Chapitre 24

Biogéochimie isotopique et anthropologie biologique : reconstitution des modes de vie du passé

Estelle Herrscher et Gwenaëlle Goude
Aix Marseille Université, CNRS, Ministère de la Culture et de la Communication, LAMPEA UMR 7269,
Aix-en-Provence, France

24.1 Introduction

Depuis la découverte, au début du XX^{e} siècle, des isotopes stables et l'essor de la spectrométrie de masse dans les années 30, il faut attendre les années 70, avec le développement des techniques d'extraction du collagène relatif aux datations radiocarbone, pour voir poindre la première application des isotopes stables du carbone en anthropologie. En 1967, Hall constate que les datations ^{14}C réalisées sur des grains de maïs apparaissent plus jeunes que celles réalisées sur des charbons supposés contemporains [1]. L'explication sera apportée quelques années plus tard par les recherches de Smith et Epstein [2] qui mettent en évidence une relation entre les processus photosynthétiques et les compositions isotopiques en carbone. Dès lors, munis de ces résultats princeps et des protocoles d'extraction du collagène, les anthropologues s'intéressent à ce marqueur ($^{13}C/^{12}C$) pour traquer dans les tissus humains la consommation de cette céréale particulière qu'est le maïs tant les enjeux en rapport avec l'histoire et le développement de sa culture sont importants dans le contexte de la colonisation du Nouveau monde par les Européens [3-4]. S'en suivent les travaux réalisés par Tauber, en 1981 [5], sur des populations côtières danoises, qui montrent l'intérêt des rapports isotopiques en carbone pour distinguer des consommateurs mésolithiques de ressources marines de consommateurs néolithiques de ressources terrestres. Dans le même temps, les investigations dans le cadre d'expériences de nutrition contrôlée se poursuivent sur un autre élément : l'azote ($^{15}N/^{14}N$) [6-8]. Elles mettent en évidence des compositions isotopiques en azote différentes dans les tissus d'organismes animaux selon leur niveau trophique, avec un enrichissement isotopique en isotope lourd (^{15}N) entre deux niveaux consécutifs et entre des organismes terrestres et marins [7]. En 1989, les travaux de Fogel et collaborateurs [9], réalisés sur

des ongles de couples mères-enfants actuels, démontrent un enrichissement en ^{15}N dans les tissus des nourrissons consécutif à la consommation de lait maternel. Ces travaux marquent un autre tournant dans l'application des études biogéochimiques à des problématiques anthropologiques, permettant à partir de la caractérisation des modalités d'allaitement et de sevrage, d'apporter des informations complémentaires relatives à la dynamique démographique des populations [9-10]. Dans le même temps, des travaux menés sur des populations archéologiques montrent que les isotopes stables de l'oxygène ($^{18}O/^{16}O$) ainsi que les isotopes du strontium ($^{87}Sr/^{86}Sr$), variant respectivement en fonction de l'origine géographique de l'eau ingérée et du substrat géologique, peuvent être utilisés pour aborder des thématiques relatives à la mobilité des sujets et leur lieu de résidence [11-12]. Plus récemment, d'autres isotopes comme ceux du soufre ($^{34}S/^{32}S$), de l'hydrogène (D/H), du calcium ($^{44}Ca/^{42}Ca$) et du plomb (par exemple $^{206}Pb/^{204}Pb$) ont également été explorés afin d'évaluer leur intérêt pour résoudre des problématiques ayant trait soit aux comportements alimentaires soit à la mobilité des groupes humains [13-16]. Ces derniers éléments étant actuellement moins utilisés en anthropologie, ils ne seront que brièvement abordés dans ce chapitre. Les lecteurs peuvent aussi se reporter au chapitre « Géochimie élémentaire et isotopique des métaux en anthropologie et archéozoologie » pour des précisions sur les études du rapport $^{44}Ca/^{42}Ca$.

24.2 Le matériel anthropologique

24.2.1 Nature et spécificité du matériel anthropologique

Les matériaux anthropologiques les plus souvent disponibles et analysés sont les os et les dents. Plus rarement, et dans des contextes édaphiques et climatiques particuliers, les cheveux, les ongles ou les tissus mous comme la peau et les muscles peuvent venir enrichir le corpus de matériaux à étudier. L'os, tout comme la dentine, se compose de deux phases : la phase minérale la plus importante, de l'ordre de 70 % en masse sèche, est composée de cristaux de bioapatite (ou hydroxyapatite carbonatée) et la phase organique, de l'ordre de 30 % en masse sèche, est majoritairement composée de fibres de collagène. L'émail dentaire est le tissu le plus minéralisé avec plus de 96 % de cristaux de bioapatite. Ces matériaux se distinguent chimiquement et structurellement, ce qui leur confère des spécificités en termes de conservation et d'informations biochimiques. L'os se forme et se renouvelle tout au long de la vie avec une cinétique décroissante avec l'âge, mais aussi variable selon l'état sanitaire, l'activité physique, la physiologie du sujet. Chez les jeunes enfants en pleine croissance, l'os cortical se renouvelle dix à trente fois plus vite que chez l'adulte. Ainsi, l'analyse des tissus organique et minéral osseux apportent des informations correspondant à des évènements survenus dans les dernières années de la vie de l'individu, soit une quinzaine d'années pour les sujets adultes [17] et moins pour les sujets immatures. A l'inverse, une fois formés, les tissus dentaires (émail et dentine) ne se renouvelant pas, leur analyse apporte des informations relatives à des périodes précises de la vie d'un individu, contemporaines du moment de leur formation. Le choix de l'un et/ou l'autre de ces tissus se révèle très important selon la problématique anthropologique et archéologique abordée. Par exemple, l'analyse conjointe d'un signal osseux et dentaire sur un même individu (étude intra-individuelle) permettra de distinguer des chan-

gements d'alimentation et une mobilité géographique entre deux périodes distinctes de sa vie. Au-delà du fait que les fractions minérale et organique ne présentent pas systématiquement la même cinétique de renouvellement, elles diffèrent également dans la nature même des éléments qu'elles peuvent enregistrer (Tableau 1).

Les restes humains archéologiques peuvent faire l'objet d'analyses peu de temps après la fouille ou bien plusieurs dizaines d'années *a posteriori*. Dans le second cas, il n'est pas rare que les pièces anthropologiques, stockées ou exposées dans les musées, aient subi un traitement de conservation partiel (remontage et collage) voire global (trempage dans un consolidant). Selon la période et la nature du traitement de consolidation, les restes osseux et dentaires peuvent être impropres aux analyses biochimiques. Une collection anthropologique néolithique italienne a récemment fait l'objet d'une telle étude. Un traitement de consolidation réalisé dans la première moitié du XX^{e} siècle était visible sur la plupart des pièces anatomiques humaines et son analyse a révélé la présence de protéines animales (collagène) dans sa composition [18]. Ces travaux ont toutefois montré l'efficacité du protocole de nettoyage et de préparation du matériel osseux et la possibilité d'effectuer le dosage des isotopes stables avec fiabilité.

Tableau 1 – Eléments chimiques couramment utilisés et leur intérêt en anthropologie biologique

Elément	Isotopes	Notation	Tissu	Fraction analysée	Problématique anthropologique	Marqueur
Carbone	^{13}C ^{12}C	$\delta^{13}C$	Os, dentine Cheveu, ongle	Collagène Kératine Carbonate	Alimentation protéique/glucido-lipidique	Environnement
Azote	^{15}N ^{14}N	$\delta^{15}N$	Os, dentine Cheveu, ongle	Collagène Kératine	Alimentation protéique	Niveau trophique
Oxygène	^{18}O ^{16}O	$\delta^{18}O$	Os, dentine, émail	Carbonate Phosphate	Mobilité	Eau ingérée, boisson
Soufre	^{34}S ^{32}S	$\delta^{34}S$	Os, dentine Cheveu, ongle	Collagène Kératine	Alimentation protéique Mobilité	Environnement
Strontium	^{87}Sr ^{86}Sr	$\delta^{87}Sr$	Os, dentine, émail	Bioapatite	Mobilité	Environnement

24.2.2 Traitement du matériel osseux et dentaire

La sélection du matériel respecte, dans la mesure du possible, la préservation des squelettes tout en satisfaisant les besoins de l'étude. Les squelettes prélevés peuvent soit être exposés dans les musées soit nécessiter des études ultérieures. L'échantillonnage de fragments osseux doit préférentiellement être réalisé au niveau d'os cortical. La cinétique du renouvellement osseux n'étant pas systématiquement identique entre un tissu cortical et spongieux [19], si l'étude porte sur une série de plusieurs sujets, il est préférable de sélectionner toujours la même partie anatomique. Pour les pré-

lèvements de tissus dentaires, qu'il s'agisse d'étude inter ou intra-individuelle, en raison de facteurs culturels pouvant impliquer des pratiques alimentaires différentes en fonction de l'âge des sujets, il est plus pertinent de réaliser un prélèvement au niveau d'un endroit précis (racine/couronne) dont l'âge de formation correspond à une période d'intérêt identique (enfance/adolescence/adulte).

