



**MINISTÈRE  
DE LA CULTURE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

# Prélèvements et analyses sur l'os humain au titre de l'archéologie



**APPORTS, MÉTHODOLOGIE  
ET BONNES PRATIQUES**

Recueil des fiches pratiques, 2025

**Illustration de la couverture**

Emmanuelle Jacquot (département de Seine-Saint-Denis).

**Illustrations du préambule**

Céline Bon (UMR7206 Éco-anthropologie (EA): CNRS, Muséum national d'histoire naturelle, université de Paris, musée de l'Homme), Paris, France.

**Conception et maquettage**

Ministère de la Culture, direction générale des patrimoines et de l'architecture sur la charte de Graphéine.  
© ministère de la Culture, mars 2025.

# Sommaire



## PRÉLÈVEMENTS ET ANALYSES SUR L'OS HUMAIN AU TITRE DE L'ARCHÉOLOGIE

Préambule

**Fiche** ♦ Les études paléogénétiques

**Fiche** ♦ Les analyses isotopiques

**Fiche** ♦ La cémentochronologie – Estimation de l'âge au décès

**Fiche** ♦ La datation par le carbone 14 (ou radiocarbone) des ossements

**Fiche** ♦ Optimisation et hiérarchisation des prélèvements

**Fiche** ♦ Les bons gestes à adopter pour optimiser la qualité des prélèvements



# Préambule



Les vestiges anthropobiologiques «sont des restes humains mis au jour lors d'une opération archéologique prescrite ou autorisée par l'Etat, ou encore découverts fortuitement, et ayant fait l'objet d'une déclaration au service régional de l'archéologie ou au département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines dans le cadre de l'application du livre V du code du patrimoine. Ils sont composés d'ossements humains isolés ou en connexion issus de structures funéraires, de couches sédimentaires, de remblais et ce, quel que soit le traitement funéraire rencontré ou le traitement des restes osseux; de tissus éventuellement momifiés, ainsi que les phanères résiduels et les calcifications. Sont aussi considérés comme des vestiges anthropobiologiques, les prélèvements réalisés sur les restes osseux, les «vestiges para-ostéologiques», éléments prélevés obligatoirement en même temps que les ossements, ainsi que les prélèvements de sédiment réalisés autour des ossements.» (article 1-III de l'arrêté du 7 février 2022 portant définition des données scientifiques de l'archéologie et de leurs conditions de bonne conservation).

Ils font partie des éléments du patrimoine archéologique au sens de l'article L.510-1 du code du patrimoine.<sup>1</sup>

À la fin de l'opération archéologique, les vestiges anthropobiologiques sont placés sous la garde de l'État, à l'exception de ceux qui sont intégrés dans les collections publiques des musées de France.

Ils doivent être conservés et étudiés dans des conditions conformes aux principes fondamentaux fixés par le code civil (articles 16-1 et 16-1-1)<sup>2</sup>.

Toute personne chargée de conserver ou d'étudier des vestiges anthropobiologiques au titre de l'archéologie doit traiter avec respect, dignité et décence ces vestiges. Cette obligation concerne tant les personnes

morales que les personnes physiques quelle que soit la phase de l'opération archéologique (opération d'archéologie préventive ou programmée, conservation, étude après versement des données scientifiques de l'archéologie).

Aujourd'hui, on remarque une augmentation significative du nombre d'analyses invasives sur les vestiges anthropobiologiques que ce soit dans le cadre d'une opération d'archéologie préventive, d'une opération programmée ou de reprise d'études sur les vestiges anthropobiologiques dont l'État assure la garde.

Le présent recueil a été conçu dans le cadre de la mise en place du dispositif fixant les conditions d'exploitation scientifique des vestiges anthropobiologiques remis à l'État et n'ayant pas fait l'objet d'une intégration dans les collections publiques des musées nationaux et territoriaux. Il a toutefois un propos plus général et se veut aussi applicable au temps de réalisation de l'opération archéologique.

Il s'agit d'informations introductives sur les données que peuvent apporter les différents types d'analyses physico-chimiques ou biologiques ainsi que sur les précautions qui doivent être prises dans le cadre du traitement des vestiges anthropobiologiques, du prélèvement de l'échantillon ainsi que de leur conservation. Sont aussi abordées la problématique de la préservation de la ressource ainsi que de l'optimisation des prélèvements.

1 «Constituent des éléments du patrimoine archéologique tous les vestiges, biens et autres traces de l'existence de l'humanité, y compris le contexte dans lequel ils s'inscrivent, dont la sauvegarde et l'étude, notamment par des fouilles ou des découvertes, permettent de retracer le développement de l'histoire de l'humanité et de sa relation avec l'environnement naturel.» (article L.510-1 du code du patrimoine).

2 «Chacun a droit au respect de son corps. Le corps humain est inviolable. Le corps humain, ses éléments et ses produits ne peuvent faire l'objet d'un droit patrimonial.» (article 16-1 du code civil).  
«Le respect dû au corps humain ne cesse pas avec la mort. Les restes des personnes décédées, y compris les cendres de celles dont le corps a donné lieu à crémation, doivent être traités avec respect, dignité et décence.» (article 16-1-1 du code civil).

## SIX FICHES POUR APPRÉHENDER

### LES ANALYSES SUR L'OS HUMAIN

### ET LES MÉTHODES DE PRÉLÈVEMENT



**Les quatre premières** présentent les typologies d'analyses physico-chimiques ou biologiques pouvant actuellement être menées, leurs apports et leurs spécificités :

- fiche 1: les études paléogénétiques, c'est-à-dire l'étude de l'ADN ancien, portant des marques de dégradation dues aux phénomènes taphonomiques;
- fiche 2: les analyses isotopiques, c'est-à-dire les études intégrant la mesure de ratios ou rapports isotopiques (comptage de la masse des éléments : isotopes lourd/isotope léger) de matériaux bioarchéologiques par spectrométrie de masse. Les principaux éléments dosés sont les isotopes traditionnels (carbone-C, azote-N, soufre-S, oxygène-O), les isotopes radiogéniques du strontium (Sr), les isotopes non-traditionnels (calcium-Ca, fer-Fe, cuivre-Cu, zinc-Zn);
- fiche 3: la cémentochronologie qui est une méthode d'estimation de l'âge au décès reposant sur l'observation microscopique du nombre d'appositions des couches de cément au niveau d'une coupe transversale de la racine d'une dent;
- fiche 4: la datation par le carbone 14 qui est l'analyse de datation absolue la plus utilisée en archéologie.

**La cinquième** aborde la question de l'optimisation des prélèvements en montrant à la fois les possibilités d'utilisations d'une même extraction de collagène et en donnant une hiérarchisation des analyses puisque les méthodes de prélèvements de certaines analyses peuvent interdire ultérieurement l'usage d'un même échantillon ou ossement pour réaliser un autre type d'analyse.

**La sixième** présente les bons gestes à appliquer pour s'assurer d'avoir des prélèvements non pollués et non dégradés par de mauvais gestes et des conditions de mauvaise conservation sur le terrain et sur le long terme.

Ce recueil est à la disposition de tous les acteurs de l'archéologie souhaitant obtenir des éléments de bases concernant les analyses physico-chimiques ou biologiques.

Les fiches ont été rédigées avec le concours des membres du groupe de travail sur la mise en place des protocoles de prélèvements et d'analyses sur l'os humain ainsi que sur la conservation des échantillons (PAOHCE) et des intervenants au séminaire «Les prélèvements et les analyses sur l'os humain ancien : connaître, encadrer, promouvoir la recherche» qui s'est tenu les 23 et 24 juin 2022 à la faculté des sciences médicales et paramédicales de Marseille. Elles ont été présentées au conseil national de la recherche archéologique.



# Les études paléogénétiques

mise à jour : 19 février 2025

## SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>QUELQUES ÉLÉMENTS INTRODUCTIFS SUR LA GÉNÉTIQUE</b>	<b>2</b>
1.1	Une information transmise avec des modifications	
1.2	Une information qui code pour les caractères biologiques observables d'un individu : le phénotype	
1.3	L'épigénétique	
<b>2</b>	<b>ADN ANCIEN : APPLICATIONS</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>SOURCES DE CONTAMINATION ET DE DÉGRADATION DE L'ADN POUVANT IMPACTER LE RÉSULTAT DES ANALYSES</b>	<b>5</b>
3.1	Sources de contamination	
3.2	Dégradation des molécules	

Bibliographie

# 1 QUELQUES ÉLÉMENTS INTRODUCTIFS SUR LA GÉNÉTIQUE

## 1.1 Une information transmise avec des modifications

L'information génétique est transmise de génération en génération et explique l'hérédité de caractères biologiques. Chez tous les êtres vivants (certaines classes de virus exceptées), cette information est codée dans l'ADN<sup>1</sup>, sous forme d'une succession de paires de bases azotées A-T et C-G. À chaque génération, des modifications se produisent, les mutations : par conséquent, chaque génome<sup>2</sup> est unique (sauf chez des jumeaux monozygotes). L'information génétique de deux personnes partageant des ancêtres communs récents est moins différenciée que celles de deux personnes dont les ancêtres communs sont plus éloignés. C'est en utilisant ce principe qu'il est possible de retracer l'apparentement biologique à partir de données génétiques, que cet apparentement soit proche (familial) ou plus éloigné (populationnels), voir distant (au niveau des espèces). Par exemple, le nombre de variants génétiques entre deux humains est de 3 à 5 millions, entre deux sœurs de 1,5 à 2,5 millions, et entre un humain et un chimpanzé de 42 millions.

Chez les êtres humains, l'information génétique est constituée de 3 milliards de paires de bases (pb). 2,8 milliards d'entre elles sont transmises de façon équivalente par les deux parents, les quatre grands-parents, etc., et retracent donc l'histoire populationnelle de l'ensemble des ancêtres. En revanche, le génome mitochondrial<sup>3</sup> (~17 000 pb) et le chromosome Y (57 millions de pb) sont transmis respectivement par la mère et par le père, et permettent donc de retracer des événements ayant touché la lignée maternelle ou paternelle.

Cette information génétique est presque identique dans l'ensemble des tissus de l'organisme et n'évolue pas chez un individu au cours de sa vie. Tous les types de tissu de l'organisme peuvent permettre de la reconstituer, qu'il s'agisse d'un cheveu, de salive, de dents et d'os. En revanche, pour la mise en évidence des pathogènes (bactéries ou virus), il est nécessaire que ce tissu ait été infecté par le pathogène, que ce soit un tissu portant la trace de l'infection (vertèbre modifiée par *M. tuberculosis* par exemple) ou un tissu irrigué par le sang si le pathogène crée une bactériémie.

## 1.2 Une information qui code pour les caractères biologiques observables d'un individu : le phénotype

Au sein du génome se trouvent les gènes (~20 000 chez l'humain), dont l'expression permet le développement et le fonctionnement de l'organisme. Du fait de la variabilité génétique inhérente à chaque génome, l'expression des gènes varie d'un organisme à l'autre, produisant un phénotype unique. Par conséquent, il est tentant de vouloir reconstituer le phénotype d'un individu à partir de son génome.

Par exemple, on peut déduire de la possession d'un chromosome Y, et de son gène SRY fonctionnel que l'individu concerné est de sexe mâle ; la capacité de boire du lait de vache frais à l'âge adulte grâce à une mutation particulière du gène codant pour l'enzyme lactase ; ou la présence du facteur de virulence du gène *ymt* chez *Yersinia pestis*, que la peste est de type bubonique.

Souvent, les gènes agissant de concert, il est nécessaire de connaître la séquence de plusieurs d'entre eux pour en déduire le phénotype (par exemple ceux impliqués dans les caractères de couleur de l'iris des yeux ou des cheveux). Cependant, dans la plupart des cas, le phénotype est issu d'une interaction entre l'information génétique et l'environnement : la connaissance de l'information génétique donnera juste une tendance (ex. couleur de la peau pouvant changer selon que l'individu est exposé au soleil ou non), ou une prédisposition à un phénotype (ex. maladie).

1 **ADN (ADN des pathogènes, ADN du tartre)** : macromolécule biologique, présente chez l'ensemble des êtres vivants et certains virus et portant une information transmise de génération en génération déterminant les caractères physiques de l'individu. L'ADN est constitué d'une succession ordonnée de nucléotides (A, T, C ou G), formant des chromosomes. La séquence ainsi constituée est spécifique d'une espèce voire d'un individu et peut être amenée à évoluer au cours des générations via le processus de mutation.

