ca diminue à nouveau, aux alentours de 17-22 semaines après la naissance, ce que nous estimons être l'âge du sevrage complet de l'individu, soit deux semaines après le début de la diversification alimentaire. La durée de l'allaitement exclusif n'est pas très éloignée des exigences biologiques et sanitaires du nourrisson, mais la période de transition alimentaire semble un peu courte.

D'un point de vue histologique, on n'observe pas de stress particulier après le sevrage.

IV.3.3.2. Échantillon SL 124

Il s'agit d'un homme, daté entre le XIII^e et le début du XIV^e siècle.

Le rapport Sr/Ca baisse avant et après la naissance, jusqu'à 10-13 semaines, ce qui indique un allaitement exclusif et durant toute cette période, soit 2,5 / 3 mois. Ensuite, le rapport Sr/Ca amorce une tendance à la hausse. Cette augmentation dure jusqu'à 26-33 semaines après la naissance, c'est-à-dire entre 6,5 et 8,5 mois, puis diminue à nouveau, ce qui nous permet d'estimer le sevrage complet à cet âge. Cependant, on observe une nouvelle tendance à la hausse des valeurs Sr/Ca entre 33 et 43 semaines après la naissance, ce qui pourrait suggérer une reprise de l'allaitement maternel.

D'un point de vue histologique, on observe plusieurs marqueurs de stress, notamment à proximité de la surface de l'émail, au niveau de la nouvelle hausse du rapport Sr/Ca, moins marqués toutefois que ceux que l'on peut voir au cours de l'enfance.

IV.3.3.3. Échantillon SL 154

Il s'agit d'un homme inhumé au sud de l'église, daté entre 1320 et 1430.

Le rapport Sr/Ca est en diminution au moment de la naissance, ce qui reflète un allaitement exclusif à partir de la naissance. Cette tendance perdure jusqu'à 8 à 10 semaines, ensuite, la courbe du rapport Sr/Ca augmente, ce qui indique l'introduction d'une alimentation différente du lait maternel à ce moment. On peut considérer que, pendant son enfance, cet homme a reçu un allaitement exclusif de courte durée. La courbe des valeurs Sr/Ca conserve cette tendance jusqu'à la fin de l'enregistrement dont nous disposons. L'individu recevait donc une alimentation mixte au moins jusqu'à 16 à 21 semaines. La courte durée d'enregistrement s'explique par l'usure de la dent.

L'observation microscopique de la coupe dentaire révèle une bande de stress à la fin de la zone d'enregistrement (entre 4 et 5 mois).

IV.3.3.4. Échantillon SL 262

Il s'agit d'un homme adulte inhumé place Saint-Laurent, daté entre 1320 et 1430.

Le rapport Sr/Ca est en baisse jusqu'à un âge estimé, entre 22 et 28 semaines, signe d'un allaitement exclusif d'environ 6 mois. La courbe du rapport Sr/Ca change alors de tendance, ce qui traduit l'introduction d'une alimentation diversifiée. La courbe reste en hausse jusqu'à la fin de l'enregistrement dentaire, ce qui indique que cet homme recevait encore une alimentation mixte à la fin de l'enregistrement, soit très peu de temps après l'introduction d'une alimentation diversifiée.

Deux lignes de stress, prenant la forme de larges bandes sur plus de la moitié de leur longueur, sont observables histologiquement. Elles traduisent des perturbations pendant l'enfance. S'il s'agit de problèmes de santé, cela a pu être un élément incitant à la prolongation de l'allaitement maternel.

IV.3.3.5. Échantillon SL 287

Il s'agit d'une femme adulte inhumée place Saint-Laurent, datée entre le XIII^e et le début du XIV^e siècle.

Le rapport Sr/Ca est en baisse depuis la période prénatale et amorce une tendance à la hausse entre 5 et 6 semaines, ce qui suggère que, nourrisson, cette femme a reçu un allaitement maternel exclusif pendant cette période, avant qu'une alimentation différente du lait maternel ne soit introduite. On note que l'allaitement exclusif est d'une durée inférieure à 2 mois, ce qui ne permet pas à l'enfant d'acquérir toutes les défenses immunitaires nécessaires à sa santé. Une nouvelle tendance à la hausse de la courbe des valeurs Sr/Ca intervient entre 9 et 11 semaines après la naissance, indiquant l'âge du sevrage complet. La période de transition s'étend donc sur 1 mois-1 mois ½. L'arrêt complet de l'allaitement semble là aussi précoce.

L'examen histologique montre de nombreuses lignes de croissance particulièrement marquées, ce qui indique des stress multiples chez l'individu tout au long de l'enfance, pendant la période de formation de l'émail.

IV.3.3.6. Échantillon SL 304

Il s'agit d'un homme adulte inhumé place Saint-Laurent, daté entre le XIII^e et le début du XIV^e siècle.

Le rapport Sr/Ca est en baisse avant et après la naissance, jusque 6 à 7 semaines, ce qui indique un allaitement exclusif à partir de la naissance sur une durée inférieure à deux mois. La courbe commence ensuite à augmenter, suggérant l'introduction d'une alimentation diversifiée. Cette tendance continue jusqu'à 7 à 9 semaines, âge auquel la courbe des valeurs Sr/Ca diminue à nouveau, ce qui traduit l'âge du sevrage complet. Cet individu a donc connu un allaitement exclusif bref et une période d'alimentation mixte également de courte durée (1 à 2 semaines).

L'observation histologique n'a pas révélé de marqueurs de stress significatifs dans la structure de l'émail, ce qui nous laisse penser que cet homme a eu une bonne santé pendant son enfance. Cependant, cet échantillon est particulièrement usé. L'usure s'étend sur toute la couronne et

atteint la dentine sur la partie occlusale de la dent. De ce fait, nous n'avons accès qu'à une petite partie de l'émail. Le manque de matière ne permet pas d'avoir des conclusions claires.

IV.3.3.7. Échantillon SL 327

Il s'agit d'un adulte dont le sexe n'a pas été identifié, inhumé place Saint-Laurent et daté entre le XIII^e et le début du XIV^e siècle.

Le rapport Sr/Ca montre une diminution depuis la période prénatale et jusqu'à 23 à 33 semaines. Elle marque ensuite une tendance à la hausse. Cela suggère que l'alimentation mixte a commencé à cet âge. La courbe des valeurs Sr/Ca ne connaît pas d'autres variations jusqu'à la fin de notre enregistrement, ce qui indique que l'individu recevait encore une alimentation mixte à ce moment.

Sur le plan histologique, on peut voir une large bande de stress dont la fin coïncide avec l'introduction d'une alimentation mixte. On peut se demander si la mère a attendu que l'enfant ait un état de santé stable pour diversifier son alimentation.

IV.3.3.8. Échantillon SL 526

Il s'agit d'un homme adulte inhumé au sud de l'église, daté entre 1320 et 1430.

Le rapport Sr/Ca est en diminution au moment de la naissance, ce qui traduit un allaitement exclusif à partir de la naissance. Cette tendance se prolonge jusqu'à 25 à 32 semaines ; ensuite, la courbe du rapport Sr/Ca augmente, ce qui indique l'introduction d'une alimentation différente du lait maternel. Cet individu a donc été exclusivement allaité entre 6 et 8 mois. La courbe des valeurs Sr/Ca montre une même évolution jusqu'à la fin de l'enregistrement, ce qui suggère qu'il n'était pas encore complètement sevré à ce moment.

Les observations histologiques ne présentent pas de caractéristiques notables.

IV.3.3.9. Échantillon SL 531

Il s'agit d'un adulte inhumé au sud de l'église, daté entre 1440 et le début du XVI^e siècle.

Le rapport Sr/Ca est en baisse depuis avant la naissance et jusqu'à la fin de l'enregistrement. Ce type de courbe suggère que cet individu était encore exclusivement allaité à la fin de l'enregistrement. L'enregistrement dont nous disposons prend fin entre 14 et 18 semaines après la naissance, soit entre 3,5 et 4,5 mois.

Sur la coupe dentaire, on voit apparaître une large bande de stress, sur toute la longueur, qui débute au niveau de la ligne néonatale. Des complications sanitaires peuvent avoir favorisé une certaine attente pour l'introduction d'une alimentation diversifiée.

IV.3.3.10. Échantillon SL 538

Il s'agit d'une femme inhumée au sud de l'église, datée entre 1320 et 1430.

Le rapport Sr/Ca est en baisse jusqu'à 3 – 3,5 semaines, ce qui constitue l'estimation de l'âge de l'introduction d'une alimentation différente du lait maternel. Après ce laps de temps, la courbe des valeurs Sr/Ca augmente jusqu'à 14 à 18 semaines après la naissance, ce qui indique l'âge du

sevrage complet. Cette femme n'a pas été suffisamment allaitée exclusivement et partiellement, au regard des besoins du nourrisson selon nos connaissances médicales actuelles.

Sur la coupe histologique, on observe de nombreuses lignes de croissances formées dans des conditions de stress. On peut envisager un lien avec la brièveté de l'allaitement exclusif et partiel. Cependant, on relève quelques légers stress avant la naissance, cette interprétation doit donc être considérée avec précaution.

IV.3.3.11. Échantillon SL 557

Il s'agit d'une femme adulte inhumée au sud de l'église, datée entre 1430 et le début du XVI^e siècle.

Le rapport Sr/Ca est en baisse jusqu'à 4 à 5 jours après la naissance, ce qui indique un allaitement maternel exclusif de moins d'une semaine. Le rapport augmente ensuite jusqu'à 12 à 15 semaines, suggérant l'âge du sevrage complet. Cette femme a donc été allaitée exclusivement très brièvement, et partiellement assez peu de temps (3 ou 4 mois); elle a connu une période de transition relativement progressive.

Les observations histologiques ne présentent pas de caractéristiques notables. Cependant, il faut noter que l'usure de cette dent nous prive de toute la partie occlusale de l'émail, ce qui réduit considérablement notre champ d'observation.

IV.3.3.12. Échantillon SL 558

Il s'agit d'un homme inhumé au sud de l'église, daté entre le XIII^e et le début du XIV^e siècle.

Le rapport Sr/Ca est en baisse jusqu'à 11-15 semaines, ce qui indique un allaitement exclusif inférieur à 6 mois. La courbe du rapport Sr/Ca augmente ensuite, traduisant l'introduction d'une alimentation diversifiée. Une nouvelle tendance à la baisse entre 25 et 31 semaines marque l'arrêt définitif de l'allaitement maternel.

Cependant, une nouvelle tendance à la hausse entre 30 à 39 semaines laisse penser que cet homme a été à nouveau allaité après un premier sevrage complet. Cette tendance est observée jusqu'à la fin de l'enregistrement, peu de temps après cette nouvelle variation. Cette pratique pourrait s'expliquer par le développement d'une maladie dans l'enfance, probablement dans le but de donner à l'enfant affaibli une nourriture non contaminée et plus facile à digérer.

Cette hypothèse est soutenue par la présence de stries de Retzius particulièrement marquées en épaisseur et en longueur sur la coupe histologique dentaire. Ce cerne de croissance se présente comme une large bande foncée qui s'achève à proximité de la surface de l'émail.

IV.3.3.13. Échantillon SL 593

Il s'agit d'une femme inhumée au sud de l'église, datée entre le XIII^e et le début du XIV^e siècle.

Le rapport Sr/Ca est en baisse jusqu'à 1,5-2 semaines, ce qui indique un allaitement maternel exclusif dès la naissance et qui dure 1,5 à 2 semaines, ce qui est particulièrement court. La courbe est alors en augmentation jusqu'à un âge estimé entre 6 et 8 semaines. À ce moment, la courbe amorce à nouveau une tendance à la diminution, indiquant le sevrage complet. Le sevrage

complet, qui intervient entre 1,5 mois et 2 mois est relativement précoce. La transition, quant à elle, est assez progressive.

IV.3.3.14. Échantillon SL 946

Il s'agit d'un adulte inhumé au sud de l'église, daté entre 1320 et 1430.

Le rapport Sr/Ca est en baisse avant et après la naissance, jusqu'à 3 – 4 semaines, ce qui indique un allaitement exclusif à partir de la naissance et pendant toute cette période. La courbe commence ensuite à augmenter, suggérant le début d'une alimentation diversifiée. Cette tendance continue jusque 16 à 20 semaines, âge auquel elle marque une nouvelle tendance à la baisse, ce qui traduit l'âge du sevrage complet. On peut considérer que cet individu a reçu un allaitement maternel exclusif très bref (maximum 1 mois) et un allaitement complété par une alimentation mixte d'un maximum de 4 mois, avec une transition assez progressive.

IV.3.3.15. Échantillon SL 1144

Il s'agit d'une femme adulte inhumée au sud de l'église, datée entre 1430 et le début du XVI^e siècle.

Le rapport Sr/Ca diminue jusqu'à 42-53 semaines, ce qui suggère l'âge de l'introduction d'une alimentation différente du lait maternel. L'interprétation de cet échantillon pose un problème, car elle suggère un allaitement exclusif de plus de 10 mois, ce qui semble peu habituel. La tendance en augmentation perdure jusqu'à la fin de l'enregistrement estimé entre 44 et 56 semaines après la naissance, soit peu de temps après le début de la diversification. Nous ne pouvons donc pas connaître l'âge du sevrage complet ni avoir une idée de la durée de la transition.

IV.3.3.16. Échantillon SL 1327

Il s'agit d'un enfant, mort entre 1,3 et 1,7 ans (Herrscher, 2003; d'après des méthodes s'appuyant sur les indicateurs dentaires, Iscan, 1989; Ubelaker, 1989; Smith, 1991; Liversidge *et al.*, 1993; Liversidge 1995, 1998).

La période d'allaitement exclusif est absente ou quasi absente. L'augmentation du ratio Sr/Ca débute juste après la naissance, ce qui indique l'introduction d'une alimentation diversifiée très précoce. La période pendant laquelle l'enfant reçoit une alimentation mixte s'étend sur 4 à 5 semaines. Puis la courbe des valeurs Sr/Ca chute, indiquant le sevrage complet de l'enfant.

L'enfant de Saint-Laurent de Grenoble, mort entre 1,3 et 1,7 ans n'a pas reçu d'allaitement exclusif, ou très brièvement, et a connu un processus de sevrage de courte durée. Les analyses élémentaires permettent de préciser l'âge du sevrage complet de l'enfant à 4 ou 5 semaines. Par ailleurs, l'étude anthropologique a démontré un état pathologique de l'enfant (*cribra orbitalia* bilatérales, lésions endocrâniennes d'origine infectieuse) (Herrsher, 2003). Cet état pathologique peut être une conséquence du sevrage précoce, du fait de la santé de la mère (ou de la nourrice), des croyances de la mère et de l'entourage sur la qualité du lait (*cf. supra* I. 2.2.1.), ou du refus de l'allaitement par l'enfant, souvent observé dans le cas d'enfants gravement malades et/ou en stade terminal (*cf. supra* I. 2.2.2).

N° d'individu	classe d'âge	sexe	siècle	Début de la diversification alimentaire	sevrage	Âge au décès
48	Adulte	F	1320-1430	15-20 sem	17-22 sem	
124	Adulte	M	13 ^e / début 14 ^e	10-13 sem	26-33 sem	
154	Adulte	M	1320 / 1430	8-10 sem		
262	Adulte	M	1320 / 1430	21,5-28 sem		
287	Adulte	F	13 ^e / début 14 ^e	5-6 sem	9-11 sem	
304	Adulte	M	13 ^e / début 14 ^e	6-7 sem	7-9 sem	
327	Adulte	?	13 ^e / début 14 ^e	23-33 sem		
526	Adulte	M	1320 / 1430	25-32 sem		
531	Adulte	?	1430 / début 16 ^e			
538	Adulte	F	1320 / 1430	3-3,5 sem	14-18 sem	
557	Adulte	F	1430/ début 16 ^e	4-5 jours	11,5-14,5 sem	
558	Adulte	M	13 ^e / début 14 ^e	11-15 sem	25-31 sem	
593	Adulte	F	13 ^e / début 14 ^e	1,5-2 sem	6-8 sem	
946	Adulte	?	1320 / 1430	3-4 sem	16-20 sem	
1144	Adulte	F	1430/ début 16 ^e	42-53 sem	44-56 sem	
1327	Enfant	ind.	1430/ début 16 ^e	peu/pas d'allaitement exclusif	4-5 sem	1,3-1,7 ans

Fig. 35. Tableau des résultats pour Saint-Laurent de Grenoble.