Le dosage des rapports isotopiques du carbone et de l'azote requiert à l'heure actuelle moins de 1 mg de collagène alors que celui des rapports isotopiques du souffre en nécessite plus. L'extraction de collagène [1] s'effectue au minimum sur 50 mg d'os ou de dentine selon l'état de conservation. Qu'ils soient sur poudre ou sur morceau d'os ou de dentine, les différents protocoles d'extraction du collagène se fondent sur le principe de solubilisation du collagène intégrant une étape d'élimination des contaminants, soit chimique, soit mécanique (*cf.* encart « Prélèvement et pré-traitement pour l'analyse ($\delta^{15}N$, $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$) du collagène et de la bioapatite »). Avant toute interprétation des compositions isotopiques en carbone et en azote, des critères d'authentification du collagène sont à examiner : le rendement d'extraction ($\geq$ 10 mg.g-1), les teneurs élémentaires en carbone et en azote (C $\geq$ 30 %, N $\geq$1 1 %) et surtout le rapport atomique C/N (2,9 $\leq$ C/N $\leq$ 3,6) [21-23]. La purification de la partie minérale de l'émail dentaire ou de l'os suit des protocoles différents selon la phase inorganique concernée (phosphate ou carbonate de la bioapatite) (*cf.* encart « Prélèvement et pré-traitement pour l'analyse ($\delta^{15}N$, $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$) du collagène et de la bioapatite »).

24.3 Principes de fractionnement isotopique [2] et interprétation des données

Les isotopes stables ont la propriété de ne pas subir de modification de concentration après la mort de l'individu, ainsi les teneurs mesurées aujourd'hui sur des tissus fossiles sont identiques à celles accumulées du vivant de l'individu, sous réserve que la diagénèse n'en ait pas altéré le contenu. Parce que les différents isotopes d'un élément ont des masses différentes (nombre différent de neutrons), ils présentent des propriétés cinétiques et thermodynamiques particulières et donc des modes de comportements déterminés et prévisibles au cours des réactions chimiques. En effet, lors de ces réactions, on observe une participation préférentielle d'un des isotopes stables, ce « fractionnement isotopique » conduit à des teneurs de l'isotope étudié différentes entre le produit et le substrat de la réaction. Les compositions isotopiques correspondent au rapport de l'isotope lourd sur l'isotope léger dans un échantillon comparé à ce même rapport dans un standard. Les résultats des mesures des compositions isotopiques sont notés δ et exprimés en ‰ afin de visualiser les variations très faibles entre les teneurs relatives en isotopes de l'échantillon et celles du standard (chapitre « Contributions de la biogéochimie isotopique à l'archéozoologie »).

1. Pour 100 mg d'os frais (% N_{os} de 4,4), il est possible d'obtenir environ 18 à 20 mg de collagène. Dans le cas de restes humains très anciens et/ou rares, il est préférable de mesurer préalablement la teneur élémentaire en azote afin d'estimer la conservation de la matière organique de l'échantillon (%N_{os} > 0,5) et calculer la quantité minimale de matière nécessaire pour l'extraction du collagène [20].

2. Sont présentés dans ce chapitre uniquement les principes concernant les éléments de la fraction organique. Pour la fraction minérale, voir le chapitre « Contributions de la biogéochimie isotopique à l'archéozoologie » de ce manuel.

Les rapports isotopiques de ces différents éléments sont mesurés par des spectromètres de masse isotopique. Il existe différents types de spectromètre de masse selon le système d'introduction de l'échantillon (solide, liquide ou gazeux), la source d'ionisation, le type d'analyseur et de détecteur. Pour le carbone, l'azote et le soufre, on utilise les spectromètres de masse à rapports isotopiques (IRMS), couplés à un analyseur élémentaire (EA) permettant d'obtenir, après combustion des échantillons et séparation des gaz CO_2, N_2 et SO_2, la mesure des compositions élémentaires et des abondances isotopiques.

24.3.1 Les rapports isotopiques du carbone ($^{13}C/^{12}C$)

Les végétaux présentent une variabilité isotopique importante en raison des processus photosynthétiques empruntés pour élaborer leur propre matière organique, de l'environnement fréquenté et des paramètres physico-chimiques locaux. Les plantes terrestres présentent une dispersion bimodale de leurs valeurs de $\delta^{13}C$, avec des valeurs comprises entre -33 et -22 ‰ pour les plantes de type C_3 et entre -16 et -9 ‰ pour celles de type C_4 [24]. Les plantes de type C_3 correspondent à tous les arbres et la plupart des végétaux et des céréales (blé, orge, avoine) tandis que les plantes de type C_4, moins nombreuses, correspondent à certaines graminées et quelques plantes alimentaires comme la canne-à-sucre, le maïs, le millet, le sorgho. En milieu terrestre, les plantes de milieu fermé, ou de sous-bois, peuvent présenter des valeurs de $\delta^{13}C$ plus basses (entre 2 et 5 ‰) que celles de plantes de milieu ouvert. Cet effet, appelé aussi « *effet canopée* », résulte de l'utilisation d'une source inorganique de carbone, fortement appauvrie en ^{13}C en raison de la dégradation des matières organiques en sous bois et de la présence d'une plus faible luminosité et température [25]. D'un autre côté, les plantes aquatiques présentent des valeurs différentes des plantes terrestres car elles utilisent le CO_2 dissout dans l'eau dont le $\delta^{13}C$ est proche de 0 ‰ (bicarbonate dissous) alors que les plantes terrestres utilisent comme source inorganique de carbone, le CO_2 atmosphérique dont le $\delta^{13}C$ moyen est de -8 ‰ [3]. Les plantes aquatiques présentent toutefois des valeurs de $\delta^{13}C$ différentes selon le milieu d'origine. Ainsi, les végétaux marins présentent des valeurs de $\delta^{13}C$ plus hautes que celles des plantes C_3 terrestres alors que les végétaux des milieux lacustres ou fluviatiles présentent souvent des valeurs de $\delta^{13}C$ plus faibles en raison de l'appauvrissement de ces milieux en ^{13}C [26-27]. D'autres facteurs, comme un stress physiologique, salin et hydrique, peuvent engendrer des adaptations physiologiques expliquant des valeurs plus hautes de $\delta^{13}C$ enregistrées chez des végétaux de milieux arides et halophiles [28-29]. Enfin, différentes parties d'une même plante peuvent présenter des variations de $\delta^{13}C$, avec des valeurs de $\delta^{13}C$ plus élevées pour les graines relativement aux feuilles [30]. Les caractéristiques isotopiques de l'alimentation s'enregistrent dans les tissus de leurs consommateurs, avec un fractionnement isotopique de l'ordre de 5 ‰ entre l'alimentation et le collagène d'un consommateur [31] et un fractionnement de l'ordre de 0-1 ‰ entre le collagène d'individus de deux niveaux consécutifs (proie-prédateur) [32].

3. Cette valeur ne cesse de diminuer depuis 1850 en raison de la pollution industrielle (CO_2) et de la déforestation. C'est pourquoi, il est nécessaire de corriger les valeurs de $d^{13}C$ d'organismes actuels lorsque ceux-ci sont utilisés dans les reconstitutions paléoalimentaires.

24.3.2 Les rapports isotopiques de l'azote ($^{15}N/^{14}N$)

Les plantes à la base des réseaux trophiques conditionnent également les signatures isotopiques en azote des organismes qui les consomment. Parmi les végétaux terrestres, on distingue deux types : les légumineuses, comme les lentilles, qui fixent directement l'azote atmosphérique (proche de 0 ‰) et présentent des signatures isotopiques proche de 0 ‰ en raison d'un fractionnement isotopique quasi nul [33] et les végétaux non-fixateurs qui utilisent les sources azotées disponibles dans le sol présentant ainsi des signatures isotopiques moyennes de 2,5 ‰. Des facteurs peuvent faire varier ces signatures isotopiques. Par exemple, l'acidité des sols peut entraîner une diminution des valeurs de $\delta^{15}N$ pouvant aller jusqu'à -5 ‰ [34] alors que l'aridité, la proximité de la mer (avec les embruns) et la présence de matière organique ou d'engrais naturels peuvent provoquer un enrichissement en ^{15}N [28, 35-36]. Les valeurs moyennes de $\delta^{15}N$ des plantes marines sont légèrement plus élevées (6,6 ‰) que celles des plantes terrestres (3 ‰) [7]. Les travaux princeps ont montré un fractionnement isotopique moyen de 3 ‰, entre l'alimentation et le collagène des consommateurs [7-8, 37] mais des études plus récentes montrent un fractionnement plus important allant de 3-4 ‰ jusqu'à 6 ‰ [32,39]. Cet enrichissement en ^{15}N à chaque niveau trophique s'expliquerait par une excrétion préférentielle de l'isotope le plus léger (^{14}N) chez les mammifères ; la qualité de l'alimentation pourrait également intervenir [38]. Ainsi au sein d'un même écosystème, les valeurs de $\delta^{15}N$ des organismes carnivores sont systématiquement plus hautes que celles des organismes omnivores, qui elles-mêmes sont plus hautes que celles des herbivores. En raison de chaînes alimentaires plus longues dans les milieux aquatiques, les tissus des organismes aquatiques présentent des valeurs de $\delta^{15}N$ plus hautes que ceux d'organismes terrestres (Figure 1). Chez l'homme, des travaux ont également montré une augmentation des valeurs de $\delta^{15}N$ dans les tissus en relation avec un stress physiologique, qu'il soit d'ordre pathologique, hormonal ou nutritionnel [51-53].