2 **Génome** : ensemble de l'information génétique d'un organisme présent dans chacune de ses cellules, sous forme d'un ensemble de chromosomes. Chez les mammifères, le génome comprend à la fois le génome nucléaire (présent dans le noyau) et le génome mitochondrial (dans les mitochondries).

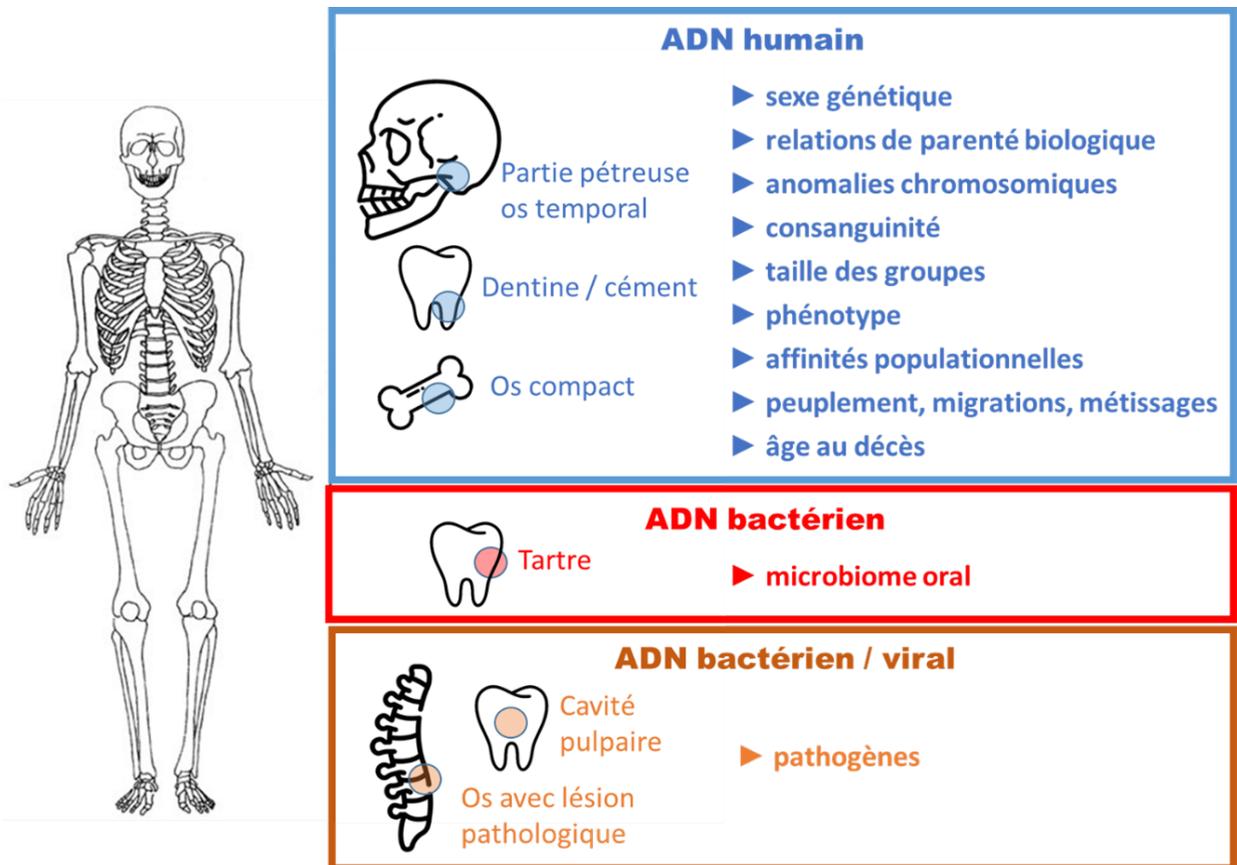
3 **Génome mitochondrial humain (ADNmt)** : le génome mitochondrial humain désigne le matériel génétique des mitochondries, propre à l'espèce humaine. En génétique des populations et en théorie de l'évolution, ce génome est particulièrement étudié, car il permet de remonter des lignées féminines puisqu'il n'est transmis que par la mère.

### 1.3 L'épigénétique

La séquence d'ADN peut porter des modifications biochimiques, qui ne vont pas changer la séquence du génome, mais moduler la façon dont sont exprimés les gènes : c'est l'épigénétique. Ces modifications se produisent au cours du développement des organismes et diffèrent au sein des différentes cellules. Elles sont induites par l'environnement au sens large et changent au cours de la vie, en fonction des comportements, de façon transitoire ou non.

## 2 ADN ANCIEN : APPLICATIONS

Voici quelques exemples, non exhaustifs, d'application des analyses ADN des vestiges anthropobiologiques. Il s'agit d'un aperçu de l'éventail des possibles, voué à évoluer et s'élargir rapidement. Ces applications peuvent être complémentaires ; elles peuvent être obtenues à partir des mêmes séquences ADN et regroupées au sein d'une même étude. De nombreux autres exemples sont disponibles dans l'ouvrage *L'ADN fossile, une machine à remonter le temps* (Orlando 2021) ou dans l'article *Contribution de la paléogénétique à l'archéologie* (Geigl 2021).



Liste des applications de la paléogénétique sur les différents éléments du squelette.

#### > Décompte des chromosomes

Même lorsqu'elles sont obtenues en relativement faible quantité, les données de séquençage ADN peuvent permettre de décompter les différents chromosomes et ainsi de déterminer le sexe génétique des individus, ce qui est particulièrement pertinent pour les individus immatures. Cette approche permet également de détecter des anomalies chromosomiques.

Exemple — Les données de criblage de près de 10 000 individus anciens (générées initialement pour évaluer le degré de préservation de l'ADN), ont été re-analysées pour repérer d'éventuelles anomalies chromosomiques. Ainsi, 6 cas de trisomie 21 et un cas de trisomie 18 ont été identifiés (Rohrlach et al. 2024).

### > Parenté

La mesure de séquences d'ADN partagées par deux individus donne une indication de leur degré d'apparentement biologique. Selon la préservation de l'ADN, l'effort de séquençage et la méthode employée, on peut détecter des apparentements jusqu'au 6e degré, mais généralement les résultats ne sont robustes que jusqu'au second degré (grand-parent/petit enfant ou oncle/niece par exemple).

Exemple — Un vaste arbre généalogique, regroupant plusieurs dizaines d'individus sur sept générations, a pu être reconstitué pour le site de Gurgy (France, nécropole 4850-4500 BC), éclairant certains aspects des pratiques matrimoniales et du fonctionnement social de la communauté néolithique (Rivollat et al. 2023).

### > Consanguinité

En mesurant les portions de chromosomes pour lesquelles les séquences d'origine paternelle et maternelle sont identiques au sein d'un même individu, il est possible d'identifier des cas d'inceste ou de faire le lien avec la démographie (par exemple repérer des groupes qui vivent de manière isolée, ou dater des phénomènes d'expansion démographique).

Exemple — Dans le célèbre site mégalithique de Newgrange (Irlande), un individu daté à 3200 BC, dont les parents étaient frère et sœur (ou parent et enfant) a été mis au jour (Cassidy 2020).

### > Affinités populationnelles, peuplement

La comparaison des séquences d'ADN d'un ou des individus avec celles d'un corpus de référence (une sorte d'atlas génétique d'individus anciens et modernes) (Mallick et al. 2024), permet de quantifier les affinités populationnelles et ainsi de retracer les voies de peuplement des différentes régions du globe et de dater les événements de métissage.

Exemple 1 — L'analyse d'individus du site de Mentesh Tepe (Azerbaïdjan) datant du VIe millénaire avant notre ère a montré que cette population était issue d'un métissage récent entre des descendants des fermiers d'Anatolie et une population du Caucase/Iran, apportant un nouvel éclairage sur le processus de néolithisation dans la région (Guarino-Vignon et al. 2023).

Exemple 2 — L'analyse des génomes de fragments crâniens de Buran Kaya III (Crimée) datés de 37 000 et 36 000 ans BP a mis en évidence le repeuplement de l'Europe à partir du Caucase après une crise environnementale, la glaciation Heinrich 4 et l'éruption volcanique campanienne il y a 40 000 ans, le métissage avec quelques survivants de cette crise environnementale et le début du développement des populations productrices des assemblages gravettiens. Les individus de Buran Kaya III se sont révélés être les premiers ancêtres des Européens actuels (Bennett et al. 2023).

### > Phénotypes

Différentes versions des gènes peuvent être associées à différents caractères de l'individu (son phénotype). On peut ainsi déduire des séquences ADN l'aspect physique (couleur de la peau par ex) ou les caractéristiques physiologiques (capacité à digérer le lait cru par ex) d'une personne, tout en gardant à l'esprit que le lien génotype – phénotype est rarement direct et dépend de nombreux paramètres.

Exemple — L'analyse de l'ADN de «Cheddar man», l'Homme de Cheddar, qui vécut il y a environ 10 000 ans a démontré que celui-ci avait selon toute vraisemblance la peau noire, les cheveux noirs bouclés et les yeux bleus (Brace 2018). Un résultat qui a eu un très fort écho médiatique, notamment auprès du public britannique.

### > Microbiome et pathogènes

Les molécules extraites des vestiges anthropobiologiques comprennent certes de l'ADN humain, en quantités variables, mais également de l'ADN des micro-organismes du sol ou du microbiome humain. Il est ainsi possible d'accéder à l'ADN de bactéries pathogènes ayant infecté l'individu de son vivant.

Exemple — À partir d'extraits de pulpe dentaire d'individus inhumés au XVIIIe siècle dans un cimetière de pestiférés des Hautes-Alpes, le génome complet de *Yersinia pestis* a été reconstitué et comparé aux génomes contemporains obtenus dans d'autres régions d'Europe (Seguin-Orlando et al. 2021).

### > Âge au décès

Au-delà de la séquence des bases azotées (A, C, G et T) il est désormais possible d'accéder aux marques épigénétiques qui influent notamment sur le niveau d'expression des gènes et dépendent de l'identité des cellules, de l'environnement et de l'âge. En particulier, une modification biochimique précise (la

méthylation) de certaines bases azotées est en lien direct avec l'âge. L'obtention de cet âge n'est pas encore faisable en routine, et nécessite des méthodologies particulières.

Exemple — Sur un modèle animal, on peut déterminer l'âge à la mort de chevaux anciens (350 BC à 1650 CE) à  $\pm 1$  an, de même que leur état castré ou non, en examinant le degré de méthylation de l'ADN (Liu et al. 2023).

### > Humanités disparues

Les vestiges anthropobiologiques ne se limitent pas à Homo sapiens: l'ADN d'humanités disparues, Néanderthaliens et Denisoviens, peut également être séquencé.

Exemple — Une analyse ADN a permis d'identifier formellement le fragment distal manquant d'une phalange de Denisova, permettant la reconstitution de cet os et son analyse morphométrique (Bennett et al. 2019).

Outre les os et les dents, des échantillons moins usuels peuvent être analysés, par exemple le tartre dentaire et les coprolithes (pour accéder au microbiome ou au régime alimentaire) peuvent permettre d'obtenir des données concernant le génome humain ou les habitudes alimentaires. En effet, les sédiments ou les artefacts peuvent encore porter des traces d'ADN humain.

Exemple 1 — D'importantes quantités d'ADN de *Penicillium roqueforti* et de *Saccharomyces cerevisiae* ont été identifiées dans des coprolithes de l'âge du Fer, mettant en évidence la consommation de fromage bleu et de bière (Maixner et al. 2021).

Exemple 2 — Un mastic de sève de bouleau, portant des empreintes de dents d'enfant, recelait suffisamment d'ADN pour reconstituer le génome complet de la petite fille qui l'avait mâchonné il y a 5 700 ans (Jensen et al. 2019).

## 3 SOURCES DE CONTAMINATION ET DE DÉGRADATION DE L'ADN POUVANT IMPACTER LE RÉSULTAT DES ANALYSES

(Billard et al. 2022).

