Chapitre 3.4
Discussion sur la paléoalimentation autour de très faibles effectifs en anthropologie biologique
Approche isotopique et modélisation

Gwenaëlle GOUDE(1), Karina GERDAU-RADONIĆ(2)

(1) Aix Marseille Université, CNRS, Ministère de la Culture, LAMPEA, Aix-en-Provence
(2) Université de Strasbourg - UMR 7044 Archimède
Archéologie et Histoire Ancienne : Méditerranée – Europe

1 Introduction

En archéo-anthropologie, l'analyse des isotopes[1] stables dans l'os et les dents humains constitue aujourd'hui une approche unique et complémentaire des travaux en botanique et en zoologie pour répondre aux problématiques de l'alimentation humaine passée. Les compositions isotopiques de différents éléments, notées par le symbole δ, peuvent être dosées sur les parties organique (collagène) et/ou minérale (bioapatite) de certains tissus humains fossiles dans la mesure où l'état de conservation le permet (Fontugne *et al.*, 2014). Parmi ces éléments, le carbone ($\delta^{13}C$ – bioapatite et collagène), l'azote ($\delta^{15}N$ – collagène), le soufre ($\delta^{34}S$ – collagène) et le strontium ($^{87}Sr/^{86}Sr$) offrent la possibilité d'évaluer la consommation des protéines, de l'énergie (glucide-lipide), de déterminer les différents environnements exploités (par ex., marin vs. terrestre) et de documenter la mobilité relative de chacun des individus*, puis par extension pour chacun des groupes humains étudiés. Cette évaluation requiert néanmoins l'établissement d'un référentiel isotopique local, à partir des ossements animaux et si possible des restes végétaux, qui permettra de replacer les consommateurs au sein de la chaîne alimentaire (par ex., Goude & Fontugne, 2016). Les données* isotopiques une fois obtenues et analysées dans leur contexte environnemental et social, sont com-

[1] Atomes d'un même élément chimique ayant un nombre de neutrons différents et donc pas la même masse.

parées aux autres informations anthropologiques (comme l'âge au décès, le sexe, la stature, les pathologies) afin d'inférer sur les interactions* entre état sanitaire, croissance et alimentation, entre autres. La comparaison de différents tissus se formant à des moments distincts de la vie d'un individu (par ex., os vs. dent, ou micro-sections dentaires), permet également de tirer des déductions sur l'histoire de vie des sujets, de déterminer des schémas de mobilité ou d'allaitement et de sevrage (par ex. Goude *et al.*, 2020) en lien avec des pratiques sociales spécifiques.

A cause de la décomposition des tissus organiques, l'étude des groupes humains archéologiques présente la particularité de focaliser ces analyses quasiment sur les seuls restes osseux et dentaires et est donc fortement contrainte à l'état de conservation de ces derniers, pouvant varier d'un environnement à l'autre (Denys, 2002). Pour des périodes anciennes (Paléolithique au début du Néolithique) et/ou des environnements peu favorables (par ex., zones arides), la conjoncture des différents facteurs (nombre d'individus, préservation anatomique, conservation biologique) amène assez souvent à de faibles effectifs* pour la réalisation des échantillonnages*. Les situations générant de petits échantillons* d'étude ne sont pas rares, et s'adjoignent à ces problèmes ceux de la limitation des prélèvements pour des raisons muséographiques, patrimoniales ou des difficultés d'accès au matériel, par exemple (Goude *et al.*, 2011, 2018). Nous proposons ici un exemple de démarche analytique et statistique pour l'étude de très petits échantillons à travers l'exemple du site* de Tablada de Lurín (Pérou).

2 Matériel, méthode et démarches analytiques

2.1 Présentation du site et du matériel

Le site précolombien de Tablada de Lurín se situe sur la côte centrale du Pérou à moins de 5 km de l'océan Pacifique et dans les districts sud de la métropole de Lima (Pérou). Le site est constitué, entre autres, de deux phases d'occupation funéraire (200 BCE - CE 200) se succédant chronologiquement et présentant des pratiques mortuaires différentes. La phase 1 (ca. 200 – 1 BCE) se caractérise par des inhumations individuelles et la phase 2 (ca. CE 1 – 200) par des sépultures collectives. Par ailleurs, lors de la construction de ces sépultures collectives, des inhumations de la phase 1 ont été détruites. Afin de comprendre ce changement si rapide dans les pratiques mortuaires et explorer s'il y a aussi un rapport avec d'autres différences d'ordre culturel, nous avons tenté d'identifier des particularités entre ces deux groupes et notamment les éventuelles différences dans les habitudes alimentaires pendant chaque phase d'occupation (Gerdau-Radonić *et al.*, 2015).