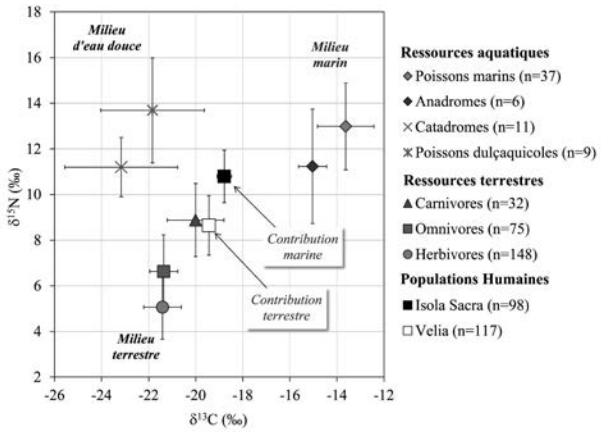


Figure 1 – Exemple de distribution des compositions isotopiques en carbone et en azote dans un environnement tempéré de type C_3 en Europe occidentale pour l'Antiquité et le Moyen Age [41-50]

24.3.3 Les rapports isotopiques du soufre ($^{34}S/^{32}S$)

Chez les végétaux, la signature isotopique du soufre ($\delta^{34}S$) est conditionnée par celle de la biodisponibilité des sulfates du sol qui varie selon la composition géologique des terrains, leur érosion, l'activité microbienne du sol et l'atmosphère locale, comme les embruns marins [14]. Le fractionnement isotopique entre les sources du sol et les végétaux, tout comme celui observé entre chaque maillon de la chaîne alimentaire, est considéré comme négligeable. Les valeurs de $\delta^{34}S$ sont particulièrement hautes dans un environnement marin (ca. +20 ‰) et plus variables dans un environnement terrestre (-10 à +20 ‰) [54]. Par conséquent, les tissus d'organismes côtiers présentent des valeurs enrichies en ^{34}S comparativement à ceux d'organismes plus continentaux. Les isotopes stables du soufre permettent ainsi de distinguer la fréquentation d'un environnement littoral ou non, ainsi que différentes origines géographiques, si les zones géologiques fréquentées sont isotopiquement distinctes [55]. Très récemment, des compositions isotopiques en soufre plus basses ont été observées chez des sujets archéologiques de moins de 5 ans comparativement aux enfants plus âgés, permettant d'évoquer l'intérêt de cet élément pour l'étude de la consommation de lait maternel [56].

24.3.4 Principe de reconstitution de l'alimentation et de la mobilité

Le principe des reconstitutions paléoalimentaires est fondé sur la comparaison entre les valeurs isotopiques des ressources alimentaires et celles des humains. Pour chaque étude, il est indispensable de définir au préalable les caractéristiques isotopiques propres à chaque écosystème en considérant un maximum de ressources potentielles à partir des restes archéologiques ou de leurs analogues actuels [57]. Pour s'affranchir de la conservation parfois difficile des restes végétaux, on peut utiliser les espèces herbivores qui correspondent aux « consommateurs de 100 % de végétaux ». De la même façon, on peut raisonnablement penser que les valeurs de $\delta^{15}N$ des carnivores, qu'ils soient terrestres ou marins, correspondent aux « consommateurs de 100 % de viande ou de chair de poisson » [57-58]. Une fois ce cadre d'interprétation défini et sous réserve que les ressources alimentaires soient isotopiquement distinctes, il est possible d'apprécier la contribution de chaque ressource alimentaire à l'alimentation des individus humains en appliquant les fractionnements isotopiques attendus entre l'alimentation et le collagène. Dans ce sens, des modèles mathématiques ont été établis pour tenter d'objectiver les proportions des ressources potentiellement dominantes dans l'alimentation d'un individu. Alors que certains modèles sont basés sur un seul élément, le carbone [59-60], d'autres, également empruntés à l'écologie, sont basés sur plusieurs éléments [61]. Ils peuvent soit intégrer dans les calculs les proportions élémentaires présentes dans chaque ressource [49] soit donner les résultats assortis d'une probabilité [62-63]. Même si des réserves sont émises sur leur application à des écosystèmes anciens, les modélisations restent pertinentes pour voir comment la consommation d'une ressource varie d'un individu à l'autre dans une population ou entre des populations, en relation avec des facteurs biologiques, sociaux, géographiques ou culturels [59]. Dosés sur le collagène, les isotopes stables du carbone et de l'azote permettent ainsi de cerner les « tendances » des protéines consommées. Autrement dit, les protéines correspondent-elles à des ressources issues

d'un environnement de type C_3 ou C_4, d'un environnement aquatique ou terrestre, d'un environnement forestier ou de plaine, ou bien de ressources majoritairement végétales ou animales.

Pour les études portant sur la mobilité des groupes humains, un cadre d'interprétation des valeurs humaines doit également être défini. Il repose sur l'établissement de cartes de distributions des valeurs de $\delta^{34}S$, $\delta^{18}O$ et $^{87}Sr/^{86}Sr$ dans les régions d'intérêt [64] (*cf.* chapitres « Contributions de la biogéochimie isotopique à l'archéozoologie » et « Géochimie élémentaire et isotopique des métaux en anthropologie et archéozoologie »). Une fois les gammes de valeurs isotopiques établies pour chaque région concernée, l'objectif est de voir dans quelle mesure les valeurs mesurées sur les humains s'en écartent pour identifier les sujets allochtones. La difficulté de ces études repose sur le recouvrement des différentes données isotopiques entre des régions de plus ou moins grande proximité. Pour s'affranchir de ces problèmes de variabilité, certains auteurs préconisent d'identifier les gammes des valeurs isotopiques locales à partir des restes animaux, ou bien de proposer des modèles locaux à partir d'espèces actuelles [65].

24.4 Application de l'outil isotopique en anthropologie biologique

Depuis ces 30 dernières années, les applications de l'outil isotopique en anthropologie sont exponentielles, elles couvrent maintenant une large période chronologique, allant des premiers homininés jusqu'à l'époque contemporaine dans toutes les régions du monde. Dans ce chapitre, les applications aux Australopithèques et aux premiers *Homo* ainsi qu'aux restes fossiles du Paléolithique supérieur ne sont pas évoquées (voir les synthèses [66-68]). Compte tenu de l'abondante littérature, il serait utopique de vouloir présenter l'ensemble des applications isotopiques. Une sélection d'exemples pour les groupes humains du Mésolithique jusqu'à l'époque moderne, a été réalisée par thématiques.

24.4.1 Comportements de subsistance aux périodes préhistoriques et proto historiques

Une des problématiques les plus documentées par l'outil isotopique ($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$) est l'évolution des économies de subsistance lors du passage du mode de vie de type chasseur-cueilleur à un mode de vie de type agro-pastoral. Par exemple, durant la colonisation du Pacifique, des travaux montrent une diminution de la contribution des produits marins et une augmentation de la part des produits d'origine végétale entre les premiers colons Lapita [69-70] et des sujets plus récents Post-Lapita [71-72]. De la même façon, plusieurs études menées sur les côtes ouest de l'Europe occidentale lors de la transition Mésolithique-Néolithique s'accordent sur le déclin brutal de la consommation de ressources marines au profit d'une alimentation centrée sur des ressources domestiques terrestres [5, 73]. En revanche, d'autres études attestent d'un changement alimentaire plus graduel comme en Suède ou dans les Gorges du Danube [74-75]. D'un autre côté, la contribution majeure de ressources terrestres est attestée dans l'alimentation de groupes mésolithiques plus continentaux [76-77] alors que la

persistance d'une contribution des ressources marines et dulçaquicoles est mise en évidence chez certains groupes néolithiques [78-79].