### 3.1 Sources de contamination

Source de contamination (niveau de risque)	Description du risque
ADN environnemental	Le sol en contact avec les vestiges contient de nombreux micro-organismes dont l'ADN pénètre dans l'échantillon avant la fouille. Il n'est pas possible sur le terrain d'éviter cette source exogène intrinsèque même en lavant le prélèvement (ce qu'il faut donc absolument éviter)
ADN des fouilleurs (+++)	Tout contact direct avec le vestige (main nue) et indirect (postillons, mucus nasal, sueur, objet ayant été en contact avec la peau) est une source importante de contamination de surface.
ADN de transfert (+)	L'ADN moderne déjà présent sur une surface, table, sachet ou contenant, outil, téléphone, bouteille, appareil photo... peut être transféré involontairement sur les vestiges (contamination indirecte).
ADN des autres vestiges	Le risque de contamination par l'ADN d'un vestige à un autre (contact direct entre les os de 2 individus, utilisation du même outil pour fouiller 2 individus) est relativement faible dans un contexte sec.
Autres contaminants et inhibiteurs (+++)	Tout produit appliqué sur le vestige (colle, vernis, encre...) est susceptible de contaminer les échantillons et/ou d'inhiber les manipulations réalisées au laboratoire. Il faut donc les éviter autant que possible et les documenter si elles sont inévitables.

Pour savoir comment éviter les contaminations, se référer à la fiche 6.

(suite de la fiche en page suivante)

## 3.2 Dégradation des molécules

Recommandations de manipulation et de conservations des différentes pièces anatomiques ou échantillons

Pièce anatomique ou échantillon	Recommandation
Dents	<p>Les dents sont un substrat très intéressant pour les études d'ADN humain (à partir du cément), paléo-microbiologiques (au niveau de la cavité pulpaire ou du tartre), paléo-protéomiques (dentine et tartre) ou isotopiques (émail et dentine).</p> <p>Si les dents sont encore incluses dans la mandibule ou le maxillaire, il est impératif de <b>laisser en place</b> jusqu'au laboratoire d'analyse. Si les dents sont libres, les placer dans un sachet neuf (minigrip ou papier).</p> <p>Il est important de <b>ne pas toucher les dents</b>, ni à main nue (risque de contamination ADN) ni avec des gants (risque de contamination par du Zinc interférant avec certaines analyses isotopiques). On peut utiliser une pince en métal préalablement nettoyée à la javel ou une pince stérile. Si la dent a été touchée, il faut le documenter et le personnel de laboratoire pourra adapter son protocole.</p> <p>Il est important de <b>ne pas nettoyer les dents</b>, et de laisser toute trace de tartre en place. Si un fragment identifiable de tartre se détache de la dent, le placer dans un sachet propre en notant de quelle dent et quelle face de la dent provient le tartre.</p> <p>Conserver la dent à une température stable &lt; 20°C et une humidité relative entre 50 et 60%, en la protégeant des UV surtout si elle n'est pas incluse.</p>
Os pétreux	<p>La densité de la partie entourant la cochlée permet une bonne préservation de l'ADN. Le risque de contamination et de dégradation post-fouille est relativement faible, <b>tant que l'os est maintenu entier</b> et que la cochlée n'est pas exposée. Si le crâne est intact, il convient de le maintenir intact. Si l'os temporal est fragmenté, on peut placer le rocher dans un sachet neuf (minigrip ou papier).</p> <p>Il est préférable de porter des gants pour faire ces manipulations sinon documenter l'information.</p> <p>Conserver la pièce anatomique à une température stable &lt; 20°C et une humidité relative entre 50 et 60%.</p>
Osselets	<p>Des études récentes (Sirak et al., 2020) ont montré que les osselets sont un très bon réservoir à ADN, donnant des résultats comparables à l'os pétreux. Lorsqu'ils sont retrouvés à la fouille, il convient de les placer dans un sachet neuf, <b>sans les laver</b>.</p> <p>Conserver l'osselet à une température stable &lt; 20°C et une humidité relative entre 50 et 60%, en le protégeant des UV.</p>
Lésions pathologiques	<p>Les études de pathogènes anciens (paléo-microbiologie) peuvent être réalisées à partir de lésions osseuses laissant suspecter une infection (tuberculose, lèpre, syphilis...). De même, certains calculs ou autres tissus calcifiés ont pu être utilisés en paléogénétique. Il convient de <b>ne pas laver</b> les échantillons, <b>d'éviter de toucher</b> ces lésions à main nue ou avec des outils non préalablement nettoyés à la javel.</p> <p>Conserver les échantillons à une température stable &lt; 20°C et une humidité relative entre 50 et 60%, en les protégeant des UV.</p>
Coprolithes	<p>Les coprolithes sont une source d'ADN humain et microbien. Il convient de <b>ne pas laver</b> les échantillons, <b>d'éviter de les toucher</b> à main nue ou avec des outils non préalablement nettoyés à la javel.</p> <p>Conserver le coprolithe à une température stable &lt; 20°C et une humidité relative entre 50 et 60%, en le protégeant des UV.</p>
Tissus momifiés, dont cheveux	<p>Les tissus momifiés ont été utilisés avec succès notamment pour des études de paléo-pathogènes (variole par exemple). Les cheveux et poils sont de très bons réservoirs à ADN humain.</p> <p>Les tissus momifiés en milieu très froid (pergélisol, glacier) doivent être <b>maintenus congelés</b> sans rupture de la chaîne du froid.</p> <p>Les tissus momifiés en milieu tempéré ou chaud doivent être maintenus à température stable et surtout en <b>atmosphère sèche</b>. Dans tous les cas il convient d'utiliser des gants pour les manipuler et de les protéger des UV.</p>
Os ou dents brûlés	<p>Les vestiges brûlés contiennent généralement très peu d'ADN exploitable. Toutefois, des protocoles prometteurs sont développés en médecine légale. Par précaution, si la rareté des vestiges ou l'importance du contexte laisse présager que ces pièces osseuses vont être utilisées pour une analyse paléogénétique, il convient de <b>ne pas laver</b> les échantillons, <b>d'éviter de les toucher</b> à main nue ou avec des outils non préalablement nettoyés à la javel.</p> <p>Conserver l'os brûlé à une température stable &lt; 20°C et une humidité relative entre 50 et 60%, en le protégeant des UV.</p>

Pièce anatomique ou échantillon	Recommandation
Sédiment	Les prélèvements de sédiment doivent être réalisés avec des <b>outils nettoyés</b> à la javel, placés dans des <b>contenants stériles de laboratoire</b> (tube eppendorf par exemple) et maintenus au <b>froid</b> (congélateur, ou à défaut réfrigérateur). Ces prélèvements doivent être étudiés rapidement.
Autres pièces osseuses	Les autres pièces osseuses sont moins favorables pour les analyses en paléogénétique. Elles peuvent néanmoins être intéressantes pour des analyses pilotes, ou si ce sont les seuls vestiges disponibles pour représenter certains individus, et sont fréquemment utilisées pour les analyses isotopiques. Si tel est le cas, le prélèvement d'os présentant des zones d'os compact plus dense sont à privilégier.  Si la rareté des vestiges ou l'importance du contexte laisse présager que ces pièces osseuses vont être utilisées pour une analyse paléogénétique, il convient de <b>ne pas laver</b> les échantillons, <b>d'éviter de les toucher</b> à main nue ou avec des outils non préalablement nettoyés à la javel  Conserver le vestige à une température stable < 20°C et une humidité relative entre 50 et 60%, le protéger des UV
Artefacts et matières géologiques	Même si ces cas relèvent encore de l'exception, certains artefacts ou matières géologiques peuvent être des sources atypiques d'ADN ancien (humain ou microbien), comme par exemple les mastics (« chewing-gums ») ou les dépôts de calcite. Ils doivent alors être prélevés et stockés avec les mêmes précautions que les vestiges anthropobiologiques précités. Il est possible que de nouvelles sources atypiques d'ADN ancien soient identifiées dans le futur.

Voir le tableau complet dans Billard et al. 2022, p. 26. ■

## Bibliographie

### Bennett et al. 2019

BENNETT E. A., CREVECOEUR I., VIOLA B. ET AL., « Morphology of the Denisovan phalanx closer to modern humans than to Neanderthals » *Science advances*, 5, 19, 2019, [en ligne](#).

### Bennett et al. 2023

BENNETT E. A., PARASAYAN O., PRAT S. ET AL., « Genome sequences of 36,000 to 37,000 year-old modern humans at Buran-Kaya III in Crimea », *Nature ecology and evolution*, 2023, 7, pp. 2160–2172, [en ligne](#)

### Billard et al. 2022

BILLARD C., BOH I., CHAILLOU A., CHAMBON P., CRIBELLIER C., *Rapport final du groupe de travail sur la mise en place de protocoles de prélèvements et d'analyses sur l'os humain ainsi que sur la conservation des échantillons (PAOHCE)*, [Paris: ministère de la Culture], 2022, [en ligne](#).

### Brace 2018

BRACE S., DIEKMANN Y., BOOTH T. J. ET AL., « Ancient genomes indicate population replacement in Early Neolithic Britain », *Nature ecology and evolution*, 2019, 3, pp. 765-771, [en ligne](#).

### Cassidy 2020

CASSIDY L. M., MAOLDUIN R. Ó., KADOR T. ET AL., « A dynastic elite in monumental Neolithic society », *Nature*, 582, pp. 384-388, [en ligne](#).

### Geigl 2021

GEIGL E.-M., « Contribution de la paléogénétique à l'archéologie », in CARPENTIER C., ARBOGAST R.-M., KUCHLER PH. (dir.), *Bioarchéologie: minimums méthodologiques, référentiels communs et nouvelles approches: actes du 4e séminaire scientifique et technique de l'Inrap (Sélestat, 2019)*, Paris: Inrap, 2021, [en ligne](#).

### Guarino-Vignon et al. 2023

GUARINO-VIGNON P., LEFEUVRE M., CHIMÈNES A. ET AL., « Genome-wide analysis of a collective grave from Mentesh Tepe provides insight into the population structure of early neolithic population in the South Caucasus », *Communicationsbiology*, 6, 319, [en ligne](#).

### Jensen et al. 2019

JENSEN T. Z. T., NIEMANN J., IVERSEN K. H. ET AL., « A 5700 year-old human genome and oral microbiome from chewed birch pitch », *Nature communications*, 10, 1, 5520, [en ligne](#).

### Liu et al. 2023

LIU X., SEGUIN-ORLANDO A., CHAUVEY L. ET AL., « DNA methylation-based profiling of horse archaeological remains for age-at-death and castration », *iScience*, 26, 3, 106144, [en ligne](#).

### Maixner et al. 2021

MAIXNER F., SARHAN M. S., HUANG K. D. ET AL., « Hallstatt miners consumed blue cheese and beer during the Iron Age and retained a non-Westernized gut microbiome until the Baroque period », *Current biology*, 31, 23, pp. 5149-5162, [en ligne](#).

### Mallick et al. 2024

MALLICK S., MICCO A., MAH M. ET AL., « The Allen Ancient DNA Resource (AADR) a curated compendium of ancient human genomes », *Scientific data*, 11, 1, 182, [en ligne](#).

### L. Orlando, 2021

ORLANDO L., *L'ADN fossile, une machine à remonter le temps: les tests ADN en archéologie*, Paris: Odile Jacob, 2021.

### Rivollat et al. 2023

RIVOLLAT M., ROHRLACH A. B., RINGBAUER H. ET AL., « Extensive pedigrees reveal the social organization of a Neolithic community », *Nature*, 620, pp. 600–606, [en ligne](#).

### Rohrlach et al. 2024

ROHRLACH A. B., RIVOLLAT M., DE-MIGUEL-IBÁÑEZ P. ET AL., « Cases of trisomy 21 and trisomy 18 among historic and prehistoric individuals discovered from ancient DNA », *Nature communications*, 15, 1294, [en ligne](#).

**Seguin-Orlando et al. 2021**

SEGUIN-ORLANDO A., COSTEDOAT C., DER SARKISSIAN C. ET AL., « No particular genomic features underpin the dramatic economic consequences of 17th century plague epidemics in Italy », *iScience*, 24, 4, 102383, [en ligne](#).

**Sirak et al. 2020**

SIRAK K., FERNANDES D., CHERONET O. ET AL., « Human auditory ossicles as an alternative optimal source of ancient DNA », *Genome research*, 30, 3, pp. 427-436, [en ligne](#).