Pour identifier des différences alimentaires possibles, des analyses isotopiques (notamment C, N, S sur collagène) ont été effectuées sur des échantillons osseux (n=59) et dentaires (n=26) de 39 sujets de la phase 1 et de 20 sujets de la phase 2. Ces 85 échantillons ont été complétés par 11 ossements animaux, issus des inhumations et contemporains de sujets humains, et 31 échantillons de différentes ressources alimentaires actuelles (plantes, viande, poisson) pour établir un référentiel local. Aucun des restes animaux n'a livré de collagène osseux bien conservé et le référentiel local a dû donc être établi uniquement à partir des ressources actuelles, moyennant des corrections du $\delta^{13}C$ pour pallier l'effet Suess. Ce dernier est dû à la combustion des

énergies fossiles à l'époque contemporaine qui affecte la teneur en ^{13}C dans l'atmosphère (Marino & McElroy, 1991). Pour les humains, seuls quatre ossements de la phase 1 et cinq dents (partie dentinaire ; quatre de la phase 1 et une seule de la phase 2), représentant huit sujets distincts, ont fourni une teneur en collagène suffisamment correct pour garantir la fiabilité des mesures* isotopiques et leur interprétation (voir De Niro, 1985 ; Klinken, 1999). La perte de 90% des informations sur la matière organique en raison d'un très mauvais état de conservation, visuellement non estimable (la plupart des sujets ont pu faire l'objet de différentes analyses anthropologiques ; Gerdau-Radonic, 2007 ; Makowski *et al.*, 2012), n'autorise donc qu'une analyse très limitée en terme de statistiques. Seul un travail descriptif peut être proposé, respectant les contraintes d'un si faible corpus, c'est-à-dire une présentation en médiane* et quartiles (ou minimum-maximum) par l'intermédiaire d'un tableau* et/ou de représentations graphique de type boite à moustaches*. Également, l'établissement du référentiel local autorise l'utilisation de modélisations, expliquée ci-dessous.

2.2 Modélisations de la consommation des ressources

Des modèles mathématiques ont très tôt été utilisés pour tenter de déterminer la proportion de ressources potentiellement dominantes dans l'alimentation d'un individu, se basant sur les premiers travaux et les applications en écologie et en éthologie (Chisholm *et al.*, 1982 ; Schwarcz, 1991). Ces approches se fondent sur le fait que plus un aliment prend une part importante dans l'alimentation plus sa contribution à la signature isotopique[2] du consommateur est grande (Little & Little, 1997). Les sources alimentaires pour lesquelles les proportions sont déterminées doivent être isotopiquement distinctes (par ex., végétaux, viande d'herbivore, poisson). L'intérêt de l'utilisation des modèles est multiple et permet notamment de répondre aux questions qui nous préoccupent, c'est-à-dire, comment la consommation d'une ressource varie d'un individu à l'autre dans une population ou entre populations et en relation avec des facteurs biologiques, sociaux, géographiques ou culturels (Schwarcz, 1991). Toutefois, la petite taille de notre échantillon ne permet pas d'explorer ni d'interpréter les données selon ces facteurs associés.

Parmi ce type d'étude, le « *Linear Mixing Model* » (LMM) a été utilisé, notamment par de nombreux auteurs en écologie (Ben-David & Schell, 2001 ; Little & Little, 1997 ; Newsome *et al.*, 2004 ; Phillips & Gregg, 2003 ; Phillips & Koch, 2002 ; Schwarcz, 1991). Ce modèle prend en compte la relation qui existe entre le δ_{tissus} du consommateur, le $\delta_{\text{alimentation}}$ et le fractionnement[3] isotopique entre ces derniers, et il s'applique à partir d'équations qui impliquent la proportion des ressources (%) ou bien de groupes de ressources similaires dans l'alimentation (Little & Little, 1997). L'utilisation du LMM a par la suite été améliorée en prenant en compte les proportions élémentaires présentes dans chaque type de ressources (Pearson *et al.*, 2003 ; Phillips, 2001 ; Phillips & Koch, 2002). En effet, les concentrations élémentaires peuvent varier considérablement d'une ressource à l'autre, relativement à la composition en protéines, et la contribution de ces dernières aux ratios isotopiques du collagène d'un consommateur ne s'effectue pas

[2] Composition isotopique enregistrée dans l'échantillon analysé.