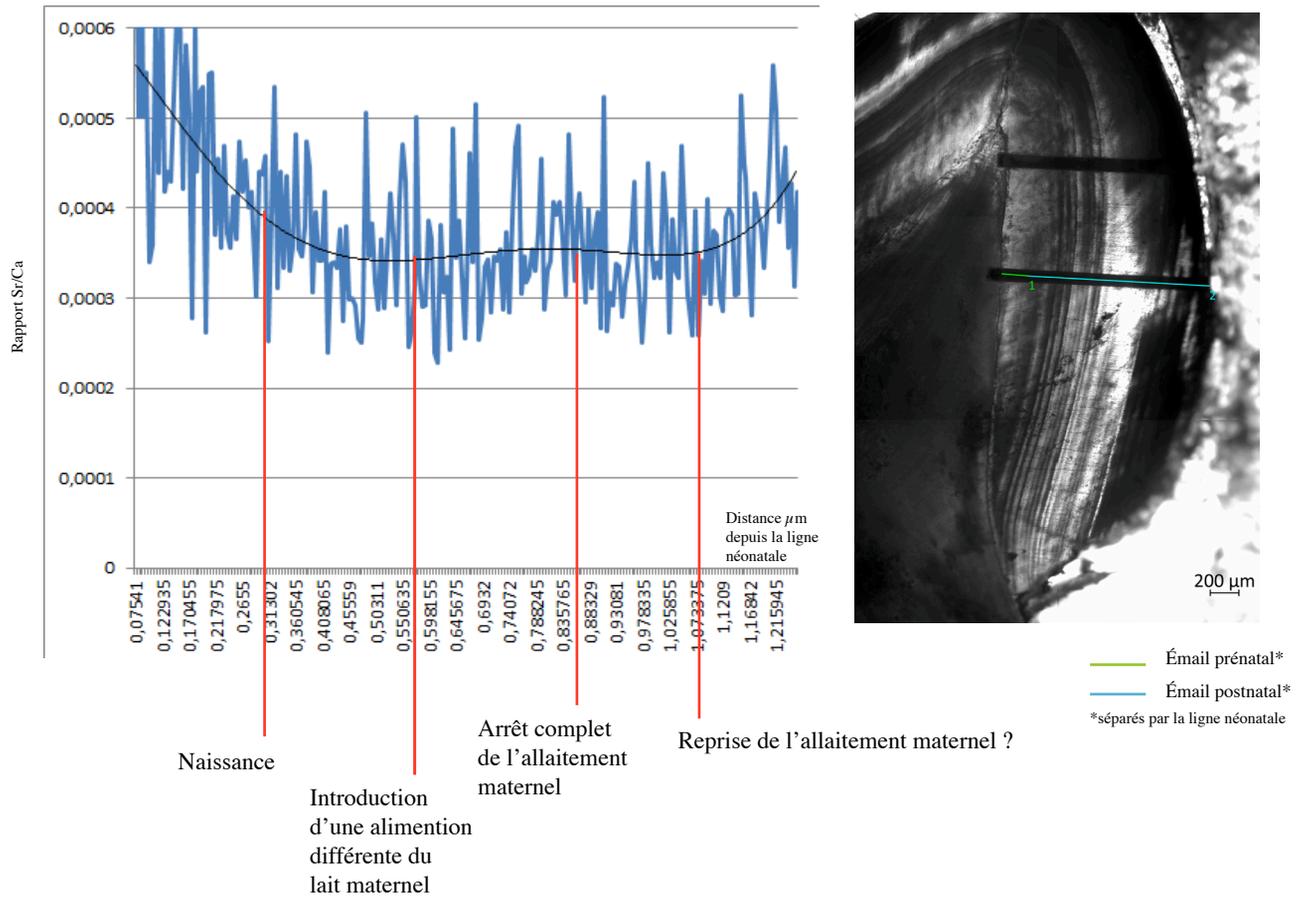


Fig. 36. Représentation des résultats pour l'échantillon CNAM 466b

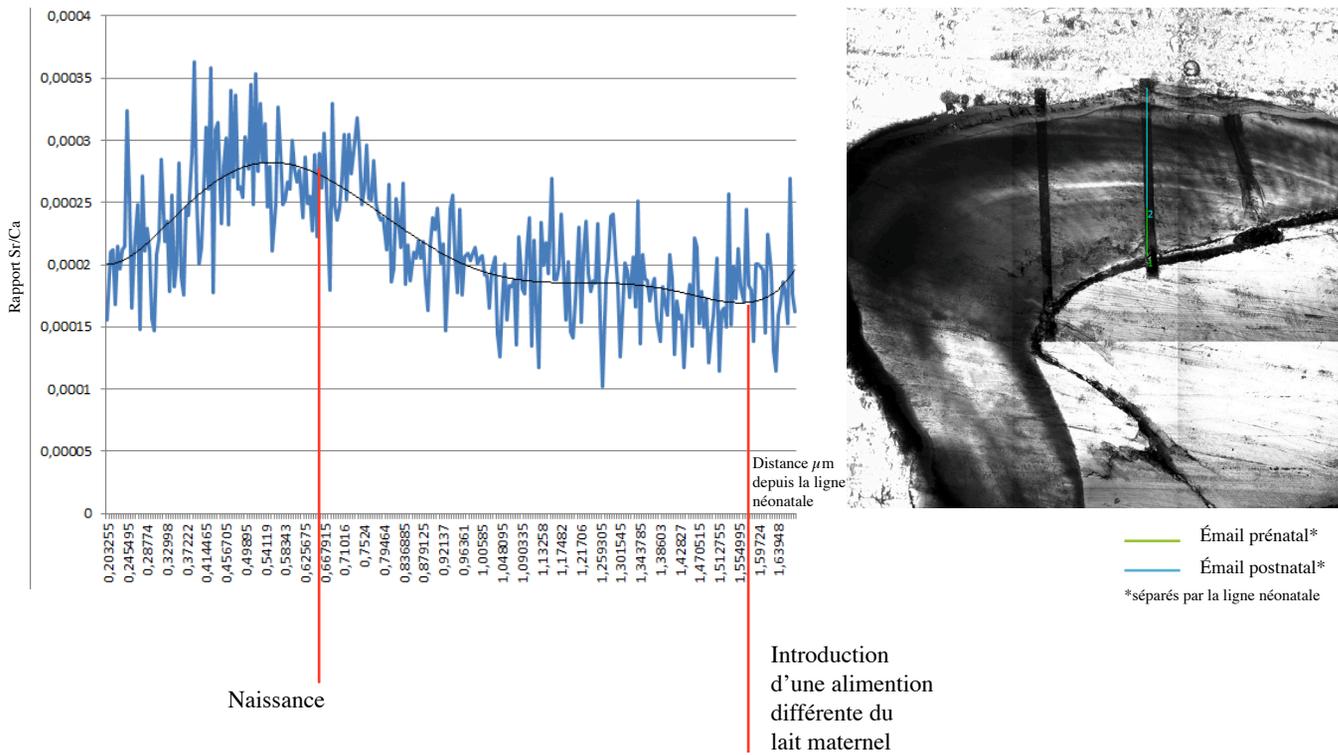


Fig. 37. Représentation des résultats pour l'échantillon GP 07

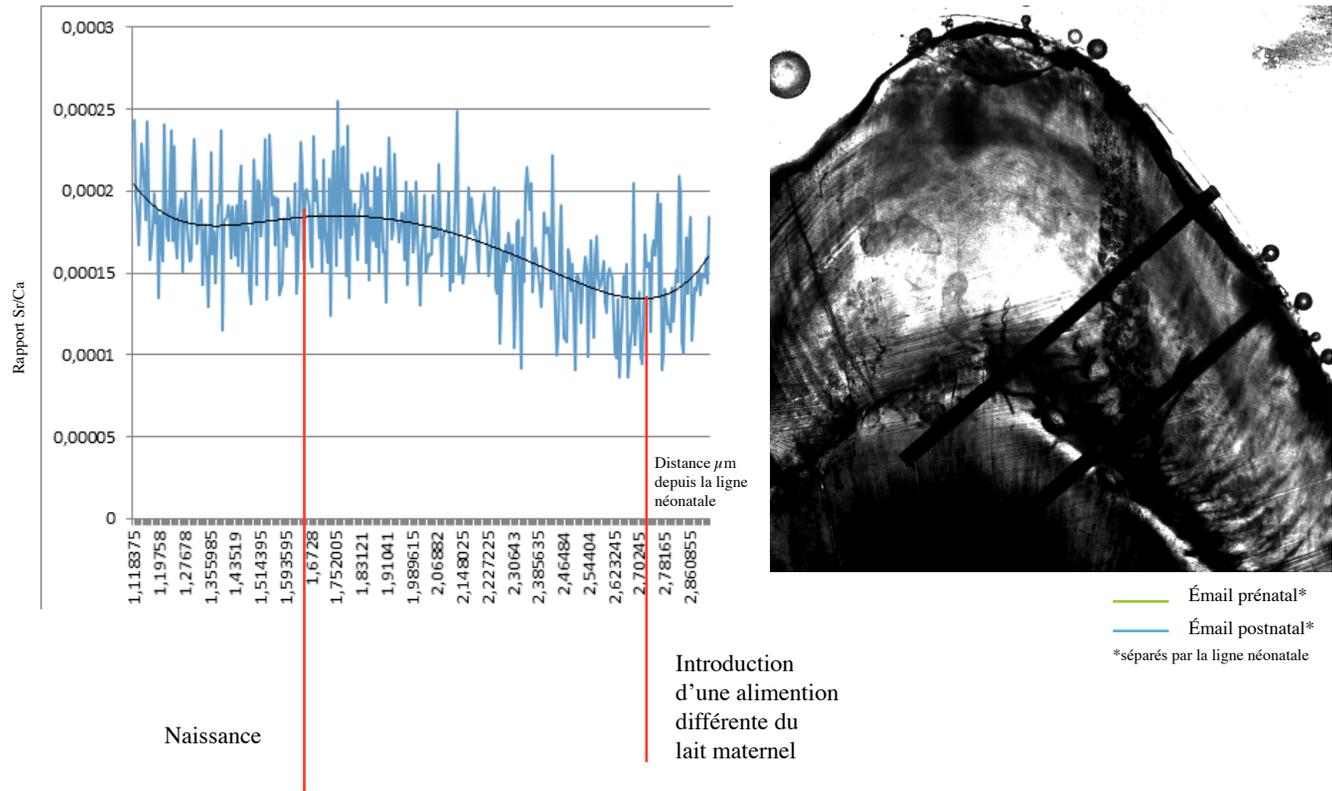


Fig. 38. Représentation des résultats pour l'échantillon GP 18

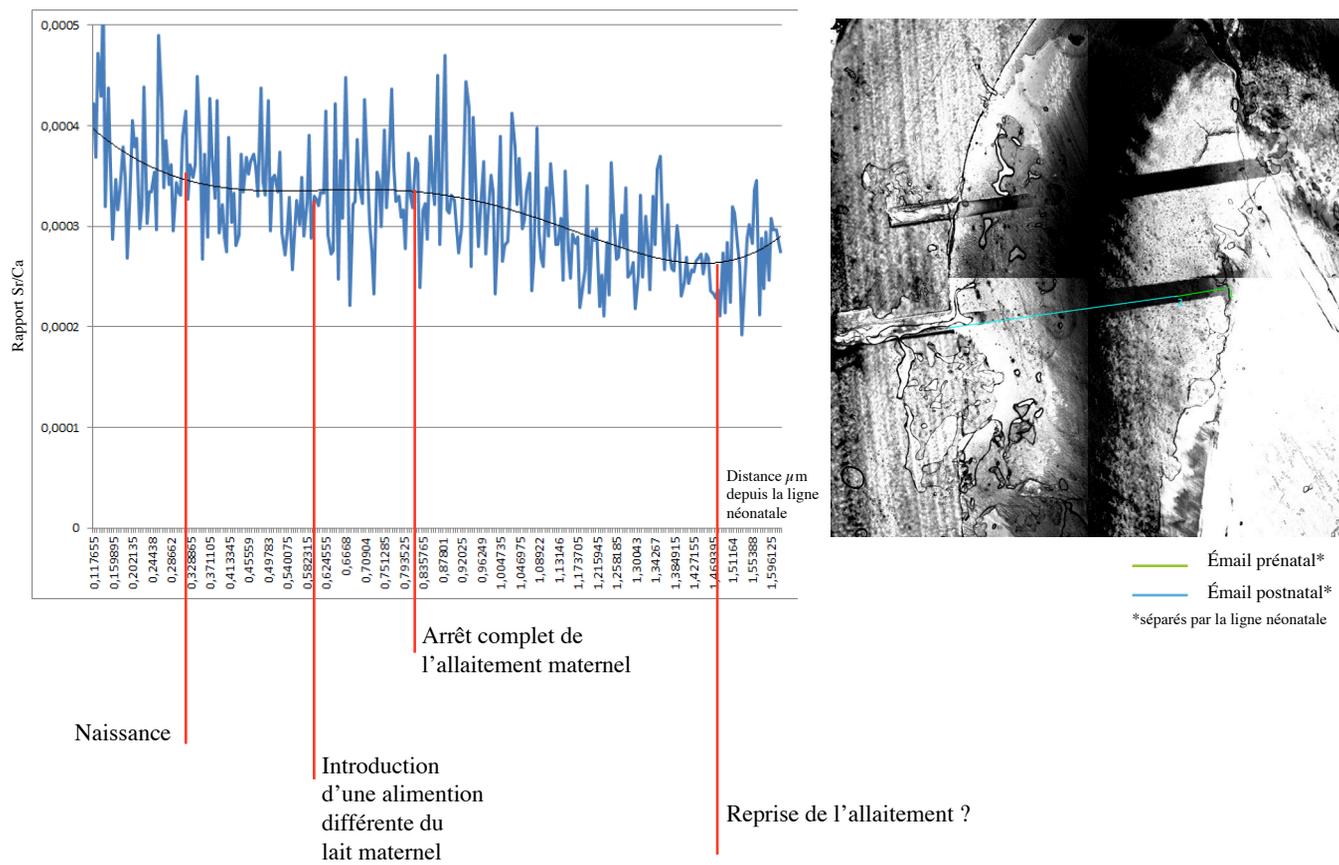


Fig. 39. Représentation des résultats pour l'échantillon GP 32

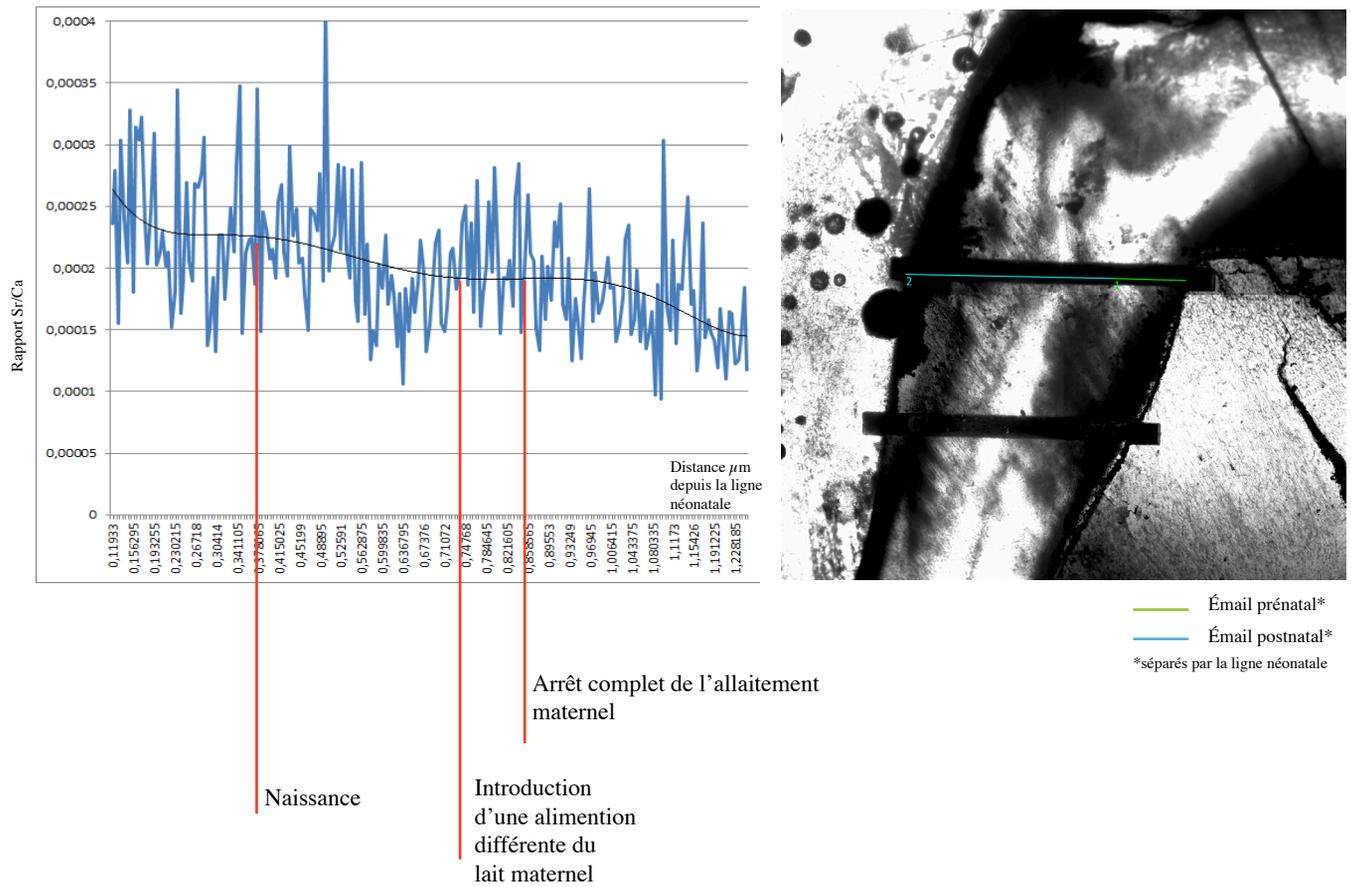


Fig. 40. Représentation des résultats pour l'échantillon GP 38.1

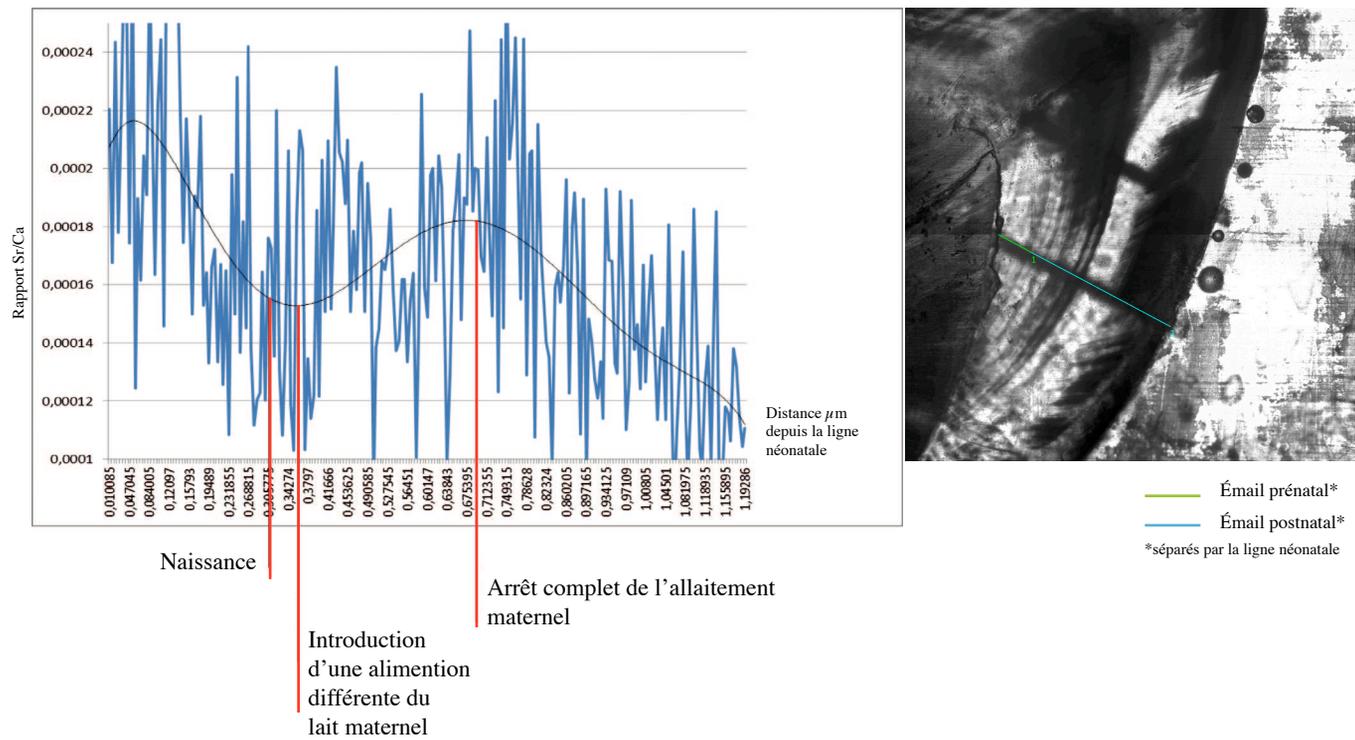


Fig. 41. Représentation des résultats pour l'échantillon GP 48

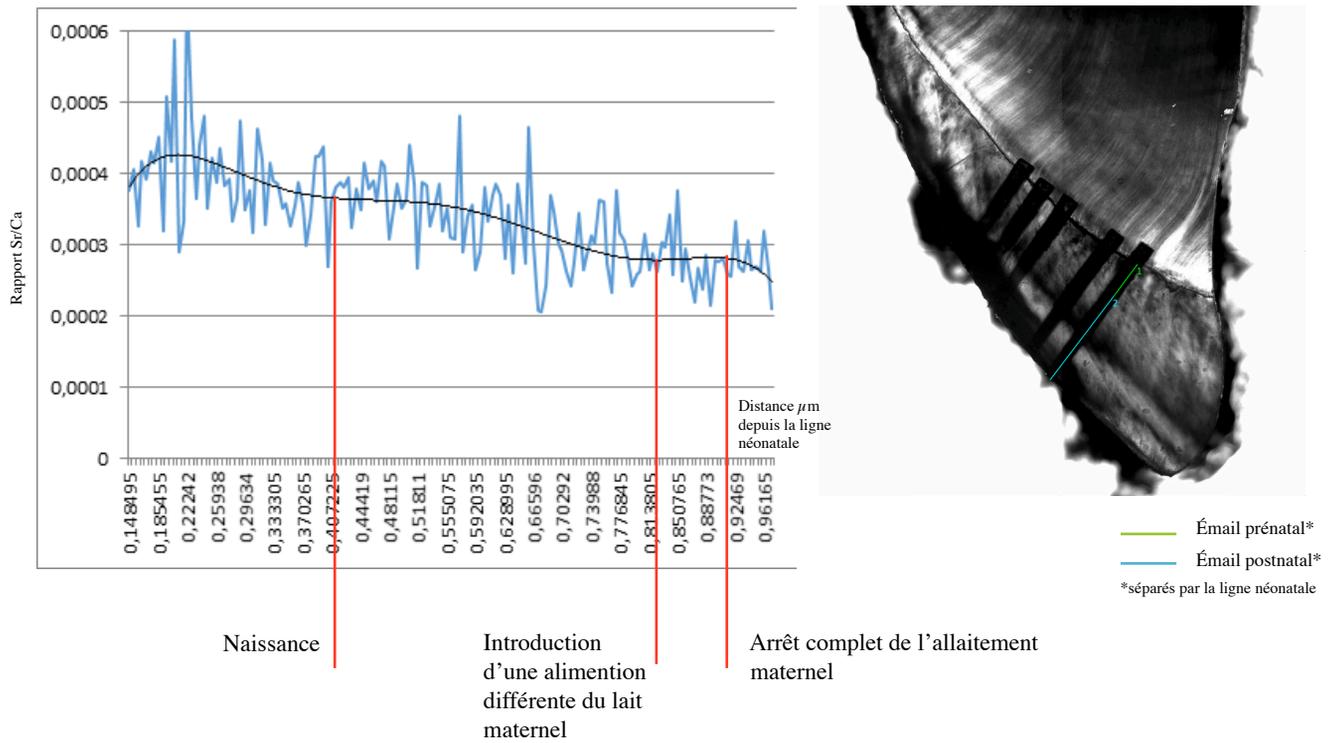


Fig. 42. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 48

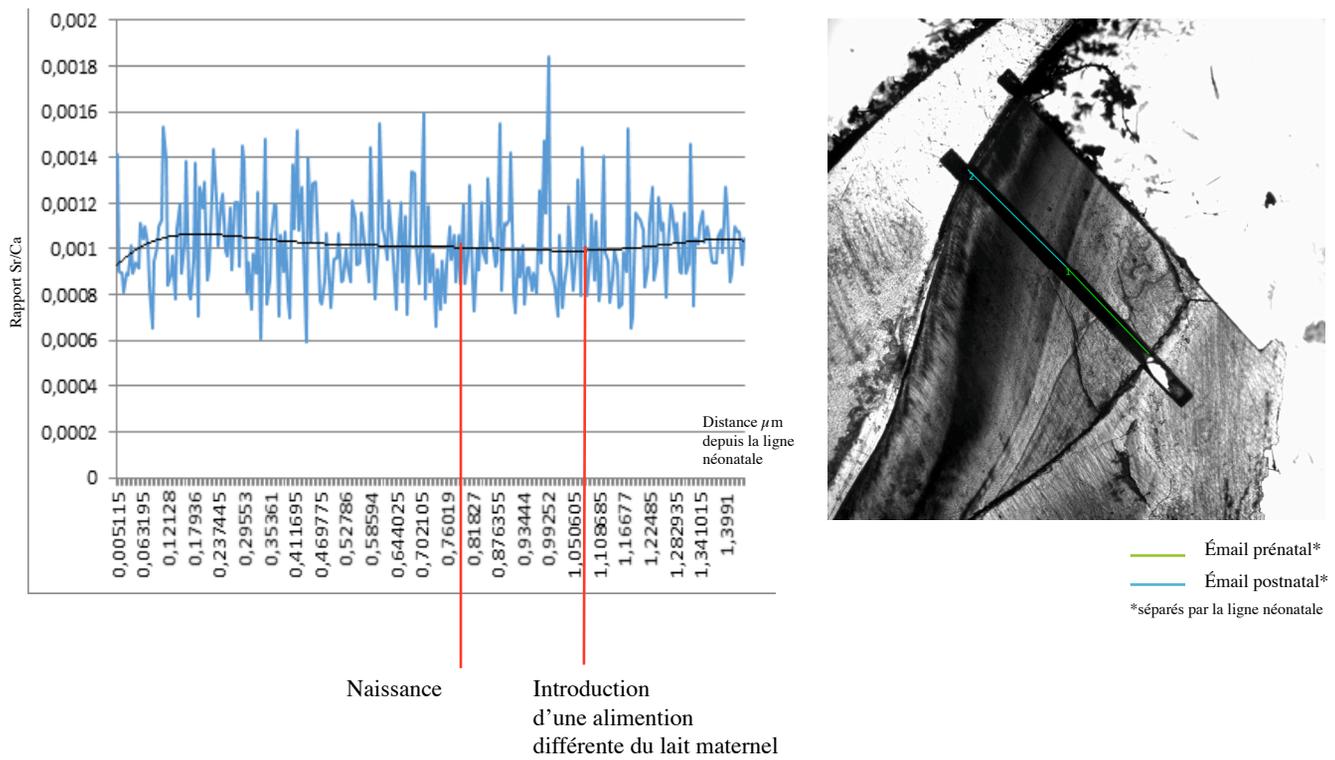


Fig. 43. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 154

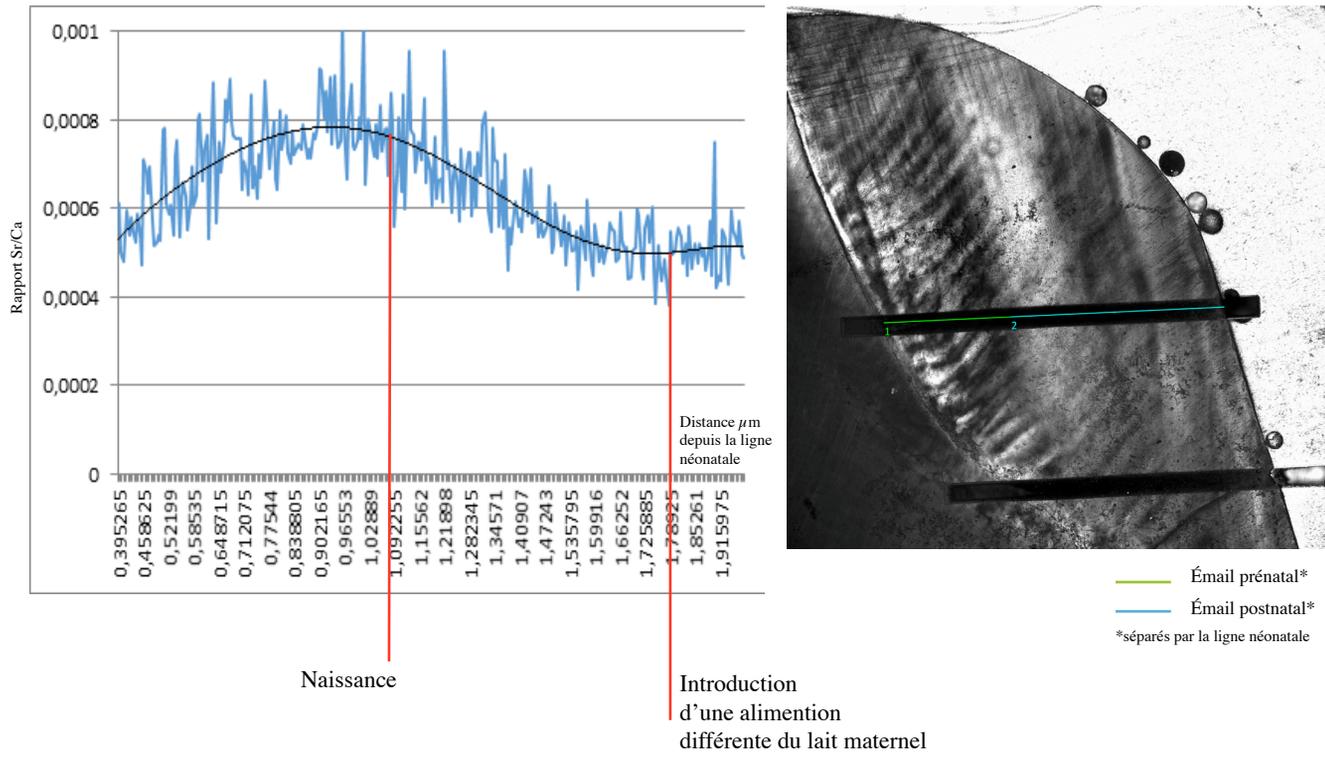


Fig. 44. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 262

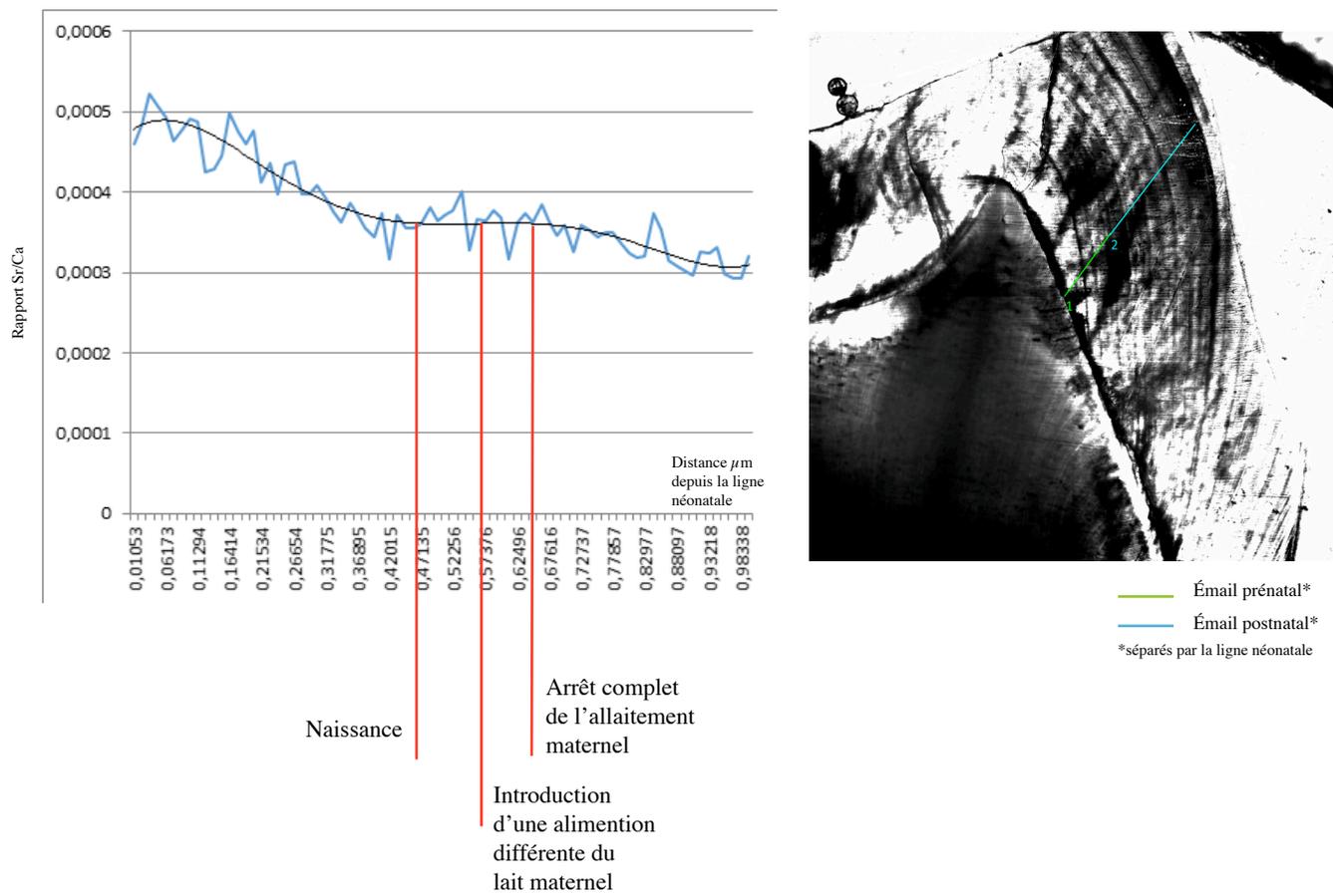


Fig. 45. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 287

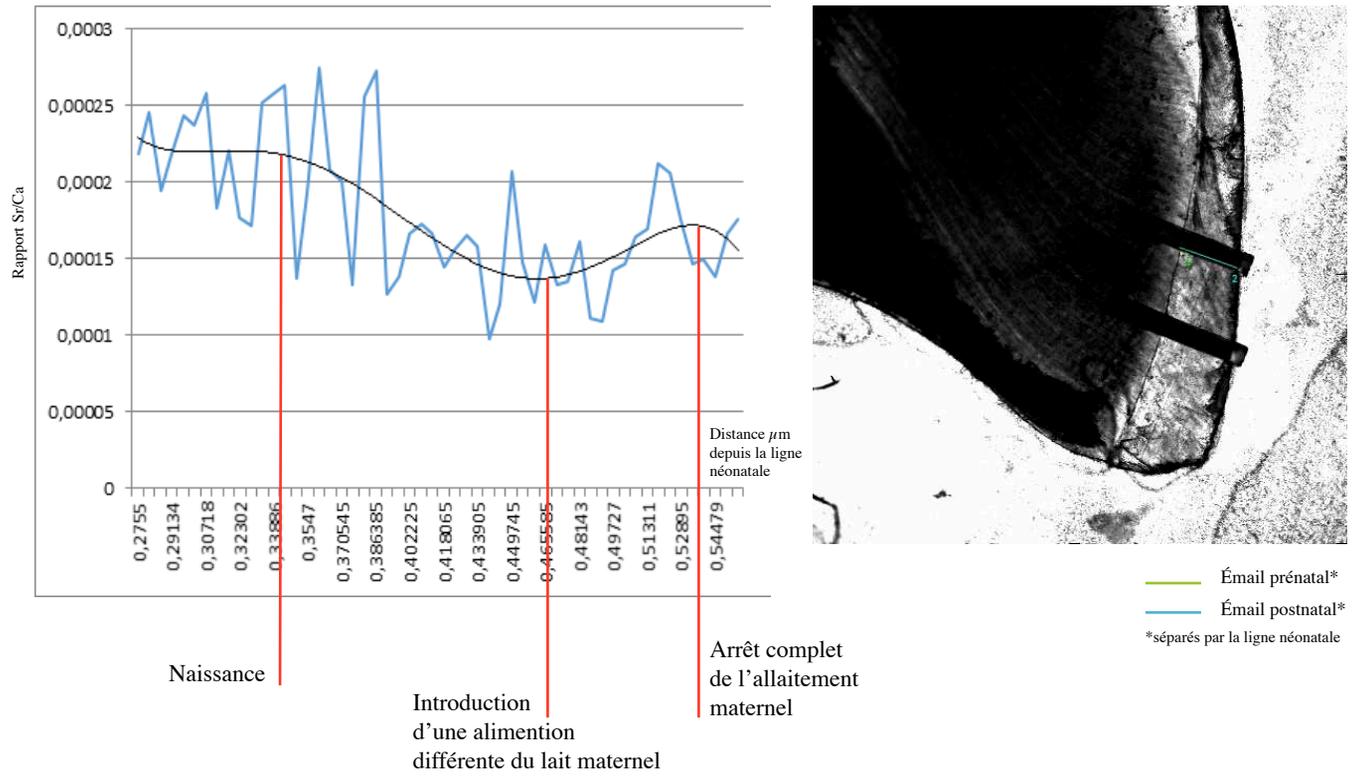


Fig. 46. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 304

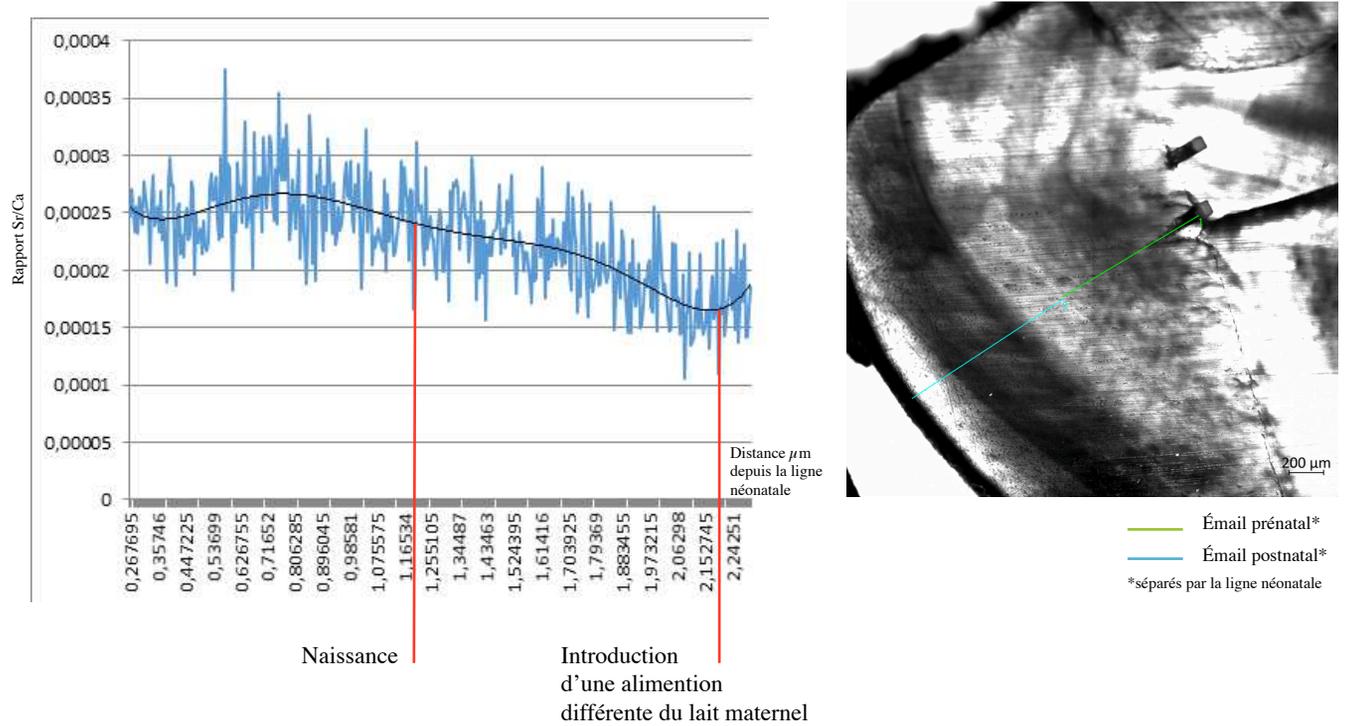


Fig. 47. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 327

Chapitre IV. Application archéologique

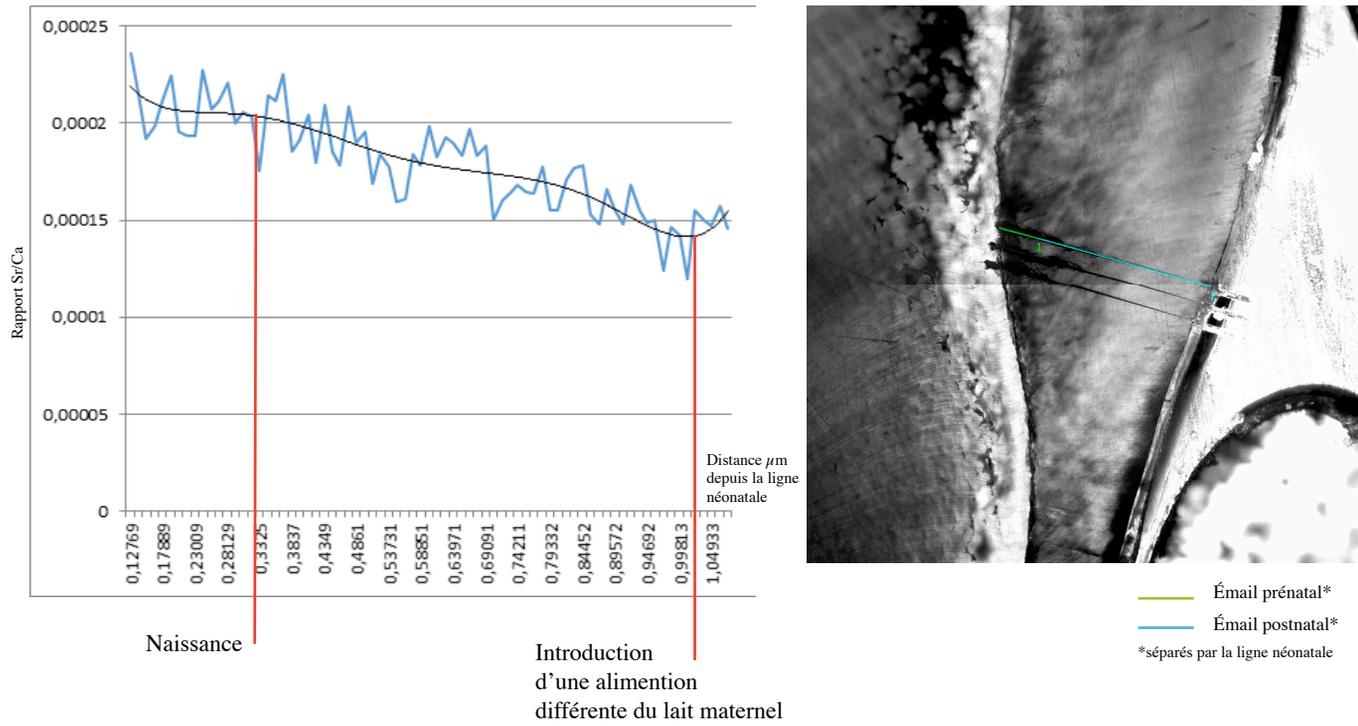


Fig. 48. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 526

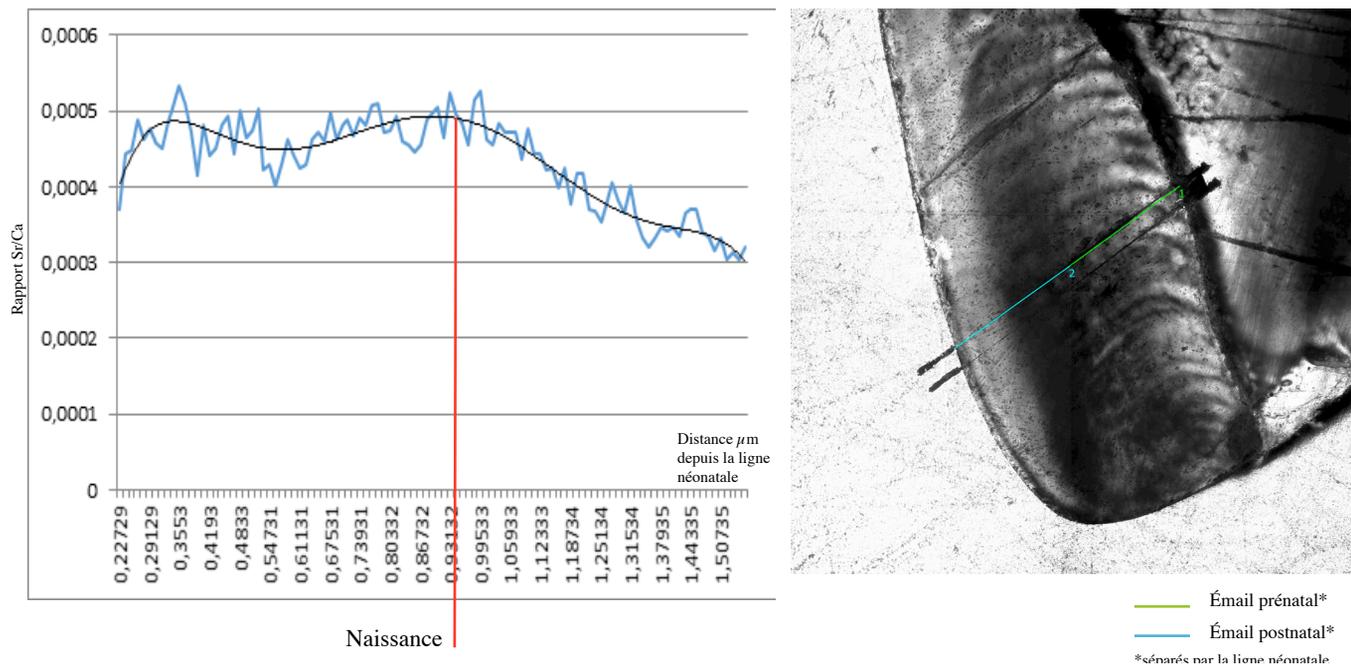


Fig. 49. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 531

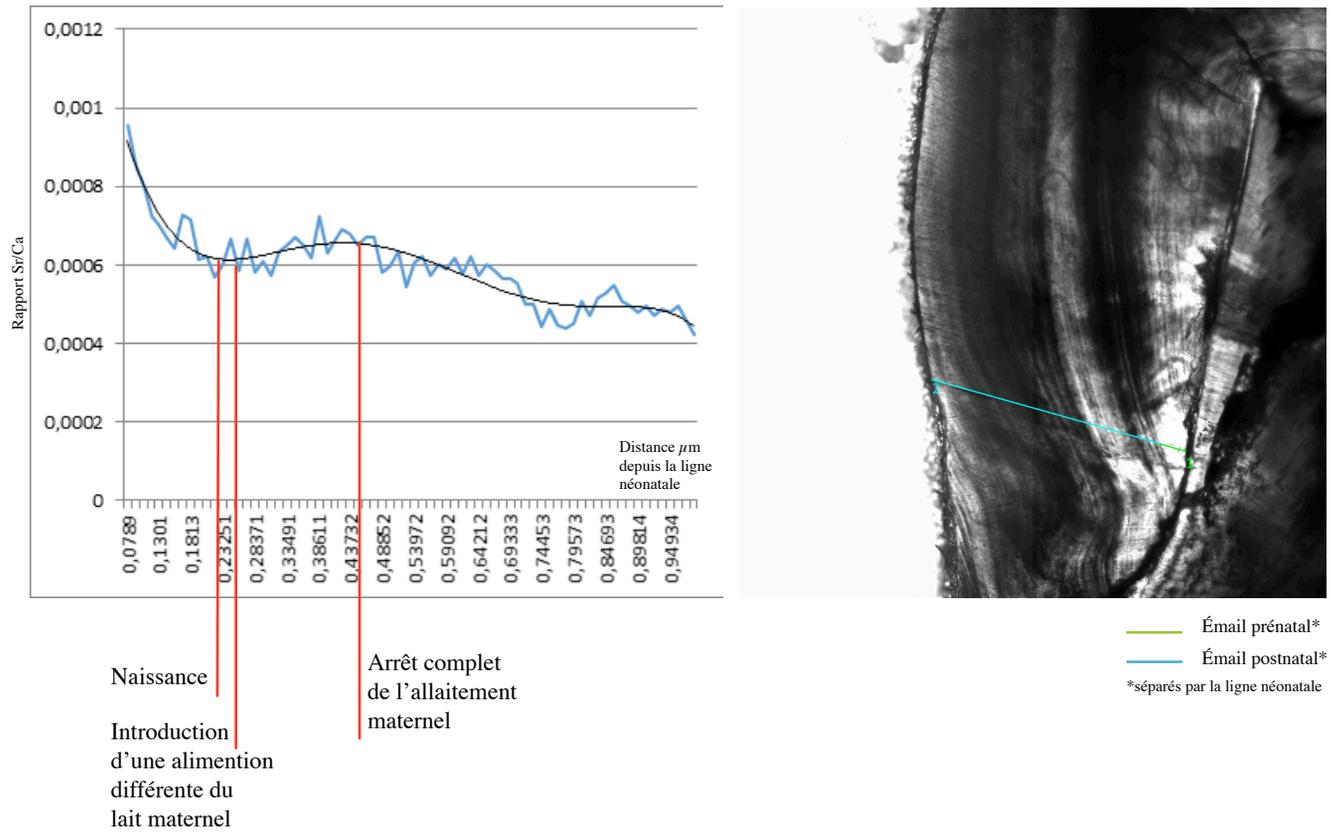


Fig. 50. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 538

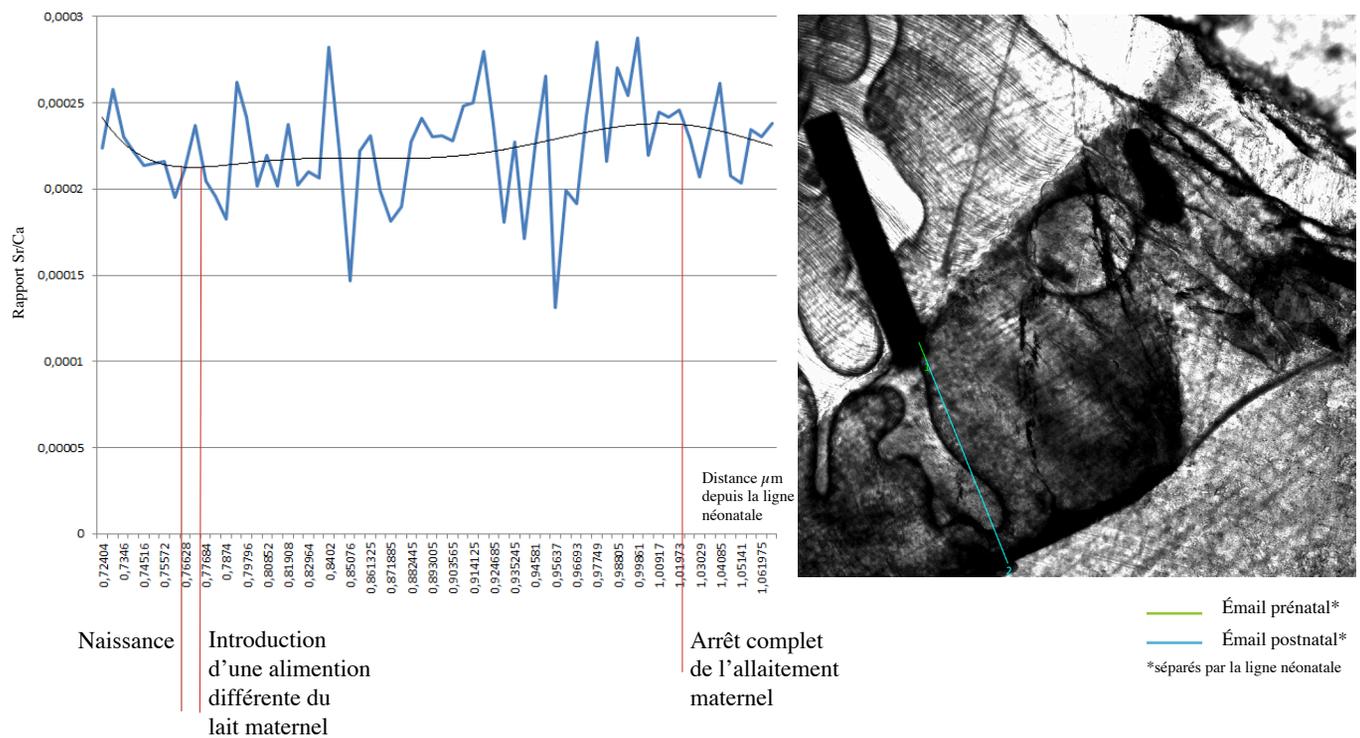
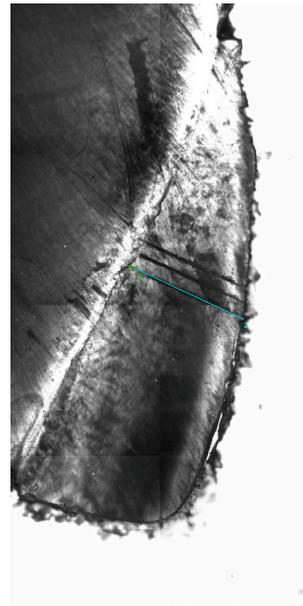
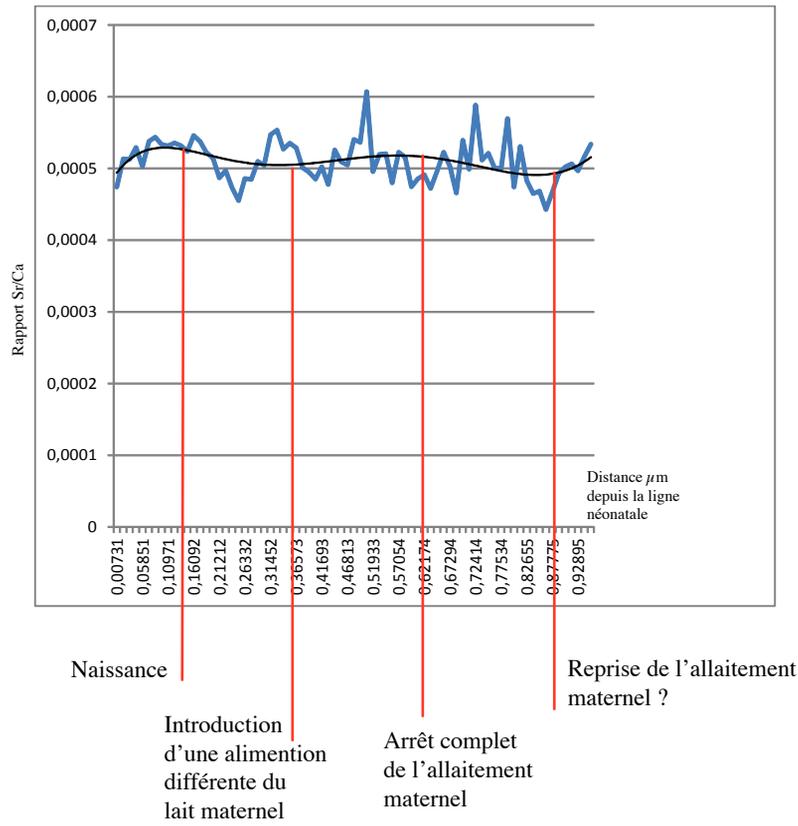
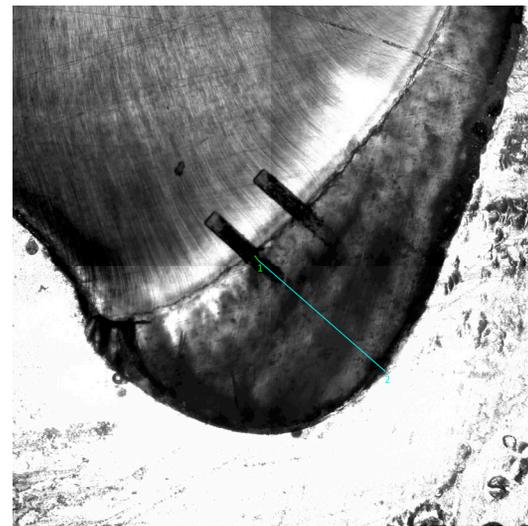
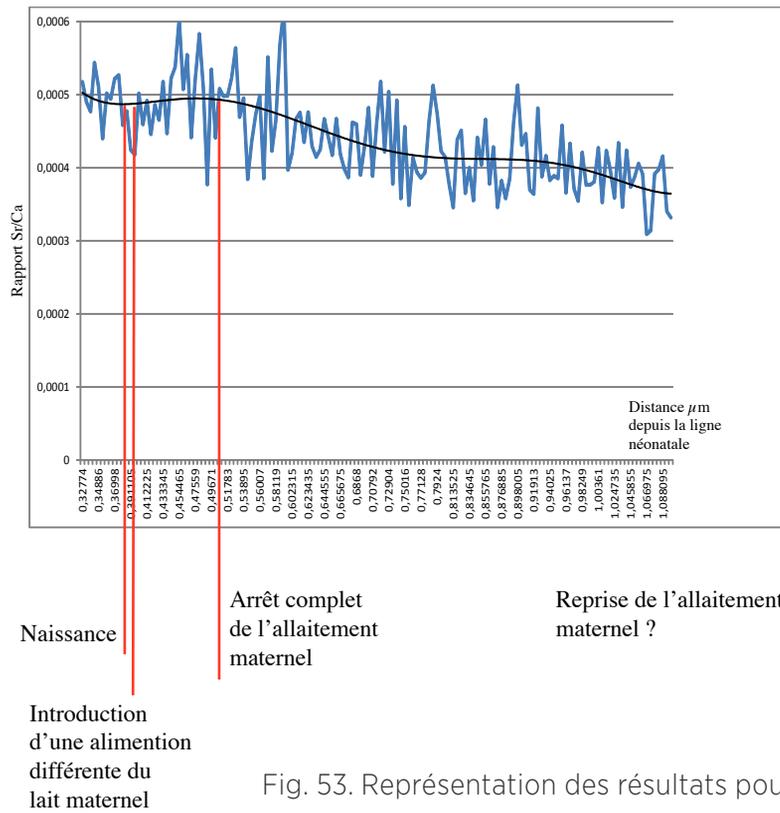


Fig. 51. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 557



— Émail prénatal*
— Émail postnatal*
*séparés par la ligne néonatale

Fig. 52. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 558



— Émail prénatal*
— Émail postnatal*
*séparés par la ligne néonatale

Fig. 53. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 593

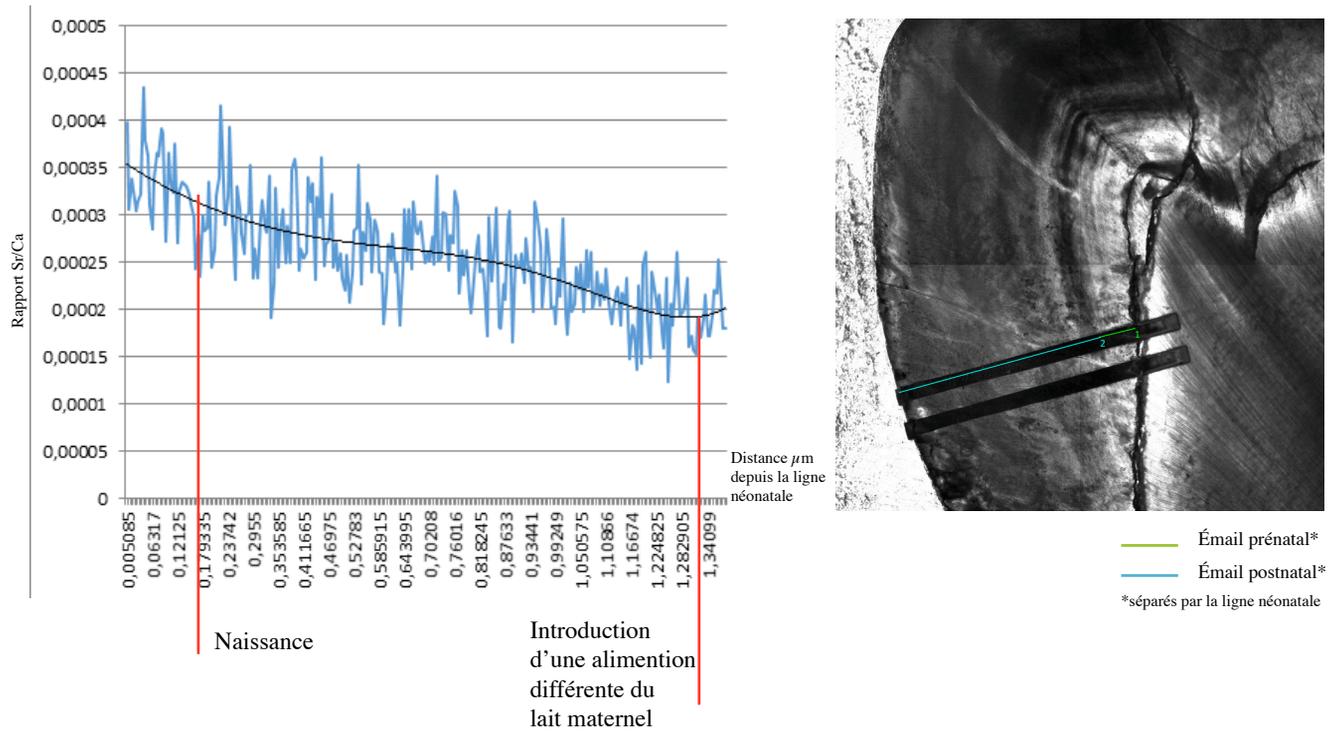


Fig. 54. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 946

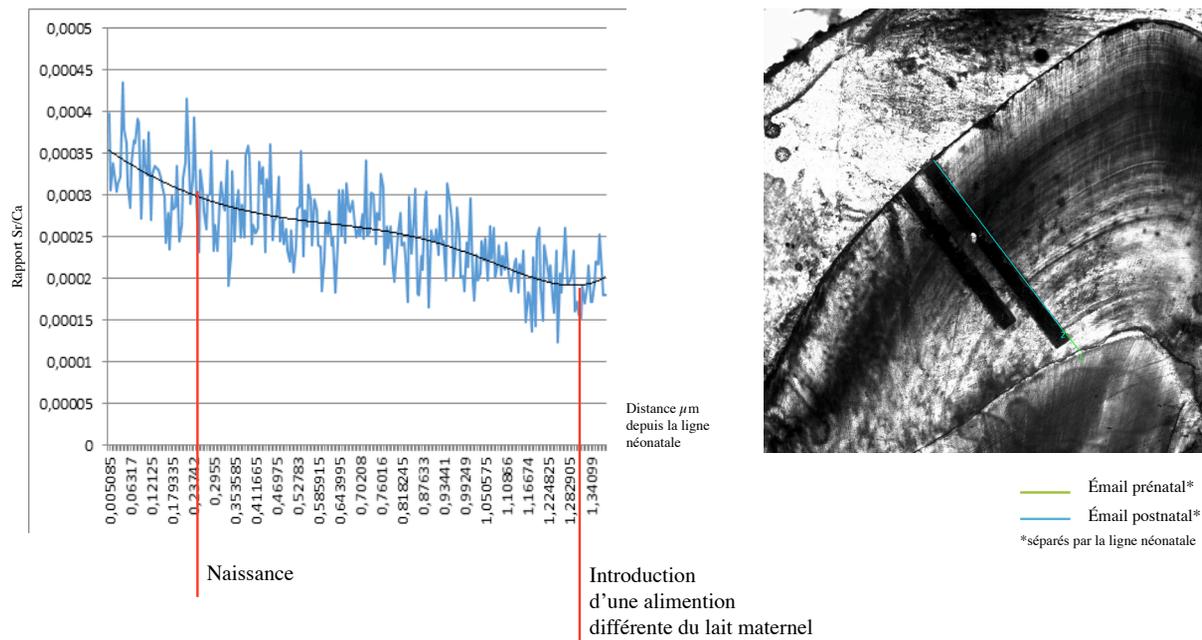


Fig. 55. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 1144

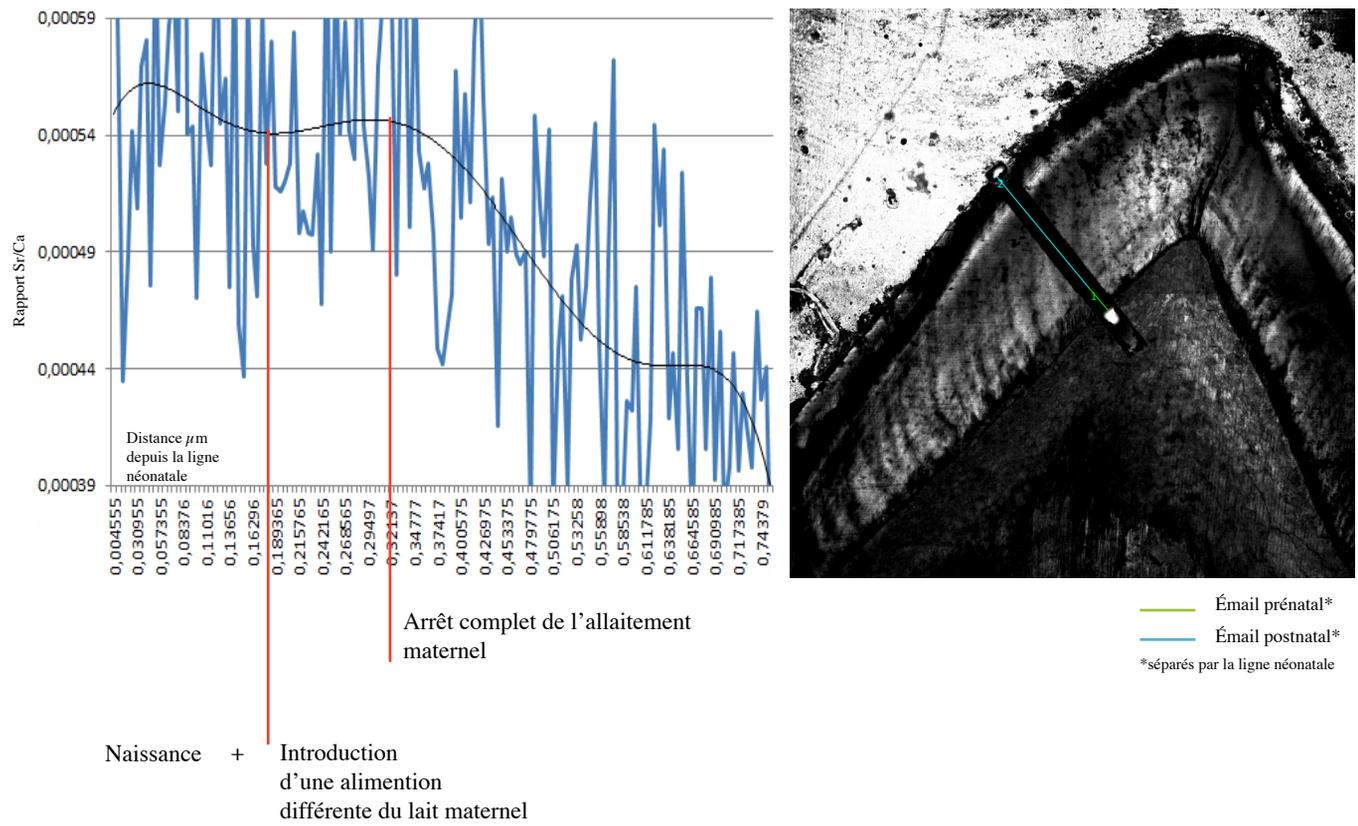


Fig. 56. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 1327

IV.4. APPORTS MÉTHODOLOGIQUES

L'association des méthodes choisie dans ce travail, l'observation des marqueurs histologiques de croissance de l'émail dentaire, et l'analyse des oligoéléments à travers l'émail apporte des informations originales en matière de chimie paléonutritionnelle par l'observation des changements élémentaires enregistrés dans l'émail dentaire. Chaque étape de formation de la dent est marquée par l'apparition d'une couche qui s'accroche aux précédentes et dont la composition peut être déterminée par l'analyse de microprélèvements. Ces derniers sont alors effectués à des endroits spécifiques correspondant à des moments connus du développement de l'émail dentaire. Le développement dentaire étant fonction de l'âge, l'utilisation et l'association de ces deux techniques, l'examen du rythme de formation de l'émail et les analyses élémentaires, offrent une précision intéressante pour l'analyse des comportements d'allaitement et de sevrage des enfants à des âges donnés ; elle est précieuse dans l'étude des populations anciennes. Cette démarche permet de déterminer si un individu, représenté par son squelette, a connu une période d'allaitement exclusif, d'en mesurer la durée, et d'estimer l'âge du sevrage complet, ce que les autres méthodes ne permettent pas. Les analyses isotopiques, dans le cadre des études sur l'allaitement et le sevrage, ne peuvent se faire que sur les enfants, puisque les adultes sont normalement sevrés au moment de leur mort. La méthode proposée dans ce travail présente donc l'avantage d'être applicable, aussi bien sur les adultes que sur les enfants, ce qui permet de s'extraire du biais de la sélection des échantillons qui ne seront pas seulement des enfants n'ayant pas survécu à l'âge adulte. De plus, les résultats sur la durée de l'allaitement et le processus de sevrage peuvent alors être comparés entre les sexes, ce qui n'est pas possible avec les jeunes enfants dont les caractéristiques biologiques sexuées ne sont pas encore suffisamment marquées (Braga *et al.*, 2019).

À l'échelle individuelle, les analyses isotopiques et élémentaires peuvent être complémentaires. Les isotopes stables de l'azote et le rapport Strontium/Calcium sont deux approches utilisées en archéologie pour restituer l'histoire de l'alimentation des tout-petits, en distinguant notamment la période d'allaitement de celle du sevrage. Afin de vérifier les apports de ces deux méthodes, nous avons comparé les analyses isotopiques et élémentaires sur deux enfants datés du Moyen Âge dont les âges au décès estimés à partir des restes dentaires sont de 18 mois plus ou moins 6 mois pour l'un et de 3 ans plus ou moins 12 mois, pour le second. Ces deux approches se distinguent sur de nombreux points. Les tissus analysés sont l'émail dentaire pour le rapport Sr/ Ca alors qu'il s'agit de la fraction organique des os et des racines dentaires dans le cas des isotopes stables de l'azote. Alors que les valeurs de ^{15}N augmentent pendant la période d'allaitement et diminuent au moment de l'introduction de la nourriture de sevrage, les valeurs du rapport Sr/Ca diminuent lors de l'allaitement et augmentent lors de la diversification alimentaire. En revanche, ces deux approches reposent sur des stratégies d'échantillonnage intra-individuelles permettant de tracer l'histoire alimentaire de chaque individu entre sa naissance et son décès. Dans les deux exemples choisis (Saint-Martin-de-Champs, CNAM 466b et Saint-Laurent de Grenoble, SL 1327), la diminution des valeurs de d^{15}N indique un arrêt ou une nette diminution de l'apport en lait maternel à un moment proche du décès. Les modifications de valeurs du rapport Sr/Ca attestent également de ce scénario pour l'enfant de Saint-Laurent. L'enfant de Saint-Martin-desChamps

(CNAM 466b), mort entre 2 et 4 ans, a connu une période d'allaitement exclusif courte, confirmée par les deux méthodes biochimiques et précisée par l'approche élémentaire entre 12 et 15 semaines. Elle est suivie d'une période d'alimentation mixte jusqu'à 25-31 semaines. Mais, les analyses élémentaires semblent indiquer une reprise de l'allaitement maternel entre 31 et 39 semaines. Les cernes de croissance observés dans la microstructure de l'émail témoignent de nombreux stress dans l'enfance (d'origine physiologique et/ou psychologique) qui traduisent un état de fragilité de l'enfant. La reprise éventuelle de l'allaitement maternel peut-être liée à cet état. L'enfant de Saint-Laurent de Grenoble (SL 1327), mort entre 1,3 et 1,7 an n'a pas reçu d'allaitement exclusif, ou très brièvement, et a connu un processus de sevrage de courte durée. L'approche élémentaire permet de préciser l'âge du sevrage complet de l'enfant à 4 ou 5 semaines. Par ailleurs, l'étude anthropologique (Herrscher, 2003) a démontré un état pathologique de l'enfant (des *cribra orbitalia* bilatérales, et quelques lésions endocrâniennes, indices d'infection, ont été observées). Cet état physiologique perturbé de l'enfant est soutenu par la présence de nombreux stress physiologiques identifiés sur la surface dentaire. L'état pathologique de l'enfant peut être une conséquence du sevrage précoce, soit du fait des croyances de la mère, soit du refus de l'allaitement par l'enfant, souvent observé dans le cas d'enfants malades en stade terminal.

Si d'une façon générale, les deux approches sont corrélées et s'accordent pour identifier la consommation de lait maternel, puis son arrêt, permettant d'identifier au sein d'un groupe, le statut des enfants par rapport au sevrage, l'analyse du rapport Sr/Ca par microéchantillonnages le long la couronne dentaire autorise un récit plus précis (en semaines) des événements alimentaires au cours de la vie de ces enfants. Les analyses élémentaires de l'émail de la première molaire définitive nous livre un enregistrement précis jusqu'à environ 1,5 an. Au-delà, il est nécessaire d'étudier des dents supplémentaires pour obtenir des informations chronologiques complémentaires.

À l'échelle de la population, les analyses isotopiques pour la détection de l'alimentation maternelle à Saint-Laurent de Grenoble pour la période XIIIe-XVe (Herrscher, 2003) suggèrent un sevrage qui pourrait se mettre en place entre 2,6 et 3,3 ans. La diversité des pratiques révélées par les analyses élémentaires et un certain nombre de sevrages plus précoces peuvent s'expliquer par plusieurs hypothèses, sans être contradictoires. D'abord les individus étudiés sont différents (sauf un, SL 1327), les différences peuvent donc s'expliquer par le caractère aléatoire de la sélection que nous avons faite. D'autre part, dans le cadre des analyses élémentaires, les signaux chimiques issus de l'alimentation par des laits animaux sont clairement identifiés comme une alimentation différente du lait maternel.



chapitre V

PROLONGEMENTS ET CONCLUSION

V.1. **DISCUSSION**

Les résultats présentés confirment le modèle général de diminution du strontium entre la naissance et 6 mois (ou plus) postulé au début de cette recherche. En outre, ils reflètent les variations de l'évolution du comportement du strontium, lesquelles intègrent de multiples implications. À partir de ces résultats, nous pouvons discuter de plusieurs points :

- Les conclusions sur la nutrition de jeunes enfants du Moyen Âge occidental peuvent être discutées et abordées dans le cadre de nos connaissances sur les comportements alimentaires, chez l'adulte (pour réfléchir sur la qualité de l'alimentation introduite au moment de la diversification alimentaire, souvent similaire à celle des adultes) et lors du sevrage. Nous pouvons ainsi réfléchir sur les pratiques d'allaitement et de sevrage à travers le temps, à partir des échantillons étudiés. Pour élargir la portée de nos résultats, nous les avons comparés à d'autres études fondées sur l'analyse chimique des tissus durs dans le cadre de restitutions paléoalimentaires.
- Les modalités analytiques de cette étude sont examinées afin de proposer un ensemble de conditions et de précautions à suivre dans les futures recherches sur l'émail dentaire à l'aide de la technologie LA-ICP-MS associée à l'observation histologique de l'émail.

V.1.1. **Discussion sur les pratiques d'allaitement et de sevrage à travers le temps, à partir des échantillons étudiés.**

Plusieurs éléments soutiennent l'hypothèse selon laquelle le rapport Sr/Ca analysé dans cette étude est l'enregistrement fidèle du signal chimique associé à l'alimentation consommée dans la prime enfance. D'abord, l'émail est hautement résistant au processus de diagenèse et peut-être utilisé pour refléter l'incorporation du strontium pendant la minéralisation de l'émail. Deuxièmement, le strontium contenu dans les tissus durs est un indicateur représentatif du strontium contenu dans l'alimentation ingérée pendant le développement de l'émail. Troisièmement, la quantité de strontium et de calcium (et le rapport Sr/Ca) de l'émail des échantillons médiévaux étudiés est cohérente à travers la longueur de l'émail, individuellement. Enfin, les modèles d'évolution du rapport Sr/Ca en association avec les comportements alimentaires correspondent effectivement aux traditions de soins de l'enfant, en particulier l'augmentation significative du rapport Sr/ Ca