# Les analyses isotopiques

mise à jour: 21 janvier 2025

---

## SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>QUELQUES ÉLÉMENTS INTRODUCTIFS SUR LES ANALYSES ISOTOPIQUES</b>	<b>2</b>
1.1	Les marqueurs biogéochimiques	
1.2	Choix des tissus analysés	
<b>2</b>	<b>APPROCHES DES ÉTUDES BIOGÉOCHIMIQUES</b>	<b>3</b>
2.1	Alimentation (approche inter-individuelle)	
2.2	Mobilité (approche inter-individuelle)	
2.3	Modifications au cours de la vie d'un individu (approche intra-individuelle)	

Bibliographie

## 1 QUELQUES ÉLÉMENTS INTRODUCTIFS SUR LES ANALYSES ISOTOPIQUES

Développées depuis une cinquantaine d'années, les analyses isotopiques appliquées à l'archéologie sont encore un domaine en pleine évolution qui apporte de plus en plus d'informations sur les histoires de vie des populations du passé. Elles nécessitent des connaissances en anthropologie-biologie afin de bien comprendre à quelle période de l'histoire de la vie correspond l'échantillon qui doit être prélevé et aussi des connaissances sur la chimie, la physique et la panoplie d'analyses possibles afin de bien identifier le meilleur traceur pour répondre aux questions archéologiques.

Les analyses isotopiques peuvent porter sur l'étude d'une population (approche inter-individuelle) ou un individu en particulier (approche intra-individuelle). Un individu est entendu comme un être humain, une espèce animale ou une espèce végétale vivants ou disparus.

Comme pour la paléogénétique, les analyses isotopiques sont confrontées à des limites liées à la conservation du signal enregistré (c'est-à-dire la préservation de l'intégrité chimique de la matière organique et minérale dans le temps), à l'impact des facteurs environnementaux et physiologiques sur les marqueurs ainsi qu'au choix des tissus (os, émail dentaire...) sur lesquels les analyses sont faites et qui peut parfois entraîner des interprétations complexes.

### 1.1 Les marqueurs biogéochimiques

Les plus utilisés sont les suivants :

- les ratios (ou rapports) isotopiques du carbone, de l'azote, du soufre ou de l'oxygène (maintenant appelés les isotopes « traditionnels ») ;
- le ratio radiogénique du strontium ;
- les éléments traces<sup>1</sup> (en particulier les isotopes stables du calcium, du strontium et du zinc).

Ces marqueurs vont permettre de questionner les milieux de vie et les environnements dans lesquels les humains ont évolué et de répondre à deux questions anthropologiques principales qui sont l'alimentation et la mobilité.

Selon la question posée, l'analyse va sélectionner un élément d'intérêt et un tissu en particulier.

Grace aux progrès de la spectrométrie de masse, il est possible aujourd'hui d'analyser beaucoup de nouveaux systèmes isotopiques. Ce sont des protocoles qui sont encore en développement et pour lesquels la France fait figure de pionnière pour les applications en archéologie (voir infra exemple sur le zinc, on peut également citer le calcium).

Des travaux sur d'autres marqueurs sont en cours de test et certains pourront s'appliquer à l'archéologie. Par exemple, ils pourraient permettre de tracer la cuisson des aliments ou mieux quantifier la consommation de plantes ou de sel ce qui permettrait d'apporter de nouveaux éléments de connaissance dans le domaine de la mobilité des populations et des individus dans le temps.

Concernant les isotopes traditionnels (carbone, azote), il serait possible de ré-utiliser le collagène extrait afin de mesurer la composition isotopique du carbone et de l'azote à l'échelle des acides aminés pris séparément. Ceci apporterait des informations plus précises sur l'alimentation des individus.

### 1.2 Choix des tissus analysés

Les analyses isotopiques portent essentiellement sur les os et les dents (dentine et émail).

La formation des tissus osseux et dentaires répond à des processus de croissance différents. Tandis que l'os est soumis à un renouvellement perpétuel, les signaux enregistrés par la dent sont contemporains de sa période de formation. L'analyse du tissu dentaire est donc privilégiée dans des problématiques relatives à l'enfance (alimentation, mobilité) tandis que l'analyse du collagène osseux est sollicitée pour

<sup>1</sup> **Éléments traces** : éléments chimiques naturels, présent le plus souvent en faibles concentrations (traces) dans l'environnement, dans l'alimentation ingérée par l'individu et dans tous les organismes vivants.

renseigner les dernières années de la vie d'un individu (entre 10-15 ans pour un sujet adulte, en considérant la partie compacte des os longs) (voir tableau ci-dessous).

Pour des problématiques centrées sur l'analyse globale des patrons alimentaires, un tissu par individu est ciblé préférentiellement (le tissu osseux), au sein d'une population, la mieux numériquement représentée pour atteindre des échantillons statistiquement recevables.

En revanche pour traquer des modifications alimentaires au cours de la vie d'un sujet, une approche intra-individuelle est privilégiée. L'analyse peut alors porter sur plusieurs tissus, soit l'os et le tissu dentaire, permettant d'interroger les modifications entre l'enfance et le moment du décès. Il est également possible de cibler l'émail ou la dentine (selon l'élément chimique visé), sur lesquels des analyses séquentielles peuvent être réalisées le long de l'axe de croissance de ces tissus. Toutes les dents peuvent être analysées. Le rang de la dent d'intérêt dépend alors de la période de vie dont on souhaite retracer les modifications isotopiques.

Tissu cible	Signal enregistré	Problématique envisagée	
<b>Os</b>		<b>Analyse inter-individuelle (1 mesure par individu)</b>	<b>Analyse intra-individuelle (plusieurs mesures par individu)</b>
Os compact (fémur, tibia, humérus...)	Signal moyen = dernières années de la vie (env. 15 ans pour un adulte, moins pour un sujet en pleine croissance)	Alimentation/mobilité/ environnement sur une large période de la vie	Suivre l'histoire de vie des individus ( <i>in utero</i> -naissance jusqu'à la mort)
Os spongieux (côtes, épiphyses...)	Signal moyen = durée d'enregistrement plus courte que dans l'os compact; signal plus proche de la mort	Alimentation/mobilité/ environnement sur une période plus brève, mais non déterminable avec précision	
<b>Dent</b>		<b>Analyse individuelle (plusieurs mesures par dent)</b>	
Émail, dentine, cément, dentine secondaire	Croissance et physiologie spécifique à chaque dent et chaque tissu dentaire	Alimentation/mobilité de la naissance à la fin de l'adolescence/début de l'âge adulte. Alimentation maternelle, allaitement, sevrage, impacts physiologiques du stress et de la croissance, détection « d'âges sociaux ».	

Problématiques envisagées pour les analyses isotopiques sur la matière organique (collagène) dentaire et osseuse (C, N, S). Voir le tableau complet dans Billard et al. 2022 : 22.

## 2 APPROCHES DES ÉTUDES BIOGÉOCHIMIQUES

Voici quelques exemples, non exhaustifs, d'applications des analyses isotopiques sur des éléments mis au jour lors d'opérations archéologiques (vestiges anthropobiologiques, faune, flore), en approche inter-individuelle ou intra-individuelle.

### 2.1 Alimentation (approche inter-individuelle)

- > **Identification des changements de pratiques alimentaires (protéines)** dans le temps et l'espace grâce à l'analyse des isotopes du carbone et de l'azote sur le collagène osseux.

Exemple — En contexte insulaire dans le Pacifique, l'analyse des isotopes du carbone et de l'azote a montré que les premières populations arrivées sur une île ont une alimentation centrée à la fois sur des ressources terrestres et des ressources marines alors que les individus les plus récents ont des valeurs distinctes qui indiquent la consommation de ressources presque uniquement terrestres et végétales. De plus, l'existence dans cette partie du monde d'un référentiel bien documenté permet de distinguer la consommation préférentielle de ressources marines qui viennent du large et de celles provenant du bord

de mer. Cette analyse a permis de mettre en évidence une évolution de l'économie de subsistance des groupes humains lors de la colonisation du Pacifique (Herrscher et al. 2018).

### > Variabilité alimentaire et structurations sociales des groupes humains

Exemple — la comparaison de sujets, datés l'âge du Bronze en Grèce, montre des modifications des pratiques funéraires et alimentaires qui ne sont pas complètement synchrones. Alors que la consommation du millet est une pratique nouvelle adoptée par tous les sujets au Bronze récent, la nouvelle pratique d'inhumation en ciste est adoptée par certains sujets tandis que d'autres conservent un mode d'inhumation en *tumuli* typique de la période précédente (Bronze moyen). En associant à cette première comparaison le sexe des sujets, il s'avère que les sujets du Bronze moyen inhumés en *tumuli* ne présentent pas de distinctions entre individus de sexes féminins et masculins à l'inverse des sujets du Bronze récent inhumés en ciste dont les sujets masculins présentent une consommation plus importante de protéines. (Tristsaroli et al. 2019).

### > Futures applications du développement des analyses sur les isotopes du zinc et du calcium

Exemple 1 — Isotopes du zinc: l'analyse des isotopes du zinc réalisée au niveau de l'émail dentaire permet d'obtenir des informations sur la position dans la chaîne alimentaire de l'individu étudié avec plus de précision que via l'analyse des isotopes de l'azote et sans limite de temps puisque l'on s'affranchit de la présence de collagène qui diminue dans le temps. Ce traceur rend possible l'étude des niveaux trophiques en absence de préservation de la matière organique et ouvre des perspectives nouvelles d'analyse d'échantillons vieux de plusieurs millions d'années (McCormack et al. 2022).

Exemple 2 — Isotopes en calcium: à partir d'études de populations dont le régime alimentaire est connu, il a été démontré que plus un individu consomme de produits laitiers, plus les valeurs isotopiques en calcium de ses tissus sont faibles. Ce traceur ouvre de nouvelles perspectives de recherche sur l'étude des grands changements alimentaires liés à l'apparition de la production laitière et des modifications de la durée de l'allaitement maternel (Tacail et al. 2019; 2021).

## 2.2 Mobilité (approche inter-individuelle)

Cette approche a comme limite l'âge des tissus et la nécessité d'avoir des référentiels chimiques selon la zone géographique étudiée pour essayer d'identifier les non locaux mais aussi leur lieu de vie antérieur.

### > Identification du nombre de sujets locaux au sein d'un groupe

Exemple — Dans le cas d'une étude portant sur des sujets inhumés dans le couvent des Dominicains à Rennes, il a été montré que neuf individus présentaient des valeurs plus basses des ratios isotopiques du strontium que celles référencées pour la région Bretagne. Ceci a permis de déduire qu'au moment de la formation des tissus étudiés à la fin de l'enfance/début de l'adolescence, ces sujets ont très certainement vécu dans des endroits plutôt en périphérie de la région (Jaouen et al. 2018; Colleter et al. 2019).

### > Détermination des lieux de vie

Exemple — En combinant plusieurs traceurs (strontium, oxygène et soufre), il est possible générer des cartes de probabilité de provenance des sujets humains ou animaux analysés. En jouant sur l'association de plusieurs proxies (ou marqueurs de provenance), il est possible d'affiner les *scenarii* de provenance (Bataille et al. 2021).

## 2.3 Modifications au cours de la vie d'un individu (approche intra-individuelle)

En combinant à la fois plusieurs dents et un os, il est possible de restituer ce qui s'est passé des périodes *in utero* jusqu'au décès d'un individu. Ces analyses permettent aussi de discuter des processus physiologiques.

Exemple 1 — À partir d'une série de dents d'individus des périodes néolithique et protohistorique en Ligurie, l'analyse des ratios isotopiques de l'azote a permis de mettre en évidence deux modèles isotopiques témoignant de deux stratégies de sevrage qui permettent de conclure sur la présence de deux

économies préhistoriques différentes. En ce qui concerne les isotopes du carbone, il est possible de déterminer qu'à l'âge de 8 ans, les individus de l'âge du Fer commençaient à consommer du millet, contrairement aux individus du Néolithique. Sur les individus néolithiques, il a été possible de mettre en évidence un impact physiologique sur l'assimilation des protéines, très certainement en rapport avec le statut de tuberculeux de l'individu (Goude et al.2020).

Exemple 2 — Grâce à la capacité de l'émail dentaire à capturer des signaux chimiques pendant sa formation, il est possible de reconstituer des événements de la vie de l'individu qui se sont passés pendant l'enfance, voire pendant la grossesse de la mère, si ces analyses portent sur des dents de lait. L'analyse isotopique du strontium permet aussi la mise en évidence des déplacements de l'individu et les éléments traces vont, quant à eux, donner des informations sur l'écologie ou l'alimentation de l'individu (Rey et al. 2022). ■

## Bibliographie

### Bataille et al. 2021

BATAILLE C. P., JAOUEN K., MILANO S. ET AL., « Triple sulfur-oxygen-strontium isotopes probabilistic geographic assignment of archaeological remains using a novel sulfur isoscape of western Europe », *PLoS One*, 16, 5, [en ligne](#).