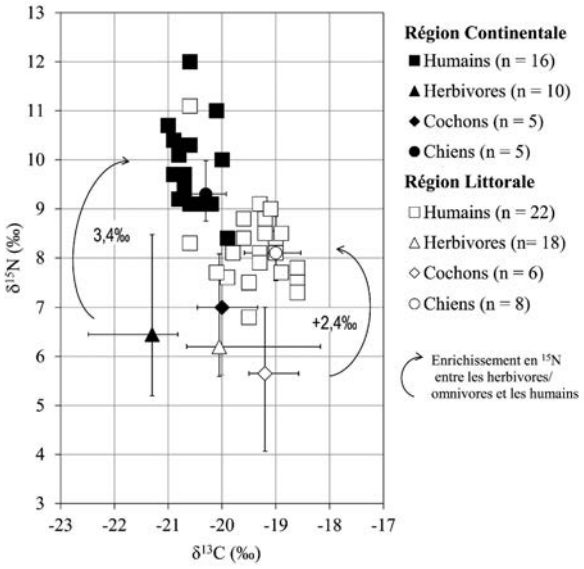


Figure 2 – Distribution des compositions isotopiques en carbone et en azote pour plusieurs séries du Néolithique moyen dans le sud de la France [82]

L'une des autres problématiques phares pour laquelle l'outil isotopique est particulièrement pertinent est l'étude des changements de subsistance durant le Néolithique. L'arrivée des techniques agricoles et pastorales ont conduit les groupes humains à produire leurs ressources impliquant une gestion différente de leur environnement à la fois naturel et social. Par exemple, à Nevalı Çori, un site attribué à la période du *Pre-Pottery Neolithic B* (PPNB) dans le sud-est de l'Anatolie, des valeurs basses de $\delta^{15}N$ chez les hommes mais également chez les animaux ont été interprétées comme une consommation de légumineuses impliquant une gestion des ressources végétales et des pratiques d'élevages particulières [80]. Dans le sud de la France au Néolithique moyen, plusieurs études ont mis en évidence une distinction régionale entre des sujets plus sédentaires, vivant à proximité de la mer et consommant de façon importante des ressources végétales et des sujets plus continentaux, peut-être plus mobiles consommant majoritairement des ressources animales [81] (Figure 2). Cette variabilité alimentaire régionale pourrait être liée à des choix environnementaux (et économiques) mais également à des choix sociaux [82]. Une récente étude réalisée sur des sujets ayant vécu dans le Massif central a montré une contribution plus importante des ressources d'eau douce, venant renforcer cette notion de particularisme alimentaire régional au Néolithique moyen [83]. A l'instar des travaux menés en Amérique du Nord sur le maïs, la culture et la consommation du millet a également été explorée à partir des isotopes stables du carbone sur plusieurs sites archéologiques en Chine, révélant le plus ancien foyer de domestication de cette céréale dès 8000 ans avant notre ère (Néolithique ancien) [84]. La preuve isotopique de

la consommation de millet, que ce soit par les hommes et les animaux, est également attestée en différents points de l'Europe entre le Chalcolithique et l'âge du Fer [85-88] (encart « La consommation de millet en Italie à l'âge de Bronze. Le cas de Olmo di Nogara »).

24.4.2 Pratiques alimentaires durant l'Antiquité et le Moyen Age

Dès l'Antiquité, s'ajoutent, aux contraintes environnementales, techniques et sociales décrites pour les périodes précédentes, des paramètres économiques liés à la mise en place des axes commerciaux offrant aux populations historiques, qu'elles soient urbaines ou rurales, un choix plus abondant de produits alimentaires. De plus, l'apparition d'une organisation étatique et sociale plus complexe ainsi que le développement des préceptes religieux sont autant de paramètres dont l'impact sur les pratiques alimentaires peut être abordé par les analyses isotopiques. Ainsi, en Italie à la période romaine, des travaux menés sur des sites côtiers ont montré une consommation différentielle des ressources marines inter et intra-site en rapport avec une disponibilité plus importante des produits marins dans le port de Rome [45,47]. D'un autre côté, à cette même période en Angleterre, alors que les données historiques et archéologiques s'accordent sur l'exploitation des ressources aquatiques pour la production de *garum*, des études isotopiques révèlent une consommation majoritaire de ressources terrestres soulignant l'absence de relation entre le développement économique régional et l'incorporation de ces produits dans l'alimentation des populations locales [89]. Relativement aux paramètres biologiques, quelle que soit la période considérée et la région, la relation entre le régime alimentaire et le sexe des individus est variable. On peut toutefois citer l'exemple des sujets masculins de Velia, en Italie, chez lesquels la consommation significativement plus importante de ressources marines est également corrélée à la présence de marqueurs d'activités liés à la pêche [90]. Plus ponctuellement, certains travaux ont montré une relation entre l'augmentation des valeurs de $\delta^{15}N$ et l'âge des sujets, suggérant une consommation plus importante de protéines animales chez les individus âgés. Il pourrait s'agir soit d'une pratique alimentaire particulière des individus les plus âgés, soit d'une espérance de vie plus longue des sujets les plus « carnivores » [41,91]. Concernant les recommandations religieuses, certains travaux ont mis en évidence en Angleterre que le suivi des règles de vie imposées par l'église chrétienne en matière d'alimentation, avec une consommation plus importante de ressources maigres, tel que le poisson, au dépend de ressources grasses, telle que la viande, se reflète dans le collagène osseux par une augmentation significative des valeurs de $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ à partir du XI^{e} siècle [46].

24.4.3 Les pratiques d'allaitement et de sevrage

A partir des isotopes du carbone et de l'azote associés à une stratégie d'échantillonnage inter ou intra-individuelle, il est possible de cerner la durée de la consommation de lait maternel, l'âge d'introduction de la nourriture de sevrage ou le statut de chaque enfant par rapport au sevrage [92]. L'étude de populations natives nord-américaines a mis en évidence l'absence de relation entre un âge au sevrage précoce et l'accroissement démographique des populations [10]. Durant l'Antiquité tardive, qu'il s'agisse de populations ayant vécu en Angleterre, en Italie et, en Egypte, sous domination

romaine, des travaux ont montré une constance des pratiques avec une diminution de la consommation de lait maternel dès 6-8 mois et son arrêt complet vers 2-3 ans en accord avec les recommandations des hygiénistes en vigueur à cette époque [93-95]. L'analyse isotopique des collagènes animaux du cheptel de la population de l'oasis de Dakhleh en Egypte a également permis d'interpréter l'enrichissement en ^{13}C observé chez les enfants âgés de plus de 6 mois par l'introduction dans la nourriture de sevrage de lait de chèvre [93] (Figure 3). Une étude intra-individuelle conduite sur des enfants de Sibérie a permis de mettre en évidence un âge d'introduction d'une nourriture de sevrage plus précoce ainsi qu'un allongement de la période de sevrage entre le Néolithique ancien et récent [96]. En France, des études intra-individuelles ont montré une variabilité des pratiques d'allaitement indépendamment de la période étudiée. Par exemple, aux époques carolingienne et moderne, on observe la concomitance de deux pratiques différentes selon les enfants, avec un allaitement long et un sevrage précoce [97-98] alors qu'à la fin du Moyen Age, une seule pratique, avec un allaitement long, apparaîtrait [99].

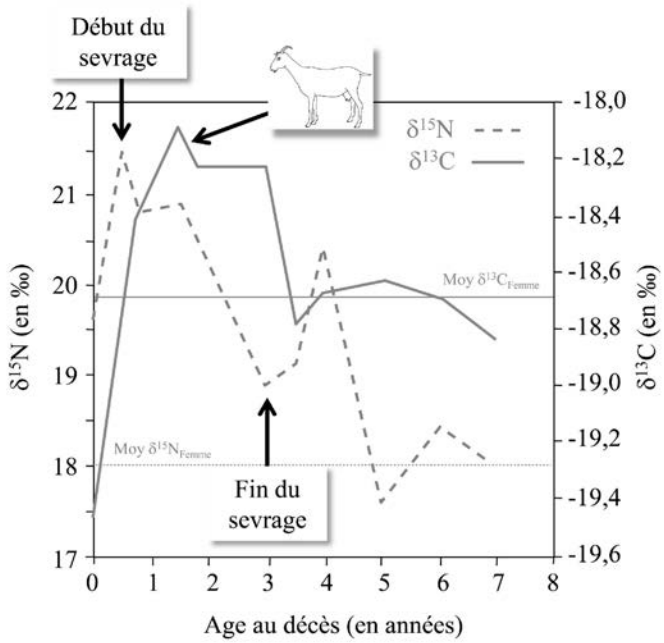


Figure 3 – Distribution des compositions isotopiques en carbone et en azote en fonction de l'âge au décès chez des enfants, Oasis Dakhleh, Egypte [93]

24.4.4 Migration, mobilité et origine géographique

Une étude isotopique intra-individuelle du strontium appliquée à des sujets de plusieurs séries néolithiques de la Vallée du Danube a permis d'identifier des voies de migration du nord-est vers le sud-ouest de la région d'étude [100]. Fait particulièrement intéressant, ces voies de migration ne sont constantes ni d'un site à l'autre ni d'un individu à l'autre et elles impliqueraient préférentiellement les sujets fémi-

nins. Indépendamment de la période historique considérée, des travaux reposant sur l'analyse conjointe des isotopes du strontium et de l'oxygène mettent en évidence la présence d'individus allochtones ou « migrants » dans de nombreuses populations de différentes régions du monde que ce soit en Europe [101-103], en Afrique du Nord [104] ou en Amérique du Sud [105]. L'analyse des sujets d'Isola Sacra à Rome a montré que la mobilité n'impliquait pas uniquement les sujets adultes mais également les enfants [103]. L'exploration de la mobilité des populations anglaises durant la période romaine a notamment permis de démontrer une diversité géographique des migrants [102], mais également de souligner que parmi la population de la ville d'York ou de Gloucester, certains sujets auraient passé leur enfance dans une région caractérisée par un climat plus chaud qu'en Angleterre à la période romaine [48,106]. Toutefois, de récents travaux ont montré que les boissons fortement chauffées (alcool, soupe, thé) ont des valeurs isotopiques de l'oxygène modifiées par rapport à l'eau de source [107]. Ce paramètre doit être considéré dans la reconstitution de la mobilité des populations humaines.