dans l'émail (introduction d'une alimentation différente de l'allaitement maternel) après 6 à 12 mois, augmentation qui atteint son plus haut niveau à partir de 2 ans.

Les résultats de notre analyse suggèrent que l'abondance relative du strontium peut être mesurée dans la première molaire définitive humaine reflète l'alimentation ingérée pendant la petite enfance. Dans le cadre de perspectives archéologiques, la compréhension d'alimentation et de sevrage de l'enfant à un moment critique pour la survie de ce dernier peut fournir des informations importantes sur l'interaction entre les changements sociaux et biologiques.

Dans le travail présenté ici, les données du rapport Sr/Ca de l'émail dentaire de la première molaire définitive reflète :

- des variations dans l'âge auquel les valeurs du rapport Sr/Ca (ou âge du sevrage définitif présumé) sont à leur maximum
- l'introduction d'une alimentation diversifiée dans la première année,
- une tendance plus tardive du pic de rapport Sr/Ca et un modèle plus homogène à mesure que l'on recule dans l'histoire,
- une période prolongée d'alimentation mixte.

Peu de sources écrites médiévales évoquent la durée de l'allaitement exclusif et l'âge du sevrage définitif. Cependant, les signaux chimiques que nous avons trouvés sont cohérents avec les recommandations médicales et sanitaires de cette époque et héritées de la médecine antique grecque. Dans la civilisation grecque, les contrats pour les nourrices mentionnent un allaitement exclusif de 6 mois, suivi d'une diversification progressive vers l'alimentation adulte (Turck, 2010). De même, Soranos d'Éphèse et Galien, deux médecins grecs du II^e siècle ap. J.-C., ayant abordé la santé de la mère et de l'enfant, conseillent d'introduire progressivement l'alimentation solide à partir de 6 mois, et recommandent l'arrêt complet de l'allaitement vers 3 ans. L'héritage des pratiques gréco-romaines au Moyen Âge, en matière d'allaitement, semble être confirmé par les écrits de certains médecins (Turck, 2010). Parmi ces médecins, on peut citer Paul d'Égine (625-690), dont les idées se diffusent dans le monde arabe et byzantin, et Avicenne (980-1037), tous deux recommandant une durée d'allaitement de deux ans. Quant au Moyen Âge occidental, il connaît plusieurs œuvres de compilations et travaux encyclopédiques qui reflètent les idées de Galien et Soranos d'Éphèse, et découvre les écrits d'Avicenne, dans lesquels l'âge du sevrage semble varier entre 1 et 2 ans. Il faut attendre le XV^e siècle pour que les auteurs occidentaux introduisent des commentaires fondés sur leurs observations personnelles (Fildes, 1986).

Ces pratiques ont pu être mises en évidence par quelques études archéologiques s'appuyant sur les analyses isotopiques. L'analyse isotopique des enfants du site de Wetwang Stock, en Angleterre, daté de l'Âge du fer (IV^e – II^e siècles av. J.-C.) montre que ces derniers reçoivent un allaitement exclusif très bref (Jay *et al.*, 2008). Les travaux sur l'Égypte romano-chrétienne (250-450), sur le site de Kellis (Dupras *et al.*, 2001), suggèrent un allaitement exclusif de 6 mois et un processus de sevrage progressif qui s'achève vers 3 ans. Des études sur la Rome impériale (I^{er} – III^e siècles) avec le site d'Isola Sacra (Prowse *et al.*, 2004) démontrent que les enfants sont définitivement sevrés entre 2,5 et 3 ans. Les recherches de Keenleyside et ses collaborateurs (2009), sur l'Afrique romaine (Leptimus, Tunisie, III^e-IV^e siècles) vont également dans ce sens. Durant l'Antiquité tardive, dans

l'ensemble, les populations ayant vécu sous l'influence romaine, que ce soit en Angleterre, en Italie, en Afrique subsaharienne, ou en Égypte, suivent un modèle avec un allaitement exclusif de 6 à 8 mois et un processus de sevrage progressif qui s'achève entre 2 et 3 ans. On note cependant quelques exceptions à ce modèle majoritaire. En effet, de récentes recherches sur l'Angleterre tardo-Antique (IV^e – VI^e siècles) menées sur le site de Queenford Farm (Fuller *et al.*, 2006a, b), encore dans l'héritage culturel romain, révèlent une diversification alimentaire plus tardive, et un processus de sevrage entre 2 et 4 ans.

Dans le cas d'Hières-sur-Amby (IX^e-X^e siècle), les valeurs reflètent une période d'allaitement exclusif d'une durée de 4,5 mois à 9 mois pour les estimations basses et de 6 à 11 mois et demi pour les estimations hautes, pour quatre individus (cette marge est liée à la différence documentée de rythme de formation de l'émail entre les individus). Pour trois des enfants étudiés, l'âge de la fin de l'allaitement exclusif peut être considéré comme optimal. L'allaitement maternel semble donc avoir été suffisant pour couvrir les besoins du nourrisson, et pas trop long, évitant ainsi des carences chez l'enfant (Kramer et Kakuma, 2002). Le sevrage est ensuite progressif, ce qui favorise la survie des enfants à cette étape décisive.

Le seul enfant étudié ayant reçu un allaitement maternel exclusif court (trois/quatre mois) figure parmi les enfants morts jeunes (entre 2 et 5 ans), mais le décès n'étant pas directement consécutif au sevrage de l'enfant, on ne peut en attribuer la cause avec certitude au changement de nourriture.

Le cinquième individu (GP38.1) a été mis à l'écart de cette synthèse, car il ne présente pas les variations de valeurs attendues pour identifier le processus de sevrage avant la fin de l'enregistrement biologique dont nous disposons (10 à 13 mois) ce qui suggère que l'enfant recevait encore un allaitement exclusif autour de 1 an.

En ce qui concerne le sevrage définitif, seulement trois des cinq enfants étudiés présentent des enregistrements permettant de l'identifier. Dans ces trois cas, le sevrage définitif survient entre 6 mois et 1 an. Dans le cas des deux enfants dont les enregistrements fournis par l'émail ne présentent pas les signaux chimiques attendus dans le cas du sevrage définitif, on peut en déduire que le sevrage survient après la fin de l'enregistrement, soit après 1,5 an environ.

Dans nos échantillons, les pratiques d'allaitement et de sevrage semblent favorables à la survie des enfants. La mortalité infantile est fortement impactée par la malnutrition de manière générale et, en particulier, par les pratiques de sevrage. La mortalité infantile, attribuable au sevrage, est fortement influencée par la chronologie de l'introduction d'une alimentation diversifiée et par l'âge du sevrage complet. De plus, la valeur nutritionnelle adéquate pour le jeune enfant de l'alimentation introduite pour éviter la malnutrition, ainsi que son innocuité, sont déterminantes.

L'introduction trop précoce d'une alimentation diversifiée peut introduire chez l'enfant des pathogènes contre lesquels son système immunitaire immature n'est pas en mesure de se défendre et perturber son système gastro-intestinal en développement, ce qui favorise certaines maladies. Un allaitement exclusif au-delà de 6 mois, au moment où l'enfant requiert une augmentation

de ses apports nutritionnels pour soutenir ses besoins en énergie et pour sa croissance, peut avoir des conséquences négatives. Cela peut, par exemple, provoquer des carences, notamment en fer, car les besoins de l'enfant grandissent alors que la quantité de fer dans le lait de la mère décline après 6 mois post-partum. La durée de l'allaitement exclusif, le sevrage progressif, et l'important décalage entre le moment du sevrage définitif et celui du décès suggèrent que les pratiques d'allaitement et de sevrage ne sont pas la cause du décès des enfants. D'ailleurs, bien que les études démographiques révèlent un nombre élevé de décès d'enfants dans l'ensemble de la nécropole, on remarque qu'aucun n'est mort à moins d'1 an. Le nombre élevé d'enfants dans la nécropole pourrait donc être attribué à la gestion des inhumations (sélection selon l'âge, le sexe ou des critères sociaux) ou aux aléas de la conservation, plutôt qu'à une surmortalité infantile liée aux pratiques d'allaitement maternel et de sevrage.

La chronologie du processus de sevrage n'est pas le seul facteur influençant la santé de l'enfant. En effet, on peut également s'interroger sur la nature de l'alimentation de supplantation, de ses qualités nutritionnelles et de sa pertinence vis-à-vis des besoins et du développement gastrointestinal de l'enfant. Aux alentours de 1 an, les enfants sont suffisamment développés pour se nourrir comme les adultes. Cependant, ils mangent moins en quantité, alors que leurs besoins nutritionnels sont importants. De ce fait, la densité nutritive de leur alimentation doit être élevée pour être adéquate, tout en étant saine (World Health Organisation, 2005). Cela peut s'avérer difficile dans certains contextes. Il est souvent délicat d'apprécier les pratiques de supplantation dans les populations archéologiques. Néanmoins, nous pouvons supposer que le contexte alimentaire à la fin du haut Moyen Âge est meilleur que plus tardivement dans le Moyen Âge et à l'époque moderne. Les sociétés du haut Moyen Âge s'appuient sur un système économique agro-sylvo-pastoral, avec des ressources variées, issues aussi bien de l'agriculture (céréales, légumineuses, légumes), que des terres non cultivées (gibier, bétail, poisson) (Flandrin et Montanari, 1996). La fertilité du sol et les conditions climatiques favorisent les différents types de ressources naturelles. L'étude anthropologique n'a pas mis en évidence une insuffisance alimentaire dans la population d'Hières-sur-Amby, du fait de l'absence de séquelles de carences nutritionnelles sur les squelettes (Porte et Buchet, 1985). Dans la plupart des cas étudiés, l'évolution du rapport Sr/Ca signalant un changement d'alimentation est de faible amplitude. Cela peut suggérer un sevrage très progressif ou une alimentation de supplantation de niveau trophique élevé. Cette dernière interprétation est cohérente avec les indices archéologiques d'une importante activité liée à l'élevage dans l'environnement proche (Porte et Buchet, 1985). Cependant, cet indice archéologique est à considérer avec précaution, car l'élevage, qui peut fournir à l'alimentation de supplantation du lait et de la viande, n'est pas systématiquement exploité à ces fins. D'une part, concernant le lait, la production est largement utilisée à des fins commerciales plutôt qu'à des fins domestiques (Rollet, 1978). De plus, les animaux fournissant du lait ne sont en période de lactation que quelques mois dans l'année (De Lestrangue et Passot-Guevara, 1981). D'autre part, la viande n'est pas un aliment recommandé dans les différentes sources historiques traitant de l'alimentation du nourrisson.

La mortalité infantile à Hières-sur-Amby pourrait être liée à un état sanitaire général médiocre et à une mauvaise hygiène comme le suggère le mauvais état des dentures qui présentent une fréquence élevée de kystes et une perte précoce des dents chez les adultes (Porte et Buchet, 1985).