### Billard et al. 2022

BILLARD C., BOH I., CHAILLOU A. ET AL., *Rapport final du groupe de travail sur la mise en place de protocoles de prélèvements et d'analyses sur l'os humain ainsi que sur la conservation des échantillons (PAOHCE)*, [Paris: ministère de la Culture], 2022, [en ligne](#).

### Colleter et al. 2019

COLLETER R., CLAVEL B., PIETRZAK A. ET AL., « Social status in late medieval and early modern Brittany: insights from stable isotope analysis », *Archaeological and anthropological sciences*, 11, pp. 823-837, [en ligne](#).

### Goude et al. 2020

GOUDE G., DORI I., SPARACELLO V. ET AL., « Multi-proxy stable isotope analyses of dentine microsections reveal diachronic changes in life history adaptations, mobility, and tuberculosis-induced wasting in prehistoric Liguria (Finale Ligure, Italy, northwestern Mediterranean) », *International journal of palaeopathology*, 28, pp. 99-111, [en ligne](#).

### Herrscher, Goude 2015

HERRSCHER E., GOUDE G., « Biogéochimie isotopique et anthropologie biologique: reconstitution des modes de vie du passé », in BALASSE M., BRUGAL J.-P., DAUPHIN Y. ET AL. (dir.), *Message d'os: archéométrie du squelette animal et humain*, Paris: GMPCA, 2015, pp. 259-275, « coll. Sciences archéologiques », [en ligne](#).

### Herrscher et al. 2018

HERRSCHER E., FENNER J.-N., VALENTIN F. ET AL., « Multi-isotopic analysis of first Polynesian diet (Talasiu, Tongatapu, Kingdom of Tonga) », *Journal of archaeological science: reports*, 18, pp. 308-317, [en ligne](#).

### Jaouen et al. 2015

JAOUEN K., VERNA C., BALTER V., « Géochimie élémentaire et isotopique des métaux en anthropologie et archéozoologie. », in BALASSE M., BRUGAL J.-P., DAUPHIN Y. ET AL. (dir.), *Message d'os: archéométrie du squelette animal et humain*, Paris: GMPCA, 2015, pp. 413-427, « coll. Sciences archéologiques », [en ligne](#).

### Jaouen et al. 2018

JAOUEN K., COLLETER R., PIETRZAK A. ET AL., « Tracing intensive fish and meat consumption using Zn isotope ratios: evidence from a historical Breton population (Rennes, France) », *Scientific reports*, 8, 1, 5077, [en ligne](#).

### McCormack et al. 2022

MCCORMACK J., GRIFFITHS M. L., KIM S. L. ET AL., « Trophic position of *Otodus megalodon* and great white sharks through time revealed by zinc isotopes », *Nature communications*, 13, 1, 2980, [en ligne](#).

### Rey et al. 2022

REY L., TACAÏL T., SANTOS F. ET AL., « Disentangling diagenetic and biogenic trace elements and Sr radiogenic isotopes in fossil dental enamel using laser ablation analysis », *Chemical geology*, 587, 120608, [en ligne](#).

### Tacail et al. 2019

TACAÏL T., MARTIN J. E., ARNAUD-GODET F. ET AL., « Calcium isotopic patterns in enamel reflect different nursing behaviors among South African early hominins », *Science advances*, 5, 8, [en ligne](#).

### Tacail et al. 2021

TACAÏL T., MARTIN J. E., HERRSCHER E. ET AL., « Quantifying the evolution of animal dairy intake in humans using calcium isotopes », *Quaternary science reviews*, 256, 106843, [en ligne](#).

### Tristsaroli et al. 2019

TRITSAROLI P., HERRSCHER E., KOULIDOU S. ET AL., « Changements alimentaires et culturels en Macédoine à l'âge du Bronze récent (1700/1600-1200/1100 BCE, Grèce) », *Bulletins et mémoires de la société d'Anthropologie de Paris*, 31.





# La cémentochronologie

## Estimation de l'âge au décès

mise à jour: 19 février 2025

---

### SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>PRINCIPE</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>PRÉLÈVEMENT REQUIS</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>AVANTAGES</b>	<b>3</b>
<b>5</b>	<b>PRÉCAUTIONS</b>	<b>4</b>

Bibliographie

## 1 INTRODUCTION

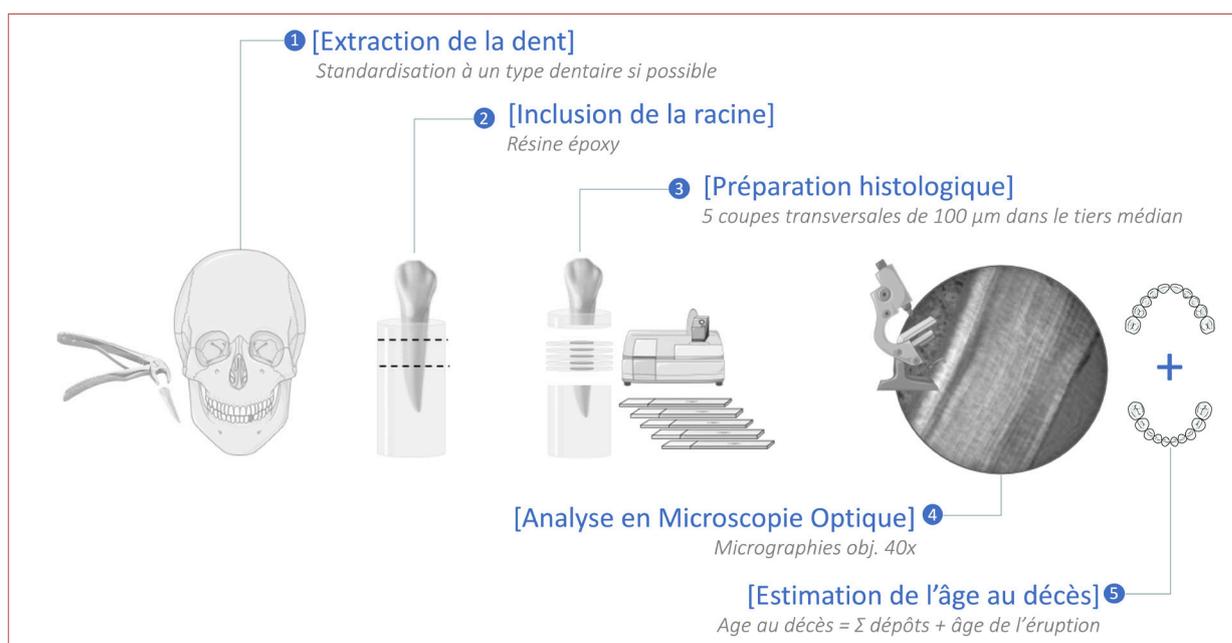
En anthropologie, l'estimation de l'âge au décès est un élément central de la construction du profil biologique.

Pour estimer l'âge de sujets adultes, il existe un panel de méthodes qui traditionnellement se concentrent sur quatre régions principales : la symphyse pubienne, la surface auriculaire de l'ilium, l'extrémité sternale des côtes et les sutures exocrâniennes. Mais le caractère subjectif de l'examen et la variabilité des processus dégénératifs ou de maturation osseuse conduisent à des estimations dont l'imprécision est unanimement reconnue. De plus, ces indicateurs osseux sont fréquemment mal préservés. Ces limitations ont conduit à l'élaboration d'une méthode histologique basée sur un tissu dentaire, plus résistant que le tissu osseux, et fondée sur l'analyse de structures périodiques dans le ciment<sup>1</sup> : la cémento-chronologie.

## 2 PRINCIPE

La cémento-chronologie repose sur le principe d'un enregistrement périodique dans le tissu [figure]. L'apposition de ciment qui débute à l'édification de la racine et perdure jusqu'au décès du sujet offre un accès direct à un indicateur corrélé à l'âge chronologique.

Le dénombrement des dépôts annuels de ciment, caractérisés en microscopie optique par des alternances d'anneaux sombres et de zones claires, ajouté à l'âge de l'édification radiculaire de la dent considérée permet d'évaluer l'âge du sujet.



Chaîne opératoire d'une étude cémento-chronologique

Le ciment se définit comme une matrice extracellulaire composée de fibrilles collagéniques minéralisées, de collagène, de glycosaminoglycanes, de protéoglycanes, d'ostéopontine, de sialoprotéine osseuse et d'hydroxyapatite. Le ciment contient deux types de fibres qui entrent dans la classification du tissu (Jones, 1981) : les fibres extrinsèques correspondant aux extrémités des fibres de Sharpey et sécrétées par les fibroblastes et en partie par les cémentoblastes ; les fibres intrinsèques qui sont propres au ciment et sécrétées par les cémentoblastes.

1 **Cément** : tissu conjonctif minéralisé recouvrant la dentine au niveau de la racine des dents.

La classification admise intègre la nature des fibres collagéniques ainsi que la présence de cémentocytes et distingue différents types de ciments (Schroeder 1986). Trois principaux types sont discernables :

- le ciment acellulaire à fibres extrinsèques (CAFE) qui est le ciment acellulaire typique (qui contient des fibres extrinsèques en abondance mais aucun cémentocyte) ;
- le ciment cellulaire à fibres intrinsèques (CCFI) (qui contient des fibres intrinsèques et des cémentocytes) ;
- le ciment cellulaire mixte stratifié (CCMS) (qui correspond au ciment cellulaire classique).

Tous sont caractérisés par une structure incrémentale mais leurs développements et leurs fonctions sont spécifiques. Des connaissances histologiques sont donc requises et seul le CAFE doit être examiné, car il présente un taux de croissance constant durant toute son apposition.

### 3 PRÉLÈVEMENT REQUIS

Les étapes de sélection et de préparation des dents sont déterminantes pour la fiabilité des estimations et doivent faire l'objet d'une attention particulière.

L'analyse requiert la préparation de coupes transversales de 100 µm d'épaisseur. La dent prélevée (si possible non perdue *ante mortem* et de préférence une dent monoradiculée) n'est pas déminéralisée et est incluse dans une résine (résine Époxy ou, plus rarement, de méthacrylate de méthyle) avant d'être sectionnée à l'aide d'une tronçonneuse de précision. En considérant le nombre de coupes réalisées (en général cinq coupes) et l'épaisseur de la lame utilisée (en général 300 µm), environ 2 mm de la hauteur de la racine sont donc prélevés dans le tiers médian. Les coupes transversales sont fixées dans un milieu de montage (résine Époxy, résine composée d'acrylique et de xylène ou baume du Canada). Certains milieux de montage sont réversibles.

NB : des alternatives à ce protocole reposent sur la déminéralisation de l'organe, l'inclusion dans un bloc de paraffine, et la coloration histologique des préparations minces (<10 µm). Néanmoins, en contexte archéologique, la mauvaise préservation des composés organiques conduit souvent à l'échec de ce protocole.

### 4 AVANTAGES

La cémento-chronologie représente un apport non négligeable pour les études anthropologiques, notamment si elle est combinée à d'autres méthodes pour conforter une estimation ou resserrer un intervalle. L'inexactitude de l'estimation de l'âge est très réduite puisqu'elle est d'environ - 4,5 ans (pour les sujets de moins de 60 ans, l'exactitude est excellente, l'inexactitude augmente pour les sujets de plus de 60 ans, avec des erreurs allant d'environ -5 à -8 ans) (Bertrand 2019; Bertrand et al. 2019).

La cémento-chronologie représente sans doute la méthode la plus précise pour estimer un âge au décès et ses performances sont appréciées dans de nombreuses publications (Pinto et al. 2022).

Le tissu cémentaire est très résistant aux agents taphonomiques. La cémento-chronologie est donc **adaptée à l'examen de sujets dont l'état est très altéré et peut être employée lors de l'étude de sépultures à incinération** (Gocha, Schutkowski 2012; Oliveira-Santos et al. 2017). Dans des cas extrêmes, l'examen de dépôts de ciment même incomplets peut permettre l'estimation d'un âge minimum qui, dans le cas de sujets fortement dégradés, peut représenter l'unique donnée exploitable.

La racine est incluse dans la résine (irréversible), mais les parties inutilisées de la racine (tiers cervical et tiers apical) restent à disposition et peuvent être prélevées pour d'autres analyses. Suivant le protocole adopté, la couronne peut ne pas être incluse et reste disponible pour des études ultérieures.