24.5 Conclusion

Depuis maintenant plus de 30 ans, la biogéochimie isotopique s'est imposée comme une discipline à part entière permettant d'apporter, conjointement aux études archéologiques (environnement, faune, mobilier) et anthropologiques (morphologie, lésions osseuses et dentaires, ADN), des éléments de réponses à de nombreuses problématiques liées à l'alimentation et à la mobilité des groupes humains. Actuellement, les applications concernent majoritairement l'analyse des isotopes de l'azote et du carbone, pour identifier les tendances des régimes alimentaires afin d'inférer sur les comportements associés et la gestion des ressources environnementales, mais pas seulement. En effet, d'autres marqueurs liés à l'environnement, comme le soufre, l'oxygène et le strontium sont dorénavant de plus en plus utilisés pour identifier des sujets migrants au sein d'un groupe et dans certains cas, leur origine permettant de statuer sur les voies de migration. Même si des avancées importantes ont été faites d'un point de vue instrumental et méthodologique, des progrès restent à faire pour mieux comprendre les mécanismes impliqués dans le transfert et l'enregistrement de ces éléments dans les tissus biologiques. La complexité géologique des milieux associée à celle des pratiques alimentaires humaines est telle que la consommation d'items de nature et d'origine différentes peut conduire à des caractéristiques isotopiques similaires dans les ossements. Pour cela, des travaux sur des populations humaines actuelles, dont l'alimentation et l'origine peuvent être contrôlées, restent à mener pour assurer une interprétation correcte de la variabilité isotopique. Toutes les problématiques archéologiques et anthropologiques ne peuvent pas être étudiées par l'outil isotopique. En effet, les applications isotopiques dépendent notamment de la conservation du matériel mais également de la pertinence du contexte géologique et environnemental dont sont issus les restes osseux et dentaires. Le développement de nouveaux marqueurs et l'analyse multi-proxies semblent être la gageure d'une reconstitution la plus fiable et pertinente possible des modes de vie du passé.

Bibliographie

[1] R. Hall, Those late corn dates : isotopic fractionation as a source of error in carbon-14 dates. Michigan Archaeologist. 13, 171-180, 1967.

[2] B.N. Smith, S. Epstein, Two categories of $^{13}C/^{12}C$ ratios for higher plants. Plant Physiology. 47, 380-384, 1971.

[3] J.C. Vogel, N.J. van der Merwe, Isotopic evidence for early maize cultivation in New York state. American Antiquity. 42, 238-242, 1977.

[4] M.A. Katzenberg, H.P. Schwarcz, M. Knyf, F.J. Melbye, Stable isotope evidence for maize horticulture and palaeodiet in Southern Ontario, Canada. American Antiquity. 60, 335-350, 1995.

[5] H. Tauber,^{13}C evidence for dietary habits of prehistoric man in Denmark. Nature. 292, 332-333, 1981.

[6] M.J. DeNiro, S. Epstein, Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. Geochimica et Cosmochimica Acta. 45, 341-351, 1981.

[7] M.J. Schoeninger, M.J. DeNiro, Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals.Geochimica et Cosmochimica Acta. 48, 625-639, 1984.

[8] M. Minagawa, E. Wada, Stepwise enrichment of ^{15}N along food chain : further evidence and the relation between $\delta^{15}N$ and animal age. Geochimica et Cosmochimica Acta. 48, 1135-1140, 1984.

[9] M.L. Fogel, N. Tuross, D.W. Owsley, Nitrogen isotope tracers of human lactation in modern and archaeological populations. Annual Report of Geophysical Laboratory Carnegie Institution of Washington 1988-1989, 111-117, 1989.

[10] M.R. Schurr, M.L. Powell, The role of changing childhood diets in the prehistoric evolution of food production : An isotopic assessment. American Journal of Physical Anthropology. 126, 278-294, 2005.

[11] J.E. Ericson, Strontium isotope characterization in the study of prehistoric human ecology. Journal of Human Evolution. 14, 503-514, 1985.

[12] T.D. Price, G. Grupe, P. Schröter, Reconstruction of migration patterns in the Bell Beaker period by stable strontium isotope analysis. Applied Geochemistry. 9, 413-417, 1994.

[13] G. Aberg, G. Fosse, H. Stray, Man, nutrition and mobility : A comparison of teeth and bone from the Medieval era and the present from Pb and Sr isotopes. The Science of The Total Environment. 224, 109-119, 1998.

[14] M.P. Richards, B.T. Fuller, R.E.M. Hedges, Sulphur isotopic variation in ancient bone collagen from Europe : implication for human palaeodiet residence mobility and modern pollutant studies. Earth and Planetary Science Letters. 191, 185-190, 2001.

[15] G.J. Bowen, L.I. Wassenaar, K.A. Hobson, Global application of stable hydrogen and oxygen isotopes to wildlife forensics. Oecologia. 143, 337-348, 2005.

[16] N. Chu, G.M. Henderson, N. Belshaw, R.E.M. Hedges, Establishing the potential of Ca isotopes as proxy for consumption of dairy products. Applied Geochemistry. 21, 1656-1667, 2006.

[17] R.E.M. Hedges, J.G. Clement, C. David, L. Thomas, T.C. O'Connell, Collagen turnover in the adult femoral midshaft : modeled from anthropogenic radiocarbon tracer measurements. American Journal of Physical Anthropology. 133, 808-816, 2007.

[18] G. Goude, K. Müller, F. Buscaglia, I. Reiche, Etude isotopique ($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$) et de l'état de conservation d'anciennes collections anthropologiques. Le cas de la grotte Pollera (Ligurie, Italie). ArchéoSciences - Revue d'Archéométrie. 35, 223-233, 2011.

[19] M.A Parfitt, Misconceptions (2) : Turnover is always higher in cancellous than in cortical bone. Bone. 30, 807-809, 2002.

[20] H. Bocherens, D. Drucker, D. Billiou, M. Moussa, Une nouvelle approche pour évaluer l'état de conservation de l'os et du collagène pour les mesures isotopiques (datation au radiocarbone, isotopes stables du carbone et de l'azote). L'Anthropologie. 109, 557-567, 2005.

[21] M.J. DeNiro, Post-mortem preservation and alteration of *in vivo* bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction. Nature. 317, 806-809, 1985.

[22] S.H. Ambrose, Preparation and characterisation of bone and tooth collagen for isotopic analysis. Journal of Archaeological Science. 17, 431-451, 1990.

[23] G.J. van Klinken, Bone collagen quality indicators for palaeodietary and radiocarbon measurements. Journal of Archaeological Science. 26, 687-695, 1999.

[24] P. Deines, « The isotopic composition of reduced organic carbon »dans*Handbook of environmental isotope geochemistry*, eds. P. Fritz, J.C. Fontes, Elsevier, New-York. p. 329-406, 1980.

[25] T.H.E. Heaton, Spatial species and temporal variation in the $^{13}C/^{12}C$ ratios of C_3 plants : implication for paleodiets studies. Journal of Archaeological Science. 26, 637-649, 1999.

[26] H.P. Schwarcz, J. Melbye, M.A. Katzenberg, M. Knyf, Stable isotopes in human skeletons of Southern Ontario : reconstructing palaeodiet. Journal of Archaeological Science. 12, 187-206, 1985.

[27] E. Dufour, H. Bocherens, A. Mariotti, Palaeodietary implications of isotopic variability in eurasian lacustrine fish. Journal of Archaeological Science. 26, 617-627, 1999.

[28] S.H. Ambrose, Effects of diet climate and physiology on nitrogen isotope abundances in terrestrial foodwebs. Journal of Archaeological Science. 18, 293-317, 1991.

[29] K. Britton, G. Müldner, M. Bell, Stable isotope evidence for salt-marsh grazing in the Bronze Age Severn Estuary, UK : implications for palaeodietary analysis at coastal sites. Journal of Archaeological Science. 35, 2111-2118, 2008.

[30] L.L. Tieszen, Natural variations in the carbon isotope values of plants : implications for archaeology, ecology and palaeoecology. Journal of Archaeological Science. 18, 227-248, 1991.

[31] S.H. Ambrose, L. Norr, « Experimental evidence for the relationship of the carbon isotope ratios of whole diet and dietary protein to those of bone collagen and carbonate » dans *Prehistoric human bone Archaeology at the molecular level*, eds. J.B. Lambert, G. Grupe, Springer-Verlag, Berlin. p. 1-37, 1993.

[32] H. Bocherens, D. Drucker, Trophic level isotopic enrichment of carbon and nitrogen in bone collagen : case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems. International Journal of Osteoarchaeology. 13, 46-53, 2003.