[3] Au cours du transit d'un élément à travers la chaîne alimentaire, les rapports isotopiques vont varier à cause du fractionnement isotopique, c'est-à-dire le comportement différent de chaque isotope (vitesse de réaction) lors des processus physiques et chimiques.

de la même manière (par ex. Webb *et al.*, 2017). Si pendant quelques années les anthropologues, spécialistes de la paléodiète et des outils isotopiques, ont utilisé le LMM par des applications telles que ISOCONC 1.01 et IsoSource 1.3.1 (Phillips & Koch, 2002), ces dernières présentaient des limitations en terme du nombre de ressources alimentaires pouvant être intégrées dans le modèle, et ne prenaient pas en compte la variabilité isotopique de chacune des ressources ni les marges d'erreur associées aux différents fractionnements isotopiques (voir revue dans Fernandes *et al.*, 2014).

Ces problèmes ont été palliés par le développement des modélisations bayésiennes, (Moore & Semmens, 2008 ; Parnell *et al.*, 2010), dont l'approche statistique probabiliste est communément utilisée avec de petits échantillons. On retrouvera dans la littérature récente des applications utilisant SIAR[4] et FRUITS[5] qui sont accessibles gratuitement. Ces applications nécessitent en amont un certain nombre d'informations sur chacune des sources à évaluer, sur le fractionnement des éléments considérés (par ex., différences alimentation-tissu ou tissu proie-prédateur). Concernant le fractionnement et le routage des éléments à travers le corps, la littérature fournit un bon nombre d'informations (Fernandes *et al.*, 2012 ; Froehle *et al.*, 2010 ; Webb *et al.*, 2017 entre autres) et celles choisies pour l'établissement du modèle doivent être par conséquent bien spécifiées, si ce n'est dans le corps de la publication, au moins dans une annexe.

2.3 Modélisations appliquées aux données de Tablada de Lurin

L'étude isotopique de Tablada de Lurín se prête parfaitement aux modélisations bayésiennes même si le jeu de données n'autorise pas l'utilisation de test statistiques. En effet, l'établissement du référentiel* local a permis de discuter de l'alimentation des huit sujets pour lesquels nous avons obtenus de résultats isotopiques interprétables (Gerdau-Radonić *et al.*, 2015). L'hypothèse d'une différence alimentaire a été rejetée ; en dépit des différentes pratiques funéraires, les individus de deux phases consomment des aliments de base semblables, de protéines principalement issues de poissons et de maïs, résultats qui font écho aux travaux publiés sur la même région (Knudson *et al.*, 2007 ; Tomczak, 2003).

Sont présentées dans les figures 1 et 2, deux applications de modélisations bayésiennes (SIAR : siarmcmcdirichletv4 ; MCMC for stable isotope data ; R Development Core Team 2011 ; FRUITS 3.1 Beta : http://sourceforge.net/projects/fruits/) pour les huit individus de Tablada (pour les données humaines et les référentiels locaux, aliments voir Gerdau-Radonić *et al.*, 2015 : Tableaux 1 et 3). Les données intègrent trois compositions isotopiques ($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$, $\delta^{34}S$) mesurées directement sur les aliments regroupés en trois catégories* (viande séchée d'Alpaga, poisson marin, maïs) car la viande d'origine terrestre, la nourriture marine et le maïs (avec une photosynthèse[6]

[4]SIAR (Stable Isotope Analysis in R) est un « package » implémenté dans le logiciel R (R Development Core Team 2011, les manuels d'utilisation sont téléchargeables : https://maths.ucd.ie/parnell_a/media/SIAR_For_Ecologists.pdf ; https://cran.r-project.org/Web/packages/siar/siar.pdf.