Puisque les analyses histologiques portent sur la surface radiculaire, une analyse cémento-chronologique peut être compatible avec des dents préalablement ponctionnées pour une analyse de l'ADN pulpaire ou pour un dosage des rapports isotopiques. Le protocole peut alors s'adapter au fragment radiculaire préservé.

## 5 PRÉCAUTIONS

La cémento-chronologie, comme toute autre méthode, se caractérise par des limitations en termes d'efficacité et d'applicabilité.

La principale limitation concerne sa nature invasive (seul le rayonnement synchrotron permet l'exploration non invasive, mais cette technologie reste difficile d'accès et des avancées sont attendues pour atteindre la précision d'une estimation par l'histologie conventionnelle).

La cémento-chronologie est une discipline en développement et certaines applications relèvent de la recherche. Leur application au registre archéologique est prématurée. La cémento-chronologie ne permet pas chez l'homme la détermination fiable de la saisonnalité du décès (Bertrand et al. 2024) ni la détermination d'évènements physiologiques et/ou pathologiques survenus au cours de la vie d'un individu.

Ces applications restent à valider sur du matériel de référence. ■

## Bibliographie

### Bertrand 2019

BERTRAND B., « Cémento-chronologie : précision et exactitude de l'estimation de l'âge au décès : influence de la taphonomie », *Bulletins et mémoires de la société d'Anthropologie de Paris*, 31, pp. 189-198.

### Bertrand et al. 2019

BERTRAND B., CUNHA E., BÉCART A. ET AL., « Age at death estimation by cementochronology: too precise to be true or too precise to be accurate? », *American journal of physical anthropology*, 169, 3, pp. 464–481, [en ligne](#).

### Bertrand et al. 2024

BERTRAND B., KADDOURA A., CUNHA E. ET AL., « The off-season of dental cementum investigations: a critical appraisal of season-of-death prediction in medico-legal investigations », *Archives of legal medicine*, sous-presse, l'épreuve corrigée est [en ligne](#).

### Gocha, Schutkowski 2012

GOCHA T. P., SCHUTKOWSKI H., « Tooth cementum annulation for estimation of age-at-death in thermally altered remains », *Journal of forensic sciences*, 58, issue s1, pp. s151-s155, [en ligne](#).

### Jones 1981

JONES S. J., « Cement », in OSBORN J. W. (ed.), *Dental anatomy and embryology*, Oxford/Boston: Blackwell scientific publications, pp. 193–205.

### Oliveira-Santos et al. 2017

OLIVEIRA-SANTOS I., GOUVEIA M. M., CUNHA E. ET AL., « The circles of life: age at death estimation in burnt teeth through tooth cementum annulations », *International journal of legal medicine*, 131, 2, pp. 527–536, [en ligne](#).

### Pinto et al. 2022

PINTO P. H. V., FARES L. C., SILVA R. H. A. DA, « Dental age estimation by cementum incremental lines counting: a systematic review and meta-analysis », *Forensic science international*, 341, 111492, [en ligne](#).

### Schroeder 1986

SCHROEDER H. E., *Handbook of microscopic anatomy*, vol. 5, *The Periodontium*, Berlin/New-York: Springer.



# La datation par le carbone 14 (ou radiocarbone) des ossements

mise à jour: 19 février 2025

---

## SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>PRINCIPE DE LA MÉTHODE</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>RÉSULTAT D'UNE MESURE DE LA TENEUR EN RADIOCARBONE</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>LES OS FOSSILES DATABLES PAR LE CARBONE</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>IDENTIFICATION D'UN OS DATABLE</b>	<b>3</b>
<b>5</b>	<b>CAS PARTICULIER DE L'INFLUENCE D'UN RÉGIME ALIMENTAIRE À BASE DE RESSOURCES AQUATIQUES SUR LES DATATIONS DES OSSEMENTS</b>	<b>3</b>

Bibliographie

## 1 PRINCIPE DE LA MÉTHODE

Le carbone 14 ( $^{14}\text{C}$  ou C14) est un atome radioactif produit naturellement dans la haute atmosphère par réaction de neutrons sur l'azote de l'air ( $^{14}\text{N}$ ). Il s'oxyde rapidement en gaz carbonique ( $^{14}\text{CO}_2$ ) et se mélange à celui de l'air. Il entre alors dans le cycle naturel du carbone marquant ainsi tous les êtres vivants qui assimilent directement ou indirectement le gaz carbonique de l'atmosphère, comme les végétaux, les animaux (terrestres et marins) ou les humains.

Le carbone 14 étant radioactif, il se désintègre spontanément pour redonner un atome d'azote. La production de  $^{14}\text{C}$  et sa disparition par désintégration s'équilibrent, conférant une radioactivité naturelle au gaz carbonique de l'atmosphère.

Les organismes vivants intègrent du carbone 14 tout au long de leur vie et présentent la même radioactivité que le gaz carbonique de l'atmosphère. À la mort de l'organisme, la fixation du radiocarbone cesse, puisqu'il n'est plus renouvelé, et sa concentration dans les matières carbonées diminue avec le temps à raison de la moitié tous les 5 568 ans. Connaissant la loi physique de la décroissance de la radioactivité qui régit cette disparition progressive, il est possible, en mesurant le taux résiduel de carbone 14 dans un échantillon et en le comparant à l'activité du carbone moderne, d'en déduire le temps écoulé depuis la mort de l'organisme.

## 2 RÉSULTAT D'UNE MESURE DE LA TENEUR EN RADIOCARBONE

L'activité en  $^{14}\text{C}$  mesurée est corrigée par le fractionnement isotopique du carbone 13 de l'échantillon quelle que soit la méthode de mesure utilisée. L'activité carbone 14 est normalisée à une même teneur en carbone 13 car, sans cette correction isotopique, il ne serait pas possible de comparer entre eux des âges obtenus sur des matériaux différents.

Les âges  $^{14}\text{C}$  sont exprimés en années BP (Before Present, avant l'année de référence 1950, année zéro du carbone 14) avec une marge d'erreur (1 sigma).

Cette date BP ne correspond pas aux années solaires de notre calendrier. Une courbe de correction (calibration) permet de convertir le résultat en un intervalle de temps en années réelles.

Cet intervalle de temps est exprimé en :

- av. J.-C. ou av.è.c. [avant l'ère commune] / ap. J.-C. ou è.c.
- en anglais, cal. BC ou BCE / cal AD ou CE.

Il est plus ou moins étendu selon la précision de la mesure et la séquence de la courbe de calibration considérée, dans laquelle l'âge de l'échantillon daté a 95 chances sur 100 de se trouver. La dernière courbe de calibration publiée, Intcal 20, permet de corriger les datations radiocarbones jusqu'à 50 000 ans.

## 3 LES OS FOSSILES DATABLES PAR LE CARBONE

Les os fossiles peuvent se présenter sous trois formes :

### > L'os « sain »

La structure primitive peut être bien conservée si le contexte géologique n'est ni trop acide, ni trop lessivé. Les parties les plus dures où la matière organique (i.e. le collagène) est en général bien conservée sont à privilégier pour faire des analyses sur le carbone 14. Les parties spongieuses sont à proscrire.

La masse à prélever pour une datation dépend de la conservation du collagène (voir infra). Il faut en général entre 1 et 5 grammes d'os pour une datation.

### > L'os brûlé

Chauffé à des températures relativement basses (200-300 °C), il a été pyrolysé par le feu et contient des matières grasses et des protéines carbonisées. La matrice intérieure est noire d'aspect charbonneux. Il est traité comme un charbon « fragile ». La quantité requise est de 1 à 3 grammes.

### > L'os calciné

Chauffé à des températures supérieures à 600 °C, il ne contient plus de matériau carbonisé. Il est blanc, parfois bleuté, en surface comme à l'intérieur et fait un bruit de caillou lorsqu'on le laisse tomber sur une

table. Il n'y a plus du tout de collagène. La crémation entraîne des modifications de la bioapatite<sup>1</sup> qui rend l'os calciné très résistant à l'égard de l'altération. Cette propriété va être utilisée pour le dater par la méthode du radiocarbone. La quantité nécessaire est de 5 grammes environ.

**Attention: dans les milieux tempérés, la datation de la bioapatite n'est valable que pour les os calcinés.** La datation de la bioapatite des os « sains » dépourvus de collagène n'est absolument pas fiable.

## 4 IDENTIFICATION D'UN OS DATABLE

La datation des os brûlés et des os calcinés ne pose en général pas de problème. Le seul risque qui existe pour un os brûlé est de ne pas résister au prétraitement qui lui est appliqué.

La datation d'un os « sain » sera faite sur le collagène. Le traitement des os à dater entraînant leur destruction, il est préférable de déterminer si la datation est faisable ou non, en estimant l'état de conservation du collagène, afin d'éviter de détruire inutilement l'échantillon.

- > **Le dosage des quantités d'azote (N) et de carbone**, réalisé sur 4 milligrammes d'os environ, permet de vérifier si le collagène est conservé ou non. L'azote provient uniquement de la partie organique de l'os et principalement du collagène. L'état de conservation du collagène reste satisfaisant jusqu'à des teneurs en azote de ca. 0,5%. Les ossements dont les teneurs en azote sont inférieures à cette limite sont éliminés. Quant au dosage du carbone, il permet de détecter la présence éventuelle de contaminations carbonées (carbonatation secondaire, acides humiques...) et d'adapter la préparation. L'impact d'une pollution récente influe nettement sur la datation d'un collagène mal conservé.
- > **Le rendement total en collagène** est aussi un indicateur important de l'état de conservation de l'os ou de la dent et de leur pertinence pour la datation. Le rendement est exprimé en milligrammes de collagène obtenus par gramme d'échantillon d'os traité. Si le rendement est inférieur à 1%, il n'est pas conseillé de poursuivre la datation car le collagène est mal préservé. Si dans certaines circonstances (pas d'autre choix possible pas exemple) la datation est effectuée sur un échantillon dont le rendement est mauvais, la date ne peut être considérée que comme un terminus ante quem.
- > **La composition en azote et en carbone du collagène** constitue un autre critère de son intégrité géochimique. Un collagène contenant moins de 8% de carbone et 3% d'azote est chimiquement et isotopiquement altéré.
- > **Les rapports C/N atomiques** compris entre 2,9 et 3,6 assurent l'intégrité isotopique du collagène extrait. En dehors de ces valeurs, le collagène est considéré altéré ou contaminé et la fiabilité de la datation, mauvaise.

Les données analytiques décrites ci-dessus permettent de sélectionner les échantillons d'os, de choisir et d'adapter le prétraitement à appliquer et d'évaluer la qualité du collagène. Elles servent aussi à émettre d'éventuelles réserves quant à la fiabilité de la date.

## 5 CAS PARTICULIER DE L'INFLUENCE D'UN RÉGIME ALIMENTAIRE À BASE DE RESSOURCES AQUATIQUES SUR LES DATATIONS DES OSSEMENTS

Le collagène enregistre les signatures isotopiques de la nourriture assimilée pendant les dernières années de la vie de l'individu. L'alimentation à base de ressources aquatiques va avoir une influence sur les datations obtenues: **elles seront vieillies à cause de l'effet « réservoir » de l'eau de mer ou de l'eau douce.**

Lorsque l'on date un organisme aquatique et une plante terrestre, strictement contemporains, la datation du premier donnera une date nettement plus ancienne que celle de la plante: la différence entre les deux datations est due à l'effet réservoir de l'eau. Il est actuellement de  $500 \pm 60$  ans pour l'eau de mer.

1 **Bioapatite (correspondance française: hydroxyapatite ou hydroxylapatite):** phosphate de calcium, composant principal de la fraction minérale des tissus squelettiques (os, émail, dentine). Sur cette fraction, sont dosés la majorité des éléments d'intérêts en bioarchéologie, à l'exception de l'azote et du soufre.

Ce qui explique le vieillissement de la datation d'un individu qui aura eu un régime alimentaire plutôt basé sur des ressources marines.

Pour les eaux continentales, cet effet réservoir est très variable car différent pour chaque point d'eau (mare, lac, rivière...).