En avançant dans le Moyen Âge, les pratiques d'allaitement et de sevrage apparaissent moins homogènes. Les travaux fondés sur l'étude des tissus durs des immatures au sein d'une population médiévale (500-700) du sud de l'Allemagne à Wenigumstadt (Dittmann et Grupe, 2000) présentent un processus de sevrage progressif entre 1 an et 3 ans. De même, sur le site médiéval de Wharram Percy (X^e – XVI^e siècles), en Grande-Bretagne (Mays *et al.*, 2002 ; Richards *et al.*, 2002) a été mis en évidence un âge culturel de sevrage plus précoce, entre 1,5 et 2 ans. Les auteurs ont démontré un processus de sevrage plus abrupt, avec une période d'alimentation mixte plus courte. En outre, les aliments utilisés pour l'introduction d'une alimentation mixte et le sevrage ont été identifiés comme étant similaires à ceux des adultes. Le site carolingien de Saint-Martindes-Champs réunit des modèles d'allaitement court et long (Herrscher et Goude, 2015). Les analyses élémentaires du site médiéval (X^e – XII^e siècles) d'Espenfeld, en Allemagne mettent en évidence un sevrage complet vers 3 ans (Grupe et Bach, 1993). L'étude des immatures de Saint-Laurent de Grenoble (XIII^e – XV^e siècles) indique un sevrage complet plus tardif, entre 2,6 et 3,3 ans (Herrscher, 2003). Les recherches sur les squelettes du site de Fischergate House York, en Angleterre, issus d'un cimetière utilisé de la moitié du XIV^e siècle à la moitié du XV^e siècle, font ressortir un allaitement exclusif prolongé et un sevrage complet autour de 2 ans (Burt, 2013).

Nos résultats montrent également une diversité des pratiques d'allaitement durant le Moyen Âge. Une plus grande variation des pratiques de sevrage dans l'Europe médiévale avait déjà été proposée par Fildes (1995), qui remarquait une tendance au sevrage entre 9 et 12 mois dans certaines zones/milieus et un sevrage entre 2 et 3 ans dans d'autres contextes.

L'évolution de pratiques culturelles pourrait être expliquée par des variables politiques, économiques, religieuses et culturelles. En effet, d'un point de vue politique, le Moyen Âge est marqué par la rencontre de plusieurs civilisations. Dans une zone largement occupée par des civilisations issues de l'Antiquité gréco-romaine, interviennent de nombreux mouvements de populations, par vagues successives, principalement de peuples venus de l'Est (comme les Huns, les Wisigoths, les Vandales ou les Slaves) aux IV^e et V^e siècles, de peuples arabo-musulmans qui arrivent dans le Sud entre le VI^e et le VIII^e siècle, et de peuples du Nord (notamment les Normands et les Varègues), du IX^e au XI^e siècle. Ce mélange de populations peut être à l'origine de variations des pratiques culturelles, dont les habitudes liées à l'allaitement et au sevrage. Dans le domaine religieux, la christianisation de l'Europe, largement propagée par les Francs en Gaule, peut influencer les croyances populaires. Il semble que l'Église ne soit pas favorable à l'allaitement prolongé après 1 an, jugé alors incestueux si l'on en croit l'évêque Grégoire de Tours (Grégoire de Tours, Folio Histoire, 2012). Ainsi, les idées chrétiennes viennent interférer avec les recommandations de tradition gréco-romaine. Sur le plan économique, on note une restructuration de l'exploitation de l'espace. Cette nouvelle organisation peut aussi influencer la disponibilité et l'accès aux ressources naturelles, potentiellement utilisables dans le cadre de la diversification alimentaire et devenir ainsi un paramètre intervenant sur les pratiques de sevrage.

L'enfant de Saint-Martin-des-champs se situe chronologiquement au milieu du Moyen Âge. Il est exclusivement allaité entre 3 et 4 mois et reçoit une alimentation mixte jusqu'à 6/8 mois. Mais après une période estimée entre 6 et 8 semaines, les analyses semblent indiquer une reprise de l'allaitement maternel. L'examen des microstructures de l'émail dentaire révèle plusieurs stries pathologiques de Retzius ce qui traduit un état de fragilité de l'enfant. Nous ne pouvons pas savoir si cet état est une cause ou une conséquence des modalités d'allaitement et sevrage. Ces observations, faites sur un échantillon unique, ne peuvent être définies comme représentatives des comportements de son époque.

Les résultats obtenus dans ce travail semblent indiquer qu'à Saint-Laurent de Grenoble, à la fin du Moyen Âge les femmes optent pour des pratiques d'allaitement et de sevrage très variées. Parmi les échantillons analysés, nous avons pu observer un individu exclusivement allaité quelques jours (SL 557), et un enfant exclusivement allaité entre 10,5 mois et 13 mois (SL 1144). Dans cette synthèse, écartons l'enfant SL 1327 qui présente des signes infectieux (*cribra orbitalia* bilatérales, plages criblées sur l'occipital, larges plages d'appositions périostées sur la face endocrânienne des pariétaux et des temporaux, ainsi que sur le sphénoïde) et dont les comportements liés à son alimentation ne peuvent être traités dans une observation générale (Herrscher, 2001). Entre ces deux exemples, nous avons identifié une diversité de profils de quelques semaines et de quelques mois. En ce qui concerne l'âge du sevrage complet (toujours en excluant de l'observation SL 1327) l'âge le plus jeune avec un profil sevré est 1,5/2 mois, plusieurs ont un âge compris entre 2,5 et 5 mois, plusieurs ont plus de 6 mois et un individu a été sevré à environ 1 an (SL 1144). Il faut noter que l'enregistrement dentaire nous permet de voir les variations alimentaires jusqu'à environ 1,5 an. Il ne nous est donc pas possible d'estimer l'âge du sevrage complet passé ce délai, qui peut encore être réduit selon l'état d'usure et de conservation de la dent. C'est par exemple le cas de SL 262, SL 327 et SL 526.

La durée de l'alimentation mixte, ou période de transition alimentaire n'est pas homogène non plus. Elle peut durer de deux semaines (SL 48) à quatre mois (SL 124), mais on note une légère tendance dominante autour de 1 mois. La durée de la transition alimentaire ne semble pas être corrélée avec l'âge de l'introduction d'une alimentation mixte.

L'échantillonnage étant restreint, et réparti sur une longue période d'au moins deux siècles, une analyse statistique ne peut être significative. On note, cependant, que les diversités observées ne semblent pouvoir être associées, ni à la période, ni à la zone d'inhumation (sud de l'église ou place Saint-Laurent), ni au sexe de l'individu.

Les analyses isotopiques pour la détection de l'alimentation maternelle à Saint-Laurent de Grenoble pour la période XIII^e-XV^e siècles (Herrscher, 2003) suggèrent un sevrage qui pourrait se mettre en place entre 2,6 et 3,3 ans. La diversité des pratiques révélées par les analyses élémentaires et un certain nombre de sevrages plus précoces peuvent s'expliquer par plusieurs hypothèses, sans être contradictoires. D'abord, les individus étudiés sont différents, les différences peuvent donc s'expliquer par le caractère aléatoire de la sélection que nous avons étudiée. D'autre part, dans le cadre des analyses élémentaires, les signaux chimiques issus de l'alimentation par des laits animaux sont clairement identifiés comme une alimentation différente du lait maternel.

Dans le travail présenté ici, les différences entre les individus du début du Moyen Âge et de la fin du Moyen Âge reflètent des changements culturels et biologiques qui peuvent être liés à la maladie, à des changements de conditions d'accès à la nourriture pour des raisons écologiques et/ou politiques, elles-mêmes en lien avec des problématiques de gestion du territoire et de ses ressources.

À l'inverse de ce modèle stable et général de l'introduction progressive d'une alimentation diversifiée jusqu'au sevrage définitif, les variations du rapport Sr/Ca observées dans la première molaire définitive des sujets du Moyen Âge indiquent que les pratiques autour du processus de sevrage peuvent être flexibles. Ces variations reflètent l'adaptation de la mère et de l'enfant à des conditions socio-économiques et épidémiologiques qui se retrouvent en interaction avec les pratiques de soins de l'enfant.

Le moment de l'initiation du processus de sevrage et du sevrage complet est variable à travers les cultures humaines et il est spécifique à chaque contexte familial, mère, père, enfant, qui sont autant de facteurs actifs dans le déroulement du processus. Les facteurs qui influencent l'arrêt de l'allaitement maternel incluent la perception culturelle de la qualité et de la quantité du lait, la maladie éventuelle de la mère, la reprise des menstruations, la naissance d'un nouvel enfant, le ressenti de la mère, les caractéristiques économiques (responsabilités professionnelles), la tendance sociale, le statut socio-économique, la saison, l'âge de l'enfant, l'éruption des dents, le développement intestinal de l'enfant et la santé générale (Fildes, 1986).

Un des facteurs importants pour la chronologie du processus de sevrage est la maladie. L'allaitement exclusif et l'arrêt de la nourriture solide (lorsque le processus de sevrage a été initié) ont été associés à la maladie de l'enfant, mais il est possible que l'enfant malade cesse l'allaitement à cause d'une incapacité à téter, ou d'une séparation de la mère. Dans ces cas, l'arrêt prolongé de l'accès au lait maternel donne lieu au sevrage de l'enfant puisque la mère n'est plus en capacité de produire du lait (après un arrêt prolongé de la stimulation de la lactation par la succion). Ainsi, la maladie de l'enfant peut aussi bien être la cause que la conséquence du sevrage (Institute of Medicine, 1991).

L'interruption de l'allaitement peut-être lié à une nouvelle grossesse, le lait d'une femme enceinte étant considéré par plusieurs cultures comme mauvais pour la santé du nourrisson (StuartMacadam et Dettwyler, 1995). Les perceptions culturelles contre les aliments « contaminés » absorbés alors que l'enfant est physiquement fragile (ce qui est souvent associé à des désordres gastro-intestinaux) peuvent être à l'origine d'une introduction d'une alimentation mixte retardée jusqu'à 1 an, voire plus (Fildes, 1986 ; Dettwyler et Fishman, 1992). Dans certains cas les enfants en sous-nutrition ou en sous-développement sont allaités plus longtemps, car les mères associent les risques de mortalité infantile à la période de sevrage.

L'introduction d'une alimentation et le sevrage définitif précoces observés pour plusieurs enfants pourraient être liés au mode de vie urbain. En effet, il a été observé que dans les populations traditionnelles, non industrialisées, la durée de l'allaitement maternel a tendance à décliner à mesure que l'urbanisation progresse. Ce phénomène semble favorisé par plusieurs facteurs.

D'abord, le mode de vie urbain implique souvent des activités maternelles éloignées du foyer, ce qui limite les possibilités d'allaitement, augmente la durée entre les tétées, et favorise, de fait, le processus de sevrage. On peut également discuter le fait que le développement urbain implique des mouvements de populations des campagnes vers les villes. Dans ces cas de migrations, les couples se retrouvent souvent détachés des familles, des parents de la génération précédente, et des enseignements traditionnels qu'elle leur dispense et qui influencent les pratiques culturelles. Le déclin de l'allaitement peut être associé à une perte de l'héritage culturel. On note enfin que la vie urbaine au Moyen Âge est généralement associée à un contexte sanitaire médiocre. Le mauvais état sanitaire est accentué, notamment, par la promiscuité dans les villes et par le mauvais traitement des déchets et des eaux usées qui favorise le développement des organismes pathogènes. Le mauvais état de santé des femmes peut être à l'origine de l'arrêt de l'allaitement maternel, plus tôt qu'initialement envisagé (Fildes, 1986).

La société du Moyen Âge occidentale est une société patriarcale. Comme souvent dans les sociétés patriarcales, il existe une distinction de genre qui favorise l'homme par rapport à la femme et qui se manifeste à plusieurs niveaux (social, économique, politique). Cette distinction peut avoir des répercussions sur le statut nutritionnel, d'où des pratiques d'allaitement et de sevrage différentes selon le sexe de l'enfant. Les résultats obtenus dans ce travail ne présentent pas de différences significatives entre les hommes et les femmes (peut-être en raison de la taille réduite de l'échantillon), que ce soit pour la durée de l'allaitement exclusif, la durée de l'alimentation mixte ou l'âge du sevrage complet.

L'étude des marqueurs biologiques inscrits dans le squelette humain nous permet d'émettre des hypothèses sur le contexte de l'alimentation des nourrissons. L'observation des stries pathologiques de Retzius est une information complémentaire sur l'état de l'enfant avant et après le sevrage. L'identification des stress autour de la période de l'introduction d'une alimentation mixte ou du sevrage définitif nous permet d'orienter notre réflexion sur les choix chronologiques concernant les événements du sevrage. Par exemple, si l'allaitement semble s'arrêter, puis reprendre, la présence de stries pathologiques de Retzius peut nous indiquer que l'état de l'enfant est à l'origine d'un modèle de sevrage inhabituel (par exemple SL 124 et CNAM 466b). Dans le cas d'une diversification alimentaire ou d'un sevrage particulièrement tardifs, intervenant après une série de stries pathologiques, on peut envisager que les parents aient attendu que l'enfant soit plus apte à supporter une transition alimentaire. Dans le cadre de ces réflexions, l'état de l'enfant comprend à la fois la santé (maladies, infections ...) et les conditions psychologiques (périodes d'insécurité par exemple). Les faits observés, croisés avec des informations issues d'autres domaines de la recherche archéologique, historique et démographique nous permettent d'avoir une vue d'ensemble sur la complexité des facteurs qui interagissent autour de l'alimentation du jeune enfant au Moyen Âge.

V.1.2. **Discussion sur le modèle théorique proposé dans ce travail pour l'interprétation des analyses élémentaires**

Chez les individus étudiés, l'analyse des séquences chronologiques individuelles établies à l'aide de deux séries de prélèvements a révélé une évolution du rapport Sr/Ca cohérente avec le postulat de départ. En effet, les changements de tendances observées sur les ratios Sr/Ca peuvent raisonnablement être interprétés comme liés aux pratiques d'allaitement et de sevrage. De telles interprétations supposent néanmoins une teneur en strontium du régime provisoire, inférieure à celle du régime adulte. Cela est, a priori, la norme dans une très grande majorité de cas, mais nous ne pouvons pas le vérifier (faute de méthode) au cas par cas dans les populations archéologiques que nous étudions. Nous avons également tenu compte de l'hypothèse que la mère soit dans l'impossibilité d'allaiter son enfant. Lorsque cette situation se présente, en mettant de côté les cas de mise en nourrice, l'alternative la plus fréquente est un remplacement du lait maternel par du lait de brebis, de chèvre ou de vache (Dupras *et al.*, 2001). Il a aussi été remarqué que le rapport Sr/Ca augmente dans l'émail formé immédiatement après la naissance par rapport à l'émail formé avant dans le cas des enfants nourris au lait de vache. Le lait de vache contient environ six fois plus de strontium que le lait humain (Widdowson *et al.*, 1960). Du point de vue des signaux chimiques Sr/Ca que nous interprétons, le lait de vache doit donc être considéré comme une alimentation de diversification par rapport au lait maternel (de même que l'azote-15).

La mise en application du protocole proposé dans ce travail a révélé quelques limites et quelques contraintes dont il faut tenir compte pour établir un modèle cohérent fondé sur les concentrations élémentaires en vue de recherches paléalimentaires. La première limite réside dans le fait que la plupart des études chimiques actuelles, isotopiques et élémentaires, s'appuient sur la formation rythmique de l'émail pour les interprétations chronologiques des variations de composition révélatrices de certains événements. Cependant, les auteurs, bien qu'utilisant cette démarche, admettent que, d'une part, la constance n'est pas aussi stricte qu'on pourrait l'espérer et que, d'autre part, certains mécanismes restent flous, en particulier au niveau des éléments assimilés dans l'émail et des signaux qui en résultent (décalage dans le temps ou modification d'intensité, par exemple). Ensuite, il est admis que, bien que le phénomène de biopurification, qui conditionne les ratios Sr/Ca, et les conséquences qui en résultent, soient désormais bien connus, acceptés et d'utilisation répandue, il existe, néanmoins, plusieurs facteurs capables d'entraver les interprétations alimentaires. Des régimes alimentaires avec des proportions de plantes/viande différentes peuvent avoir des ratios Ba/Ca et Sr/Ca similaires, en particulier quand des plantes très riches en Ca, sont la source dominante de l'apport en calcium alimentaire (Burton et Wright, 1995). Inversement, des régimes alimentaires avec la même quantité de viande peuvent avoir des ratios Ba/Ca et Sr/Ca différents en fonction des quantités de Ba, Ca, Sr dans les plantes qui complètent ces régimes (Burton *et al.*, 1999). Ainsi des variations dans les composants de la plante alimentaire peuvent modifier les rapports alimentaires, et nécessairement ceux des tissus durs, sans changement dans le ratio plante/viande. Bien que les résultats expérimentaux aient, en très grande majorité, démontré que Ba/Ca et Sr/Ca de l'os suivent fidèlement Ba/Ca et Sr/Ca de

l'alimentation, des régimes alimentaires différents peuvent avoir les mêmes rapports Ba/Ca et Sr/Ca.

Parmi les problèmes, on compte également celui de la variabilité des concentrations élémentaires interespèces des végétaux qui se superposent aux variations relatives aux sources géologiques (déjà responsables de niveaux de strontium significativement différents). En effet, la proportion de strontium par rapport au calcium dépend également de la plante puisque chaque espèce a son propre degré de biopurification. Les études à ce sujet ont révélé des différences entre les ratios Sr/Ca (et Ba/Ca) de plantes poussant au même endroit (donc non soumises à différentes influences environnementales) dépassant dans certains cas les différences de ratios de plantes d'une même espèce, mais d'origines différentes. Ces conclusions confirment alors que la variabilité inter espèces et une consommation spécifique peuvent être cohérents avec l'existence d'une assez grande variation au sein même des herbivores et, peuvent excéder les nuances dues à la biopurification des niveaux trophiques qui suivent (outre les conditions liées au sol). Les variabilités individuelles et inter espèce constituent donc des sources majeures de variation dans la chaîne alimentaire locale (Burton *et al.*, 1999).

À la variabilité interespèces s'ajoutent des complications introduites par les concentrations élémentaires inégales des différentes parties des plantes. En effet, dans un environnement donné, le ratio Sr/Ca, des racines, des rhizomes et des graines est nettement plus élevé que celui des feuilles (Sillen et Kavanagh, 1982; Sillen, 1992). Il semble que les feuilles et les pousses aient un ratio Sr/Ca proche de celui des solutions des sols, alors que celui des racines est de 1,5 à 10 fois plus élevé (Song, 2004). Ainsi, les herbivores, lorsque leur alimentation est dominée par la consommation de feuilles, présentent des rapports strontium/calcium plutôt faibles en comparaison d'une alimentation principalement composée d'éléments riches en fibres de la plante. Cela peut entraîner un défaut de distinction entre un herbivore se nourrissant des feuilles des plantes et un carnivore, confusion induite pas la tendance générale à la baisse du rapport strontium/calcium dans les niveaux trophiques (Sillen, 1992).

Les facteurs de confusion évoqués invitent à rester prudent dans les interprétations, à plus forte raison lorsqu'il s'agit d'espèces fossiles dont le régime alimentaire nous est inconnu (Elliott, 1993), mais la connaissance et la prise en compte de ces problèmes permet d'adapter notre démarche et nos conclusions.

Compte tenu des limites existantes, le recours aux analyses élémentaires nécessite un certain nombre de prérequis. La première condition est l'existence d'une documentation satisfaisante sur la relation directe entre les concentrations de l'oligo-élément utilisé présentes dans l'alimentation et celles que l'on observe dans les tissus du squelette humain après les différents processus de métabolisation (Beck, 1985)., ce qui implique une collecte des données de référence

Les niveaux élémentaires dans les tissus du squelette doivent être suffisants pour permettre des mesures précises, et de tels niveaux sont attendus dans des intervalles estimés en fonction de la consommation du spécimen.

Les concentrations d'un élément dans les tissus humains ne doivent pas avoir subi de modifications diagenétiques significatives, aussi bien par lessivage que par enrichissement, pendant toute l'étendue de la période d'inhumation (*cf. supra* III.3.3).

Il est préférable que les éléments utilisés ne soient pas des nutriments essentiels, car ces derniers sont plus facilement soumis à une régulation homéostatique puisque les caractéristiques essentielles de ces nutriments impliquent une fluctuation moins importante (Song, 2004).

Les concentrations d'un élément dans les tissus durs humains ne devraient pas non plus être affectées par une ou plusieurs maladies (à moins que la maladie capable d'altérer les concentrations élémentaires soit identifiable par ailleurs sur le squelette). Par exemple, le maintien de niveaux de calcium moyens ou élevés dans l'alimentation est peu susceptible d'avoir des répercussions significatives sur l'applicabilité du ratio Sr/Ca dans les analyses de reconstructions paléalimentaires à partir du moment où la discrimination du strontium n'est pas affectée. Cependant, il est plus prudent de ne pas utiliser ce ratio dans les cas de privation extrême en calcium (Sillen et Kavanagh, 1982). Pour ce qui est du strontium, selon les conclusions de Sillen et Kavanagh (1982), il est inapproprié de procéder à la quantification élémentaire en cas de suspicion de malnutrition ou de pathologie. L'absorption absolue et/ou les rapports des alcalino-terreux peuvent être, soit perturbés (par exemple, en cas de carence en vitamine D), soit améliorés (par exemple, en cas de déficit en calcium).

Les niveaux des éléments sélectionnés ne doivent pas être sujets à de trop grandes fluctuations liées aux variabilités individuelles, à l'âge ou au sexe, une fois l'âge adulte atteint (Beck, 1985).

Dans des conditions optimisées, ces éléments peuvent être testés pour des problèmes nutritionnels à l'aide d'autres indicateurs visibles sur les os et les tissus durs dentaires.

Plusieurs études indiquent que, généralement, lorsque l'absorption des alcalino-terreux est particulièrement efficace, comme c'est le cas pour les jeunes individus, la discrimination du strontium est relativement faible. De même, lorsque l'intensité de l'absorption augmente du fait d'une alimentation faible en calcium, la discrimination contre le strontium est amoindrie (Thompson, 1963). Cependant, tant que les niveaux de strontium restent dans des limites physiologiques normales chez l'adulte, l'absorption relative de strontium et de calcium ne varie pas dans d'importantes proportions (Sillen et Kavanagh, 1982). Des niveaux moyens ou élevés de calcium issus des apports nutritionnels sont susceptibles de ne pas avoir d'effet sur l'application du rapport Sr/Ca chez les adultes (et donc sur les restes osseux), si la discrimination du strontium n'est pas affectée. L'observation des niveaux de strontium et des rapports Sr/Ca osseux chez les adultes est risquée dans le cadre d'une démarche comparative entre adultes. En revanche, l'applicabilité du ratio strontium/calcium apparaît plus significative sur les jeunes individus, à partir des tissus dentaires, car, dans ce cas, le strontium et le calcium répondent aux critères nécessaires à une interprétation cohérente.

D'autre part, la teneur en strontium de nombreux produits alimentaires non consommés par les populations occidentales, comme les vers et autres insectes, ou les racines de nombreuses plantes, n'est pas connue.

V.2. PERSPECTIVES

Cette étude est la première reconstruction du régime alimentaire suivi pendant la prime enfance sur des populations archéologiques en utilisant les analyses LA-ICP-MS associées aux observations histologiques, à partir de l'émail dentaire humain.

De ce fait, nous sommes face à un manque évident de données comparables, d'autres recherches du même ordre seront à mener dans l'avenir pour compléter les références et offrir ainsi de meilleures bases de réflexions.

De même, l'application de la méthode associant la technologie LA-ICP-MS aux observations histologiques à des individus dont on connaît l'origine, l'histoire alimentaire, et les changements d'environnement éventuels dans le but de constituer une base de données de référence serait d'un appui précieux. Cela nous donnerait la possibilité de mieux évaluer la pertinence de la méthode pour la paléonutrition, de mieux comprendre la relation complexe entre la nature des éléments, dans la composition des aliments, et les proportions élémentaires finalement absorbées par l'organisme, ainsi que la relation entre les aliments consommés et l'incorporation de ces éléments dans l'émail. Dans le cas posé par le processus de sevrage, ces informations nous aideraient à approfondir nos recherches sur les aliments utilisés lors de l'introduction d'une alimentation différente du lait maternel et du sevrage complet.

De même que dans d'autres domaines de la recherche bioarchéologique, une standardisation de la méthodologie analytique serait un atout précieux, que ce soit au niveau de la préparation des échantillons dentaires (incluant la coupe de la dent et le repérage du tracé de prélèvement), au niveau des paramètres opératoires de LA-ICP-MS, ou au niveau des choix des isotopes des éléments utilisés pour les ratios.

Günther *et al.* (2000) envisagent une amélioration de la technologie LA-ICP-MS. Ils proposent une simplification du protocole dans sa mise en place avec une augmentation de l'automatisation, notamment avec le développement de changeurs d'échantillons. Ils suggèrent également que l'avancée de la recherche sur le laser, l'efficacité du transport des éléments et la diminution du fractionnement élémentaire pourront perfectionner la technologie et affiner ses applications aux recherches bioarchéologiques.

La durée de l'enregistrement de la première molaire définitive n'allant pas au-delà de 1/1,5 ans, il peut être trop court pour témoigner de l'âge d'un sevrage définitif plus tardif. Les analyses LA-ICP-MS des autres dents peuvent soutenir les résultats de la première molaire définitive, mais surtout étendre le champ chronologique de l'observation du régime alimentaire. De ce fait, les cas d'allaitement prolongés pourraient être mieux identifiés.

Pour confirmer les résultats de ces recherches et l'association du comportement du rapport Sr/Ca de l'émail avec l'alimentation et le processus de sevrage de l'enfant, les analyses isotopiques seraient particulièrement intéressantes. La composition isotopique de l'azote et du carbone est, elle aussi, archivée pendant la formation et la minéralisation de l'émail dentaire (Balasse, 2002; Passey et Cerling, 2002). Une double analyse élémentaire, à la fois des éléments traces et des

isotopes, en exploitant la biochronologie des cernes de croissance de l'émail, pourrait apporter des informations complémentaires sur l'alimentation de la prime enfance. En effet, dans ce cas, l'application de l'analyse isotopique serait affranchie de plusieurs de ses limites, comme la plus grande sensibilité de l'os et de la racine dentaire à la diagenèse, tout en conservant la résolution chronologique de l'information. Les incertitudes liées à l'interprétation des résultats dans les deux types d'analyses pourraient être levées ou non avec une meilleure probabilité. Cependant, cela n'est possible que dans le cas des squelettes d'enfants, puisque l'âge de la diversification alimentaire et celui du sevrage ne peuvent pas être détectés sur les adultes à partir des analyses isotopiques (en raison du turn-over des cellules osseuses qui ne permet de conserver l'enregistrement biologique de l'enfance, *cf. supra* II. 3.1.4).

D'autres éléments peuvent aussi être analysés. Pour identifier le processus de sevrage, le zinc peut être un élément intéressant pouvant être associé à des changements relatifs dans la consommation le lait maternel et d'aliments solides.

L'examen des concentrations de zinc dans la dent pourrait apporter une information complémentaire pour identifier une alimentation enrichie en produits laitiers, céréales et œufs. L'augmentation du ratio Zn/Ca et la teneur en zinc, après une diminution du rapport Zn/Ca associée à l'allaitement maternel, peut être liée aux aliments dans lesquels les concentrations en zinc sont plus élevées (Glab *et al.*, 2001). Aussi nous pourrions mieux cerner la nature des aliments mixtes introduits lors du sevrage, ce qui serait un indice sur la qualité et la conformité de la nutrition en fonction de l'âge de l'enfant.

Les concentrations élevées en zinc dans le colostrum pourraient refléter les pratiques concernant la consommation du colostrum. En effet, ce premier lait n'a pas toujours une image positive dans les populations historiques, parfois jugé insuffisant pour les besoins de l'enfant à cause de son aspect, voire impropre à la consommation. De ce cas, des substituts sont introduits dans la nutrition de l'enfant qui reçoit alors une alimentation non lactée avant que son organisme ne soit prêt à la digérer. De plus l'utilisation d'ustensiles plus ou moins propres présente de plus grands risques d'infection tant que l'allaitement maternel n'a pu renforcer les défenses immunitaires de l'enfant. Ces inadéquations sont donc supposées capables d'affecter la croissance, la santé et la survie des nouveau-nés. La consommation du colostrum semble être un facteur à prendre en compte dans l'étude des pratiques d'allaitement afin de mieux comprendre les variables intervenant dans la mortalité infantile des populations historiques et, dans ce contexte, le zinc apparaît comme un outil prometteur. Les recherches sur le zinc n'ont pas été approfondies les études sur le processus de sevrage. Cependant, dans le contexte de la recherche sur l'émail dentaire, il serait intéressant d'examiner l'incorporation du zinc pendant l'enfance et le processus de sevrage, et d'utiliser les techniques de micro échantillonnage pour avoir des données sur chaque étape du processus, ce qui apporterait des données comparatives avec le strontium.

Le magnésium apparaît aussi comme une piste intéressante à explorer dans le cadre des recherches sur l'identification des pratiques d'allaitement et de sevrage à partir de l'analyse des signaux chimiques dans l'émail dentaire. Une augmentation du ratio Mg/Ca reflète le sevrage, mais la réciproque ne se vérifie pas (Humphrey *et al.*, 2008b). L'examen du ratio Mg/Ca à travers

l'émail dentaire, sur le même principe que l'étude du ratio Sr/Ca, permettrait de confirmer, dans certains cas, l'interprétation du ratio Sr/Ca dans l'identification du sevrage.

Le modèle proposé dans ce travail ne tient pas compte des différences de composition entre le colostrum et lait maternel des premiers mois et le lait maternel plus mature, car le colostrum est censé satisfaire les besoins métaboliques du nouveau-né seulement durant les trois premiers jours (Rossipal *et al.* 2000). Il est difficile de déterminer si cette durée est suffisante pour laisser un signal chimique significativement différent et distinguable. Cependant, cette observation laisse des perspectives intéressantes pour répondre à des questionnements sur le don du colostrum et l'impact de ce dernier sur la santé et la survie du nouveau-né.

Au-delà du processus de sevrage, les analyses du strontium peuvent être un élément important pour estimer la nature hétérogène (d'un point de vue biologique) d'une population. Les ratios des isotopes de strontium ($87\text{Sr}/86\text{Sr}$) peuvent être examinés pour identifier des origines différentes pendant la prime enfance et distinguer des groupes de migration dans les échantillons archéologiques (Prince *et al.*, 1994; Budd *et al.*, 1998; Müller *et al.*, 2003; Andrusko *et al.*, 2009; Buzon et Simonetti, 2013). Cela s'appuie sur le principe que des ratios isotopiques distincts reflètent des différences environnementales géologiques, en particulier l'eau locale, le sol et les aliments. Dans le cadre des études sur les migrations, certains auteurs complètent leurs données par l'examen d'autres éléments tels que l'oxygène ou le plomb, dans l'émail dentaire et dans l'os humain (Slovak *et al.*, 2003; Turner *et al.*, 2009; Chenery *et al.*, 2010; Buzon *et al.*, 2012; Phaff *et al.*, 2012), ou encore le mercure (Hoffmann *et al.*, 2000). Ce champ de recherche a des implications importantes pour les recherches sur les dynamiques de population. Les niveaux des isotopes de strontium peuvent nous aider à distinguer des groupes d'origines différentes, dans un premier temps, et éventuellement nous éclairer sur des questions liées à l'origine visant à restituer des mouvements de populations.

V.3. CONCLUSION

Les objectifs de ce travail sont :

- Distinguer la période d'allaitement de la période d'alimentation adulte.
- Distinguer l'allaitement exclusif de l'alimentation mixte.
- Définir un protocole pour la préparation et le traitement des échantillons.
- Définir l'apport des analyses élémentaires à l'étude anthropologique.

Notre modèle et les résultats de nos analyses dentaires montrent qu'il est possible de suivre les transitions alimentaires pendant le processus de sevrage à partir du rapport Sr/Ca dans l'émail dentaire en formation, pendant la période de sevrage, et de proposer une interprétation chronologique des variations significatives de ces éléments de l'émail pour distinguer le type d'alimentation à la naissance et au début du sevrage chez les nouveau-nés. Cette méthode peut être utilisée pour suivre les changements alimentaires pendant la petite enfance, au cas par cas.

Cette technique offre également une nouvelle approche de reconstitution du processus de sevrage et offre de nouvelles pistes de recherches sur cette question, notamment sur la relation entre le régime alimentaire de l'enfant en bas âge et les indicateurs liés à la croissance, la santé et la survie, dans les populations archéologiques.

L'un des objectifs de notre étude est de déterminer si un individu, représenté par son squelette, a connu une période d'allaitement exclusif, d'en mesurer la durée, et d'estimer l'âge du sevrage complet. Plus précisément, la question est d'identifier et d'interpréter les signaux chimiques du rapport Sr/Ca dans les séquences d'émail qui traversent les lignes de croissance de la couronne dentaire afin de déterminer s'ils peuvent traduire des changements alimentaires dans l'enfance. Les étapes principales de transition alimentaire durant l'enfance vont de l'allaitement exclusif au sevrage complet et définitif. Cette question est d'autant plus pertinente que, dans les sources écrites, le terme « sevrage » peut être utilisé, à la fois, pour évoquer l'introduction d'une alimentation autre que le lait maternel et pour parler de la cessation complète et définitive de l'allaitement maternel (Lawrence, 1994 ; Katzenberg *et al.*, 1996). Si l'on prend en considération les textes anciens traitant de ce sujet, il faut donc être particulièrement vigilant sur les nuances sous-entendues par le terme « sevrage ». En effet, dans la littérature, l'allaitement long n'est pas toujours synonyme d'exclusif et il peut arriver, notamment au Moyen Âge, que le sevrage complet soit tardif, mais que la diversification, généralement sous forme de bouillies à base de diverses céréales et laits animaux, soit précoce.

Pour répondre à cette question, nous avons utilisé des dents archéologiques médiévales que nous avons soumises à des analyses LA-ICP-MS et observées au microscope à confocal.

Les résultats suggèrent que le rapport Sr/Ca enregistré par l'émail dentaire reflète les processus de diversification alimentaire et de sevrage complet, à partir de l'absorption prédominante du lait maternel jusqu'à la dépendance prédominante de l'alimentation solide. Cela est reflété par une hausse des valeurs Sr/Ca, après la naissance (plus ou moins longtemps après la naissance selon les cas), au moment où commence la diversification alimentaire, cette hausse augmentant avec le temps. À l'inverse, l'arrêt du lait maternel est reflété par la diminution du rapport Sr/Ca. Le rapport Sr/Ca est donc très intéressant pour identifier l'introduction d'une alimentation différente du lait maternel et la prédominance de la consommation de l'alimentation solide. Actuellement, les isotopes de l'azote sont utilisés de manière fiable pour identifier l'arrêt de l'absorption du lait maternel (sevrage) dans les tissus durs (*cf. supra* II. 3.1). L'estimation du rapport Sr/Ca par LA-ICP-MS au cours de la croissance de l'émail dentaire nous permet d'avoir une information complémentaire originale, l'âge d'introduction d'une alimentation différente du lait maternel. De plus, l'exploitation de la croissance régulière de l'émail dentaire offre des précisions chronologiques pour les informations obtenues.