[5]FRUITS (Food Reconstruction Using Isotopic Transferred Signals) est une application gratuite publiée par Fernandes *et al.* (2014) offrant une interface et une utilisation simple pouvant prendre en compte des informations *a priori* et les différents acheminements des éléments comme le carbone à travers le corps (https://sourceforge.net/projects/fruits/).

[6]Les plantes peuvent avoir une voie photosynthétique en C4 (par ex. maïs) ou C3 (par ex. pomme de terre).

en C4) ont des signatures isotopiques différentes. Le groupe humain est représenté par la moyenne* des compositions isotopiques des collagènes osseux et dentaires, avec un écart-type, et le fractionnement enregistré correspond donc à celui entre l'alimentation globale et le collagène (voir revue dans Lee *et al.*, 2017).

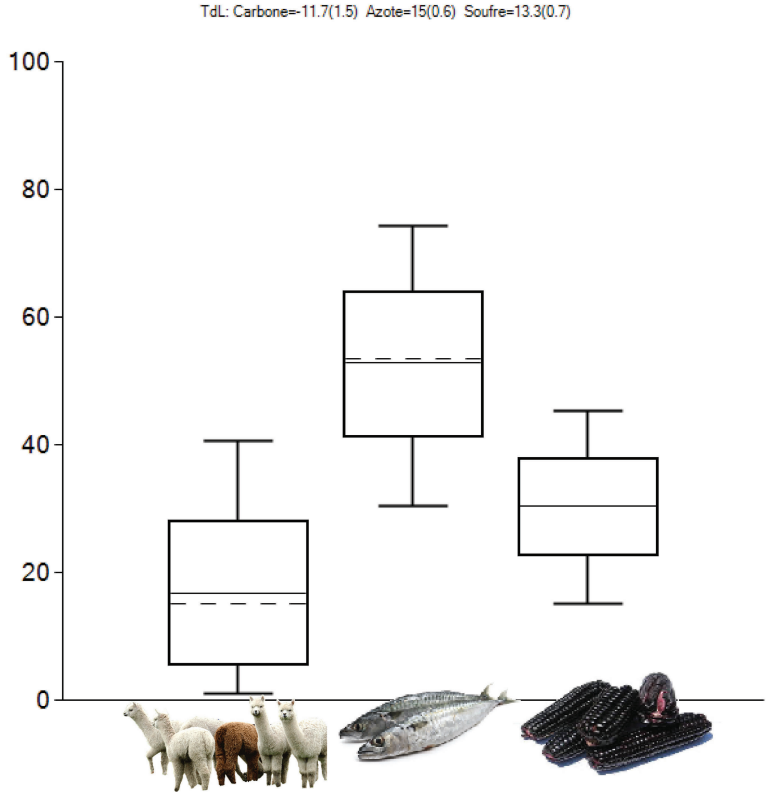


FIG. 1 : Exemple d'application du logiciel de modélisation bayésienne FRUITS (Fernandes *et al.*, 2014), d'après les données isotopiques de sujets archéologiques du Pérou (issues de Gerdau-Radonić *et al.*, 2015). Les boîtes-à-moustaches représentent une estimation des proportions de ressources consommées avec la moyenne et la médiane et les intervalles de crédibilité* de 68 et 95%.