[33] A. Mariotti, F. Mariotti, N. Amarger, G. Pizelle, J. Ngambi, M. Champigny, A. Moyse, Fractionnements isotopiques de l'azote lors des processus d'absorption des nitrates et de fixation de l'azote atmosphérique par les plantes. Physiologie végétale. 18, 163-181, 1998.

[34] A. Mariotti, D. Pierre, J.C. Vedy, S. Bruckert, J. Guillemot, The abundance of natural nitrogen-15 in the organic matter of soils along an altitudinal gradient (Chablais, Haute Savoie, France). Catena. 7, 293-300, 1980.

[35] R.A. Virginia, C.C. Delwiche, Natural ^{15}N abundance of presumed N_2 fixing and non N_2 fixing plants from selected ecosystems. Oecologia. 57, 317-325, 1982.

[36] A. Bogaard, T.H.E. Heaton, P. Poulton, I. Merbach, The impact of manuring on nitrogen isotope ratios in cereals : archaeological implications for reconstruction of diet and crop management practices. Journal of Archaeological Science. 34, 335-343, 2007.

[37] M. Vanderklift, S. Ponsard, Sources of variation in consumer-diet $\delta^{15}N$ enrichment : a meta-analysis. Oecologia. 136, 169-182, 2003.

[38] M.J. DeNiro, S. Epstein, Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. Geochimica et Cosmochimica Acta.45, 341-351, 1981.

[39] T.C. O'Connell, C.J. Kneale, N. Tasevska, G.G.C. Kuhnle, The diet-body offset in human nitrogen isotopic values : A controlled dietary study. American Journal of Physical Anthropology. 149, 426-434, 2012.

[40] H. Bocherens, M. Fizet, A. Mariotti, C. Olive, G. Bellon, D. Billiou, Application de la biogéochimie isotopique (^{13}C, ^{15}N) à la détermination du régime alimentaire des populations humaines et animales durant les périodes antique et Médiévale. Archives des Sciences, Genève. 44, 329-340, 1991.

[41] E. Herrscher, H. Bocherens, F. Valentin, R. Colardelle, Comportement alimentaire au Moyen Age à Grenoble : application de la biogéochimie isotopique à la nécropole de Saint-Laurent (XIII^{e}-XV^{e} siècles, Isère, France). Comptes rendus de l'Académie des sciences Série 2, Sciences de la Vie. 324, 479-487, 2001.

[42] C. Polet, M.A. Katzenberg, Reconstruction of the diet in a medieval monastic community from the coast of Belgium. Journal of Archaeological Science. 30, 525-533, 2003.

[43] K.L. Privat, T.C. O'Connell, M.P. Richards, Stable isotope analysis of human and faunal remains from the anglo-saxon cemetery at Berinsfield Oxfordshire : dietary and social implications. Journal of Archaeological Science. 29, 779-790, 2002.

[44] G. Müldner, M.P. Richards, Fast or feast : reconstructing diet in later medieval England by stable isotope analysis. Journal of Archaeological Science.32, 39-48, 2005.

[45] T. Prowse, H.P. Schwarcz, S. Saunders, R. Macchiarelli, L. Bondioli, Isotopic paleodiet studies of skeletons from the Imperial Roman-age cemetery of Isola Sacra, Rome, Italy. Journal of Archaeological Science. 31, 259-272, 2004.

[46] G. Muldner, M.P. Richards, Stable isotope evidence for 1500 years of human diet at the city of York, UK. American Journal of Physical Anthropology. 133, 682-697, 2007.

[47] O.E. Craig, M. Biazzo, T.C. O'Connell, P. Garnsey, C. Martinez-Labarga, R. Lelli, L. Salvadei, G. Tartaglia, A. Nava, L. Renò, A. Fiammenghi, O. Rickards, L. Bondioli, Stable isotopic evidence for diet at the Imperial Roman coastal site of Velia (1st and 2nd Centuries AD) in Southern Italy. American Journal of Physical Anthropology. 139, 572-583, 2009.

[48] C. Chenery, G. Müldner, J.A. Evans, H. Eckardt, M. Lewis, Strontium and stable isotope evidence for diet and mobility in Roman Gloucester, UK. Journal of Archaeological Science. 37, 150-163, 2010.

[49] E. Herrscher, « Inferring diet by stable isotope analysis : a case study from the French Alps » dans *The Archaeology of Medieval Europe Vol 2 : The Twelfth to Sixteenth Centuries AD*, ed. M. Carver, Aarhus University Press, Aarhus, Cophenhagen. p. 139-146, 2011.

[50] M. Tafuri, G. Goude, G. Manzi,« Isotopic evidence of diet variation at the transition between Roman times and Late Antique in Central Italy », dans *Social identity during theRoman Antiquity in western Mediterranean sea : archaeo-anthropology, mortuary practices and organization of the funerary space*, eds. Y. Gleize, D. Castex, Mergoil Editions, Montagnac. accepté.

[51] M.A. Katzenberg, N.C. Lovell, Stable isotope variation in pathological bone. International Journal of Osteoarchaeology. 9, 316-324, 1999.

[52] B. Fuller, J. Fuller, N. Sage, D. Harris, T. O'Connell, R. E. M.Hedges, Nitrogen balance and $\delta^{15}N$: why you're not what you eat during pregnancy. Rapid Communications in Mass Spectrometry. 18, 2889-2896, 2004.

[53] A.M. Mekota, G. Grupe, S. Ufer, U. Cuntz, Serial analysis of stable nitrogen and carbon isotopes in hair : monitoring starvation and recovery phases of patients suffering from anorexia nervosa. Rapid Communications in Mass Spectrometry. 20, 1604-1610, 2006.

[54] O. Nehlich, M. P. Richards, Establishing collagen quality criteria for sulphur isotope analysis of archaeological bone collagen. Archaeological and Anthropological Sciences. 1, 59-75, 2009.

[55] E. Vika, Strangers in the grave ? Investigating local provenance in a Greek Bronze Age mass burial using $\delta^{34}S$ analysis. Journal of Archaeological Science. 36, 2024-2028, 2009.

[56] O. Nehlich, B.T. Fuller, M. Jay, A. Mora, R.A. Nicholson, C.I. Smith, M.P. Richards, Application of sulphur isotope ratios to examine weaning patterns and freshwater fish consumption in roman oxfordshire, UK. Geochimica et Cosmochimica Acta. 75, 4963-4977, 2011.

[57] R.E.M. Hedges, L.M. Reynard, Nitrogen isotopes and the trophic level of humans in archaeological. Journal of Archaeological Science. 34, 1240-1251, 2007.

[58] H. Bocherens, A. Mariotti, « Paléoenvironnements et paléoalimentations : biogéochimie isotopique des vertébrés » dans *Géologie de la Préhistoire*, ed. J.C. Miskowsky, Presses Universitaires de Perpignan, Géopré, Paris. p. 1323-1344, 2002.

[59] H.P. Schwarcz, Some theoretical aspects of isotope paleodiet studies. Journal of Archaeological Science. 18, 261-275, 1991.

[60] C.M. Kellner, M.J. Schoeninger, A simple carbon isotope model for reconstructing prehistoric human diet. American Journal of Physical Anthropology. 133, 1112-1127, 2007.

[61] D.L. Phillips, P.L. Koch, Incorporating concentration dependence in stable isotope mixing models. Oecologia. 130, 114-125, 2002.

[62] B.X. Semmens, E.J. Ward, J.W. Moore, C.T. Darimont, Quantifying Inter- and Intra-Population Niche Variability Using Hierarchical Bayesian Stable Isotope Mixing Models. PLoS ONE. 4, e6187, 2009.

[63] R. Fernandes, A.R. Millard, M. Brabec, M.-J. Nadeau, P. Grootes, Food Reconstruction Using Isotopic Transferred Signals (FRUITS) : A Bayesian Model for Diet Reconstruction. PLoS ONE. 9, e87436, 2014.

[64] G.J. Bowen, B. Wilkinson, Spatial distribution of $\delta^{18}O$ in meteoric precipitation. Geology. 30, 315-318, 2002.

[65] T.D. Price, J.H. Burton, R.A. Bentley, The characterization of biologically available strontium isotope ratios for the study of prehistoric migration. Archaeometry. 44, 117-135, 2002.

[66] J. Lee-Thorp, M. Sponheimer, Contributions of biogeochemistry to understanding hominin dietary ecology. American Journal of Physical Anthropology. 131(S43), 131-148, 2006.

[67] H. Bocherens, D. Drucker, D. Billiou, M. Patou-Mathis, B. Vandermeersch, Isotopic evidence for diet and subsistence pattern of Saint-Césaire I Neanderthal : review and use of multi-source mixing model. Journal of Human Evolution. 49, 71-87, 2005.

[68] M. P. Richards, R. Jacobi, J. Cook, P.B. Pettitt, C.B. Stringer, Isotope evidence for the intensive use of marine foods by late upper palaeolithic humans. Journal of Human Evolution. 49, 390-394, 2005.