L'augmentation de la discrimination du strontium par les intestins à mesure du développement gastro-intestinal impliquant des valeurs réduites du ratio Sr/Ca. Cela n'exclut pas la poursuite de la consommation de lait maternel jusqu'autour de 4 ans, mais l'interprétation des analyses élémentaires en vue d'obtenir des informations sur le processus de sevrage devient plus délicate. Or, nous n'avons, dans ce travail, aucun individu soumis à un allaitement prolongé de cette durée

(ou pas d'enregistrement assez long pour le mettre en évidence), nos interprétations ne sont pas touchées par cet élément de complexité.

Les diverses expérimentations techniques testées lors de ce travail ont permis de développer un protocole applicable aux différentes étapes de la démarche analytique. Les choix en matière de préparation des lames minces permettent de garantir la pureté chimique de l'échantillon (choix de la résine, du matériau de fixation de la dent pendant l'induration, méthodes de nettoyage du matériel, notamment). Les réflexions méthodologiques ont également porté une attention particulière à la qualité de la coupe (orientation, épaisseur, méthode d'abrasion). Des recherches approfondies et plusieurs essais ont permis de faire un choix argumenté en matière d'équipement pour le traitement des échantillons (Microscope confocal et LA-ICP-MS).

L'interprétation de l'âge associé aux changements alimentaires est compliquée par une réalité physiologique importante, à savoir le décalage chronologique entre l'enregistrement des signaux chimiques et l'enregistrement physique dans les microstructures de l'émail. L'introduction d'aliments solides, ou au contraire le sevrage peuvent avoir eu lieu un peu plus tôt et apparaître plus tardivement dans l'émail, compte tenu des processus physiologiques qui régissent l'absorption des oligo-éléments dont le timing est envisagé autour de deux semaines. Ce point devra être approfondi et précisé par de futures recherches. L'estimation de l'âge peut être précisé avec l'utilisation des stries régulières de Retzius, ce qui implique un équipement en microscopie à confocal adéquat.

L'association des analyses élémentaires à l'utilisation du rythme de formation de l'émail a permis d'identifier la période d'allaitement exclusif, la période d'alimentation mixte et l'âge du sevrage définitif (lorsque ce dernier intervient avant la fin de l'enregistrement dentaire). Les analyses isotopiques, jusque-là plus largement utilisées pour les questions de sevrage, identifient la situation nutritionnelle de l'enfant (allaité ou sevré) à sa mort, quel que soit son âge. Les analyses élémentaires précisent la chronologie des événements du sevrage jusqu'à environ 1/1,5 ans. L'utilisation des marqueurs histologiques, associée aux analyses élémentaires (impossible avec les analyses isotopiques), permet d'avoir des informations plus générales sur la santé de l'enfant.

La cohérence entre les analyses élémentaires et les analyses isotopiques dont témoignent les échantillons qui ont pu bénéficier des deux examens accrédite la fiabilité des résultats et des interprétations par le protocole que nous proposons.

Dans ce travail, nous considérons le sevrage comme un processus progressif dont le début est marqué par l'introduction d'une alimentation diversifiée dont la part augmente ensuite, de façon plus ou moins rapide et régulière, tandis que la consommation de lait maternel diminue. Le processus s'achève avec l'arrêt complet de l'allaitement (Katzenberg *et al.*, 1996). Dans cette étude, nous démontrons qu'il est possible, avec un protocole précis, d'aller au-delà du concept « d'âge du sevrage » comme événement et d'explorer « le processus de sevrage » dans ses nuances.

En raison des faibles effectifs et des disparités géographiques et chronologiques, ni l'analyse de l'évolution au cours du temps ni l'identification d'un modèle de population en fonction des

conditions environnementales et socioculturelles n'étaient envisageables. Néanmoins, quelques observations et comparaisons intéressantes ont pu être formulées dans la discussion.

Notre méthode donne un aperçu original des comportements d'allaitement et de sevrage durant le Moyen Âge. Elle propose un protocole expérimental donnant des résultats fiables, utilisables pour identifier des modèles de population, dégager des tendances, et analyser l'évolution des pratiques, dans le cadre d'une application de la méthode à plus grande échelle (avec un échantillonnage plus important pour un même site dans une même tranche chronologique). Elle propose également plusieurs éléments de réflexion pour mieux comprendre les mécanismes, les facteurs impliqués dans les pratiques d'allaitement et de sevrage et leurs conséquences, concernant l'alimentation des jeunes enfants. En effet, les interactions entre la chimie des aliments, le métabolisme humain, la santé, la nutrition, les processus d'incorporation des oligoéléments dans les tissus durs étant complexes et pas complètement comprises, les comportements alimentaires peuvent être mieux restitués en croisant les données.

Ainsi, la technique présentée ici pourra être appliquée lors d'enquêtes approfondies sur les changements de comportement vis-à-vis du sevrage au cours de l'histoire, en interaction avec les transitions culturelles et démographiques majeures (comme, par exemple, l'industrialisation et l'urbanisation).



BIBLIOGRAPHIE

- AITKENS, J. M. 1976. Factors affecting the distribution of zinc in the human skeleton. *Calcified Tissue Research*, 20, 23-30.
- AJACQUES, J. C. 2002. Anomalies dentaires *Traité EMC Stomatologie*. Paris, Editions scientifiques et médicales Elsevier SAS.
- ALEXANDRE, P. 1987. Le climat en Europe au Moyen Âge. Contribution à l'histoire des variations climatiques de 1000 à 1425, d'après les sources narratives de l'Europe occidentale. Paris, éditions de l'École des hautes études en sciences sociales, 808 p.
- ALEXANDRE-BIDON, D. & CLOSSON, M. 1985. L'enfant à l'ombre des cathédrales. Lyon, Presses universitaires de Lyon, 278 p.
- AL-JAWAD, M., ADDISON, O., JAMES, A., HENDRIKSZ, C. J. & KHAN, M. A. 2012. Disruption of enamel crystal formation quantified by synchrotron microdiffraction. *Journal of Dentistry*, 40 (12), 1074-1080.
- ALOMARY, A., AL-MOMANI, I. F. & MASSADEH, A. M. 2006. Lead and calcium in human teeth from Jordan by atomic absorption spectrometry : Some factors influencing their concentrations. *Science of the Total Environment*, 369, 69-75.
- ALVIRA, F. C., RAMIREZ ROZZI, F. & BILMES, G. M. 2010. Laser-Induced Breakdown spectroscopy Microanalysis of trace elements in Homo Sapiens teeth. *Applied Spectroscopy*, 64, 313-319.
- AMARASIRIWARDENA, D., DURRANT, S. F., LÁSZTITY, A., KRUSHEVSKA, A., ARGENTINE, M. D. & BARNES, R. M. 1997. Semiquantitative analysis of biological materials by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Microchemical Journal*, 56, 352-372.
- AMIN, S. 1990. Infant mortality and breastmilk supplementation in Bangladesh. *The Bangladesh Development Studies*, XVIII, 18(4), 15-31.
- ANDRUSHKO, V. A., BUZON, M. R., SIMONETTI, A. & CREASER, R. A. 2009. Strontium isotope evidence for prehistoric migration at Choquepukio, Valley of Cuzco, Peru. *Latin American Antiquity*, 20, 57-75.
- ANTOINE, D., HILLSON, S. & DEAN, M. C. 2009. The developmental clock of dental enamel: a test for the periodicity of prism cross-striations in modern humans and an evaluation of the most likely sources of error in histological studies of this kind. *Journal of Anatomy*, 214, 45-55.
- ANTOINE, S. E., CHILD, A. M., NICHOLSON, R. A. & POLLARD, A. M. 2000. The biochemistry and microbiology of buried human bone, in relation to dietary reconstruction. *Circaea*, 9, 65-79.
- AOBA, T. 1996. Recent observations on enamel crystal formation during mammalian amelogenesis. *The anatomical record*, 245, 208-218.
- AOBA, T., FUKAE, M., TANABE, T., SHIMIZU, M. & MORENO, E. C. 1987. Selective adsorption of porcine-amelogenins onto hydroxyapatite and their inhibitory activity on hydroxyapatite growth in supersaturated solutions. *Calcified Tissue International*, 41, 281-289.
- ARMELAGOS, G. J., GOODMAN, A. H., HARPER, K. N. & BLAKELY, M. L. 2009. Enamel Hypoplasia and early mortality: bioarcheological support for the Barker hypothesis. *Evolutionary Anthropology*, 18, 261-271.
- ARRUDA-NETO, J. D. T., DE OLIVEIRA, M. C. C., SARKIS, J. E. S., BORDINI, P., MANSO-GUEVARA, M. V., GARCIA, F., PRADO, G. R., KRUG, F. J., MESA, J., BITTENCOURT-OLIVEIRA, M. C., GARCIA, C., RODRIGUES, T. E., SHTEJER, K. & GENOFRE, G. C. 2009. Study of environmental burden of lead in children using teeth as bioindicator. *Environnement International*, 35, 614-618.
- ASPER, H. V. 1916. Über die "Braune retzinusghsche parallelstreifung" im schmelz der menschlichen zähne. *Schweiz. V. schr. Zahnheilk.*, 26, 275-214.

- AURIOL, M. M., LE CHARPENTIER, Y. & LE NAOUR, G. 2000. Histologie de l'émail. *Traité EMC Stomatologie*. Paris, Editions scientifiques et médicales Elsevier SAS.
- AUVARD, P. V. & PINGAT, H. 1889. Hygiène infantile ancienne et moderne, Paris.
- BACON, A. M. 1989. Estimation de l'âge à la mort des enfants actuels et fossiles à partir des stries d'accroissement de l'émail dentaire. Avantages et inconvénients de la méthode. *Bulletin et mémoire de la société d'anthropologie de Paris*, 1, 3-12.
- BALASSE, M. 2002. Reconstructing dietary and environmental history from enamel isotopic analysis : Time resolution of intra-tooth sequential sampling. *International Journal of Osteoarchaeology*, 12, 155-165.
- BALASSE, M. 2003. Potential biases in sampling design and interpretation of intra-tooth isotope. *International Journal of Osteoarchaeology*, 13, 3-10.
- BALTER, V., BLICHERT-TOFT, J., BRAGA, J., TELOUK, P., THACKERAY, F. & ALBARÈDE, F. 2008. U-Pb dating of fossil enamel from the swartkrans pleistocene hominid site, South Africa. *Earth and Planetary Science Letters*, 267, 236-246.
- BALTER, V., BRAGA, J., TELOUK, P. & THACKERAY, F. 2012. Evidence for dietary change but not landscape use in South African early hominins. *Nature*, 489, 7417, 558-560.
- BANNER, J. L. 1995. Application of the trace element and isotope geochemistry of strontium to studies of carbonate diagenesis. *Sedimentology*, 805-824.
- BARFOD, G. H., OTERO, O. & ALBARÈDE, F. 2003. Phosphate Lu-Hf Geochronology. *Chemical Geology*, 200, 241-253.
- BARTLETT, J. D., GANSS, B., GOLDBERG, M., MORADIAN-OLDAK, J., PAINE, M. L., SNEAD, M. L., WEN, X., WHITE, S. N. & ZHOU, Y. 2006. Protein-protein interactions of the developing enamel matrix. *Current topics in developmental biology*, 74, 57-115.
- BARTLETT, J. D. & SIMMER, J. P. 1999. Proteinases in developing dental enamel. *Critical Reviews in Oral Biology* 10, 425-441.
- BARTSIOKAS, A. & MIDDLETON, A. P. 1992. Characterization and dating of recent and fossil bone by X-ray diffraction. *Journal of Archaeological Science*, 19, 63-72.
- BAUDELOCQUE, J. L. 1790. *A system of midwifery*, Londres.
- BAWDEN, J. W. 1989. Calcium transport during mineralization. *The Anatomical Record*, 224, 226-233.
- BAYLE, P. 2008. Analyses quantitatives par imagerie à haute résolution des séquences de maturation dentaire et des proportions des tissus des dents déciduales chez les Néanderthaliens et les hommes modernes, Thèse de doctorat, Université de Toulouse III - Paul Sabatier.
- BEAUMONT J., ATKINS, E. C., BUCKBERRY J., HAYDOCK H., HORNE P., HOWCROFT R., MACKENZIE K. & MONGOMERY J. 2018. Comparing apples and oranges : why infant bone collagen may not reflect dietary intake in the same way as dentine collagen. *American Journal of Physical Anthropology*, 167, 524-542.
- BECK, L. A. 1985. Bivariate analysis of trace elements in bone. *Journal of Human Evolution*, 14, 493-502.
- BECKER, J. S., MATUSCH, A. & WU, B. 2014. Bioimaging Mass spectrometry of trace elements - recent advance and applications of LA-ICP-MS. *Analytica Chimica Acta*, 835, 1-18.
- BECKER, J. S., ZORIY, M., MATUSCH, A., WU, B., SALBER, D., PALM, C. & BECKER, J. S. 2010. Bioimaging of metals by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Mass Spectrometry Reviews*, 29, 156-175.
- BELLOT-GURLET, L., POUPEAU, G., SALOMON, J., CALLIGARO, T., MOIGNARD, B., DRAN, J.-C., BARRAT, J.-A. & PICHON, L. 2005. Obsidian provenance studies in archaeology : A comparison between PIXE, ICP-AES and ICP-MS. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 240, 583-588.
- BERGER, J. F. & BRAVARD, J. P. 2012. Le développement économique romain face à la crise environnementale : le cas de la Gaule narbonnaise. In: BERGER, J. F. (ed.) *Des climats et des hommes*. Paris, La Découverte, 496 p.

Bibliographie

- BERMAN, M. L., HANSON, K. & HELLMAN, I. L. 1972. Effect of breast feeding on postpartum menstruation, ovulation and pregnancy in Alaskan Eskimos. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 114, 524-534.
- BERTRAND, M. F. 1997. Biochimie des différentes structures de l'organe dentaire. *Traité EMC Stomatologie*. Paris, Editions scientifiques et médicales Elsevier SAS.
- BETSINGER, T. K. 2007. *The biological consequences of urbanization in medieval Poland*. Thesis, The Ohio State University.
- BEYNON, A. D., CLAYTON, C. B., RAMIREZROZZI, F. & REID, D. J. 1998a. Radiographic and histological methodologies in estimating the chronology of crown development in modern humans and great apes: a review, with some applications for studies on juvenile hominids. *Journal of Human Evolution* 35, 351-370.
- BEYNON, A. D., DEAN, M. C., LEAKEY, M. G., REID, D. J. & WALKER, A. 1998b. Comparative dental development and microstructure of *proconsul* teeth from Rusinga Island, Kenya. *Journal of Human Evolution*, 35, 163-209.
- BEYNON, A. D., DEAN, M. C. & REID, D. J. 1991. On thick and thin enamel hominoids. *American Journal of Physical Anthropology*, 86, 295-309.
- BIELINSKI, R. W. 2006. Magnésium et activité physique. *Revue Médicale Suisse*, 2.
- BLAKELY, R. L. 1989. Bone strontium in pregnant and lactating females from archaeological samples. *American Journal of Physical Anthropology*, 80, 173-185.
- BLAKELY, R. L. & BECK, L. A. 1981. Trace elements, nutritional status and social stratification at Etowah, Georgia. Unpublished manuscript. Department of Anthropology, Georgia State University.
- BLAKEY, M. L., LESLIE, T. E. & REIDY, J. P. 1994. Frequency and chronological distribution of dental enamel hypoplasia in enslaved African Americans : A test of the weaning hypothesis. *American Journal of Physical Anthropology*, 95, 371-383.
- BLUMENSCHINE, R. & CAVALLO, J. 1992. Nos ancêtres, des charognards ? *Pour la Science*, 182, 74-81.
- BOCHERENS, H. 1997. L'apport de la biogéochimie isotopique à la connaissance des comportements de subsistance des chasseurs cueilleurs anciens. In : Patou-Mathis M., ed. *L'alimentation des hommes du paléolithique. Approche pluridisciplinaire*, Liege, ERAUL 83, 322 p.
- BOCHERENS, H. 1999. Isotopes stables et reconstitution du régime alimentaire des hominidés fossiles : une revue. *Bulletin et mémoire de la société d'anthropologie de Paris*, 11, 261-267.
- BOCHERENS, H., BRINKMAN, D. B., DAUPHIN, Y. & MARIOTTI, A. 1994. Microstructural and geochemical investigations on Late Cretaceous archosaur teeth from Alberta, Canada. *Canadian Journal of Earth Science*, 31, 783-792.
- BOCHERENS, H., DRUCKER D., 2003. Trophic Enrichment of carbon and nitrogen in bone collagen : case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems. *International Journal of Osteoarchaeology*, 13, 46-53.
- BOCQUET, A. 1967. Le problème de l'occupation palafittique au nord du Bas-Dauphiné. Du Néolithique final au Bronze Moyen. *Bulletin de la société préhistorique française. Etudes et Travaux*, 64, 501-516.
- BODRI, L. & ČERMÁČ, V. 1995. Climate changes of the last millennium inferred from borehole temperatures : Results from the Czech Republic. Part. I. *Global and Planetary change*, 11, 121-125.
- BODRI, L. & ČERMÁČ, V. 1997. Climate changes of the last millennium inferred from borehole temperatures : Results from the Czech Republic. Part. II. *Global and Planetary Change*, 14, 163-173.
- BOULVAIN, F. 2007. Géologie générale : du minéral aux géosphères, Paris, Ellipse, 240 p.
- BOURBOU, C., FULLER, B. T., GARVIELOK, S. & RICHARDS, M. P. 2013. Nursing mothers and feeding bottles : reconstructing breastfeeding and weaning patterns in Greek Byzantine populations (6th - 15th centuries AD) using

- carbon and nitrogen stable isotope ratios. *Journal of Archaeological Science*, 40, 3903-3913.
- BOURD-BOITTIN, K., FANCHON, S., GOLDBERG, M., SEPTIER, D. & MENASHI, S. 2004. Métalloprotéases et inhibiteurs de métalloprotéases au cours de l'odontogénèse. Rôle biologique des sous-produits de dégradation matricielle. *Les cahiers de l'Association dentaire française*, 16-17, 46-55.
- BOURGEOIS-PICHAT, J. 1951. La mesure de la mortalité infantile. Principes et méthodes. *Population*, 2, 233-248.
- BOYDE, A. 1963. Estimation of age at death of young human skeletal remains from incremental lines. Third International Meeting in Forensic Immunology, Medecine, Pathology and toxicology, 1963, 36-46.
- BOYDE, A. 1967. The development of enamel structure. *Proceedings of Royal Society of Medicine*, 60, 923-928.
- BOYDE, A. 1979. Carbonate concentration, crystal centers, core dissolution, caries, cross striations, circadian rhythms, and compositional contrast in the SEM. *Journal of Dental Research*, 58, 981-983.
- BOYDE, A. 1990. Developmental interpretations of dental microstructure. I In: DEROUSSEAU C.J., ed. Primate life history and evolution, monographs in primatology, 14, Wiley-liss, 229-267.
- BOYDE, A., PETRAN, M. & HADRAVSKY, M. 1983. Tandem scanning reflected light microscopy of internal features in whole bone and tooth samples. *Journal of Microscopy*, 132, 1-7.
- BRAGA J., CHAFIK S., RISSER L. & DUMONCEL J. 2019. Cochlear shape that the human organ of hearing is sex-typed from birth. *Scientific Reports* 9, 10889, 1-9.
- BRANGER, B., CEBRON, M., PICHEROT, G. & CORNULIER DE, M. 1998. Facteurs influençant la durée de l'allaitement maternel chez 150 femmes. *Archives de Pédiatrie*, 5, 489-496.
- BRAUX, J. 2011. Influence d'un phosphate de calcium substitué en strontium sur la physiologie de l'ostéoblaste humain en culture et évaluation de son potentiel de réparation osseuse chez la souris. Thèse de doctorat, Université de Reims.
- BRIEND, A. 1995. Allaitement au sein, état nutritionnel, espacement des naissances et survie de l'enfant au Bangladesh. In : NÉMO, J. ed. *Populations du Sud et Santé : Parcours et horizons*. Paris, ORSTOM Editions, 302 p.
- BROCHERIOU, C. & ROQUANCOURT, A. D. 1987. Anatomie pathologique dentaire et stomatologique. Paris, éditions cdp, 128 p.
- BROCHIER, J. E. 1983. Deux mille ans d'histoire du climat dans le Midi de la France : étude sédimentologique. *Annales. Economies, Sociétés, Civilisations.*, 38, 425-438.
- BROMAGE, T. G. 1991. Enamel incremental periodicity in the pig-tailed macaque : a polychrome fluorescent labeling study of dental hard tissues. *American Journal of Physical Anthropology*, 86, 205-214.
- BROMAGE, T. G. & DEAN, M. C. 1985. Re-evaluation of the age at death of PlioPleistocene fossil hominids. *Nature*, 317, 525-528.
- BROMAGE, T. G. & LACRUZ, R. S. 2006. Appositional enamel growth in molars of south African fossil hominids. *Journal of Anatomy*, 209, 13-20.
- BROMAGE, T. G., LACRUZ, R. S., PEREZ-CHOA, A. & BOYDE, A. 2007. Portable confocal scanning optical microscopy of *Australopithecus africanus* enamel structure. In : BAILEY S.E. & HUBLIN J. J. eds. *Dental perspectives on human evolution*. Dordrecht, Springer, 412 p.
- BROMAGE, T. G., PEREZ-CHOA, A. & BOYDE, A. 2005. Portable confocal microscope reveals fossil hominid microstructure. *Microscopy and Analysis*, 19, 21-23.
- BRONISLAVA, D. 1894. Contribution à l'étude de l'allaitement maternel. Thèse de Doctorat, G. Steinheil Editeur.
- BROWN, A. B. 1973. Bone strontium content as a dietary indicator in human skeletal populations. Thesis, University of Michigan.
- BROWN, A. B. 1974. Bone strontium as a dietary indicator in human skeletal. *Rocky Mountain Geology*, 13, 47-48.

Bibliographie

- BROWN, A. B. & BLAKELY, R. L. 1985. Biocultural adaptation as reflected in trace element distribution *Journal of Human Evolution*, 14, 461-468.
- BROWN, C. J., CHENERY, S. R. N., SMITH, B., MASON, C., TOMKINS, A., ROBERTS, G. J., SERUNJOGI, L. & TIBERINDWA, J. V. 2004. Environmental influences on the trace element content of teeth – implications for disease and nutritional status. *Archives of Oral Biology*, 49, 705-717.
- BROWNING, D. R. 1974. Méthodes spectroscopiques, Paris, Masson, 191 p.
- BRUT, C. 1993. L'église mérovingienne de SaintMartin-des-Champs. *Archéologia*, 295, 34-37.
- BRUT, C. 2001. La fouille d'un grand monument médiéval : Le prieuré de Saint-Martin-desChamps. *Archéologia*, 378, 54-63.
- BUDD, P., MONTGOMERY, J., COX, A., KRAUSSE, P., BARREIRO, B. & THOMAS, R. G. 1998. The distribution of lead within ancient and modern human teeth : Implications for long-term and histological exposure monitoring. *The Science of the Total Environment*, 220, 121-136.
- BUDD, P., MONTGOMERY, J., EVANS, J. & BARREIRO, B. 2000. Human tooth enamel as a record of the comparative lead exposure of préhistoric and modern people. *The Science of the Total Environment*, 263, 1-10.
- BURT, N. M. 2013. Stable isotope ratio analysis of breastfeeding and weaning practices of children from medieval Fishergate House York, UK. *American Journal of Physical Anthropology*, 152, 407-416.
- BURTON, J. H. & PRICE, T. D. 1990. The ratio of barium to strontium as a paleodietary indicator of consumption of marine resources. *Journal of Archaeological Science*, 17, 547-557.
- BURTON, J. H. & PRICE, T. D. 1999. Evaluation of bone strontium as a measure of seafood consumption. *International Journal of Osteoarchaeology*, 9, 233-236.
- BURTON, J. H. & PRICE, T. D. 2006. The use and abuse of trace elements for paleodiet research. *In: AMBROSE, S. H. & KATZENBERG, M. A. eds. Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*. New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 269 p.
- BURTON, J. H., PRICE, T. D. & MIDDLETON, W. D. 1999. Correlation of bone Ba/Ca and Sr/Ca due biological purification of calcium. *Journal of Archeological Science*, 26, 609-616.
- BURTON, J. H. & WRIGHT, J. T. 1995. Nonlinearity in the relationship between bone Sr/Ca and diet : paleodietary implications. *American Journal of Physical Anthropology*, 96, 273-282.
- BUZON, M. R., CONLEE, C. A., SIMONETTI, A. & BOWEN, G. J. 2012. The consequences of Wari contact in the Nasca region during the Middle Horizon : archaeological, skeletal, and isotopic evidence. *Journal of Archaeological Science*, 39, 2627-1636.
- BUZON, M. R. & SIMONETTI, A. 2013. Strontium isotope (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) variability in the Nile valley : Identifying Residential Mobility during ancient egyptian and nubian sociopolitical changes in the new kingdom and napatan periods. *American Journal of Physical Anthropology*, 1-9.
- BYRNE, K. B. & PARRIS, D. C. 1987. Reconstruction of the diet of the middle Woodland Amerindian population at Abbott farm by bone trace-element analysis. *American Journal of Physical Anthropology*, 74, 373-384.
- CANTRELLE, P., LERIDON, H. & LIVENAIS, P. 1980. Fécondité, allaitement et mortalité infantile. Différences inter-ethniques dans une même région : Saloum (Sénégal). *Population*, 35^e année, 623-647.
- CANTURK, N., ATSU, S. S., SEMA AKA, P. & DAGALP, R. 2014. Neonatal line on fetus and infant teeth. an indicator of live birth and mode of delivery. *Early Human Development*, 90, 393-397.
- CARON, C., XUE, J. & BARTLETT, J. D. 1998. Expression and localisation of membrane type 1 matrix metalloproteinase in tooth tissues. *Matrix Biology*, 17, 501-511.
- CAROPRESO, S., BONDIOLI, L., CAPANNOLO, D., CERRONI, L., MACCHIARELLI, R. & CONDO, S. G. 2000. Thin sections for hard

- tissue histology : a new procedure. *Journal of Microscopy*, 199, 244-247.
- CASTAING, R. 1973. Introduction sur les méthodes de la microanalyse locale : comparaison de l'analyseur ionique et de la microsonde électronique. In : MONTEL M. G., ed. Physicochimie et cristallographie des apatites d'intérêt biologique, Paris, Centre National de la Recherche Scientifique, 502 p.
- CASTRO, W., HOOGEWERFF, J., LATKOCZY, C. & ALMIRALL, J. R. 2010. Application of laser ablation (LA-ICP-MS) for the elemental analysis of bone and teeth samples for discrimination purposes. *Fornsic Science International*, 195, 17-27.
- CATERINA, J. J., SKOBE, Z., SHI, J., DING, Y., SIMMER, J. P., BIRKEDAL-HANSEN, H. & BARTLETT, J. D. 2002. Enamelysin (matrix metalloproteinase 20) deficient mice display an amelogenesis imperfecta phenotype. *The Journal of Biological Chemistry*, 277, 49598-49604.
- CAZALBOU, S., EICHERT, D., DROUET, C., COMBES, C. & REY, C. 2004. Minéralisations biologiques à base de phosphate de calcium *Comptes Rendus Palevol*, 3, 563-572.
- CENTLIVRES CHALLET, M.-C. 2016. Tîre-lait ou biberons romains ? Fonctions, fonctionnalités et affectivité. *Antiquité Classique*, 85, 157-180.
- CHARNOV, E. L. & BERRIGAN, D. 1993. Why do female primates have such long lifespans and so few babies ? Or life in the slow lane. *Evolutionary Anthropology*, 1, 191-194.
- CHÉDEVILLE, A. 2004. Les grands siècles du Moyen Âge (XI^e-XIII^e siècles). In : CHÉDEVILLE, A. ed. *La France au Moyen Âge*. Paris, Presse universitaire de France, 128 p.
- 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, 150-163.
- CHINIQUE DE ARMAS Y. & PESTLE W. 2018. Assessing the association between subsistence strategies and the timing of weaning among indigenous archaeological populations of the caribbean. *International Journal of Osteoarchaeology*, 28, 492-509.
- CHRISTENSEN, G. J. & KRAUS, B. S. 1965. Initial calcification of the human permanent first molaire. *Journal of Dental Research*, 44, 1338-1342.
- CLAVERIE, F. 2009. Développement et applications d'un système laser femtoseconde infrarouge basse énergie et haute cadence de tir pour l'analyse d'éléments trace dans les solides par couplage ablation laser / ICPMS, Thèse de Doctorat, Université de Pau et des Pays d'Adour.
- CLAYTON, F., SEALY, J. & PFEIFER, S. 2006. Weaning age among foragers at matjes river rock Shelter, South Africa, from stable nitrogen and carbon isotope analyses. *American Journal of Physical Anthropology*, 129, 311-317.
- COHEN, D. D., CLAYTON, C. B. & AINSWORTH, T. 1981. Preliminary investigations of trace element concentrations in human teeth. *Nuclear Instruments and Methods*, 188, 203-209.
- COLARDELLE, R. 1996. Saint-Laurent et les cimetières de Grenoble du IV^e au XVIII^e siècle. In : GALINIÉ, H. & ZADORA-RIO, E. eds. *Archéologie du cimetière chrétien Actes du 2^e colloque A.R.C.H.E.A., Orléans, 11^e supplément à la revue Archéologique du centre*.
- COLARDELLE, R. 2008. La ville et la mort. Saint-Laurent de Grenoble, 2000 ans de tradition funéraire, Brepols Publishers, 413 p.
- COMAR, C. L. 1963. Some over-all aspects of strontium-calcium discrimination. In : WASSERMAN R.H. ed. *The transfer of calcium and strontium across biological membranes* New York, Academic Press, 443 p.
- COMAR, C. L., RUSSELL, L. & WASSERMAN, R. H. 1957. Strontium- calcium movement from soil to man. *Science*, 126, 485-496.
- CONDON, K. W. 1981. Correspondence of developmental defects between the mandibular canine and first premolar. Thesis, University of Arkansas.
- COPPENS, Y. 1986. Evolution de l'homme. *Comptes rendus. La vie des sciences*, 3, 227-243.

Bibliographie

- COX, A., KEENAN, F., COOKE, M. & APPLETON, J. 1996. Trace element profiling of dental tissues using laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 354, 254-258.
- CREMERS, D. A. & RADZIEMSKI, L. J. 2006. Handbook of laser-induced breakdown spectroscopy, Chichester, John Wiley and Sons, Ltd, 283 p.
- CUCINA, A., DUDGEON, J. & NEFF, H. 2007. Methodological strategy for the analysis of human dental enamel by LA-ICP-MS. *Journal of Archaeological Science*, 34, 1884-1888.
- CUCINA, A., TIESLER, V., SIERRA SOSA, T. & NEFF, H. 2011. Trace-element evidence for foreigners at a Maya port in northern Yucatan. *Journal of Archaeological Science*, 38, 1878-1885.
- CUISINIER, F. J. G., STEUER, P., SENGER, B., VOEGEL, J. C. & FRANK, R. M. 1992. Human Amelogenesis I : High resolution electron microscopy study of ribbon-like crystals. *Calcified Tissue International*, 51, 259-268.
- CUNHA, E., RAMIREZ ROZZI, F., BERMUDEZ DE CASTRO, J. M., MARTINONTORRES, M., WASTERLAIN, S. N. & SARMIENTO, S. 2004. Enamel hypoplasias and physiological stress in the Sima de los Huesos middle Pleistocene hominins. *American Journal of Physical Anthropology*, 125, 220-231.
- CUNNINGHAM, A. S. 1995. Adaptative behavior for child health and longevity. In : STUARTMACADAM P. & DETTWYLER K.A. eds. *Breastfeeding : Biocultural Perspectives*. New York, Aldine de Gruyter, 430 p.
- CUNNINGHAM, A. S., JELLIFFE, D. B. & JELLIFFE, E. F. P. 1991. Breast-feeding and health in the 1980s : A global epidemiologic review. *The Journal of Pediatrics*, 118, 659-666.
- DACULSI, G., MENANTEAU, J., KEREBEL, L. M. & MITRE, D. 1984. Length and shape of enamel crystals. *Calcified Tissue International*, 36, 550-555.
- DANGRÉAUX, B. 1986. Les origines de Grenoble : l'état des connaissances. *Cahiers d'Histoire*, 31, 3-22.
- DART, R. A. 1957. The osteodontokeratic culture of Australopithecus prometheus. *Transvaal Museum Memoirs*, 10.
- DARY, L. 2000. La paléontologie et les dents. Intérêt pour les stries de Retzius en particulier. Thèse de doctorat en chirurgie dentaire, Université René Descartes.
- DE GARINE, I. 1979. Pour une anthropologie bioculturelle de l'alimentation. *Communications*, 31, 70-92.
- DE LESTRANGE, M. T. & PASSOT-GUEVARA, B. 1981. De la grossesse au sevrage, chez les Bassari, les Peul et les Boin de Salemata (Sénégal oriental). *Journal des Africanistes*, 51, 23-41.
- DE LESTRANGE, M.-T. & PASSOT-GUEVARA, B. 1981. De la grossesse au sevrage, chez les Bassari, les Peul, et les Boin de Salemata (Sénégal Oriental). *Journal des Africanistes*, 51, 23-41.
- DE LUCA A., HANKARD R., FRASQUET-DARRIEUX M. & ROBINS R. 2019. Mesure de l'abondance isotopique naturelle en ¹⁵N dans le cheveu du nouveau-né allaité exclusivement. In : HERRSCHER, E. & SÉGUY I. eds. *Premiers cris, premières nourritures*. Aix-en-Provence, PUP, collection Corps et Âmes, 456 p.
- DE MONTJOYE, A. 1988. Grenoble. Document d'évaluation du patrimoine archéologique urbain, Paris, Association pour les fouilles archéologiques nationales.
- DEAN, M. C. 1987. Growth layers and incremental markings in hard tissues ; a review of the literature and some preliminary observations about enamel structure in paranthropus boisei. *Journal of Human Evolution*, 16, 157-172.
- DEAN, M. C. 1998. A comparative study of cross striation spacings in cuspal enamel and of four methods of estimating the time taken to grow molar cuspal enamel in Pan, Pongo and Homo. *Journal of Human Evolution*, 35, 449-462.
- DEAN, M. C. 2000. Progress in understanding hominoid dental development. *Journal of Anatomy*, 197, 77-101.
- DEAN, M. C. 2006. Tooth microstructure tracks the pace of human life history evolution. *Proceedings of the Royal Society B*, 273, 2799-2808.