Pour corriger les datations, il faudrait estimer la part de l'alimentation d'origine marine et calibrer les datations avec une courbe de calibration mixte terrestre/marine. Ce qui peut être délicat si l'effet réservoir local n'est pas connu. Dans le cas d'une alimentation d'origine aquatique continentale, il faudrait estimer le vieillissement de la datation sur l'os en datant un échantillon d'origine végétale strictement contemporain. ■

## Bibliographie

### **Oberlin et al. 2015**

OBERLIN C., VALLADAS H., « Datation par le radiocarbone de la fraction organique de l'os », in BALASSE M., BRUGAL J.-P., DAUPHIN Y. ET AL. (dir.), *Message d'os: archéométrie du squelette animal et humain*, Paris: GMPCA, 2015, pp. 287-306, « coll. Sciences archéologiques ».



# Optimisation et hiérarchisation des prélèvements

mise à jour: 19 février 2025

Les méthodes actuelles permettant d'obtenir des informations très complémentaires autour de restes osseux sont multiples: datation (radiocarbone), identification d'espèces et évolution (Zoom's<sup>1</sup>, paléogénomique, paléoépigénétique), migration (analyses isotopiques, paléogénomique), histoire de vie et pathologies (paléogénomique, paléomicrobiologie, paléohistologie, analyses isotopiques), alimentation (microrestes, protéomique et métagénomique du tartre dentaire, analyses isotopiques) ou encore histologie (étude de la structure interne de l'os, cémentochronologie).

Si elles se multiplient, ces analyses, considérées séparément, s'avèrent heureusement de moins en moins consommatrices de vestiges anthropobiologiques.

Toutefois, il est important de préserver la ressource par une mutualisation des prélèvements ou des préparations (collagène ou autres produits intermédiaires) et de penser la localisation des prélèvements dans une logique de réutilisation de la pièce osseuse pour d'autres types d'analyses. Par exemple, si un prélèvement pour une analyse ADN est fait en plein milieu d'une racine de dent, celle-ci ne pourra plus être utilisée pour faire de la cémentochronologie.

Il est donc important que le chercheur à l'origine de la demande d'analyse puisse en amont échanger avec les différents laboratoires choisis pour faire les analyses afin de voir comment il est possible de mutualiser et hiérarchiser les prélèvements.

De même, **il est indispensable que les vestiges anthropobiologiques non totalement détruits dans le cadre d'une analyse physico-chimique ou biologique soient restitués à l'État pour qu'ils puissent être réexploités par la suite.** La multiplication récente des méthodes d'analyse des restes humains amène à penser que de nouvelles approches seront envisageables dans les années à venir. Il sera alors nécessaire d'avoir de la matière pour pouvoir répondre aux sollicitations d'analyses. Il pourrait de même être judicieux de mettre en place des conventions de dépôt entre l'État et les laboratoires en ce qui concerne la conservation des produits intermédiaires non exploités ou des lames minces générées, si l'État n'a pas la possibilité de les conserver dans de bonnes conditions. Ces produits intermédiaires, résidus ou lames minces pourraient être ainsi disponibles pour de nouvelles analyses ou études.

À défaut de pouvoir préserver toute la ressource, il serait important de documenter systématiquement non seulement l'acte de prélèvement mais aussi assurer, en amont, un archivage du matériel prélevé par l'intermédiaire de scans 2D et 3D, de photographies ou de moulages.

---

1 **Zoom's**: méthode d'analyse récente qui permet, à partir d'éléments squelettiques non-diagnostiques, d'identifier la famille (genre ou espèce) à laquelle ils appartiennent. Cette technique repose sur l'analyse par spectrométrie de masse des séquences peptidiques présentes dans la protéine de collagène. Moins chère qu'une analyse ADN, son utilisation tend à se développer en bioarchéologie.

En ce qui concerne la mutualisation d'une préparation, il est par exemple possible, une fois le collagène d'un os extrait pour une analyse radiocarbène, d'utiliser cet extrait pour d'autres analyses isotopiques ou protéomiques. Ainsi, un seul prélèvement est à même de fournir un maximum d'informations. Le tableau 1 (voir le tableau complet dans Billard et al. 2022: 19) illustre les méthodes qui peuvent être combinées lors de l'analyse de l'extraction de collagène de 500 mg à 1 g d'os.

Méthode	But de l'analyse	Avantage	Inconvénient	Partie échantillonnée	Quantité de collagène échantillonné	Quantité d'os (dépend de sa préservation)
Radiocarbène	Dater directement l'échantillon	Datation directe, méthode très fiable possible aussi sur os brûlés	Coûteuse et file d'attente	Collagène d'un os ou d'une dent ou sur fraction minérale de l'os en cas d'os brûlé	3mg	100mg-1g
Isotopes du carbone et de l'azote du collagène dans son ensemble	Alimentation	Rapide, peu cher	Nécessité d'analyser des herbivores et carnivores associés	Collagène d'un os ou d'une dent	0.5 à 1mg	100mg-500mg
Isotopes du carbone et de l'azote des acides aminés	Données très précises sur l'alimentation	Informations très précises sur le niveau trophique, besoin de peu de spécimens	Analyse difficile et coûteuse, encore peu de recul	Collagène d'un os ou d'une dent	3 mg	100mg-1g
Isotopes du soufre	Mobilité/ consommation de poisson	Peu chère en commercial, récents développements pour l'utiliser comme un bon traceur de provenance	Difficile à mettre en place	Collagène d'un os ou d'une dent	8 mg	300mg-1g
Zoom's	Identification phylogénique	Rapide, peu cher	Ne peut pas toujours aller au niveau de l'espèce	Collagène d'un os ou d'une dent	le sac ou le fond de tube qui a contenu l'échantillon	< 100mg

[tabl. 1] Méthodes isotopiques et biochimiques pouvant être combinées lors de l'extraction de collagène d'un os ou d'une dent.

Dans la même logique d'optimisation, des travaux de combinaisons de protocoles sont en cours pour les analyses isotopiques sur l'émail dentaire [tabl. 2]. Chaque typologie d'analyse demande encore un prélèvement séparé, mais des recherches sont menées actuellement pour combiner les protocoles et séparer différents éléments à partir du même extrait d'émail dentaire.

En ce qui concerne la préservation de la ressource, la majorité de ces analyses exploitent de la matière obtenue par ablation laser qui n'entraîne ainsi qu'une destruction minimale de la dent et n'impacte pas la réalisation d'autres types d'analyse futures (ADN ou cémentochronologie).

Type d'analyse	But de l'analyse	Avantage	Inconvénient	Partie échantillonnée	Quantité échantillonnée
Isotopes du zinc	Alimentation/ allaitement	Moins sensible que d'autres traceurs à la mobilité, bonnes informations sur le niveau trophique et l'allaitement	Sensible aux pollutions dans le laboratoire	émail	entre 2 et 20 mg selon l'espèce
d <sup>66</sup> Zn					
Isotopes du carbone	Écologie	Traceur très bien connu, peut distinguer les folivores des pâturiers dans certains environnements	Peut être impacté par la diagenèse	émail	0.4 à 8 mg selon le laboratoire
d <sup>13</sup> C					

Type d'analyse	But de l'analyse	Avantage	Inconvénient	Partie échantillonnée	Quantité échantillonnée
Isotopes de l'oxygène d <sup>18</sup> O	Climat, mobilité, reconstruction de température, saisonnalité	Traceur très bien connu	Plus compliqué à mettre en œuvre si l'on veut s'affranchir du risque de diagénèse	émail	0.4 à 8 mg selon le laboratoire
Isotopes du calcium d <sup>44</sup> Ca	Alimentation/écologie/allaitement	Nécessite de très petites quantités d'émail pour l'analyse	Sensible à la mobilité	émail ou os	1 mg <
Isotopes du strontium stable d <sup>88</sup> Sr	Alimentation/écologie	Peut être purifié et analysé en même temps que le strontium radiogénique	En cours de développement/peu de recul	émail	entre 2 et 20 mg selon l'espèce
Isotopes du strontium radiogénique <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	Mobilité	Peut être purifié et analysé en même temps que le strontium stable	Permet rarement de conclure sur la provenance exacte	émail	entre 4 et 20 mg selon l'espèce
Isotopes du magnésium d <sup>25</sup> Mg	Alimentation ?	Semble fournir des informations complémentaires au Ca et Zn	Sensible à la mobilité	émail	1 mg
Rapports d'éléments traces (Sr/Ca, Ba/Ca)	Alimentation	Facile à analyser, pas de séparation chimique	Ne sépare pas toujours bien les groupes alimentaires	émail	1 mg <

[tabl. 2] Analyses isotopiques et élémentaires pouvant être réalisées dans l'émail dentaire (voir le tableau complet dans Billard et al. 2022 : 20).

De façon similaire, les analyses paléogénétiques sont, elles aussi, de moins en moins demandeuses en vestiges anthropobiologiques puisque l'amélioration des protocoles rend aujourd'hui possible les extractions à partir de 10-40 mg de matériel. Par ailleurs, même si les parties pétreuses des os temporaux demeurent les pièces osseuses privilégiées pour étudier l'ADN génomique, de plus en plus d'analyses paléogénétiques sont effectuées sur des substrats atypiques, comme le tartre dentaire ou les sédiments [tabl. 3]. ■

Objectif de l'analyse	ADN ciblé	Partie échantillonnée	Quantité de matériel nécessaire
Détermination du sexe biologique	ADN génomique	os (par ex. pétreux) ou racine de dent	10-100 mg
Détermination de relations de parenté	ADN génomique	os (par ex. pétreux) ou racine de dent	10-100 mg
Génétique des populations	ADN génomique	os (par ex. pétreux) ou racine de dent	10-100 mg
Haplogroupes mitochondriaux	ADN mitochondrial	os (par ex. pétreux) ou racine de dent	10-100 mg
Haplogroupes Y	ADN génomique	os (par ex. pétreux) ou racine de dent	10-100 mg
Pathogènes	ADN microbien	Cavité pulpaire de dent ou partie osseuse présentant des lésions ou à proximité	10-100 mg
Détermination du phénotype	ADN génomique	os (par ex. pétreux) ou racine de dent	10-100 mg
Microbiome buccal	ADN microbien	Tartre ou tissu spécifique	1-100 mg
Restes alimentaires	ADN eucaryote	Tartre, ou tissu spécifique	1-100 mg

[tabl. 3] Analyses génétiques pouvant être réalisée en fonction de la qualité des données (Billard et al. 2022 : 21).

## Bibliographie

### **Billard et al. 2022**

BILLARD C., BOH I., CHAILLOU A. ET AL., *Rapport final du groupe de travail sur la mise en place de protocoles de prélèvements et d'analyses sur l'os humain ainsi que sur la conservation des échantillons (PAOHCE)*, [Paris: ministère de la Culture], 2022, [en ligne](#).



# Les bons gestes à adopter pour optimiser la qualité des prélèvements

mise à jour : 21 janvier 2025

---

## SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>LES BONS GESTES LORS DE L'OPÉRATION</b>	<b>2</b>
1.1	Fouille et prélèvement sur le terrain	
1.2	Conservation sur le terrain des ossements isolés et des prélèvements	
1.3	Post-fouille et études anthropologiques ultérieures	
1.4	Prélèvement des échantillons	
1.5	Conservation pérenne des ossements isolés pour analyses futures	

<b>2</b>	<b>IMPACTS DES OUTILS ET PRODUITS UTILISÉS SUR L'INTÉGRITÉ DE L'ADN</b>	<b>5</b>
----------	---	----------

Bibliographie

Pour que les analyses physico-chimiques ou biologiques puissent apporter les meilleurs résultats possibles, il est indispensable de suivre quelques règles permettant d'éviter la pollution des échantillons transmis pour analyse ainsi que leur dégradation dans le temps.

Ces règles doivent obligatoirement être suivies dans le cadre d'analyses paléogénétiques mais pourraient être mises en œuvre en routine afin d'anticiper de futures analyses de quelque nature qu'elles soient.

En effet le protocole de prélèvement et de conservation d'ossements et de dents destinés à l'analyse paléogénétique cherche à minimiser autant que possible la contamination du spécimen par l'ADN actuel (fouilleur, analyseur) qui est omniprésent (sueur, peau, cheveux, tout objet en contact avec des êtres humains), ainsi que la dégradation de l'ADN (Geigl 2021)<sup>1</sup>.