[69] F. Valentin, H.R. Buckley, E. Herrscher, R. Kinaston, S. Bedford, M. Spriggs, S. Hawkins, K. Neal, Lapita subsistence strategies and food consumption patterns in the community of Teouma (Efate, Vanuatu). Journal of Archaeological Science. 37, 1820-1829, 2010.

[70] R.L. Kinaston, H.R. Buckley, F. Valentin, S. Bedford, M. Spriggs, S. Hawkins, E. Herrscher, Lapita diet, subsistence strategies and methods of animal husbandry in Remote Oceania : new stable isotope evidence from the 3000-year-old Teouma site, Efate Island, Vanuatu. PLoS ONE 9, e90376, 2014.

[71] N. Beavan-Athfield, R.C. Green, J. Craig, B. McFadgen, S. Bickler, Influence of marine sources on ^{14}C ages : isotopic data from Watom island, Papua New Guinea inhumations and pig teeth in light of new dietary standards. Journal of the Royal Society of New Zealand. 38, 1-23, 2008.

[72] F. Valentin, E. Herrscher, S. Bedford, M. Spriggs, H.R. Buckley. Evidence for social and cultural change in central Vanuatu between 3000 and 2000 BP : comparing funerary and dietary patterns of the first and later generations at Teouma, Efate. The Journal of Island and Coastal Archaeology. 9, 1-19, 2014.

[73] R. Schulting, M.P. Richards, Dating women and becoming farmers : new palaeodietary and A.M.S. dating evidence from the Breton Mesolithic cemeteries of Téviec and Hoëdic. Journal of Anthropological Archaeology. 20, 314-344, 2001.

[74] D. Boric, G. Grupe, J. Peters, Z. Mikic, Is the Mesolithic-Neolithic subsistence dichotomy real ?New stable isotope evidence from the Danube Gorges.European Journal of Archaeology. 7, 221-248, 2004.

[75] K. Lidén, G. Eriksson, B. Nordqvist, A. Götherström, E. Bendixen, The wet and the wild followed by the dry and the tame, or did they occur at the same time ? Diet in Mesolithic and Neolithic southern Sweden. Antiquity. 78, 23-33, 2004.

[76] R.J. Schulting, S.M. Blockley, H. Bocherens, D. Drucker, M. Richards, Stable carbon and nitrogen isotope analysis on human remains from the Early Mesolithic site of La Vergne (Charente-Maritime, France). Journal of Archaeological Science. 35, 763-772, 2008.

[77] H. Bocherens, C. Polet, M. Toussaint, Palaeodiet of Mesolithic and Neolithic populations of Meuse Basin (Belgium) : evidence from stables isotopes. Journal of Archaeological Science. 34, 10-27, 2007.

[78] M.C. Lillie, M. P.Richards, Stable isotope analysis and dental evidence of diet at the Mesolithic-Neolithic transition in Ukraine. Journal of Archaeological Science. 27, 965-972, 2000.

[79] A. Papathanasiou, Stable isotope analysis in Neolithic Greece and possible implications on human health. International Journal of Osteoarchaeology. 13, 314-324, 2003.

[80] S. Lösch, G. Grupe, J. Peters, Stable isotopes and dietary adaptations in humans and animals at Pre-Pottery Neolithic Nevalı Çori, Southeast Anatolia. American Journal of Physical Anthropology. 131, 181-193, 2006.

[81] E. Herrscher, G. Le Bras-Goude, Southern French Neolithic populations : Isotopic evidence for regional specificities in environment and diet. American Journal of Physical Anthropology. 141, 259-272, 2010.

[82] G. Le Bras-Goude, E. Herrscher, J. Vaquer, Funeral practices and foodstuff behavior : what does eat meat mean ? Stable isotope analysis of Middle Neolithic populations in the Languedoc region (France). Journal of Anthropological Archaeology. 32, 280-287, 2013.

[83] G. Goude, A. Schmitt, E. Herrscher, G. Loison, S. Cabut, G. André, Pratiques alimentaires au Néolithique moyen : Nouvelles données sur le site de Pontcharaud 2 (Auvergne, France). Bulletin de la Société Préhistorique Française 110, 299-317, 2013.

[84] L. Barton, S.D. Newsome, F.-H. Chen, T. Guilderson, R. Bettinger, Agricultural origins and the isotopic identity of domestication in northern China. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 106, 5523-5528, 2009.

[85] J.D. Le Huray, H. Schutkowski, Diet and social status during the La Tène period in Bohemia : Carbon and nitrogen stable isotope analysis of bone collagen from KutnáHora-Karlov and Radovesice. Journal of Anthropological Archaeology. 24, 135-147, 2005.

[86] M.A. Tafuri, O.E. Craig, A. Canci, Stable isotope evidence for the consumption of millet and other plants in Bronze Age Italy. American Journal of Physical Anthropology. 139, 146-153, 2009.

[87] M.L. Murray, M.J. Schoeninger, « Diet, status, and complex social structure in Iron Age Central Europe : some contributions of bone chemistry » dans *Tribe and Polity in Late Prehistoric Europe*, eds. B. Gibson, M.N. Geselowitz, Plenum Press, New York. p. 155-176, 1988.

[88] G. Goude, A. Balasescu, H. Réveillas, Y. Thomas, P. Lefranc, Diet variability and stable isotope analyses : looking for variables within the Late Neolithic and Iron Age human groups from Gougenheimsite and surrounding areas (Alsace, France). International Journal of Osteoarchaeology. DOI : 10.1002/oa.2399, 2014.

[89] R.C. Redfern, C. Hamlin, N.B. Athfield, Temporal changes in diet : a stable isotope analysis of late Iron Age and Roman Dorset, Britain. Journal of Archaeological Science. 37, 1149-1160, 2010.

[90] F. Crowe, A. Sperduti, T.C. O'Connell, O.E. Craig, K. Kirsanow, P. Germoni, R. Macchiarelli, P. Garnsey, L. Bondioli, Water-related occupations and diet in two roman coastal communities (Italy, First to Third century AD) : Correlation between stable carbon and nitrogen isotope values and auricular exostosis prevalence. American Journal of Physical Anthropology. 142, 355-366, 2010.

[91] T. Prowse, H.P. Schwarcz, R.S. Saunders, R. Macchiarelli, L. Bondioli, Isotopic evidence for age related variation in diet from Isola Sacra. American Journal of Physical Anthropology. 128, 2-13, 2005.

[92] E. Herrscher, Détection isotopique des modalités d'allaitement et de sevrage à partir des ossements archéologiques. Cahiers de Nutrition et de Diététique. 48, 75-85, 2013.

[93] T.L. Dupras, H.P. Schwarcz, S.I. Fairgrieve, Infant feeding and weaning practices in Roman Egypt. American Journal of Physical Anthropology. 115, 204-212, 2001.

[94] B.T. Fuller, T.I. Molleson, D.A. Harris, L.T. Gilmour, R.E.M. Hedges, Isotopic evidence for breastfeeding and possible adult dietary differences from Late/Sub-Roman Britain. American Journal of Physical Anthropology. 129, 45-54, 2006.

[95] T.L. Prowse, S.R. Saunders, H.P. Schwarcz, P. Garnsey, R. Macchiarelli, L. Bondioli, Isotopic and dental evidence for infant and young child feeding practices in an imperial Roman skeletal sample. American Journal of Physical Anthropology. 137, 294-308, 2008.

[96] A.L. Waters-Rist, V.I. Bazaliiskii, A.W. Weber, M.A. Katzenberg, Infant and child diet in Neolithic hunter-fisher-gatherers from cis-baikal, Siberia : Intra-long bone stable nitrogen and carbon isotope ratios. American Journal of Physical Anthropology. 146, 225-241, 2011.

[97] E. Herrscher, Comportements socioculturels liés à l'allaitement et au sevrage : le cas d'une population grenobloise sous l'Ancien Régime. Annales Fyssen. 20, 46-66, 2005.

[98] E. Herrscher, F. Valentin, L. Coupain, « Analyse bioarchéologique des enfants découverts dans le Chœur » dans *Les fouilles de la nécropole Saint-Martin-des-Champs de Paris, (site no.75 056 051 AH)*, ed. C. Brut, Rapport final d'Opération, Etude Anthropologique. DHAAP, Paris, 25 p, 2012.

[99] E. Herrscher, Alimentation d'une population historique. Analyse des données isotopiques de la nécropole Saint-Laurent de Grenoble (XIII^{e}-XV^{e} siècle, France). Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris. 15, 149-269, 2003.

[100] T.D. Price, G. Grupe, P. Schröter, Migration in the Bell Beaker period of central Europe. Antiquity. 72, 405-411, 1998.

[101] M. M. Schweissing, G. Grupe, 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, 2003.

[102] J. Evans, N. Stoodley, C. Chenery, 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, 2006.

[103] T.L. Prowse, H.P. Schwarcz, P. Garnsey, M. Knyf, R. Macchiarelli, L. Bondioli, Isotopic evidence for age-related immigration to imperial Rome. American Journal of Physical Anthropology. 132, 510-519, 2007.