- DEAN, M. C. & BEYNON, A. D. 1991. Histological reconstruction of crown formation times and initial root formation times in a modern human child. *American Journal of Physical Anthropology*, 86, 215-228.
- DEAN, M. C., LEAKEY, M. G., REID, D. J., SCHRENK, F., SCHWARTZ, G. T., STRINGER, C. & WALKER, A. 2001. Growth processes in teeth distinguish modern humans from *homo erectus* and earlier hominins. *Nature*, 414, 628-631.
- DEAN, M. C., REID, D. J., SCHWARTZ, G. T. & ZIHLMAN, A. L. 2006. A Faithful Record of Stressful Life Events preserved in the Dental Developmental record of a Juvenile Gorilla. *International Journal of Primatology*, 27, 1201-1219.
- DEAN, M. C. & SCANDRETT, A. E. 1996. The relation between long-period incremental markings in dentine and daily cross-striations in enamel in human teeth. *Archives of Oral Biology*, 41, 233-241.
- DEAN, M. C. & SHELLIS, R. P. 1998. Observations on striae morphology in the lateral enamel of pongo, Hylobates and proconsul teeth. *Journal of Human Evolution*, 35, 401-410.
- DELGADO, H. L., VALVERDE, V. E., MARTORELL, R. & KLEIN, R. E. 1982. Relationship of maternal and infant nutrition to infant growth. *Early Human Development*, 6, 273-286.
- DEMURGER, A. 2003. *L'Occident Médiéval XIII^e-XV^e S.*, Paris, Hachette Supérieur, 159 p.
- DENBESTEN, P. K., HEFFERNAN, L. M., TREADWELL, B. V. & AWBREY, B. J. 1989. The presence and possible functions of the matrix metalloproteinase collagenase activator protein in developing enamel matrix. *Biochemical Journal*, 264, 917-920.
- DENIRO, M. J. & EPSTEIN, S. 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42, 495-506.
- DENIRO, M. J. & EPSTEIN, S. 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45, 341-351.
- DENOYER, E. R., FREDEEN, K. J. & HAGER, J. W. 1991. Laser solid sampling for inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 63, 445-457.
- DENYS, C., WILLIAMS, C. T., DAUPHIN, Y., ANDREWS, P. & FERNANDEZ-JALVO, Y. 1996. Diagenetical changes in pleistocene small mammal bones from Olduvai Bed I. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 126, 121-134.
- DETTWYLER, K. A. 1995. A time to wean : The hominid blueprint for the natural age of weaning in modern human population *In: STUARTMACADAM P. & DETTWYLER K.A. eds. Breastfeeding : Biocultural perspectives* New York, Aldine de Gruyter, 430 p.
- DETTWYLER, K. A. & FISCHMAN, C. 1992. Infant feeding practices and growth. *Annual Review of Anthropology*, 21, 171-204.
- DEUTSCH, D. 1989. Structure and function of enamel gene products. *The Anatomical Record*, 224, 189-210.
- DEUTSCH, D., PALMON, A., DAFNI, L., CATALANO-SHERMAN, J., YOUNG, M. F. & FISHER, L. W. 1995. The enamelin (tuftelin) gene. *The International Journal of Developmental Biology*, 39, 135-143.
- DEVY, L., NOËL, A., CATALDO, D., JEANNESSON, P. & FOIDART, J. M. 1999. Métalloprotéases matricielles, protéases à sérine et migration des cellules hématopoïétiques. *Hématologie*, 5, 265-72.
- DIEKWISCH, T. G. H., BERMAN, B. J., GENTER, S. & SLAVKIN, H. C. 1995. Initial enamel crystals are not spatially associated with mineralized dentin. *Cell and Tissue Research*, 279, 149-167.
- DIRKS, W. 1998. Histological reconstruction of dental development and age of death in a juvenile gibbon. *Journal of Human Evolution*, 35, 411-425.
- DIRKS, W., REID, D. J., JOLLY, C. J., PHILLIPSCONROY, J. E. & BRETT, F. L. 2002. Out of the mouths of baboons : stress, life history, and dental development in the awash national park hybrid zone, Ethiopia. *American Journal of Physical Anthropology*, 118, 239-252.

Bibliographie

- DITTMANN, K. & GRUPE, G. 2000. Biochemical and palaeopathological investigations on weaning and infant mortality in the early middle ages. *Anthropologischer Anzeiger*, 58, 345-355.
- DOLPHIN, A. E. 2013. Bromine in teeth and bone as an indicator of marine diet. *Journal of Archaeological Science*, 40, 1778-1786.
- DOLPHIN, A. E. & GOODMAN, A. H. 2009. Maternal diets, nutritional status, and zinc in contemporary Mexican infants' teeth : Implications for reconstructing paleodiets. *American Journal of Physical Anthropology*, 140, 399-409.
- DOLPHIN, A. E., GOODMAN, A. H. & AMARASIRIWARDENA, D. D. 2005. Variation in elemental intensities among teeth and between pre- and postnatal regions of enamel. *American Journal of physical Anthropology* 128, 878-888.
- DOP, M. C. 2002. L'allaitement maternel en Afrique : l'évolution favorable sera-t-elle remise en question par l'épidémie du sida. *Cahiers d'études et de recherches francophones / Santé, Nutrition et développement au temps de la mondialisation : de nouveaux enjeux pour la santé publique*, 12, 5-8.
- DOREA, J. G. 1999. Calcium and phosphorus in human milk. *Nutrition Research*, 19, 709-739.
- DRANCOURT, M., ABOUDHARAM, G., SIGNOLI, M., DUTOUR, O. & RAOULT, T. 1998. Detection of 400 year old *Yersinia pestis* DNA in human dental pulp : An approach to the diagnosis of ancient septicemia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95, 12637-12640.
- DSILLEN, A., HALL, G. & ARMSTRONG, R. 1995. Strontium calcium ratios (Sr/Ca) and strontium isotopic ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) of *Australopithecus robustus* and *Homo sp.* from Swartkans. *Journal of Human Evolution*, 28, 277-285.
- DUFOUR, E. & GERDEAUX, D. 2001. Apports des isotopes stables ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{36}\text{S}/^{34}\text{S}$, $^{87}\text{S}/^{86}\text{S}$) aux études écologiques sur les poissons. *Cybium*, 25, 369-382.
- DUMÉZIL, B. 2013. *Des Gaulois aux Carolingiens*, Paris, Presses Universitaires de France, 229 p.
- DUMONT, E. R. 1996. Variation in quantitative measures of enamel prisms from different species as assessed using confocal microscopy. *Archives of oral biology*, 41, 1053-1063.
- DUPRAS, T. L., SCHWARTZ, H. P. & FAIRGRIEVE, S. I. 2001. Infant feeding and weaning practices in Roman Egypt. *American Journal of Physical Anthropology*, 115, 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, 63-74.
- DURAY, S. M. 1996. Dental indicators of stress and reduced age at death in prehistoric native Americans. *American Journal of Physical Anthropology*, 99, 275-286.
- DURRANT, S. F. 1999. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry : Achievements, problems, prospects. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 14, 1385-1403.
- DUTOUR, O., SIGNOLI, M., ARDAGNA, Y. & FOTI, B. 2006. Odontologie en ostéarchéologie et paléopathologie humaine. *Bulletin Archéologique de Provence*, supplément 4, 157-160.
- EANES, E. D. 1992. Dynamics of calcium phosphate precipitation. In : BONUCCI E. ed. *Calcification in biological systems*. Boca Raton, CRC Press 432 p.
- EERKENS J. W. and BARTELINK E. J. 2013. Sex-biased weaning and early childhood diet among middle Holocene hunter-gathers in central California. *American Journal of Physical Anthropology*, 152, 471-483.
- EGO, A., DUBOS, J. P., DJAVADZADEHAMINI, M., DEPINOY, M. P., LOUYOT, J. & CODACCIONI, X. 2003. Les arrêts prématurés d'allaitement maternel. *Archives de Pédiatrie*, 10, 11-18.
- ELI, I., SARNAT, H. & TALMI, E. 1989. Effect of the birth on the neonatal line in primary tooth enamel. *Paediatric Dentistry*, 11, 220 - 223.
- ELIAS, M. 1980. The feasibility of dental strontium analysis for diet assessment of human population. *American Journal of Physical Anthropology*, 53, 1-4.
- ELIAS, R. W., HIRAO, Y. & PATTERSON, C. C. 1982. The circumvention of the natural

- biopurification of calcium nutrient pathways by atmospheric inputs of industrial lead. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46, 2561-2580.
- ELLIOTT, T. A. 1993. Bone diagenesis : an experimental study of selected trace elements. Thesis, Durham University.
- ELLISON, P. T. & O'ROURKE, M. T. 2000. Population growth and fertility regulation. In : STINSON, S., BOGIN, B., HUSSASHMORE, R. & O'ROURKE, D. eds. *Human biology : an evolutionary and biocultural perspective*. New York, Wiley-Liss, 639 p.
- ERICSON, J. E., SMITH, D. R. & RUSSELL FLEGAL, A. 1991. Skeletal concentrations of lead, cadmium, zinc, and silver in ancient north American Pecos Indians. *Environmental Health Perspectives* 93, 217-223.
- EVANS, J., STOODLEY, N. & CHENERY, C. 2006. A strontium and oxygen isotope assessment of a possible fourth century immigrant population in a Hampshire cemetery, southern England. *Journal of Archaeological Science*, 33, 265-272.
- EVANS, R. D., RICHNER, P. & OUTRIDGE, P. M. 1995. Micro-spatial variations of heavy metals in the teeth of walrus as determined by laser ablation ICP-MS: The potential for reconstructing a history of metal exposure *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 28, 55-60.
- EZZO, J. A. 1994. Zinc as a paleodietary indicator : An issue of theoretical validity in bone-chemistry analysis. *American Antiquity*, 59, 606-621.
- FAHY, G. E., RICHARDS, M. P., FULLER, B. T., DESCHNER, T., HUBLIN, J.-J. & BOESCH, C. 2013. Stable nitrogen isotope analysis of dentine serial sections elucidate sex differences in weaning patterns of wild chimpanzees (*Pan troglodytes*). *American Journal of Physical Anthropology*, 00, 1-8.
- FARELL, J., AMARASIRIWARDENA, D., GOODMAN, A. H. & ARRIAZA, B. 2013. Bioimaging of trace metals in ancient Chilean mummies and contemporary Egyptian teeth by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Microchemical Journal*, 106, 340-346.
- FARGE, P., AJACQUES, J. C., DALLAIRE, L. & MAGLOIRE, H. 1992. *Manuel de génétique bucco-dentaire*, Paris, Masson, 130 p.
- FARNUM, J. F. & BENFER JR, R. A. 1995. Age of pregnancies and age of weaning from prehistoric bone : Are Sr and Zn indicators ? . *Paper presented at the 6th Annual meeting of the Am. Assoc. of Physical Anthropologists, Oakland, CA, March 30*.
- FEACHEM, R. G. & KOBLINSKY, M. A. 1984. Interventions for the control of diarrhoeal diseases among young children : promotion of breast-feeding. *Bulletin of the World Health Organisation*, 62, 271-291.
- FÉDÉRATION DENTAIRE INTERNATIONALE 1982. An epidemiological index of developmental defects of dental enamel (DDE). *International Dental Journal* 32, 159-167.
- FERGUSON, J. E. & PURCHASE, N. G. 1987. The analysis and levels of lead in human teeth : A review. *Environmental Pollution*, 46, 11-44.
- FILDES, V. A. 1986. Breast, bottles and babies : A history of infant feeding. Edinburgh, Edinburgh University Press, 462 p.
- FILDES, V. A. 1995. The culture and biology of breastfeeding : An historical review of western Europe. In : STUART-MACADAM P. & DETTWYLER K.A. eds. *Breastfeeding : Biocultural perspectives*, New York, Routledge, 430 p.
- FILOUX, A. 2011. Le comportement de subsistance des premiers européens du pourtour méditerranéen ; étude des assemblages osseux de Barranco León, Fuente Nueva 3, la grotte du Vallonnet et des niveaux inférieurs de la Caune de l'Arago. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier 3.
- FINCHAM, A. G., MORADIAN-OLDAK, J. & SIMMER, J. P. 1999. The structural biology of the developing dental enamel matrix. *Journal of structural biology*, 126, 270-299.
- FINCHAM, A. G., MORADIAN-OLDAK, J., SIMMER, J. P., SARTE, P., LAU, E. C., DIEKWISCH, T. & SLAVKIN, H. C. 1994. Self-assembly of recombinant amelogenin protein generates supramolecular structure. *Journal of structural biology*, 112, 103-109.

Bibliographie

- FITZGERALD, C. M. 1998. Do enamel microstructures have regular time dependency ? Conclusions from the literature and a large-scale study. *Journal of Human Evolution*, 35, 371-386.
- FITZGERALD, C. M. & ROSE, J. C. 2008. Reading between the line : dental development and subadult age assessment using the microstructural growth markers of teeth *In* : KATZENBERG M.A. & SAUNDERS S.R. eds. *Biological Anthropology of the human skeleton*. Londre, Wiley-Liss, 640 p.
- FITZGERALD, C. M. & SAUNDERS, S. R. 2005. Test of histological methods of determining chronology of accentuated striae in deciduous teeth. *American journal of Physical Anthropology* 127, 277-290.
- FITZGERALD, C. M., SAUNDERS, S. R., BONDIOLI, L. & MACCHIARELLI, R. 2006. Health of infants in an imperial Roman skeletal sample perspective from dental microstructure. *American journal of Physical Anthropology*, 130, 179-189.
- FITZGERALD, C. M., SAUNDERS, S. R., MACCHIARELLI, R. & BONDIOLI, L. 1999. Large scale histological assessment of deciduous crown formation. *In* : MAYHALL JOHN P. H. T. ed. *Dental Morphology 1998 – Proceedings of the 11th International Symposium on Dental Morphology*. Oulu, Oulu University Press.
- FLANDRIN, J. L. 1978. Familles : Parenté, maison, sexualité, dans l'ancienne société, Poitier, Hachette, 287 p.
- FLANDRIN, J. L. & MONTANARI, M. 1996. Histoire de l'alimentation, Paris, Fayard, 915 p.
- FLENSBORG G., MARTINEZ G., TESSONE A. 2018. First approach to the paleodiet of hunter-gathers though stable isotopes ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) in the eastern Pampa-Patagonia transition during the Middle Holocene. *Journal of Archaeological science*, Report 17, 571-580.
- FOGARASSY, E. 2001. Les dépôts en couches minces par ablation laser d'impulsions ultracourtes : état de l'art et perspectives. *Journal de Physique*, IV, Pr7-87- Pr7-91
- FOGEL, M., TUROSS N., OWSLEY D. W., 1989. Nitrogen isotope tracers of human lactation in modern and archaeological populations. Annual report of *Geophysical Laboratory Canergie Institute of Washington Yearbook*, 88, 111-117.
- FOSSIER, R. 1990. Le Moyen Âge. Les mondes nouveaux 350-950, Paris, Armand Colin, 543 p.
- FOSSIER, R. 1994. La société Médiévale, Paris, Armand Colin, 463 p.
- FOUCAULT, A. & RAOULT, J.-F. 1985. Dictionnaire de géologie, Paris, Masson, 384 p.
- FRANCALACCI, P. 1989. Dietary reconstruction at Arene Candide cave (Liguria, Italy) by means of trace element analysis. *Journal of Archaeological Science*, 16, 109-124.
- FRANK, R. M. 1978. Les stries brunes de Retzius en microscopie électronique à balayage. *Journal de Biologie Buccale*, 6, 139-151.
- FROMENT, A. & AMBROSE, S. H. 1995. Analyses tissulaires isotopiques et reconstruction du régime alimentaire en milieu tropical : implications pour l'archéologie. *Bulletin et Mémoire de la Société d'Anthropologie de Paris*, 7, 79-98.
- FUKAE, M., TANABE, T., NAGANO, T., ANDO, H., YAMAKOSHI, Y., YAMADA, M., SIMMER, J. P. & OIDA, S. 2002. Odontoblasts Enhance the Maturation of Enamel Crystals by Secreting EMSP1 at the Enamel-Dentin junction. *Journal of Dental Research*, 81, 668-672.
- FUKAE, M., TANABE, T., UCHIDA, T., LEE, S. K., RYU, H., MURAKAMI, C., WAKIDA, K., SIMMER, J. P., YAMADA, Y. & BARLETT, J. D. 1998. Enamelysin (Matrix Metalloproteinase-20): Localization in the Developing Tooth and Effects of pH and calcium on amelogenin hydrolysis. *Journal of dental research*, 77, 1580-1588.
- FUKUMOTO, S., KIBA, T., HALL, B., IEHARA, N., NAKAMURA, T., LONGENECKER, G., KREBSBACH, P. H., NANJI, A., KULKARNI, A. B. & YAMADA, Y. 2004. Ameloblastin is a cell adhesion molecule required for maintaining the differentiation state of ameloblasts. *Journal of cell biology*, 167, 973-983.
- FUKUMOTO, S., YAMADA, A., NONAKA, K. & YAMADA, Y. 2005. Essential roles of ameloblastin in maintaining ameloblast

- differentiation and enamel formation. *Cells tissues organs*, 181, 189-195.
- FULLER, B. T., FULLER, J. L., HARRIS, D. A. & HEDGES, R. E. M. 2006a. Detection of breastfeeding and weaning in modern human infants with carbon and nitrogen stable isotope ratios. *American Journal of Physical Anthropology*, 129, 279-293.
- FULLER, B. T., MOLLESON, T. I., HARRIS, D. A., GILMOUR, L. T. & HEDGES, R. E. M. 2006b. Isotopic evidence for breastfeeding and possible adult dietary differences from Late/ SubRoman Britain. *American Journal of Physical Anthropology*, 129, 45-54.
- GALLEY, C. & WOODS, R. 1998. Réflexions sur la distribution des décès au cours de la première année de vie. *Population*, 5, 921-946.
- GALLIEN, C. IIe siècle av. J.-C. 1530. De sanitate tuenda, Thomas de Linacre (trad.). In : CHEVALLON ed. Paris, Parisiis apvd Simonem Colinaevm.
- GAO, S., LIU, X., YUSAN, H., HATTENDORF, B., GÜNTHER, D., CHEN, L. & HU, S. 2002. Determination of forty two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and geoanalytical Research*, 26, 181-196.
- GARCIN, V. 2009. Bioarchéologie des sujets immatures de quatre nécropoles du haut Moyen Âge européen : Méthodes d'étude du développement et des interactions biologique/ culture. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I.
- GARDNER, M. J., WINTER, P. D. & BARKER, D. J. P. 1984. Atlas of mortality from selected diseases in England and Wales, 1868-1878, Chichester, Wiley, 96 p.
- GILBERT, C., SEALY, J. & SILLEN, A. 1994. An investigation of barium, calcium and strontium as paleodietary indicators in the Southwestern Cape, South Africa. *Journal of Archaeological Science*, 21, 173-184.
- GILBERT, R. J. 1975. Trace element analyses of three skeletal Amerindian populations at Dickson Mounds. Thesis, University of Massachusetts.
- GILLET, P. 1994. Mémoires lactées. Blanc, bu, biblique: le lait du monde, Paris, Autrement, 222 p.
- GIRIJA, V. & STEPHEN, H. C.-Y. 2003. Characterization of lipid in mature enamel using confocal laser scanning microscopy. *Journal of Dentistry*, 31, 303-311.
- GIUSSANI, B., MONTICELLI, D. & RAMPAZZI, L. 2009. Role of laser ablation inductively coupled plasma-mass spectrometry in cultural heritage research : A review. *Analytica Chimica Acta*, 635, 6-21.
- GLAB, H., SZOSTEK, K. & KACZANOWSKI, K. 2001. Trace elements concentrations from Papiro hamadryas sequences. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 15, 59-61.
- GOLDBERG, M. 1982. Histologie de l'émail. In : *Encyclopédie de Médecine et de Chirurgie*. Paris, Elsevier.
- GOLDBERG, M. 1989. Manuel d'histologie dentaire. La dent et ses tissus de soutien, Paris, Masson.
- GOLDBERG, M. 2007. Histologie de l'émail dentaire. *Traité EMC Stomatologie*. Paris, Elseviers Masson SAS.
- GOLDBERG, M., SEPTIER, D., RAPOPORT, O., IOZZO, R. V., YOUNG, M. F. & AMEYE, L. G. 2005. Targeted disruption of two small leucinerich proteoglycans, biglycan and decorin, excerpts divergent effects on enamel and dentin formation. *Calcified tissue international*, 77, 297-310.
- GOODMAN, A. H., ALLEN, L. H., HERNANDEZ, G. P., AMADOR, A., ARRIOLA, L. V., CHAVEZ, A. & PELTO, G. H. 1987. Prevalence and age at development of enamel hypoplasias in Mexican children. *American Journal of Physical Anthropology*, 72, 7-19.
- GOODMAN, A. H., ARMELAGOS, G. J. & CLARK, G. 1984. Indications of stress from bone and teeth. In : COHEN M.N. & ARMELAGOS G.J. eds. *Pathology at the origins of agriculture*. New-York, Academic Press, 615 p.
- GOODMAN, A. H., DOLPHIN, A. E., AMARASIRIWARDENA, D. D., KLEIN, R., BACKSTRAND, J. R., REID, J. B. & OUTRIDGE, P. 2003. Tooth rings : Dental

Bibliographie

- enamel as a chronobiological biomonitor of elemental absorption from pregnancy to adolescence. *Journal of Children's Health*, 1, 203-214.
- GOODMAN, A. H. & ROSE, J. C. 1990. Assessment of systemic physiological perturbations from dental enamel hypoplasias and associated histological structures. *Yearbook of physical anthropology*, 33, 59-110
- GRAHAM, B. J. 1987. Urban genesis in early medieval Ireland. *Journal of Historical Geography*, 13, 3-16.
- GRATUZE, B., BLET-LEMARQUAND, M. & BARRANDON, J.-N. 2001. Mass spectrometry with laser sampling : A new tool to characterize archaeological materials. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 247, 645-656.
- GRAY, A. L. 1985. Solid sample introduction by laser ablation for inductively coupled plasma source mass spectrometry. *Analyst*, 110, 551-556.
- GRAY, R. H., CAMPBELL, O. M., APELO, R., ESLAMI, S. S., ZACUR, H., RAMOS, R. M., GEHRET, J. C. & LABBOK, M. H. 1990. Risk of ovulation during lactation. *Clinical Practice*, 335, 25-29.
- GRÉGOIRE DE TOURS 2012. L'histoire des rois francs, Saint-Amand, Folio Histoire, 288 p.
- GRÜNKE, K., STÄRK, H.-J., WENNRICH, R. & FRANK, U. 1996. Determination of traces of heavy metals (Mn, Cu, Zn, Cd and Pb) in microsamples of teeth material by ETV-ICP-MS. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 354, 633-635.
- GRUPE, G. 1986. Rekonstruktion bevölkerungsbiologischer parameter aus dem elementgehalt boldengelagerter knochen. In: HERRMANN, B. ed. *Innovative trends in prehistoric anthropology*. Urgesch : Mitteilungen der Berliner Gesellschaft für Anthropologie, Ethnologie und Urgeschichte.
- GRUPE, G. & BACH, H. 1993. Life style, subsistence and mortality in the slavonic village at Espenfeld (Kr Arnstadt, FRG). A trace element study. *Anthropologischer Anzeiger*, 51, 317-332.
- GUATELLI-STEINBERG, D. 2001. What can developmental defects of enamel reveal about physiological stress nonhuman primates ? *Evolutionary Anthropology*, 10, 138-151.
- GUATELLI-STEINBERG, D., FLOYD, B. A., DEAN, M. C. & REID, D. J. 2012. Enamel extension rate patterns in modern human teeth : Two approaches designed to establish an integrated comparative context for fossil primates. *Journal of Human Evolution*, 30, 1-12.
- GÜNTHER, D. & HATTENDORF, B. 2005. Solid sample analysis using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Trends in Analytical Chemistry*, 24, 255-264.
- GÜNTHER, D., HORN, I. & HATTENDORF, B. 2000. Recent trends and developments in laser ablation-ICP-mass spectrometry. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 368, 4-14.
- GYSI, A. 1931. Metabolism in a adult enamel. *Dental Digest*, 37, 661-668.
- HALL, R., SEPTIER, D., EMBERY, G. & GOLDBERG, M. 1999. Stromelysin-1 (MMP-3) in forming enamel and predentine in rat incisor - coordinated distribution with proteoglycans suggests a functional role. *The Histochemical Journal*, 31, 761-770.
- HAMADE, H., CHAAYA, M., SALIBA, M., CHAABAN, R. & OSMAN, H. 2013. Determinants of exclusive breastfeeding in an urban population of primiparas in Lebanon : a cross-sectional study. *BMC Public Health*, 13.
- HANĆ, A., OLSZEWSKA, A. & BARALKIEWICZ, D. 2013. Quantitative analysis of elements migration in human teeth with and without filling using LA-ICP-MS. *Microchemical Journal*, 110, 61-69.
- HANCOCK, R. G. V., GRYNPAS, M. D. & PRITZKER, K. P. H. 1989. The abuse of bone analysis for archaeological dietary studies. *Archaeometry*, 31, 169-179.
- HARE, D., AUSTIN, C., DOBLE, P. & ARORA, M. 2011. Elemental bio-imaging of trace elements in teeth using laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Journal of Dentistry*, 39, 397-403.
- HART, P. S., HART, T. C., MICHALEC, M. D., RYU, O. H., SIMMONS, D., HONG, S. &

- WRIGHT, J. T. 2004. Mutation in kallikrein 4 causes autosomal recessive hypomaturation amelogenesis imperfecta. *Journal of Medical Genetics*, 41, 545-549.
- HART, S., HART, T., GIBSON, C. & WRIGHT, J. T. 2000. Mutational analysis of X-linked amelogenesis imperfecta in multiple families. *Archives of oral biology*, 45, 79-86.
- HARVEY, P. H. & CLUTTON-BROCK, T. H. 1985. Life history variation in primates. *Evolution*, 39, 559-581.
- HASSAN, A. A. & ORTNER, D. J. 1977. Inclusions in bone material as a source of error in radiocarbon dating. *Archaeometry* 19, 131-135.
- HASTING, M. H. 1997. The vertebrate clock : localisation, connection, and entrainment. In : REDFERN P.H. & LEMMER B. eds. *Physiology and pharmacology of biological rhythms*. Berlin, Springer, 668 p.
- HATCH, J. W. & GEIDEL, R. A. 1985. Status-Specific dietary variation in two world cultures. *Journal of Human Evolution*, 14, 469-476.
- HAYDENBLIT, R., PODBILEWICZ, B. & SMITH, P. 1999. Evolution of human enamel growth analysed by confocal microscopy. In : MAYHALL, J. T. & HEIKKINEN, T. eds. *Dental morphology*. Oulu, Finland, Oulu University Press.
- HECK, K. E., BRAVEMAN, P., CUBBIN, C., CHÁVEZ, G. F. & KIELY, J. 2006. Socioeconomic status and breastfeeding initiation among california mothers. *Public Health Reports*, 121, 51-59.
- HEDGES R. E. M., CLEMENT J. G., THOMAS C. D. L., O'CONNELL T. C. 2007. Collagen turnover in the adult femoral mid-shaft : modelled from anthropogenic radiocarbon tracer measurements. *American Journal of Physical Anthropology*, 133, 808-816.
- HERRING, D. A., SAUNDERS, S. R. & KATZENBERG, M. A. 1998. Investigating the weaning process in past populations *American Journal of Physical Anthropology*, 105, 425-439.
- HERRSCHER, E. 2001. Contribution de l'analyse paléoépidémiologique et paléogéobiochimique à la connaissance de la santé et de l'alimentation à la fin du Moyen Âge, Église Saint-Laurent de Grenoble (XIII^e-XV^e s., Isère ; France). Thèse de doctorat, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 335p.
- HERRSCHER, E. 2003. Alimentation d'une population historique : Analyse des données isotopiques de la nécropole de Saint-Laurent de Grenoble (XIII^e - XV^e siècle, France). *Bulletin et mémoire de la Société d'Anthropologie de Paris*, 15, 145-320.
- HERRSCHER, E. 2013. Détection isotopique des modalités d'allaitement et de sevrage à partir des ossements archéologiques. *Cahiers de nutrition et de diététique*, 48, 75-85.
- HERRSCHER, E. & VALENTIN F. & COUPAIN, L. 2012. Analyse bioarchéologique des enfants découverts dans le chœur. In : BRUT C. ed. *Les fouilles de la nécropole Saint-Martin des Champs (Site n°75 056 051 AH), Rapport final d'opération, Étude anthropologique*. DHAAP, Paris.
- HERRSCHER, E. & GOUDE, G. 2015. Biochimie isotopique et anthropologie biologique : reconstitution des modes de vie du passé. In : BALASSE, M., BRUGAL, J.-P., DAUPHIN, Y., GEIGL, E.-M., OBERLIN, C. & REICHE, I. eds. *Message d'os. Archéométrie du squelette animal et humain*. Paris, Editions des Archives Contemporaines, 532 p.
- HERRSCHER, E., GOUDE, G. & METZL. 2019. Modification de la composition isotopique (C, N) du lait maternel au cours des premiers mois d'allaitement. In : HERRSCHER, E. & SÉGUY I. eds. *Premiers cris, premières nourritures*. Aix-en-Provence, PUP, collection Corps et Âmes, 456 p.
- HERRSCHER, E. & SÉGUY I. 2019. A quels seins se vouer : pratiques d'allaitement et sevrage d'hier et d'aujourd'hui. In : HERRSCHER, E. & SÉGUY I. eds. *Premiers cris, premières nourritures*. Aix-en-Provence, PUP, collection Corps et Âmes, 456 p.
- HERWARTZ, D., TÛTKEN, T., MÛNKER, C., JOCHUM, K. P., STOLL, B. & SANDER, P. M. 2011. Timescales and mechanisms of REE and Hf uptake in fossil bones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 82-105.
- HEYMANN, J., RAUB, A. & EARLE, A. 2013. Breastfeeding policy : a globally comparative

Bibliographie

- analysis. *Bulletin of the World Health Organisation*, 91, 398-406.
- HILLSON, S. 1996. *Dental anthropology*, Cambridge, Cambridge university press 373 p.
- HILLSON, S. 2008. Dental pathology. In : KATZENBERG M.A. & SAUNDERS S.R. eds. *Biological anthropology of human skeleton*. Londres, Wiley-Liss, 640 p.
- HILLSON, S. W. 1992. Dental enamel growth, perikymata and hypoplasia in ancient tooth crowns. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 85, 460-466.
- HOFFMANN, E., STEPHANOWITZ, H., ULLRICH, E., SKOLE, J., LÜDKE, C. & HOFFMANN, B. 2000. Investigation of mercury migration in human teeth using spatially resolved analysis by laser ablation ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 15, 663-667.
- HOWARTH, W. J. 1905. The influence of feeding on the mortality of infants. *The Lancet*, 2, 210-213.
- HOWCROFT, R., ERIKSSON, G. & LIDÉN, K. 2012. Conformity in diversity ? Isotopic investigations of infant feeding practices in two iron age populations from southern Öland, Sweden. *American Journal of Physical Anthropology*, 149, 1-14.
- HOWIE, P. H. & MCNEILLY, A. S. 1982. Effect of breast-feeding patterns on human birth intervals. *Journal of Reproduction and Fertility*, 65, 545-557.
- HUDA, T. F. J. & BOWMAN, J. E. 1994. Variation in cross-striation number between striae in archaeological population. *International Journal of Osteoarchaeology*, 4, 49-52.
- HUDA, T. F. J. & BOWMAN, J. E. 1995. Age determination from dental microstructure in juveniles. *American Journal of Physical Anthropology*, 97, 135-150.
- HUFFMAN, S. L., CHOWDHURY, A. K. M., CHAKRABORTY, J. & SIMPSON, N. K. 1980. Breast-feeding patterns in rural Bangladesh. *American Journal Clin. Nutr.*, 33, 144-154.
- HÜHNE-OSTERLOH, G. & GRUPE, G. 1989. Causes of infant mortality in the Middle Ages revealed by chemical and palaeopathological analyses of skeletal remains. *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie* 77, 247-258.
- HUMPHREY, L. T. 2010. Weaning behaviour in human evolution *Seminars in cell and developmental biology*, 21, 453-461.
- HUMPHREY, L. T., DEAN, M. C. & JEFFRIES, T. E. 2007. An evaluation of changes in strontium / calcium ratios across the neonatal line human deciduous teeth. In : BAILEY S.E. & J.J., H. eds. *Dental Perspectives on Human Evolution : State of the Art Research in Dental Paleoanthropology*. Dordrecht, Springer, 411 p.
- HUMPHREY, L. T., DEAN, M. C., JEFFRIES, T. E. & PENN, M. 2008a. Unlocking evidence of early diet from tooth enamel. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 6834-6839.
- HUMPHREY, L. T., DIRKS, W., DEAN, M. C. & JEFFRIES, T. E. 2008b. Tracking dietary transitions in weaning baboons (papio hamadryas anubis) using strontium/calcium ratios in enamel. *Folia Primatologica*, 79, 197-212.
- IJJIMA, M., FAN, D., BROMLEY, K. M., SUN, Z. & MORADIAN-OLDAK, J. 2010. Tooth enamel proteins enamelin and amelogenin cooperate to regulate the growth morphology of octacalcium phosphate crystals. *Crystal growth and design*, 10, 4815-4822.
- IJJIMA, M., MORIWAKIL, Y., WEN, H. B., FINCHAM, A. G. & MORADIAN-OLDAK, J. 2002. Elongated growth of octacalcium phosphate crystals in recombinant amelogenin gels under controlled ionic flow. *Journal of dental research*, 81, 69-73.
- IIZUKA, S., KUDO, Y., YOSHIDA, M., TSUNEMATSU, T., YOSHIKO, Y., UCHIDA, T., OGAWA, I., MIYAUCHI, M. & TAKATA, T. 2011. Ameloblastin regulates Osteogenic differentiation by Inhibiting Src Kinase via cross talk between Integrin B1 and CD63. *Molecular and cellular biology*, 31, 783-792.
- ILLINGWORTH, R. S. & LISTER, J. 1964. The critical or sensitive period, with special reference to certain feeding problems in infants and children. *The Journal of Pediatrics*, 65.