### A minima

- > Fouiller et prélever les vestiges anthropobiologiques avec un masque ainsi que des gants et des instruments décontaminés
- > Conditionner les ossements destinés aux analyses et les prélèvements dans des sacs plastiques type minigrip ou des sacs en papier neufs
- > Conserver les ossements destinés aux analyses et les prélèvements dans un endroit à climat stable et plutôt frais et sec
- > **Ôter la terre mécaniquement mais ne pas laver les ossements et prélèvements destinés aux analyses**

## 1 LES BONS GESTES LORS DE L'OPÉRATION

Les précautions générales à prendre sont à but conservatoire, pour éviter la contamination des vestiges anthropobiologiques et garantir leur identification. Dans le cas où le cahier des charges scientifique de l'opération préventive ou la demande d'autorisation de l'opération programmée prévoient des prélèvements en vue d'analyses prévues en amont, notamment les prélèvements d'ADN, l'archéo-anthropologue, le responsable d'opération ou le titulaire de l'autorisation doit se rapprocher du laboratoire qui effectuera ces analyses pour adapter au mieux le protocole de prélèvement et éviter les risques de contamination.

Lorsque des analyses sur les vestiges anthropobiologiques ne sont pas prévues dans le cadre de l'opération archéologique, il serait judicieux de mettre de côté des ossements ayant été prélevés selon les modalités précisées ci-après afin de permettre des analyses futures dans les meilleures conditions possibles. Les ossements ciblés sont préférentiellement les éléments du blocs crânio-facial (os pétreux et dents **encore incluses**), pièces pathologiques et au moins un os long. Il pourrait aussi être envisageable de mettre de côté des coprolithes ainsi que des échantillons de sédiments prélevés par exemple à l'emplacement des tissus mous (organes systèmes digestifs, cerveau...).

Les mêmes préconisations pourraient être faites concernant les vestiges de faune et, le cas échéant, les restes de flore.

### 1.1 Fouille et prélèvement sur le terrain

D'une manière générale :

- > **Éviter les températures extrêmes** au moment de la fouille (protéger du soleil la zone en cours de fouille).

<sup>1</sup> Pour ce qui concerne la collecte, le traitement et la conservation des vestiges anthropobiologiques hors problématique d'analyses physico-chimiques ou biologiques se référer à la fiche n°10 du recueil des fiches méthodologiques mis en place par le ministère de la culture et disponible [en ligne](#).

- > **Porter un masque et utiliser a minima des gants non poudrés<sup>2</sup> neufs** à changer à chaque sépulture. Dans le cas d'analyse paléogénétique [figure], utiliser des gants et des instruments à usage unique décontaminés (essuyage à l'eau de javel, rinçage à l'eau ultrapure puis séchage). Les contaminations invisibles étant plus difficiles à éliminer que les contaminations visibles (poils, cheveux), le port de la charlotte n'est pas obligatoire, même s'il reste recommandé.



Prélèvement d'ossements au moment de l'opération en vue d'une analyse paléogénétique.

- > **Supprimer au maximum le sédiment** entourant les ossements isolés afin de permettre des analyses futures tant qu'il est humide puisque **ces ossements ne sont pas destinés à être lavés pour éviter les contaminations**.
- > **Photographier le vestige** en situation avant prélèvement.
- > **Mettre les prélèvements** destinés au laboratoire d'analyse et/ou les ossements isolés pour analyses futures dans des sachets plastique type minigrip ou papier neufs et individuels afin d'éviter les contaminations entre individus. Laisser le sachet plastique entrouvert pour éviter la condensation, les moisissures et aider au séchage lent.
- > **Inclure dans le sachet une étiquette** (idéalement imputrescible type styron) portant les informations de l'opération, du contexte et du vestige les plus complètes possibles; étiquette elle-même placée dans un sachet plastique neuf pour éviter toute contamination du prélèvement ou de l'ossement isolé. Noter les mêmes informations sur le sachet contenant le prélèvement ou l'ossement.
- > **Notifier clairement** sur les étiquettes et les sachets: « **ne pas laver** ».
- > **Attention** : si des prélèvements sont réalisés avec des outils de type micro-scie (dremel, scie circulaire...), la poudre générée pose un fort risque de contaminer un autre échantillon, et l'outil est également contaminant s'il n'est pas correctement nettoyé. Ce type de manipulation ne doit pas être réalisé sur le terrain (sauf cas très spécifiques par du personnel formé) mais dans un laboratoire dédié à l'ADN ancien.
- > **Si prélèvement idéal impossible**: minimiser autant que possible la manipulation des ossements et dents avec les mains nues ou avec des gants non-javellisés et avec les instruments qui n'ont pas été nettoyés à l'eau de javel et, SURTOUT, ne pas laver les vestiges !

2 La poudre présentes sur certains gants dits « poudrés » est un inhibiteur de PCR qui peut rendre impossible les réactions biochimiques effectués sur l'échantillon. Les gants dits « poudrés » ne doivent pas être utilisés.

## 1.2 Conservation sur le terrain des ossements isolés et des prélèvements

La dégradation de l'ADN est accélérée par la température élevée, l'humidité et les variations de température (Pruvost et al. 2008). Par conséquent, si les spécimens ne sont pas tout de suite transmis au laboratoire de paléogénétique, leur conservation doit se faire dans un sac minigrip entrouvert (à moins que l'os soit parfaitement sec) ou un sac en papier à un endroit frais et sec et dont la température varie peu.

## 1.3 Post-fouille et études anthropologiques ultérieures

Lors des études anthropologiques, les ossements, isolés afin de permettre des analyses futures, doivent obligatoirement être manipulés avec un masque, des gants non poudrés neufs ou décontaminés (essuyage à l'eau de javel, rinçage à l'eau ultrapure puis séchage) entre chaque ossement et des outils également décontaminés entre chaque ossement.

Les ossements doivent être déposés sur une table qui aura été nettoyée au préalable avec un papier essuie-tout imbibé de javel ou placés sur du papier aluminium neuf. Cette opération de nettoyage doit être réalisée à chaque changement d'individu, il faut agir de même en changeant de papier aluminium à chaque fois.

Lorsqu'un point de collage est nécessaire, veiller à ne pas utiliser des produits de conservation-restauration pouvant entraver des analyses physico-chimiques et biologiques. Toutefois dans le cas d'un remontage temporaire des pièces pour étude, le collage peut être fait avec un ruban adhésif repositionnable qui doit être retiré le plus rapidement possible afin d'éviter la migration de l'adhésif vers l'os.

La fiche de conservation (squelette éclaté) des individus et des ossements conservés doit être complétée en indiquant la caractérisation de l'état de la matière osseuse, les ossements ayant fait l'objet d'analyses (destructrices ou non) et ceux ayant été isolés pour permettre des analyses futures

## 1.4 Prélèvement des échantillons

### > Prélèvement des os temporaux

Ces prélèvements sont effectués de préférence dans le laboratoire paléogénétique.

Si cela n'est pas possible, l'os pétreux peut être prélevé à l'intérieur du crâne à l'aide d'un burin et d'un marteau à l'endroit où l'os spongieux est localisé. La partie pétreuse tombe alors dans le crâne et peut être récupérée. L'os pétreux est alors conservé dans un sac en plastique propre et entrouvert (à moins qu'il soit totalement sec) ou dans un sac en papier fermé.

Alternativement, bien que moins adapté à l'analyse de l'ADN ancien, certains paléogénéticiens prélèvent la poudre d'os dans l'os pétreux en place avec une perceuse. Cette procédure n'est pas idéale car elle induit un échauffement de la surface de l'os au moment du perçage ce qui peut dégrader l'ADN.

Techniquement plus difficile, mais mieux pour la préservation de l'ADN est un micro-carottage.

### > Prélèvement des dents

Idéalement, les dents sont prélevées des mâchoires/mandibules en mettant des gants javellisés/stériles et en les retirant prudemment de la mâchoire.

Il est préférable que cet isolement soit effectué en laboratoire confiné de paléogénétique, et donc de transmettre la mandibule/maxillaire entière ou fragmentaire en précisant la dent à prélever.

## 1.5 Conservation pérenne des ossements isolés pour analyses futures

Si les vestiges anthropobiologiques peuvent être conservés dans la même réserve que les matériaux peu sensibles, il serait important de pouvoir **conserver les ossements isolés pour analyses futures dans une atmosphère de conservation à température stable < 20°C, et dont l'humidité relative se situe entre 50 et 60%**. Il s'agit idéalement de la réserve dite « humide » dans laquelle sont conservés les matériaux organiques secs ou traités, le verre altéré, les matériaux peu sensibles restaurés (apports d'adhésifs, consolidants, comblements...) et les autres matériaux sensibles par leur nature ou leur état de conservation.

Il est dans ce cas important de conserver le lien entre les différents contenants d'une même sépulture et de bien indiquer dans l'inventaire de gestion du lieu de conservation le fait que les ossements de la sépulture sont conservés dans deux espaces différents.

## 2 IMPACTS DES OUTILS ET PRODUITS UTILISÉS SUR L'INTÉGRITÉ DE L'ADN

	Contact direct	Contact indirect	Conséquences
Paraloïd B72 ou Primal ou Acryl 33 (acryliques)	●		Peut former des complexes avec l'ADN ce qui le rendrait susceptible d'affecter sa purification
Cyclododécane	●		Inerte vis-à-vis de l'ADN mais pourrait modifier sa purification
Acétone ou alcool éthylique	●		Risque d'introduction de contaminants dans l'os
Bombe polyuréthane expansé (éventuellement)		●	Non connue
Plâtre ou bandes plâtrées		●	Non connue
Eau	●		À éviter car peut : – solubiliser l'ADN lié au minéral de l'os – contaminer l'os avec de l'ADN exogène
Gaze, tarlatane, papier Japon de faible grammage	●		Aucune si neuf
Papier d'essuyage	●		Aucune si neuf
Film étirable, film aluminium	●		Aucune si neuf
Coton	●		Aucune si neuf
Ruban adhésif		●	Risque de migration de la colle dans l'os
Pinceaux	●		Transfert de matières si non stérile
Brosses	●		Transfert de matières si non stérile
Petit outillage de fouille	●		Transfert de matières si non stérile
Bâtonnets en bois	●		Usage unique
Poires - soufflettes		●	Non connue
Vaporisateur		●	À éviter (car introduction de contaminants possible)
Petite pelle à poussière en plastique		●	Transfert de matières si non stérile
Plaques métalliques et/ou en bois rigides		●	Pas de problème si l'ossement a été emballé dans un sac minigrip ou sac en papier non-utilisé auparavant
Matériau d'emballage souple (boudins d'air, boudins de chips, papier bulle et mousse)		●	Pas de problème si l'ossement a été emballé dans un sac minigrip ou sac en papier non-utilisé auparavant
Minigrip/sac en papier	●		Aucune si neuf
Caisses (larges et plates; larges et profondes; une caisse en bois matelassée de petit format)		●	Pas de problème si l'ossement a été emballé dans un sac minigrip ou sac en papier neuf
Petites boîtes éventuellement		●	Pas de problèmes à conditions que l'ossement a été emballé dans un sac minigrip ou sac en papier neuf
Étiquettes Styron, tyvek ou polyester		●	Étiquette rigide à insérer dans un sachet minigrip neuf avant son insertion dans le sachet contenant les VAB correspondant pour éviter la migration des composants volatiles de l'encre.

Ce tableau n'est pas exhaustif mais liste les outils et produits les plus couramment utilisés lors d'une opération archéologique (Billard et al. 2022). ■

## Bibliographie sélective

### Billard et al. 2022

BILLARD C., BOH I., CHAILLOU A. ET AL., *Rapport final du groupe de travail sur la mise en place de protocoles de prélèvements et d'analyses sur l'os humain ainsi que sur la conservation des échantillons (PAOHCE)*, [Paris: ministère de la Culture], 2022, [en ligne](#).

### Geigl 2021

GEIGL E.-M., « Contribution de la paléogénétique à l'archéologie », in CARPENTIER C., ARBOGAST R.-M., KUCHLER PH. (dir.), *Bioarchéologie : minimums méthodologiques, référentiels communs et nouvelles approches* : actes du 4e séminaire scientifique et technique de l'Inrap (Sélestat, 2019), Paris: Inrap, 2021, [en ligne](#).

### Pruvost et al. 2008

PRUVOST M., SCHWARZ R., BESSA CORREIA V. ET AL., « DNA diagenesis and palaeogenetic analysis: critical assessment and methodological progress », *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 266, 3-4, pp. 211-219, [en ligne](#).



**Ministère de la Culture, direction générale des patrimoines et de l'architecture**  
Service du patrimoine  
Sous-direction de l'archéologie  
182 rue Sain-Honoré  
75001 Paris