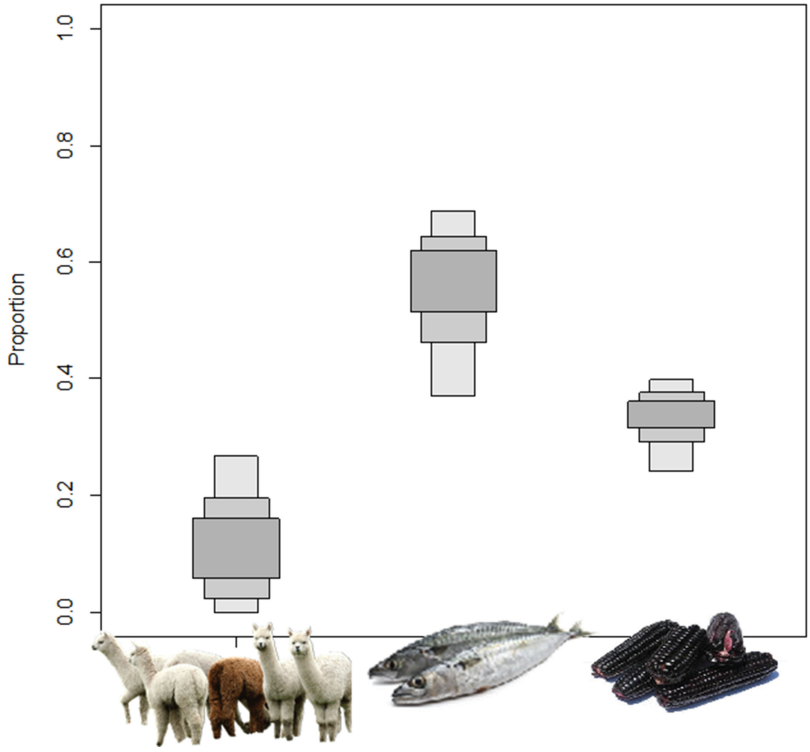


Fig. 2 : Exemple d'application de modélisation bayésienne sous R (SIA-R), considérant les mêmes données que pour le modèle de la figure 1. Les boîtes-à-moustaches représentent une estimation des proportions de ressources consommées avec des intervalles de crédibilité de 25, 75 et 95%.

A noter qu'un individu féminin de la phase 1 a fourni des données dentaires et osseuses (échantillons H84 et Hd46). Les résultats proposés par les deux applications sont similaires ; les médianes et moyennes s'échelonnent dans les mêmes gammes de proportions pour les deux modèles et les crédibilités à 95% s'échelonnent dans des gammes de proportions globalement plus larges pour l'application FRUITS. Le poisson constitue la source principale de protéines, d'environ 50 %. Le maïs représente environ 30 % des protéines ingérées et la viande moins de 20%. Ces résultats, corroborent les proportions initialement proposées à partir du LMM (Gerdau-Radonić *et al.*, 2015), où la contribution du maïs dans les protéines est estimée entre 23 et 34 %, et le poisson de 60 à 77 %. Les modèles bayésiens permettent toutefois de proposer une estimation potentielle plus large pour chacune des ressources et sont applicables individuellement afin de comparer les sujets entre eux. Par ailleurs, si le maïs contribue dans une moindre mesure aux protéines, la part énergétique (glucide notamment) semble très importante dans l'alimentation globale de ces groupes humains, partici-

pant à la hauteur de 38 à 88% (calculs réalisés à partir du $\delta^{13}C$ de la bioapatite selon Ambrose *et al.*, 1997).

3 Remarques de conclusion

Le cas présenté montre comment, à partir d'un très petit échantillon qui résulte d'une limitation dans l'acquisition du matériel ou d'un problème de conservation, il est possible d'appliquer certaines méthodes statistiques pour discuter de l'alimentation des populations passées sur la base de données anthropologiques et biochimiques. L'application de modèles bayésiens est pertinente pour discuter le rôle de certains aliments par rapport à d'autres mais doit faire l'objet de précautions quant à l'interprétation des résultats qui restent des données de type relative[7] et doivent donc être contextualisées. L'exemple présenté n'intègre pas les données biochimiques sur des plantes et animaux archéologiques ; l'utilisation des données actuelles comme référentiel doit également être considérée avec précaution en raison des pollutions chimiques récentes notamment.

Remerciements : L'étude AMPOP a été financée par un PEPS — INEE 2012 (CNRS, France), l'Asociación Atocongo (Lima, Pérou), et par Santander International Travel Grants (Bournemouth University, Royaume-Uni). Des informations complémentaires sur le projet sont disponibles sur le site web http://lampea.cnrs.fr/spip.php?article 3652. Les échantillons ont pu sortir du Pérou et être analysés sous l'autorisation no. 057-DGPC-VMPCIC-MC (Resolución Directorial del Ministerio de Cultura, Pérou).

En résumé :

- Les analyses isotopiques sur les restes humains sont pratiquées systématiquement en archéologie. L'état de conservation joue un rôle majeur sur la quantité de données exploitables *in fine*.
- Un très faible nombre de résultats isotopiques peut toutefois être intégré à des modèles statistiques adaptés.
- Différents modèles bayésiens permettent de discuter des hypothèses sur les comportements alimentaires.
- Attention ces modélisations ont des limites interprétatives inhérentes au cadre de l'étude et au jeu de données disponibles.

[7] données comparant une ressource par rapport à une ou plusieurs autres choisies pour l'étude.