- INSTITUTE OF MEDICINE 1991. *Nutrition during lactation*, Washington, DC, National Academy Press.
- IWASAKI, K., BAJENOVA, E., SOMOGYIGANSS, E., MILLER, M., NGUYEN, V., NOURKEYHANI, H., GAO, Y., WENDEL, M. & GANSS, B. 2005. Amelotin_a novel secreted ameloblast-specific protein. *Journal of dental research*, 84, 1127-1132.
- İZCI, Y., KAYA, S., ERDEM, O., AKAY, C., KURAL, C., SOYKUT, B., BAŞOĞLU, O., ŞENYURT, Y., KILIÇ, S. & TEMİZ, C. 2013. Paleodietary analysis of human remains from a Hellenistic-Roman cemetery at Camihöyük, Turkey. *Journal of Anthrology*, 1-7.
- JAKOBSEN, J. 1975. Neonatal lines in human dental enamel. Occurrence in first permanent molars in males and females. *Acta Odontologica Scandinavica*, 33, 95-105.
- JAOUEN K., VERNA C. & BALTER V. 2015. Géochimie élémentaire et isotopique des métaux en anthropologie et archéozoologie. In: BALASSE, M., BRUGAL, J.-P., DAUPHIN, Y., GEIGL, E.-M., OBERLIN, C. & REICHE, I. eds. *Message d'os. Archéométrie du squelette animal et humain*. Paris, Editions des Archives Contemporaines, 532 p.
- JAY, M., FULLER, B. T., RICHARDS, M. P., KNÜSEL, C. J. & KING, S. S. 2008. Iron Age breastfeeding practices in Britain : isotopic evidence from Wetwang Slack, East Yorkshire. *American Journal of Physical Anthropology*, 136, 327-337.
- JONES, J. 1579. The art and science of preserving body and souls in health, Wisdom and catholic religion : Physically, Philosophically and divinely devised, Londres.
- JOSPIN, P. P. 2005. Recherches sur la topographie de Cularo (Grenoble, Isère) aux Ier-IIIe siècles après J.-C. *Revue archéologique de Narbonnaise*, 38-39, 73-83.
- KAHLE, W., LEONHARDT, H. & PLATZER, W. 1982. Anatomie, Paris, Flammarion Medicine-Science.
- KANG, D., AMARASIRIWARDENA, D. & GOODMAN, A. H. 2004. Application of laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) to investigate trace metal spatial distributions in human tooth enamel and dentine growth layers and pulp. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 378, 1608-1615.
- KANUMAKALA, S., BONEH, A. & ACHARIN, M. 2002. Pamidronate treatment improves bone mineral density in children with Menkes disease. *Journal of Inherited Metabolic Disease*, 25, 391-398.
- KAUQUER, J. C., DÉCOMBAS, M. & LE MAY, O. 1989. L'émail. Structures bucco-dentaires en microscopie électronique à balayage. Paris, Masson, 204 p.
- KARRA, M. V., KIRKSEY, A., GALAL, O., BASSILY, N. S., HARRISON, G. G. & W., J. N. 1988. Zinc, Calcium and magnesium concentration in milk from American and Egyptian women throughout the first 6 months of lactation. *American Journal of Clinical Nutrition*, 47, 642-648.
- KATZENBERG, M. A. 2008. Stable isotope analysis : A tool for studying past diet, demography, and life history. In : M. ANNE KATZENBERG, S. R. S. ed. *Biological anthropology of the human skeleton*. Hoboken, Wiley, 640 p.
- 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., HERRING, D. A. & SAUNDERS, S. R. 1998. Investigating the weaning process in past populations. *American Journal of Physical Anthropology*, 105, 425-439.
- KATZENBERG, M. A., SAUNDERS, S. R. & FITZGERALD, W. R. 1993. Age differences in stable carbon and nitrogen isotope ratios in a population of prehistoric maize horticulturists. *American Journal of Physical Anthropology*, 90, 267-281.
- KATZENBERG, M. A. & SCHWACTZ, H. P. 1986. Paleonutrition in Southern Ontario : Evidence from strontium and stable isotopes. *Canadian Review of Physical Anthropology*, 5, 15-21.

Bibliographie

- KATZENBERG, M. A. & SCHWARTZ, H. P. 1984. Dietary change in Southern Ontario Prehistory : Evidence from strontium and stable isotopes of carbon and nitrogen. *American Journal of Physical Anthropology*, 63, 177.
- KAUPOVA S., PEREZ E., BUCHET L., & HERRSCHER E. 2019. Practices and health status of children from the rural burial site of Larina-le Mollard (6th-8th century AD, Isère, France). In : HERRSCHER, E. & SÉGUY I. eds. *Premiers cris, premières nourritures*. Aix-en-Provence, PUP, collection Corps et Âmes, 456 p.
- KAUPOVA S., HERRSCHER E., VELEMINSKY P., CABUT S. & BRUZEK J. 2014. Urban and rural dietary patterns in early Medieval Central Europe (9th-10th century AD, Czech Republic). *The 83rd annual meeting of the American Association of Physical Anthropologists*. Calgary, Canada.
- KEENLEYSIDE, A., SCHWARCZ, H., 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, 51-63.
- KENNEDY, G. E. 2005. From the ape's dilemma to the weanling's dilemma : early weaning and its evolutionary context. *Journal of Human Evolution*, 48, 123-145.
- KEREBEL, B., DACULSI, G. & KEREBEL, L. M. 1979. Ultrastructural studies of enamel crystallites. *Journal of Dental Research*, 58, 844-851.
- KERN, J. & MATHIASON, L. The determination of copper, zinc, and lead in human teeth using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). Concordia College *Journal of Analytical Chemistry* 3, 2012.
- KIMANI-MURAGE, E. W., MADISE, N. J., FOTSO, J. C., KYOBUTUNGI, C., MUTUA, M. K., GITAU, T. M. & YATICH, N. 2011. Patterns and determinants of breastfeeding and complementary feeding practices in urban informal settlements, Nairobi Kenya. *BMC Public Health*, 11, 396.
- KING, T., HILLSON, S. & HUMPHREY, L. T. 2002. A detailed study of enamel hypoplasia in post-medieval adolescent of known age and sex. *Archives of Oral Biology*, 47, 29-39.
- KLEPINGER, L. L. 1984. Nutritional assessment from bone. *Annual Review in Anthropology*, 13, 75-96.
- KLEPINGER, L. L. 1990. Magnesium ingestion and bone magnesium concentration in paleodietary reconstruction cautionary evidence from an animal model. *Journal of Archaeological Science*, 17, 513-517.
- KLEPINGER, L. L. 1993. Culture, health and chemistry : A technological approach to the discovery In : SANDFORD ed. *Investigation of ancient human tissue*. Langhorne, Gordon and Breach, 432 p.
- KLEPINGER, L. L., KUHN, J. K. & WILLIAMS, W.S. 1986. An elemental analysis of archaeological bone from Sicily as a test of predictability of diagenetic change. *American Journal of Physical Anthropology*, 70, 325-331.
- KNODEL, J. E. 1977. Breast-feeding and population growth. *Science*, 198, 1111-1115.
- KNODEL, J. E. & KINTNER, H. 1977. The impact of breast feeding patterns on the biometric analysis of infant mortality. *Demography*, 14, 391-409.
- KNUDSON, K. J., PRICE, T. D., BUIKSTRA, J. E. & BLOM, D. E. 2004. The use of strontium isotope analysis to investigate Tiwanaku migration and mortuary ritual in Bolivia and Peru. *Archaeometry*, 46, 5-18.
- KOCH, P. L., HALLIDAY, A. N., WALTER, L. M., STEARLEY, R. E., HUSTON, T. J. & SMITH, G. R. 1992. Sr isotopic composition of hydroxyapatite from recent and fossil salmon: the record of lifetime migration and diagenesis. *Earth and planetary Science Letters*, 108, 277-287.
- KODAKA, T., SANO, T. & HIGASHI, S. 1996. Structural and calcification patterns of the neonatal line in the enamel of human deciduous teeth. *Scanning Microscopy International*, 10, 737-744.
- KOENIGSWALD, W. V. 1997. Glossary (a modified version, 1999). In: VON KOENIGSWALD W. & SANDER P.M. eds. *Tooth microstructure: Proceeding of the enamel microstructure workshop*. Balkema, Rotterdam, Routledge Chapman et Hall.

- KOENIGSWALD, W. V., PASCUAL, B. & PASCUAL, R. 1990. The Schmelzmuster of the Paleogene South American rodentlike marsupials Groeberia and Patagonia compared to rodents and other Marsupialia. *Paläont. Z.*, 64, 345-358.
- KOHN, M. J., SCHOENINGER, M. J. & BARKER, W. W. 1999. Altered states : effects of diagenesis on fossil tooth chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 2737-2747.
- KOMAI, S. 1942. A study of enamel prism cross striations in human teeth. *Journal of the Japan Stomatological Society*, 16, 279-292.
- KRACHLER, M., ROSSIPAL, E. & MICETICTURK, D. 1999. Trace element transfer from the mother to the newborn - Investigations of triplets of colostrum, maternal and umbilical cord sera *European Journal of Clinical Nutrition*, 53, 486-494.
- KRAMAR, C. 1990. L'étude de l'état sanitaire des populations anciennes est-elle un rêve ? *Bulletin et mémoire de la société d'anthropologie de Paris*, 2, 159-162.
- KRAMER, M. S. & KAKUMA, R. 2002. *The optimal duration of exclusive breastfeeding : a systematic review*, Genève, World Health Organization.
- KRONFELD, R. & SCHOUR, I. 1939. Neonatal dental hypoplasia. *Journal of American dental Association*, 26, 18-32.
- KULLMER, O., SANDROCK, O., KUPCZIK, K., FROST, S. R., VOLPATO, V., BROMAGE, T. G. & SCHRENK, F. 2011. New primate remains from Mwenirondo, Chiwondo Beds in northern Malawi. *Journal of Human Evolution*, 61, 617-623.
- KYLE, J. H. 1986. Effect of post-burial contamination on the concentrations of major and minor elements in human bones and teeth - The implications for paleodietary research. *Journal of Archeological Science*, 13, 403-416.
- LABEYRIE, J. 1985. L'homme et le climat, Paris, Denoël, 339 p.
- LACRUZ, R. S., NANJI, A., KURTZ, I., WRIGHT, J. T. & PAINE, M. L. 2010. Regulation of pH during amelogenesis. *Calcified Tissue International*, 86, 91-103.
- LACRUZ, R. S., RAMIREZ ROZZI, F. & BROMAGE, T. G. 2005. Dental enamel hypoplasia, age at death, and weaning in the Taung child. *South African Journal of Science*, 101, 567-569.
- LAMBERT, J. B., SIMPSON, S. V., SZPUNAR, C. B. & BUIKSTRA, J. E. 1985. Bone Diagenese and dietary analysis. *Journal of Human Evolution*, 14, 477-482.
- LAMBERT, J. B., SZPUNAR, C. B. & BUIKSTRA, J. E. 1979. Chemical analysis of excavated human bone from middle and late woodland sites. *Archaeometry*, 21, 115-129.
- LAMBERT, J. B., WEYDERT, J. M., WILLIAMS, S. R. & BUIKSTRA, J. E. 1990. Comparison of methods for the removal of diagenetic material in buried bone. *Journal of Archaeological Science*, 17, 453-468.
- LAMBERT, J. B., XUE, L. & BUIKSTRA, J. E. 1989. Physical removal of contaminative inorganic material from buried human bone. *Journal of Archaeological Science*, 16, 427-436.
- LANE, D. W. & PEACH, D. F. 1997. Some observations on the trace element concentrations in human dental enamel. *Biological Trace Element Research*, 60, 1-10.
- LAPPALAINEN, R., KNUUTTILA, M. & SALMINEN 1981. The concentrations of Zn and Mg in human enamel and dentine related to age and their concentrations in the soil. *Archives of Oral Biology*, 26, 1-6.
- LAUTROU, A. 1997. Anatomie dentaire, Paris, Masson, 272 p.
- LAVIGNE, M. 2002. *Sr/Ca ratios in modern mexican diets dominated by alkali-processed Maize implications for paleodietary reconstructions*. Unpublished BA thesis, Hampshire College.
- LAWRENCE, R. A. 1994. Weaning. In : RUTH, A. & LAWRENCE, R. A. eds. *Breastfeeding : A guide for the medical profession*. St Louis, Elsevier, 878 p.
- LE BRAS GOUDE G., BILLY I., CHARLIER K. & LOISON G. 2006. Contribution des méthodes isotopiques pour l'étude de l'alimentation humaine au Néolithique moyen méridional :

Bibliographie

- le cas du site chasséen ancien du Crès (Béziers, Hérault, France). *Anthropo*, 11, 167-175.
- LE ROY LADURIE, E. & ROUSSEAU, D. 2012. Fluctuation du climat de la France du Nord au centre, au temps du petit âge glaciaire. In : BERGER, J. F. ed. *Des climats et des hommes*. Paris, La Découverte, 488 p.
- LEARMONTH, A. T. A. 1955. Le Kwashiorkor, exemple de carence de protéines au cours du sevrage. *Annales de Géographie*, 64, 202-208.
- LEBON, M., REICHE, I., FRÖHLICH, F., BAHAIN, J.-J. & FALGUÈRES, C. 2008. Characterization of archaeological burnt bones: contribution of a new analytical protocol based on derivative FTIR spectroscopy and curve fitting of the ν_1, ν_3 PO₄ domain. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 392, 1479-1488.
- LEE, J. 1983. Calcium matrix effects in multi-element analysis of animal bone by inductively-coupled plasma emission spectrometry *Analytica Chimica Acta*, 152, 141-147.
- LEE, K. M., APPLETON, J., COOKE, M., KEENAN, F. & SAWICKA-KAPUSTA, K. 1999. Use of laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry to provide element versus time profiles in teeth. *Analytica Chimica Acta*, 395, 179-185.
- LEE, P. C. 1997. The meanings of weaning : growth, lactation and life history. *Evolutionary Anthropology*, 5, 87-96.
- LEE, P. C., MAJLUF, P. & GORDON, I. J. 1991. Growth, weaning and maternal investment from a comparative perspective. *Journal of zoological Society of London*, 225, 99-114.
- LEE-THORP, J., THACKERAY, J. F. & MERWE, N. J. V. D. 2000. The hunters and the hunted revisited. *Journal of Human Evolution*, 39, 565-576.
- LEE-THORP, J. A. 2002. Two decades of progress towards understanding fossilization processes and isotopic signals in calcified tissues minerals. *Archaeometry*, 44, 435-446.
- 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, 585-599.
- LEFEVRE, R. 1973. Quelques exemples d'application à des matériaux biologiques solides de la microanalyse par émission ionique secondaire. In : MONTEL M. G., ed. *Physico-chimie et cristallographie des apatites d'intérêt biologique*. Paris, Centre National de la Recherche Scientifique, 504 p.
- LEGEROS, R. Z., MIRAVITE, M. A., QUIROLGICO, G. B. & CURZON, M. E. J. 1977. The effect of some trace elements on the lattice parameters of human and synthetic apatites. *Calcified Tissue Research*, 22, 362-367.
- LEON-CAVA, N., LUTTER, C., ROSS, J. & MARTIN, L. 2002. Quantifying the benefits of breastfeeding : A summary of the evidence. Washington, Pan American Health Organization, The Food and Nutrition Program.
- LETT, D. & MOREL, M. F. 2006. Une histoire de l'allaitement. Paris, La Martinière, 160 p.
- LEWIS, M. E. 2007. The bioarchaeology of children : perspective from biological and forensic anthropology. Vol.50, Cambridge University Press, Cambridge, 266 p.
- LEWIS, M. E. & ROBERTS, C. 1997. Mean age at death of non-adults from early medieval Britain with and without stress indicators. *Papers on paleopathology*. St Louis meeting report, Missouri.
- LIMEBACK, H., SAKARYA, H., CHU, W. & MACKINNON, M. 1989. Serum albumin and its acid-hydrolysis peptides dominate preparations of mineral-bound enamel proteins. *Journal of bone and mineral research*, 4, 235-241.
- LIVERSIDGE, H. M. 1995. Crown formation times of permanent dentition and root extension rate in humans. In : MOGGI-CECCHI, J. ed. *Aspects of dental biology, palaeontology, anthropology and evolution*. Florence, International Institute for the study of Man, 460 p.
- LIVERSIDGE, H. M. 1998. Dental age estimation of non-adults, A review of methods and principles. In : ALT, K. W., RÖSING, F. W. & TESCHLER-NICOLA, M. eds. *Dental Anthropology, Fundamentals, Limits and Prospects*. Vienna, Springer-Verlag, 564 p.

- LIVERSIDGE, H. M. 2003. Variation in modern human dental development. In : THOMPSON, J. L., KROVITZ, G. E. & NELSON, S. J. eds. *Patterns of growth variation in the genus Homo*. Cambridge, Cambridge University Press 470 p.
- LIVERSIDGE, H. M., DEAN, H. C. & MOLLESON, T. I. 1993. Increasing human teeth length between birth and 5-4 years. *American Journal of Physical Anthropology*, 90, 307-313.
- LIVERSIDGE, H. M. & MOLLESON, T. 2004. Variation in crown and root formation and eruption of human deciduous teeth. *American Journal of Physical Anthropology*, 123, 172-180.
- LLANO, E., PENDA, A. M., KNÄUPER, V., SORSA, T., SALO, T., SALIDO, E., MURPHY, G., SIMMER, J. P., BARTLETT, J. D. & LOPEZ-OTIN, C. 1997. Identification and Structural and Functional Characterization of Human Enamelysin (MMP-20). *Biochemistry*, 36, 15101-15108.
- LOUGH, S. A., RIVERA, J. & COMAR, C. L. 1963. Retention of strontium, calcium, and phosphorus in human infants. *Society of experimental biology and Medicine : New York Proceedings*, 112, 631-636.
- MACHO, G. A., JIANG, Y. & SPEARS, I. R. 2003. Enamel microstructure _ a truly threedimensional structure. *Journal of Human Evolution*, 45, 81-90.
- MAHONEY, P. & JOHNS, S. E. 2012. Tooth enamel defects and infant stress. In : PARKER-PERSON M., RICHARDS M. & CHAMBERLAIN A. eds. *The Beaker People : Isotopes, mobility and diet prehistoric Society Monograph*. Oxford, Oxbow.
- MANN, A., LAMPL, M. & MONGE, J. 1990a. Décompte des périkymaties chez les enfants néandertaliens de Krapina. *Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris*, 2, 213-220.
- MANN, A., LAMPL, M. & MONGE, J. 1990b. Patterns of ontogeny in human evolution : Evidence from dental development *Yearbook of Physical Anthropology*, 33, 111-150.
- MANN, A., LAMPL, M. & MONGE, J. 1991. Investigation into relationship between perikymata counts and crown formation times. *American Journal of Physical Anthropology*, 86, 175-188.
- MARANDI, A., AFZALLI, H. M. & HOSSAINI, A. F. 1993. The reasons for early weaning among mothers in Teheran. *Bulletin of the World Health Organisation*, 71, 561-569.
- MARCUS, C. S. & LENGEMANN, F. W. 1962. Absorption of Ca45 et Sr85 from solid and liquid food at various levels of alimentary tract of the rat. *The Journal of Nutrition*, 77, 155- 160.
- MARCUS, C. S. & WASSERMAN, R. H. 1965. Comparison of intestinal discrimination between calcium 47, strontium 85 and barium 133. *American Journal of Physical Anthropology*, 209, 973-977.
- MARKS, M. K., ROSE, J. C. & DAVENPORT, W. D. 1996. Technical note : thin section procedure for enamel histology. *American Journal of Physical Anthropology*, 99, 493-498.
- MARSHALL, L. 1976. *The !Kung of Nyae Nyae*, Cambridge, Harvard University Press, 433 p.
- MARTIN, L. B. 1983. *The relationships of the later Miocene Hominoidea*. PhD thesis, London.
- MARTIN, T. 2005. Incisor schmelzmuster diversity in south America's oldest rodent fauna and early caviomorph history. *Journal of Mammalian Evolution*, 12, 405-417.
- MASSLER, M. & SCHOUR, I. 1946. Growth of the child and the calcification pattern of the teeth. *American Journal of Orthodontics and Oral Surgery*, 32, 495-517.
- MASSLER, M., SCHOUR, I. & PONCHER, H. G. 1941. Developmental pattern of the child as reflected in the calcification pattern of the teeth. *American Journal of Diseases of Children*, 62, 33-67.
- MASSON, P. 2014. Applications de la vaporisation électrothermique couplée à la technique ICP-AES pour la détermination élémentaire dans les végétaux : une stratégie permettant l'analyse directe des échantillons à l'état solide. Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays d'Adour.

Bibliographie

- MAYS, S. 2003. Bone strontium : calcium ratios and duration of breastfeeding in a medieval skeletal population. *Journal of Archaeological Science*, 30, 731-741.
- MAYS, S. & EYERS, J. 2011. Perinatal infant death at the roman villa site at hambleden buckinghamshire, England. *Journal of Archaeological Science*, 38, 1931-1938.
- MAYS, S., RICHARDS, M. P. & FULLER, B. T. 2002. Bone stable isotope evidence for infant feeding in medieval England. *Antiquity*, 76, 654-656.
- MCDADE, T. W. & WORTHMAN, C. M. 1998. The weaning's dilemma reconsidered : A biocultural analysis of breastfeeding ecology. *Developmental and Behavioural Paediatrics*, 19, 286-299.
- MCNEILLY, A. S. 1997. Lactation and fertility. *Journal of Mammary Gland Biology and Neoplasia*, 2, 291-298.
- MERCIER, A. 2012. *La deuxième fille de Cluny : grandeurs et misères de Saint-Martin-des-Champs*, Grenoble, Glénat.
- MERWE, N. J. V. D. & VOGEL, J. C. 1978. ¹³C content of human collagen as a measure of prehistoric diet in woodland Nord America. *Nature*, 276, 815-816.
- MICHAELSEN, K. F., LARSEN, P. S., THOMSEN, B. L. & SAMUELSON, G. 1994. The Copenhagen cohort study on infant nutrition and growth : duration of breast feeding and influencing factors. *Acta Paediatrica*, 83, 565-571.
- MIGNOT, J. M. 2002. Le sevrage chez les Masa Bugudum de la région de Nouldayna (Cameroun). *Journal des Africanistes*, 72, 19-30.
- MILLIGAN, L. A. & BAZINZINET, R. P. 2008. Evolutionary modifications of human milk composition : evidence from long-chain polyunsaturated fatty acid composition of anthropoid milks. *Journal of Human Evolution*, 55, 1086-1095.
- MISHRA, S., THOMAS, H. F., FEARNE, J. M., BOYDE, A. & ANDERSON, P. 2009. Comparaison of demineralisation rates in pre- and postnatal enamel and at the neonatal line. *Archives of Oral Biology*, 54, S101-S106.
- MOFFATT, P., SMITH, C. E., SAINTARNAUD, R. & NANCI, A. 2008. Caractérisation of apin, a secreted protein highly expressed in tooth-associated epithelia. *Journal of cellular biochemistry*, 103, 941-956.
- MOFFATT, P., SMITH, C. E., SOOKNANAN, R., SAINT-ARNAUD, R. & NANCI, A. 2006. Identification of secreted and membrane proteins in the rat incisor enamel organ using a signal-trap screening approach. *European Journal of Oral Sciences*, 114, 139-146.
- MOGGI-CECCHI, J., PACCIANI, E. & PINTOCISTERNAS, J. 1994. Enamel hypoplasia and age at weaning in 19th-century Florence, Italy. *American Journal of Physical Anthropology*, 93, 299-306.
- MONGOMERY, J. 2010. Passeports from the past investigating human dispersals using strontium isotope analysis of tooth enamel. *Annals of Human Biology*, 37, 325-346.
- MORADIAN-OLDAK, J., LEUNG, W. & FINCHAM, A. G. 1998. Temperature and pH-dependent supramolecular self-assembly of amelogenin molecules : a dynamic light scattering analysis. *Journal of structural biology*, 122, 320-327.
- MORADIAN-OLDAK, J., LEUNG, W., SIMMER, J. P., ZEICHNER-DAVID, M. & FINCHAM, A. G. 1996. Identification of a novel proteinase (ameloprotease-I) responsible for the complete degradation of amelogenin during enamel maturation. *Biochemical Journal*, 318, 1015-1021.
- MORGAN, M. E. & SCHOENINGER, M. J. 1989. Zinc and strontium as dietary indicators in a modern tropical community. *American Journal of Physical Anthropology*, 78, 276.
- MOTARJEMI, Y., KÄFERSTEIN, F., MOY, G. & QUEVEDO, F. 1993. Contaminated weaning food : a major risk factor for diarrhoea and associated malnutrition. *Bulletin of the World Health Organisation*, 71, 79-92.
- MÜLLER, H. 1930. Les origines de Grenoble. Sa formation depuis l'époque gauloise jusqu'au VIII^e siècle, d'après les documents extraits du sous-sol. *Revue de Géographie Alpine*, 18, 451-489.

- MULLER, W., FRICKE, H., HALLIDAY, A. N., MCCULLOCH, M. T. & WARTHON, J.-A. 2003. Origin and migration of the alpine iceman. *Science*, 302, 862-866.
- NANCI, A. 1989. Amélogénèse : Formation et structure de l'émail. In : GOLDBEG, M. ed. *Manuel d'histologie et de biologie buccale*. Paris, Masson, 152 p.
- NANCI, A. & SMITH, C. E. 1988. Les protéines de l'émail dentaire. Etude immunocytochimique de l'amélogénèse. *Médecine/Sciences*, 4, 42-45.
- NANCI, A. & SMITH, C. E. 1992. Development and calcification of enamel. In: BONUCCI E. ed. *Calcification in Biological Systems*. Boca Raton, CRC Press, 432 p.
- NANCOLLAS, G. H. 1979. Enamel apatite nucleation and crystal growth. *Journal of Dental Research*, 58, 861-870.
- NANKABIRWA, V., TUMWINE, J. K., TYLLESKÄR, T., NANKUNDA, J. & SOMMERFELT, H. 2011. Perinatal mortality in eastern Uganda : A community based prospective cohort study. *PLoS One*, 6.
- NERLOVE, S. B. 1974. Women's workload and infant feeding practices : A relationship with demographic implications. *Ethnology*, 13, 207-214.
- NEVILLE, A. C. 1967. Daily growth layers in animals and plants. *Biological review*, 42, 421-439.
- NEWMAN, G. 1906. *Infant mortality, a social problem* Londres : Methuen and company.
- NIELSEN, S. P. 2004. The biological role of strontium. *Bone*, 35, 583-588.
- NITSCH E. K., HUMPHREY L. T. & HEDGES R. E. M. 2011. Using stable isotope analysis to examine the effect of economic change on breastfeeding practices in spitalfields, London, UK. *American Journal of Physical Anthropology*, 146, 619-628.
- NOIRHOMME-RENARD, F. & NOIRHOMME, Q. 2009. Les facteurs associés à un allaitement maternel prolongé au-delà de trois mois : une revue de la littérature. *Journal de Pédiatrie et de Puériculture*, 22, 112-120.
- NOWAK, B. & CHMIELNICKA, J. 2000. Relationship of lead and calcium to essential elements in hair, teeth, and nails of environmentally exposed people. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 46, 265-274.
- OEIL G., BUCHET L., RUCKER C. & PECHEYRAN C. 2019. Estimation de la durée de l'allaitement maternel dans les populations historiques à partir des propriétés physico-chimiques de l'émail dentaire. Le cas de la population de Hières-sur-Amby. In : HERRSCHER, E., SÉGUY I. eds. *Premiers cris, premières nourritures*. Aix-en-Provence, PUP, collection Corps et Âmes, 456 p.
- OGILVIE, M. D., CURRAN, B. K. & TRINKAUS, E. 1989. Incidence and patterning of dental enamel hypoplasia among the Neandertals. *American Journal of Physical Anthropology*, 79, 25-41.
- OPREA, C., SZALANSKI, P. J., GUSTOVA, M. V., OPREA, I. A. & BUZGUTA, V. 2009. XRF detection limits for dental tissues of human teeth. *Vacuum*, 83, 166-168.
- OSBORN, J. W. 1970. The mechanism of prism formation in teeth : A hypothesis. *Calcified Tissue Research*, 5, 115-132.
- OUTRIDGE, P. M., VEINOTT, G. & EVANS, R. D. 1995. Laser ablation ICP-MS analysis of incremental biological structures : Archives of trace-element accumulation. *Environmental Review*, 3, 160-170.
- PAINE, M. L. & SNEAD, M. L. 1997. Protein interactions during assembly of the enamel organic extracellular. *Journal of Bone and Mineral Research*, 12, 221-227.
- PAINE, P. & DOREA, J. G. 2001. Gender role attitude and other determinants of breastfeeding intentions in Brazilian women. *Child : Care, Health and Development*, 27, 61-72.
- PALUBECKAITÉ, Z., JANKAUSKAS, R. & BOLDSSEN, J. 2002. Enamel hypoplasia in Danish and Lithuanian late Medieval/early Modern samples : a possible reflection of child morbidity and mortality patterns. *International Journal of Osteoarchaeology*, 12, 198-201.

Bibliographie

- PANTER-BRICK, C. 1991. Lactation, birth spacing and maternal work-loads among two castes in rural Nepal. *Journal of Biosociology Science*, 23, 137-154.
- PARKER, P. L. 1964. The biochemistry of the stable isotopes of carbon in a marine bay. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28, 1155-1164.
- PASSEY, B. H. & CERLING, T. E. 2002. Tooth enamel mineralisation in ungulates / Implications for recovering a primary isotopic time-series. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66, 3225-3234.
- PATE, D. F. & BROWN, K. A. 1985. The stability of bone strontium in the geochemical environment. *Journal of Human Evolution*, 14, 483-491.
- PATE, D. F. & HUTTON, J. T. 1988. The use of soil chemistry data to address post-mortem diagenesis in mineral. *Journal of Archaeological Science*, 15, 729-739.
- PEARSON J. A., HEDGES R. E. M., MOLLESON T. I. & OZBEK M. 2010. Exploring the relationship between weaning and infant mortality : an isotope case study from Aşikli Höyük and Çayönü Tepesi. *American Journal of Physical Anthropology*, 143, 448-457.
- PECHEY, J. 1697. A general treatise of the diseases of infants and children. Collected from the best practical authors. Printed for R. Wellington, Londres, 192 p.
- PÉCHEYRAN, C., CANY, S. & DONARD, O. F. X. 2005. Ablation laser femtoseconde à haute cadence de tir et basse énergie couplée à une détection ICPMS : Résultats préliminaires. *Canadian Journal of Analytical Sciences and Spectroscopy*, 50, 228-239.
- PEEBLES, C. S. & KUS, S. M. 1977. Some archaeological correlates of ranked societies. *American Antiquity*, 42, 421-448.
- PEREZ, E. 2013. L'enfant au miroir des sépultures médiévales (Gaule, VI^e-XII^e siècles). Thèse de doctorat, Université Nice Sophia Antipolis.
- PEREZ-ESCAMILLA, R. 1994. Breastfeeding in Africa and the latin American and Caribbean region : the potential role of urbanization. *Journal of Tropical Paediatrics*, 40, 137-143.
- PFISTER, C., LUTERBACHER, J., SCHWARZ-ZAHNETTI, G. & WEGMANN, M. 1998. Winter air temperature variations in western Europe during the Early and High Middle Ages (AD 750-1300). *The Holocene*, 8, 535-552.
- PHAFF, B. N. 2012. Human dietary and mobility patterns of a prehistoric population from Sgatoka, Fiji : A reconstruction using stable isotope analysis. Master.
- PHARSWAN, J. S. & FARSWAN, Y. S. 2011. Role and utility of trace elements in paleodietary reconstruction. *New York Science Journal*, 4, 43-48.
- POLET, C. 2008. Apport des isotopes stables à la paléanthropologie. In : CHARLIER, P. ed. *Ostéo-archéologie et techniques médico-légales : Tendances et perspectives*. Paris, De Boccard.
- PORTE, P. 2011. *Larina de l'Antiquité au Moyen Âge. Etudes archéologiques et historiques en Nord Isère*, Biarritz, Séguier, 510 p.
- PORTE, P. & BUCHET, L. 1985. La nécropole du haut Moyen Âge des Grands Peupliers à Hières-sur-Amby (Isère). Etude d'une population dans son territoire. *Archéologie médiévale*, XV, 31-102.
- POTTER, R. G., NEW, M. L., WYON, J. B. & GORDON, J. E. 1965. Applications of field studies to research on physiology of human reproduction. Lactation and its effects upon birth intervals in eleven Punjab villages, India. *Journal of Chronic Diseases*, 18, 1125-1140.
- POTVIN-LAPOINTE, S., NISHIO, C., WAZEN, R., MACEDO CRIVELINI, M., MOFFATT, P. & NANCI, A. 2009. L'étude du génome de la dent permet la découverte de deux protéines. Impact sur la santé parodontale. *Journal de l'Ordre des Dentistes du Québec*, 46, 13-15.
- PRICE T. DOUGLAS, GRUPE GISELA & PETER, S. 1994. Reconstruction of migration patterns in the Bell Beaker period by stable strontium isotope analysis. *Applied Geochemistry*, 9, 413-417.
- PRICE, T. D., BLITZ, J., BURTON, J. & EZZO, H. A. 1992. Diagenese in prehistoric bones : problems and solutions. *Journal of Archaeological Science*, 19, 513-529.
- PRICE, T. D., SCHOENINGER, M. J. & ARMELAGOS, G. J. 1985. Bone chemistry and

- past behavior : An Overview. *Journal of Human Evolution*, 14, 419-447.
- PROWSE, T., SCHWARCZ, H. P., SAUNDERS, S. R., 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, 259-272.
- QUANDT, S. A. 1986. Patterns of variation in breast-feeding behaviors. *Social Science and Medicine*, 23, 445-453.
- QUATREHOMME, G. 2015. *Traité d'anthropologie médico-légale*, Lettonie, De Boeck, 1861 p.
- RAMIREZ ROZZI, F. 1993a. Le développement dentaire des hominidés du plio-pléistocène. *Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris*, 5, 131-142.
- RAMIREZ ROZZI, F. 1993b. Tooth development in East African paranthropus. *Journal of Human Evolution*, 24, 429-454.
- RAMIREZ ROZZI, F. 1998. Enamel structure and development and its application in hominid evolution and taxonomy. *Journal of Human Evolution*, 35, 327-330.
- RAMIREZ ROZZI, F. 2005. Age au décès de l'enfant néandertalien de l'Hortus. *Bulletin et mémoire de la société d'anthropologie de Paris* 17, 47-55.
- RAMIREZ ROZZI, F. 2010. Quantification de la croissance à partir des indices dentaires. *In*:
- CHAPUIS-LUCCIANI N., GUIHARD COSTA A.M. & BOETSCH G. eds. *L'anthropologie du vivant : Objet et méthode*. Paris : CNRS GDR 3267.
- RAVELOMANANA, N., RAZAFINDRAKOTO, O., RAKOTOARIMANANA, D. R., BRIEND, A., DESJEUX, J. F. & MARY, J. Y. 1995. Risk factors for fatal diarrhoea among dehydrated malnourished children in a Madagascar Hospital. *European Journal of Clinical Nutrition*, 49, 91-97.
- REICHE, I. & CHADEFaux, C. 2015. La microscopie électronique. *In* : BALASSE, M., BRUGAL, J.-P., DAUPHIN, Y., GEIGL, E.-M., OBERLIN, C. & REICHE, I. eds. *Messages d'os. Archéométrie du squelette animal et humain*. Paris, Editions des Archives Contemporaines, 530 p.
- REICHE, I. & LEBON, M. 2015. Vers une meilleure évaluation de l'état de préservation des matières osseuses archéologiques par la caractérisation résolue spatialement multiéchelle. *In* : BALASSE, M., BRUGAL, J.-P., DAUPHIN, Y., GEIGL, E.-M., OBERLIN, C. & REICHE, I. eds. *Messages d'os. Archéométrie du squelette animal et humain*. Paris, Editions des Archives contemporaines, 530 p.
- REID, D. J., BEYNON, A. D. & RAMIREZ ROZZI, F. 1998. Histological reconstruction of dental development in four individuals from medieval site in Picardie, France. *Journal of Human Evolution*, 35, 463-477.
- REID, D. J. & DEAN, M. C. 2006. Variation in modern human enamel formation times. *Journal of human Evolution*, 50, 329-346.
- REID, D. J. & FERRELL, R. J. 2006. The relationship between number of striae of Retzius and their periodicity in imbricational enamel formation. *Journal of Human Evolution*, 50, 195-202.
- REID, D. J., SIRIANNI, J. E. & SMITH, T. M. 2006. Analysis of the surface characteristics and mineralization status of feline teeth using scanning electron microscopy. *Journal of Anatomy*, 208, 125-138.
- REITZNEROVÁ, E., AMARASIRIWARDENA, D., KOPČÁKOVÁ, M. & BARNES, R. M. 2000. Determination of some trace elements in human tooth enamel. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 367, 748-754.
- REYNARD L. M. & TUROSS N. 2015. The known, the unknown and unknowable : weaning times from archaeological bones using nitrogen isotope ratios. *Journal of Archaeological Science*, 53, 618-625.
- RHEINGOLD, A. L., HUES, S. & COHEN, M. N. 1983. Strontium and zinc content in bones as an indication of diet. *Journal of Chemical Education*, 60, 233-234.
- RICHARDS, M. P., FULLER, B. T., SPONHEIMER, M., ROBINSON, T. & AYLIFFE, L. 2003. Sulphur isotopes in palaeodietary studies : a review and results from a controlled feeding experiment. *International Journal of Osteoarchaeology*, 13, 37-45.