[104] T.L. Dupras, H.P. Schwarcz, Strangers in a Strange Land : Stable Isotope Evidence for Human Migration in the Dakhleh Oasis, Egypt. Journal of Archaeological Science. 28, 1199-1208, 2001.

[105] K.J. Knudson, A.E. Aufderheide, J.E. Buikstra, Seasonality and paleodiet in the Chiribaya polity of southern Peru. Journal of Archaeological Science. 34, 451-462, 2007.

[106] S. Leach, M. Lewis, C. Chenery, G. Müldner, H. Eckardt, Migration and diversity in Roman Britain : A multidisciplinary approach to the identification of immigrants in Roman York, England. American Journal of Physical Anthropology. 140, 546-561, 2009.

[107] R. Brettell, J. Montgomery, J. Evans, Brewing and stewing : the effect of culturally mediated behaviour on the oxygen isotope composition of ingested fluids and the implications for human provenance studies. Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 27, 778-785, 2012.

Encart 12.- La consommation de millet en Italie à l'âge de Bronze. Le cas de Olmo di Nogara

Mary Anne Tafuri
Department of Environmental Biology, Sapienza University of Rome

En Europe, les plantes domestiques C_4 les plus importantes sont *Panicum miliaceum* et *Setaria italica*. Leur consommation conduit à un enrichissement relatif en ^{13}C dans les tissus, ce qui fait d'eux une cible idéale pour les études isotopiques de la paléodiète. Si les données paléobotaniques soulignent la culture du millet en Europe au Bronze final, il est toutefois difficile de déterminer son importance en termes de ressources et s'il a été utilisé pour la consommation humaine ou animale. Des restes paléobotaniques attestent de sa présence dès l'âge du Bronze moyen en Italie du Nord mais dans des quantités qui suggèrent une utilisation secondaire. Le millet domestique, originaire d'Asie centrale, aurait atteint l'Europe à l'âge du Bronze [1,2] et serait devenu une ressource importante à partir de l'âge du Fer. Une analyse isotopique réalisée sur des sites de l'âge du Bronze en Italie a permis de documenter plus précisément l'arrivée de cette céréale en Europe du Sud [3]. Sont présentés ici les résultats obtenus sur 65 squelettes du site d'Olmo di Nogara. Localisée dans la vallée du Pô, à environ 30 km au sud de Vérone, cette nécropole a livré 517 sépultures dont un tiers contiennent des armes suggérant la présence d'une élite guerrière (Bronze moyen et récent, XVI^{e}-XII^{e} s av. J.-C. [4]).

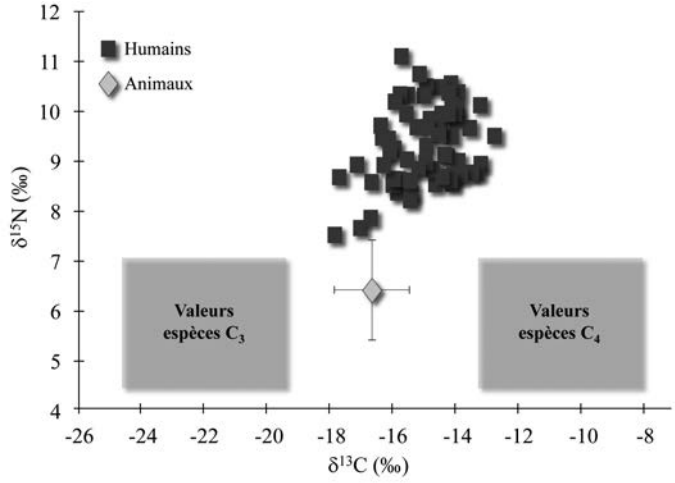


Figure 1 – Valeurs de $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ des collagènes humains et animaux (moyenne) d'Olmo di Nogara. Valeurs théoriques de $\delta^{13}C$ des plantes de type C_3 et C_4

Les valeurs de $\delta^{13}C$ à Olmo di Nogara (-14,9 ± 1,1 ‰) suggèrent une consommation importante de ressources enrichies en ^{13}C (Figure 1). La distance importante du site

à la côte et des valeurs peu élevées de $\delta^{15}N$ (9,3 ± 0,8 ‰) rendent l'hypothèse d'une consommation de ressources marines peu probable. Des poissons lacustres d'Eurasie montrent des valeurs de $\delta^{13}C$ nettement inférieures [5] permettant de rejeter la consommation de ressources d'eau douce. Notre hypothèse serait donc la consommation d'espèces végétales pour laquelle, dans ce contexte, le millet est le candidat le plus probable. Les animaux d'Olmo di Nogara montrent également des valeurs isotopiques associées à la consommation du millet. Mais qu'en est-il de l'exploitation des *Panicoïdés* sur ce site ? Des études de millets modernes indiquent des valeurs de $\delta^{13}C$ entre -12 et -10 ‰ et de $\delta^{15}N$ entre 3 et 4 ‰ [6]. Si ces valeurs sont comparables à celles du millet cultivé en Italie du Nord à l'âge du Bronze, ce sont donc les plantes C_3 (orge, épeautre, avoine) qui ont dû contribuer le plus à l'alimentation. Pour les sujets humains, il reste toutefois difficile de déterminer si leurs valeurs isotopiques sont consécutives à la consommation directe des céréales ou à celle d'animaux nourris de millet. L'absence de corrélation entre les valeurs de $\delta^{15}N$ et de $\delta^{13}C$ (Corrélation de Pearson, r = 0,23, n = 19, p = 0,35) seraient toutefois en faveur d'une consommation directe du millet et celle de viande d'animaux ayant consommé cette céréale.

L'adaptation du millet aux climats arides peut avoir favorisé particulièrement la culture de cette céréale dans le nord de l'Italie au cours de l'âge de Bronze, au moment où les conditions édaphiques étaient moins satisfaisantes pour la culture d'espèces moins tolérantes. Les conditions environnementales de la vallée du Pô au cours de l'âge du Bronze, tel que l'assèchement progressif du climat autour du XVI^{e} siècle av. J.-C. [7] lié à une importante déforestation et l'utilisation intensive des terres pour le pâturage et la culture [8] pourraient fournir une clé d'interprétation. Cette céréale a pu être introduite sur ce site par contact avec des groupes voisins d'Europe du nord-est, contact corroboré par la culture matérielle. La documentation archéobotanique et les spectres polliniques, ajoutés aux données isotopiques démontrent clairement à quel point les pratiques agricoles de l'Italie préhistorique sont plus complexes que traditionnellement admis. L'analyse isotopique des ossements humains et animaux d'Olmo di Nogara a révélé une contribution du millet dans l'alimentation des groupes humains mais également dans celle des animaux de l'âge du Bronze moyen et récent dans le nord de l'Italie. Le nombre croissant de preuves liées à la consommation de millet en Europe nous oblige à repenser nos hypothèses sur les pratiques agricoles durant la Préhistoire récente, en particulier en ce qui concerne l'utilisation des espèces telles que le blé et l'orge, jusqu'à présent considérées comme dominantes.

Bibliographie

[1] D. Arobba, R. Caramiello, A. Del Lucchese, Archaeobotanical investigations in Liguria : preliminary data on the Early Iron Age at Monte Trabocchetto (Pietra Ligure, Italy). Vegetation History and Archaeobotany. 12, 253–262, 2003.

[2] D. Zohary, M. Hopf, Domestication of Plants in the Old World : The Origin and Spread of Cultivated Plants in West Asia, Europe, and the Nile Valley. Oxford University Press, Oxford. 316 p. 2001.

[3] M.A. Tafuri, O.E. Craig, A. Canci, Stable isotope evidence for the consumption of millet and other plants in Bronze Age Italy. American Journal of Physical Anthropology. 139, 146-153, 2009.

[4] L. Salzani, La necropoli dell'età del Bronzo all'Olmo di Nogara. Memorie del Museo Civico di Storia Naturale di Verona, 2^{e}serie, Sezione de ll'Uomo. 8, 293-305, 2005.

[5] E. Dufour, H. Bocherens, A. Mariotti, Palaeodietary implications of isotopic variability in eurasian lacustrine fish. Journal of Archaeological Science. 26, 617-627, 1999.

[6] P.E. McGovern, J.H. Zhang, J.G. Tang, Z.Q. Zhang, G.R. Hall, R.-A. Moreau, A. Nunez, E.D. Butrym, M.P. Richards, C.S. Wang, G.S. Cheng, Z.J. Zhao, C.S. Wang, Fermented beverages of pre- and proto-historic China. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 101, 17593–17598, 2004.

[7] M. Magny, Holocene climate variability as reflected by mid-European lake-level fluctuations and its probable impact on prehistoric human settlements. Quaternary International. 113, 65–79, 2004.

[8] V. Valsecchi, W. Tinner, W. Finsinger, B. Ammann, Human impact during the Bronze Age on the vegetation at Lago Lucone (northern Italy). Vegetation History and Archaeobotany. 15, 99–113, 2006.