Bibliographie

- 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, U.K. *American Journal of Physical Anthropology*, 119, 205-210.
- RISNES, S. 1985. A scanning electron microscope study of the three-dimensional extent of Retzius lines in human dental enamel. *Scandinavian Journal of Dental Research*, 93, 145-152.
- RISNES, S. 1986. Enamel apposition rate and the prism periodicity in human teeth. *Scandinavian Journal of Dental Research*, 94, 394-404.
- RISNES, S. 1990. Structural characteristics of staircase-type Retzius lines in human dental enamel analysed by scanning electron microscopy. *The Anatomical Record*, 226, 135-146.
- RISNES, S. 1998a. Growth track in dental enamel. *Journal of Human Evolution*, 35, 331-350.
- RISNES, S., RADLANSKI, R. J. & RENZ, H. 1998b. A scanning electron microscopic study of developing human deciduous enamel on the dependence of the outline of surface pits on the angle of observation. *archives of Oral Biology*, 43, 111-115.
- ROBIN, G., MASSART, P., GRAIZEAU, F. & GUÉRIN DU MASGENET, B. 2010. La contraception du post-partum : état des connaissances. *La Revue Sage-Femme*, 9.
- ROBINSON, C., CONNELL, S., BROOKES, S. J., KIRKHAM, J., SHORE, R. C. & SMITH, D. A. M. 2005. Surface chemistry of enamel apatite during maturation in relation to pH : Implications for protein removal and crystal growth. *Archives of oral biology*, 50, 267-270.
- ROBINSON, C., CONNELL, S., KIRKHAM, J., SHORE, R. & SMITH, A. 2004. Dental enamel - a biological ceramic : Regular substructures in enamel hydroxyapatite crystals revealed by atomic force microscopy. *Journal of Materials Chemistry*, 14, 2242-2248.
- ROBINSON, C., KIRKHAM, J., BROOKES, S. J., BONASS, W. A. & SHORE, R. C. 1995a. The chemistry of enamel development. *International Journal of Developmental Biology*, 39, 145-152.
- ROBINSON, C., KIRKHAM, J., BROOKES, S. J. & SHORE, R. C. 1992. The role of albumin in developing rodent dental enamel : A possible explanation for white spot hypoplasia. *Journal Dental Research*, 71, 1270-1274.
- ROBINSON, C., KIRKHAM, J., BROOKES, S. J. & SHORE, R. C. 1995b. Chemistry of mature enamel. In : ROBINSON C., KIRKHAM J. & SHORE R.C. eds. *Dental enamel formation to destruction*. New York, Boca Raton, CRC Press, 272 p.
- RODIÈRE, E., BOCHERENS, H., ANGIBAULT, J. M. & MARIOTTI, A. 1996. Particularités isotopiques chez le chevreuil (*capreolus capreolus L.*) : Implications pour les reconstructions paléoenvironnementales. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 323, 179-185.
- RODUSHKIN, I., AXELSSON, M. D., MALINOVSKY, D. & BAXTER, D. C. 2002. Analyte- and matrix-dependent elemental response variations in laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry : Part.1. The roles of plasma and ion sampling conditions. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17, 1223-1230.
- ROGAN, W. J. 1989. Cancer from PCBs in breast milk? A risk benefit analysis. *Pediatric Research*, 25, 105A.
- ROGERS, I. S., EMMETT, P. M. & GOLDING, J. 1997. The incidence and duration of breast feeding. *Early Human Development*, 49 suppl, S45-S74.
- ROLLET, C. 1978. Allaitement, mise en nourrice et mortalité infantile en France à la fin du XIXe siècle. *Population*, 33, 1189-1203.
- ROLLET, C. 2005. Histoire de l'allaitement en France : Pratiques et représentations. www.santeallaitement.com, 5.
- ROSE, J. C. 1977. Defective enamel histology of prehistoric teeth from Illinois. *American Journal of Physical Anthropology*, 46, 439-446.
- ROSE, J. C., ARMELAGOS, G. J. & LALLO, J. W. 1978. Histological enamel indicator of childhood stress in prehistoric skeletal samples. *American Journal of physical Anthropology*, 49, 511-516.
- ROSENTHAL, H. L. 1981. Content of stable strontium in man and animal biota. In : C., S.

- ed. *Handbook of common strontium*. New York, Plenum, 644 p.
- ROSSIPAL, E., KRACHLER, M., LI, F. & MICETIC-TURK, D. 2000. Investigation of the transport of trace elements across barriers in humans : studies of placental and mammary transfer. *Acta Paediatrica*, 89, 1190-1195.
- ROUQUET, N. & LORIDANT, F. Note sur les biberons en Gaule romaine. In : RIVET, L., ed. *Actes du congrès de Libourne*, 1er-4 juin 2000, 2000 Marseille. SFECAG, 425-440.
- SABEL, N., JOHANSSON, C., KÜHNISCH, J., ROBERTSON, A., STEINIGER, F., NORÉN, J. G., KLINGBERG, G. & NIETZSCHE, S. 2008. Neonatal lines in the enamel of primary teeth - A morphological and scanning electron microscopic investigation. *Archives of Oral Biology*, 53, 954-963.
- SAMEK, O., BEDDOWS, D. C. S., TELLE, H. H., KAISER, J., LIŠKA, M., CÁCERES, J. O. & UREÑA, A. G. 2001. Quantitative laser-induced breakdown spectroscopy analysis of calcified tissue samples. *Spectrochimica Acta Part B*, 56, 865-875.
- SANDSTEAD, H. H. 1973. Zinc nutrition in the United States. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 26, 1251-1260.
- SCHARLOTTA I. 2018. Differentiating mobility and migration in middle Holocene Cis-Baikal. *Journal of archaeological Science : Reports* 17, 919-931).
- SCHEUER, L. & BLACK, S. 2000. *Developmental juvenile osteology*. Academic Press, Londres, 587 p.
- SCHNEIDER, K. N. & BLAKESLEE, D. J. 1990. Evaluating residence patterns among prehistoric populations : Clues dental enamel composition. *Human Biology*, 62, 71-83.
- SCHOENINGER, M. J. 1979. Diet and status at Chalcatzingo : some empirical and technical aspects of strontium analysis. *American Journal of Physical Anthropology*, 51, 295-310.
- SCHOENINGER, M. J. 1982. Diet and the evolution of modern human form in the middle East. *American Journal of Physical Anthropology*, 58.
- SCHOENINGER, M. J., MOORE, K. M., MURRAY, M. L. & KINGSTON, J. D. 1989. Detection of bone preservation in archaeological and fossil samples. *Applied Geochemistry*, 4, 281-292.
- SCHOENINGER, M. J. & PEEBLES, C. S. 1981. Effect of mollusc eating on human bone strontium levels. *Journal of Archaeological Science*, 8, 391-397.
- SCHOUR, I. & PONCHER, H. G. 1937. Rate apposition of enamel and dentine, measured by the effect of acute fluorosis. *American Journal of Diseases of children*, 54, 757-776.
- SCHROEDER, H. A., BALASSA, J. J. & TIPTON, I. H. 1966. Essential Trace metals in man : Manganese. A study in homeostasis. *Journal of Chronic Diseases*, 19, 545-571.
- SCHROEDER, H. A., TIPTON, I. H. & NASON, A. P. 1972. Trace metals in man : strontium and barium. *Journal of Chronic Diseases* 25, 491-517.
- SCHURR, M. R. 1997. Stable nitrogen isotopes as evidence for the age of weaning at the Angel site : A comparison of isotopic and demographic measures of weaning age. *Journal of Archaeological Science*, 24, 919-927.
- SCHURR, M. R. 1998. Using stable nitrogen isotopes to study weaning behavior in past populations. *World Archaeology*, 30, 327-342.
- SCHUTKOWSKI, H., HERRMANN, B., WIEDEMANN, F., BOCHERENS, H. & GRUPE, G. 1999. Diet status and decomposition at Weingarten : Trace element and isotope analyses medieval skeletal material. *Journal of Archaeological Science*, 26, 675-685.
- SCHWARCZ, H. P. & SCHOENINGER, M. J. 1991. Stable isotopic analyses in human nutritional ecology. *Yearbook of Physical Anthropology*, 34, 283-321.
- SCHWARTZ, G. T., REID, D. J., DEAN, M. C. & ZIHLMAN, A. L. 2006. A faithful record of stressful life events preserved in the dental developmental record of a juvenile gorilla. *International Journal of Primatology*, 27, 1201-1219.
- SCHWARTZ, J. H., HOUGHTON, F., MACCHIARELLI, R. & BONDIOLI, L. 2010.

Bibliographie

- Skeletal remains from Punic Carthage do not support systematic sacrifice of infants. *PLoS One*, 5, 1 - 12.
- SCHWARCZ, H. P. & SCHOENINGER, M. J. 2011. Stables isotopes of carbon and nitrogen as tracers for paleo-diet reconstruction. In : BASKARAN M. ed *Handbook of environmental isotope geochemistry*. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co, 951 p.
- 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, 1373-1383.
- SEALY, J. C. & SILLEN, A. 1988. Sr and Sr/Ca in marine and terrestrial foodwebs in the Southwestern Cape, South Africa. *Journal of Archaeological Science*, 15, 425-438.
- SÉGUY I. & BUCHET L. 2011. Manuel de paléodémographie. Paris, INED, 431 p.
- SELLEN, D. W. 2001. Comparison of infant feeding patterns reported for nonindustrial populations with current recommendations. *The Journal of Nutrition*, 131, 2715-2720.
- SELLEN, D. W. & SMAY, D. B. 2001. Relationship between subsistence and age at weaning in "preindustrial" societies. *Human Nature*, 12, 47-87.
- SHACKLETTE, H. T. 1980. Element in fruits and vegetables from areas of commercial production in the conterminous United States. US Geological Survey Professional paper N° 1178 US Government Printing Office Washington, D.C.
- SHARP, Z. D., ATUDOREI, V., PANARELLO, H. O., FERNANDEZ, J. & DOUTHITT, C. 2003. Hydrogen isotope systematics of hair : archeological and forensic applications. *Journal of Archaeological Science*, 30, 1709-1716.
- SHELLIS, R. P. 1984a. Interrelationship between growth and structure of enamel. In : FEARNHEAD R.W. & SUGA S. eds. *Tooth enamel IV*. Amsterdam, Elsevier, 570 p.
- SHELLIS, R. P. 1984b. Discussion session 5. In : FEARNHEAD R.W. & SUGA S. eds. *Tooth enamel IV*. Amsterdam, Elsevier, 570 p.
- SHELLIS, R. P. 1984c. Variations in growth of the enamel crown in human teeth and a possible relationship between growth and enamel structure. *Archives of oral biology*, 29, 697-705.
- SHELLIS, R. P. 1998. Utilization of periodic markings in enamel to obtain information on tooth growth. *Journal of Human Evolution*, 35, 387-400.
- SIFFRE, A. 1923. Persistance morphologique de la dent humaine. *Bulletin et Mémoire de la Société d'Anthropologie de Paris*, 4, 142-171.
- SILLEN, A. 1981. Strontium and diet at Hayonim cave. *American Journal of Physical Anthropology*, 56.
- SILLEN, A. 1992. strontium-calcium ratios (Sr/Ca) of *Australopithecus robustus* and associated fauna from Swartkrans. *Journal of Human Evolution*, 23, 495-516.
- SILLEN, A. & KAVANAGH, M. 1982. Strontium and paleodietary research : A review. *Yearbook of Physical Anthropology*, 25, 67-90.
- SILLEN, A., SEALY, J. C. & VAN DER MERWE, N. J. 1989. Chemistry and paleodietary research : no more easy answers. *American Antiquity*, 54, 504-512.
- SILLEN, A. & SMITH, P. 1983. Strontium/calcium ratios reveal weaning age in a skeletal population. *American Journal of Physical Anthropology*, 60, 253-254.
- SILLEN, A. & SMITH, P. 1984. Weaning Patterns are reflected in strontium - calcium ratios of juvenile skeletons. *Journal of Archaeological Science* 11, 237-245.
- SIMMELINK, L. M. & NYGAARD, V. K. 1982. Ultrastructure of striations in carious human enamel. *Caries Research*, 16, 179-188.
- SIMMER, J. P. & FINCHAM, A. G. 1995. Molecular mechanism of dental enamel formation. *Crit Rev Oral Biol Med* 6, 84-108.
- SIMONDON, K. B. 2009. Early breastfeeding cessation and infant mortality in low-income countries. In : GOLDBERG, G. R., PRENTICE, A., PRENTICE, A., FILTEAU, S. & SIMONDON, K. B. eds. *Breast-feeding : Early influences on later health*. New-York, Springer, 428 p.

- SIMPSON, S. W. 1997. Patterns of growth perturbation in La Florida : evidence from enamel microstructure. *American Journal of Physical Anthropology (Suppl.)*, 24, 212-212.
- SINGLA, Y., SHARMA, R., MISHRA, A. & SHARMA, R. 2018. Age estimation by forensic odontology. *International journal of Current Research in Life Science*, 7, 2097-2100.
- SKINNER, M. & DUPRAS, T. 1993. Variation birth timing and location of the neonatal line in human enamel. *Journal of Forensic Sciences, JFSCA*, 38, 1383 - 1390.
- SLOVAK, N. M., PAYTAN, A. & A., W. B. 2009. Reconstructing Middle horizon mobility patterns on thcoast of Peru through strontium isotope analysis. *Journal of Archaeological Science*, 36, 157-165.
- SMITH, B. H. 1989. Dental developpement as a measure of life history in primates. *Evolution*, 43, 683-688.
- SMITH, C. E. 1998. Cellular and chemical events during enamel maturation. *Crit. Rev. Oral Biol. Med.*, 9, 128-161.
- SMITH, C. E. & NANCI, A. 1996. Protein dynamics of amelogenesis. *Anatomical record*, 245, 186-207.
- SMITH, H. B. 1991. Standard of human tooth formation and dental age assessment. In : KELLEY, M. A. & LARSEN, C. S. eds. *Advances in dental anthropology*. New York, Wiley-Liss, 402 p.
- SMITH, P. & AVISHAI, G. 2005. The use of dental criteria for estimating postnatal survival in skeletal remains of infants. *Journal of Archaeological Science*, 32, 83-89.
- SMITH, P. & KAHILA, G. 1992. Identification of infanticide in archaeological sites : A case study from the later roman - Early Byzantine periods at Ashkelon, Israel. *Journal of Archaeological Science*, 19, 667-675.
- SMITH, T. M. 2006. Experimental determination of the periodicity of incremental features in enamel. *Journal of Anatomy*, 208, 99-113.
- SMITH, T. M. 2008. Incremental dental development: Methods and applications in hominoid evolutionary studies. *Journal of Human Evolution*, 54, 205-224.
- SMITH, T. M., MARTIN, L. B. & LEAKEY, M. G. 2003. Enamel Thickness, microstructure and development in Afropithecus turkanensis. *Journal of Human Evolution*, 44, 283-306.
- SMITH, T. M., REID, D. J. & SIRIANNI, J. E. 2006. The accuracy of histological assessments of dental development and age at death. *Journal of anatomy*, 208, 125-138.
- SMITH, T. M. & TAFFOREAU, P. 2008. New vision of dental tissue research: tooth development, chemistry, and structure. *Evolutionary Anthropology*, 17, 213-226.
- SONG, R. J. 2004. *Reconstructing infant diet and weaning behavior of ancient maya from Laminai, Belize, using LA-ICP-MS*. Thesis, Université du Massachusetts.
- SORANOS D'EPHÈSES 1990. Les maladies des femmes. In : BURGUIÈRE PAUL, GOUREVITCH DANIELLE & MALINAS YVES eds. Paris, Les Belles Lettres (Collection des Universités de France).
- SPONHEIMER, M. & LEE-THORP, J. A. 2006. Enamel diagenesis at south African Australopith sites : Implications for paleoecological reconstruction with trace elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 1644-1654.
- SPONHEIMER, M., PASSEY, B. H., RUITER, D. J.D., GUATELLISTEINBERG, D., CERLING, T. E. & LEE-THORP, J. 2006. Isotopic evidence for dietary variability in the early hominin Paranthropus robustus. *Science*, 314, 980-982.
- SPONHEIMER, M., RUITER, D. D., LEETHORP, J. A. & SPÄTH, A. 2005. Sr/Ca and early homini diets revisited : a new data from modern and fossil tooth enamel. *Journal of human evolution* 48, 147-156.
- STERMER, E. M., RISNES, S. & FISCHER, P. M. 1996. Trace element analysis of blackish staining on the crowns of human archaeological teeth. *European Journal of Oral Sciences*, 104, 253-261.
- STUART-MACADAM, P. & DETTWYLER, K. A. 1995. *Breastfeeding : biocultural perspectives*. New York, Aldine de Gruyter, 430 p.

Bibliographie

- SUGA, S. 1983. Comparative histology of the progressive mineralization pattern of developing enamel. *In* : SUGA S. ed. *Mechanism of tooth enamel formation*. Tokyo, Quintessence, 308 p.
- SUN, Z., FAN, D., FAN, Y., DU, C. & MORADIAN-OLDAK, J. 2008. Enamel proteases reduce amelogenin-apatite binding. *Journal of Dental Research*, 87, 1133-1137.
- SUZANNE, C. & POLLET, C. 2005. Dictionnaire d'anthropobiologie. Bruxelles, De Boeck, 402 p.
- SZOSTEK, K. 2009. Chemical signals and reconstruction of life strategies from ancient human bones and teeth - problems and perspectives. *Anthropological Review*, 72, 3-30.
- TAFFOREAU, P. 2004. Aspects phylogénétiques et fonctionnels de la microstructure de l'émail dentaire et de la structure tridimensionnelle des molaires chez les primates fossiles et actuels : apports de la microtomographie à rayonnement X synchrotron. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II.
- TARASEVICH, B. J., HOWARD, C. J., LARSON, J. L., SNEAD, M. L., SIMMER, J. P., PAINE, M. L. & SHAW, W. J. 2007. The nucleation and growth of calcium phosphate by amelogenin. *Journal of Crystal Growth*, 304, 407-415.
- TAUBER, H. 1981. ¹³C evidence for dietary habits of prehistoric man in Denmark. *Nature*, 292.
- TEIVENS, A., MÖRNSTAD, H., NÖREN, J. G. & GIDLUND, E. 1996. Enamel incremental lines as recorders for disease in infancy and their relation to the diagnosis of SIDS. *Forensic Science International*, 81, 175-183.
- TERMINE, J. D., BELCOURT, A. B., CHTISTNER, P. J., CONN, K. M. & NYLEN, M. U. 1980. Properties of Dissociatively extracted foetal tooth matrix proteins I. Principal molecular species in developing bovine enamel. *The journal of biological chemistry*, 255, 9760-9768.
- THIRION M. 2019. Allaitement naturel ... vous avez dit naturel ? *In* : HERRSCHER, E. & SÉGUYI. eds. *Premiers cris, premières nourritures*. Aix-en-Provence, PUP, collection Corps et Âmes, 456 p.
- THOMPSON, R. C. 1963. Factors and conditions modifying the absorption and retention of chronically ingested radiostrontium. *In* : WASSERMAN R.H. ed. *The transfer of calcium and strontium across biological membranes*. New York, Academic Press, 464 p.
- THOMPSON, T.J.U., GAUTHIER, M. & ISLAM, M. 2009. The application of a new method of fourier transform inferred spectroscopy to analysis of burned bone. *Journal of Archaeological Science*, 36, 910-914.
- TOOHEY, M., KRÜGER, K., SIGL, M., STORDAL, F. & SVENSEN, H. 2016. Climatic and societal impacts of a volcanic double event at the dawn of the Middle Ages. *Climatic Change*, 136, 401-412.
- TOOTS, H. & VOORHIES, M. R. 1965. Strontium in fossil bones and the reconstruction of food chains. *Science*, 149, 854-855.
- TRESSAUD, A., BONJEAN, P. & BOUSSAGNOL, P. 1973. Analyse du tissu osseux par fluorescence X et par microsonde électronique. *In* : MONTEL M. G. ed. *Physico-chimie et cristallographie des apatites d'intérêt biologique*. Paris, Centre National de la Recherche Scientifique, 502 p.
- TRILLER, M. 1986. *Histologie dentaire*, Paris, Masson, 210 p.
- TROCELLO, J.-M., CHAPPUIS, P., CHAINE, P., RÉMY, P., DEBRAY, D., DUCLOS-VALLÉE, J.-C. & WOIMANT, F. 2009. Maladie de Wilson. *La Presse Médicale*, 38, 1089-1098.
- TSUTAYA T. & YONEDAM. 2015. Reconstruction of breastfeeding and weaning practices using stable isotope and trace element analyses : a review. *Yearbook of Physical anthropology*, 156, 2-21.
- TURCK, D. 2010. Historique de la diversification alimentaire. *Archives de Pédiatrie*, 17, 191-194.
- TURNER, B. L., KAMENOV, G.D., KINGSTON, J. D. & J., A. G. 2009. Insights into immigration and social class at Machu Iccu, Peru based on oxygen, strontium, and lead isotopic analysis. *Journal of Archaeological Science*, 36, 317-332.
- TUROSS, N., BEHRENSMEYER, A. K. & EANES, E. D. 1989. Strontium increases and crystallinity changes in taphonomic and archaeological bone. *Journal of Archaeological Science*, 16, 661-672.

- TUROSS N., FOGEL M. L. 1994. Stable isotope analysis and subsistence patterns at the Sully site. In : OWSLEY D. W., JANTZ R. L. eds. *Skeletal biology in the great plains : migrations, warfare, health, and subsistence*. Smithsonian Institution Press, Washington, 408 p.
- TWARDOCK, A. R. 1963. Studies on the movement of calcium and strontium across the bovine mammary gland. In : WASSERMAN R.H. ed. *The transfer of calcium and strontium across biological membranes*. New York, Academic Press, 443 p.
- TYKOT, R. H. 2006. Isotopes analyses and histories of maize. In : STALLER J. E., TYCOT R.H. & BENZ B.F. eds. *Histories of maize. Multidisciplinary approaches to the prehistory, linguistics, biogeography, domestication, and evolution of maize*. Burlington, Elsevier, 678 p.
- UBELAKER, D. H. 1989. Human Skeletal remains : excavation, analysis, interpretation. Washington, Teraxacum, 172 p.
- ULMANN, J. 1967. Les débuts de la médecine des enfants, Paris, Palais de la découverte, 61 p.
- UNDERWOOD, E. J. 1977. *Trace elements in human and animal nutrition*, New York, Academic Press, 545 p.
- UNDERWOOD, M. 1784. *A treatise on the diseases of children*, Londres.
- URYU, T., YOSHINAGA, J., YANAGISAWA, Y., ENDO, M. & TAKAHASHI, J. 2003. Analysis of lead in tooth enamel by laser ablation inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Analytical Sciences*, 19, 1413-1416.
- USKOKOVIĆ, V., KHAN, F., LIU, H., WITKOWSKA, H. E., ZHU, L., LI, W. & HABELITZ, S. 2011. Hydrolysis of amelogenin by matrix metalloprotease-20 accelerates mineralization in vitro. *Archives of oral biology*, 56, 1548-1559.
- USKOKOVIĆ, V., KIM, M. K., LI, W. & HABELITZ, S. 2008. Enzymatic Processing of Amelogenin during Continuous Crystallization of Apatite. *Journal of Materials Research* 23, 3184-3195.
- VANDELEEST, J. J. 2012. Birth timing and the mother-infant relationship predict variation in infant behavior and physiology. *Developmental Psychobiology*, 55, 829-837.
- VELASCO-VÁSQUEZ, J., ARNAY-DE-LAROSA, M., GONZÁLEZ-REIMERS, E. & HERNÁNDEZ-TORRES, O. 1997. Paleodietary analysis on the prehistoric population of El Hierro (Canary Islands). *Biological Trace Element Research*, 60, 235-241.
- VENTRESCA MILLER A., HANKS B. K., JUDD M. & EPIMAKHOV A. 2017. Weaning Practices among pastoralists : new evidence of infant feeding patterns from Bronze Age Eurasia. *American Journal of Physical Anthropology*, 162 (3), 409-422.
- VERNET, J. L. 1997. L'homme et la forêt méditerranéenne de la préhistoire à nos jours. Paris, Editions Errance, 247 p.
- VITZTHUM, V. J. 1994. Comparative study of breastfeeding structure and its relation to human reproductive ecology. *Yearbook of Physical anthropology*, 37, 307-349.
- VOGEL, A., HUTCHISON, B.L. & MITCHELL, E. A. 1999. Factors associated with the duration of breastfeeding. *Acta Paediatrica*, 88, 1320-1326.
- VRBIC, V., STUPAR, J. & BYRNE, A. R. 1987. Trace element content in primary an permanent tooth enamel *Caries research*, 21, 37-39.
- VUORINEN, H. S., TAPPER, U. & MUSSALORAUHAMAA, H. 1990. Trace and heavy metals in infants, analysis of long bones from Ficana, Italy, 8-6th century B.C. *Journal of Archaeological Science*, 17, 237-254.
- WAKHABE KANE, A. 1995. Stratum intermedium et différenciation de l'améloblaste au sein de l'organe d'émail dentaire. Thèse de Doctorat, Cheikh Anta Diop.
- WARDLAW, T., WHITE JOHANSSON, E. & HODGE, M. 2006. Pneumonia : the forgotten killer of children. New York, Genève, World Health Organization, UNICEF.
- WARSHAWSKY, H. 1989. Organization of crystals in enamel. *The Anatomical Record*, 224, 242-262.
- WARSHAWSKY, H. & BAI, P. 1983. Knife chatter during thin sectioning of rat incisor enamel can

Bibliographie

- cause periodicities resembling cross-striations. *The Anatomical Record*, 207, 533-538.
- WARSHAWSKY, H., BAI, P. & NANCI, A. 1984. Lack of evidence for rhythmicity in enamel development. In : BELCOURT A.B. & J.V., R. eds. *Tooth morphogenesis and differentiation*. Paris, INSERM.
- WEBER, D. F. & EISENMANN, D. R. 1971. Microscopy of neonatal line in developing human enamel. *American Journal of Anatomy*, 132, 375-392.
- WEBER, D. F. & GLICK, P. L. 1975. Correlative Microscopy of enamel prism orientation. *American Journal of Anatomy*, 144, 407-420.
- 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, 187-196.
- WHITE, C. D. 1986. Paleodiet and nutrition of the ancient Maya at Lamanai, Belize : a study of trace elements, stable isotopes, nutritional and dental pathology. M. A. Thesis, Trent University.
- WHITE, C. D. 1986. Paleodiet and nutrition of the ancient Maya at Lamanai, Belize : a study of trace elements, stable isotopes, nutritional and dental pathology. M.A. Thesis.
- WHITE, T. D. 1978. Early hominid enamel hypoplasia. *American Journal of Physical Anthropology*, 49, 79-84.
- WICKES, I. G. 1953. A history of infant feeding. Part.I Primitive peoples : Ancient works : Renaissance writers. *Archives of Disease in Childhood*, 28, 151-158.
- WIDDOWSON, E. M., SLATER, J. E., HARRISSON, G. E. & SUTTON, A. 1960. Absorption, excretion, and retention of strontium by breast-fed and bottle-fed babies. *Lancet*, 276, 941-944.
- 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, 781-790.
- WILSON, D. F. & SHROFF, F. R. 1970. The nature of the striae of Retzius as seen with the optical microscope. *Australian Dental Journal*, 15, 162-171.
- WILSON, P. R. & BEYNON, A. D. 1990. Mineralization levels in pre- and post-natal human deciduous molar enamel. *Journal of pediatric dentistry*, 6, 35-39.
- WORLD HEALTH ORGANISATION 2000. collaborative study team on the role of breastfeeding on the prevention of infant mortality. Effect of breast feeding on infant and child mortality due to infectious diseases in less developed countries: a pooled analysis. *Lancet* 2000, 355, 451-455.
- WORLD HEALTH ORGANISATION 2002. The optimal duration of breastfeeding. World Health Organisation.
- WORLD HEALTH ORGANISATION 2005. Guiding principles for feeding non-breastfed children 6-24 months. World Health Organisation.
- WORLD HEALTH ORGANISATION 2006. Child growth standards : length/height-for -age, weight-for-age, weight-for-length, weight-for height and body mass index-for-age : methods and development. Guiding principles for feeding non-breastfed children 6-24 months. World Health Organisation.
- WRIGHT, J. T., HALL, K. I. & YAMAUCHI, M. 1997. The enamel proteins in human amelogenesis imperfecta. *Archives of oral biology*, 42, 149-159.
- WRIGHT, L. E. 1990. Stresses of conquest : a study of Wilson bands and enamel hypoplasias in the Maya Lamanai, Belize. *American Journal of Human Biology*, 2, 255-35.
- WRIGHT, L. E. 1994. The sacrifice of earth ? Diet, health, and inequality in the pasion Maya Lowlands. Thesis, University of Chicago.
- 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, 1-18.
- 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, 1159-1170.
- WYCKOFF, R. W. G. & DOBERENZ, A. R. 1968. The strontium content of fossil teeth and teeth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 32, 109-115.
- YANG, X., SUN, Z., MA, R., FAN, D. MORADIAN-OLDAK, J. 2011. Amelogenin “nanorods” formation during proteolysis by Mmp-20. *Journal of Structural Biology*. 176, 220-228.
- ZANOLLI, C., BONDIOLI, L., MANNI, F., ROSSI, P. & MACCHIARELLI, R. 2011. Gestation length, mode of delivery, and neonatal line-thickness variation. *Human Biology*, 83, 695-713.
- ZHU, D., PAINE, M. L., LUO, W., BRINGAS, P., SNEAD, J. & SNEAD, M. L. 2006. Altering biomineralization by protein design. *Journal of biological chemistry*, 281, 21173-21182.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Fig. 1. Composition du lait maternel.....	20
Fig. 2. Maxillaire	62
Fig. 3. Mandibule.....	63
Fig. 4. Chronologie de formation des dents définitives et temporaires	64
Fig. 5. Structure et composition de la dent	65
Fig. 6. L'organe d'émail	67
Fig. 7. Schéma de la croissance de l'émail par accumulation des couches	71
Fig. 8. Schéma d'une coupe histologique dentaire pendant la formation de l'émail	71
Fig. 9. Périkymaties	88
Fig. 10. Émail appositionnel – émail ombricationnel	89
Fig. 11. Observation au microscope à confocal des stries pathologiques de Retzius sur une première molaire définitive.....	98
Fig. 12. Observation de la ligne néonatale sur une coupe dentaire longitudinale labio-linguale d'une incisive déciduale, sous microscope optique à lumière transmise polarisée.....	101
Fig. 13. Schéma de principe du couplage ablation laser femtoseconde/ICPMS utilisé en plasma humide	166
Fig. 14. Caractéristiques du système d'ablation laser	169
Fig. 15. Performances du couplage LA-ICP-MS pour l'analyse de matériau.....	172
Fig. 16. Tableau d'estimation des valeurs attendues et des valeurs mesurées sur le NIST 612	174
Fig. 17. Résultats d'analyses du baryum, du strontium et du calcium pour des échantillons modernes.....	181
Fig. 18. Strontium contenu dans une sélection de denrées alimentaires.....	184
Fig. 19. Zinc contenu dans une sélection de denrées alimentaires	186
Fig. 20. Évolution du rapport Sr/Ca osseux dans l'échantillon de Dor, Israël	193
Fig. 21. Évolution du rapport Sr/Ca dans l'émail dentaire pendant l'allaitement exclusif et lors du processus de sevrage.....	197
Fig. 22. Localisation de Saint-Martin-des-Champs	211
Fig. 23. Plan des vestiges de l'église de Saint-Martin-des-champs de la première moitié du Moyen Âge, avec les tombes dans l'église	212
Fig. 24. Ancienne église abbatiale Saint-Martin-des-Champs, aujourd'hui Musée des arts et métiers (commons.wikimedia.org)	213
Fig. 25. Localisation de Hières-sur-Amby	214
Fig. 26. Photo de la nécropole de Hière-sur-Amby	215
Fig. 27. Inventaire des squelettes des Grands Peuplier.....	218
Fig. 28. Plan général de la nécropole d'Hières-sur-Amby et localisation	

des squelettes étudiés	219
Fig. 29. Localisation de Saint-Laurent de Grenoble	220
Fig. 30. Église de Saint-Laurent de Grenoble	225
Fig. 31. Répartition des sépultures (sep.) à un seul sujet et à plus d'un sujet par phase d'inhumation.....	227
Fig. 32. Corpus	229
Fig. 33. Tableau des résultats pour Saint-Martin-des-Champs.....	237
Fig. 34. Tableau des résultats pour les Grands Peupliers	238
Fig. 35. Tableau des résultats pour Saint-Laurent de Grenoble.....	244
Fig. 36. Représentation des résultats pour l'échantillon CNAM 466b.....	245
Fig. 37. Représentation des résultats pour l'échantillon GP 07	245
Fig. 38. Représentation des résultats pour l'échantillon GP 18	246
Fig. 39. Représentation des résultats pour l'échantillon GP 32	246
Fig. 40. Représentation des résultats pour l'échantillon GP 38.1	247
Fig. 41. Représentation des résultats pour l'échantillon GP 48	247
Fig. 42. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 48	248
Fig. 43. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 154	248
Fig. 44. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 262	249
Fig. 45. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 287	249
Fig. 46. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 304	250
Fig. 47. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 327	250
Fig. 48. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 526	251
Fig. 49. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 531	251
Fig. 50. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 538	252
Fig. 51. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 557	252
Fig. 52. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 558	253
Fig. 53. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 593	253
Fig. 54. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 946	254
Fig. 55. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 1144	254
Fig. 56. Représentation des résultats pour l'échantillon SL 1327	255

