



**HAL**  
open science

# De l'os brûlé en contexte archéologique à l'identification médico-légale : apports méthodologiques

Anaïs Du Fayet de la Tour

## ► To cite this version:

Anaïs Du Fayet de la Tour. De l'os brûlé en contexte archéologique à l'identification médico-légale : apports méthodologiques. Anthropologie biologique. Université de Bordeaux, 2023. Français. NNT : 2023BORD0243 . tel-04397613

**HAL Id: tel-04397613**

**<https://theses.hal.science/tel-04397613>**

Submitted on 16 Jan 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE PRÉSENTÉE  
POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE

**L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET ENVIRONNEMENTS

SPÉCIALITÉ : ANTHROPOLOGIE BIOLOGIQUE

Par Anaïs DU FAYET DE LA TOUR

---

**De l'os brûlé en contexte archéologique à  
l'identification médico-légale : apports  
méthodologiques.**

---

Sous la direction de : Christine COUTURE  
Et la codirection de : François PARAF

Soutenue le 9 octobre 2023

Membres du jury :

M. TELMON, Norbert, PU-PH, Université Paul Sabatier de Toulouse,  
Mme. CATTANEO Cristina, Professeur, Università degli Stundi di Milano  
M. MARTRILLE, Laurent, MCU-PH, CHU de Montpellier  
Mme COUTURE Christine, Professeure des Universités, Université de Bordeaux  
M. PARAF François, PU-PH, CHU de Limoges  
M. ROTTIER, Stéphane, Maître de conférence, Université de Bordeaux  
M. DUDAY, Henri, Directeur de recherche émérite, Université de Bordeaux

Président  
Rapporteur  
Rapporteur  
Directrice de thèse  
Co-directeur de thèse  
Examineur  
Membre invité



## **De l'os brûlé en contexte archéologique à l'identification médico-légale : apports méthodologiques.**

Mots clés : Anthropologie médico-légale, Détermination ostéologique, Archéologie, Crémation, Identification, Os brûlés.

### **Résumé**

Dans les sociétés anciennes ou modernes, le feu et la mort sont souvent associés. Le feu peut être lié à la cause ou au mécanisme du décès (contexte accidentel, suicidaire, criminel), il est aussi au centre de nombreuses pratiques funéraires ou rituels de purifications post-mortem.

Son action destructrice est souvent mise en avant, cependant il existe un fait essentiel : le feu ne fait pas disparaître un corps ! Même dans les cas de carbonisations extrêmes, il persiste toujours des fragments osseux. Lorsqu'une autopsie classique n'est plus envisageable, toute l'attention doit se porter sur l'analyse de ces fragments persistants.

Au cours du processus de combustion, l'os est le siège de multiples transformations, qui rendent son analyse complexe. Malgré une littérature riche à ce sujet, il n'existe pas en France de réel consensus méthodologique permettant d'aborder la question des corps carbonisés en contexte médico-légal.

Nous constatons une certaine négligence à l'égard des restes brûlés et fragmentés. Les enquêteurs rarement formés à ce type de découverte, ne savent pas comment les aborder et les médecins légistes, parfois sont aussi démunis. Les levées de squelettes sont négligées et seuls les fragments de grandes dimensions, paraissant les plus « nobles » sont prélevés pour l'analyse.

L'objectif principal de cette étude est de replacer le fragment osseux au centre de l'analyse. Nous souhaitons montrer l'absence de corrélation entre la taille d'un fragment et la quantité d'informations qu'il porte. Par conséquent, un prélèvement exhaustif sur le terrain est indispensable pour une analyse fiable.

Nous avons choisi de travailler sur un échantillon d'origine archéologique. Ce choix était motivé par la disponibilité d'un large échantillon de données homogènes et fiables. Il permettait également de s'affranchir des contraintes éthiques et juridiques inhérentes à toute étude sur les restes humains. Après s'être assuré de la comparabilité du matériel, nous avons inclus les données correspondant à 263 structures funéraires ou assemblages osseux ayant livré des restes humains brûlés. Ces données provenaient de la fouille et de l'analyse de trois nécropoles d'époque romaine en Italie (Porta Nocera à Pompéi, Porta Mediana à Cumes et Santa Rosa au Vatican) ainsi que le tophet de Salammbô à Carthage (Tunisie).

Nous avons pris en compte dans cette analyse 277509 fragments d'os brûlés pour une masse totale de 258022,9 g.

La question de l'identification a été traitée dans sa globalité, depuis la détermination anatomique des fragments osseux, jusqu'à l'identification biologique de l'individu. Nous avons également intégré une dimension spatiale à l'analyse des données, afin d'évaluer la plus-value d'un enregistrement sur le terrain.

Nous avons ainsi pu mettre en évidence une série de fragments d'intérêts, à analyser préférentiellement, pour répondre à diverses questions telles que le dénombrement des individus, ou la mise en évidence des principaux critères d'identification biologique.

Les fragments porteurs de la plus grande quantité d'informations, contrairement à ce que l'on aurait pu attendre, ne sont pas les plus volumineux ou ceux ramassés par les enquêteurs de manière générale.

Par ailleurs, nous avons démontré l'importance d'un enregistrement exhaustif des données dès le terrain. L'analyse spatiale et la recherche des liaisons anatomiques permettent une meilleure compréhension des faits et de leur chronologie. Cette dimension est capitale en médecine légale particulièrement en contexte criminel, dans l'analyse de scènes à cadavres multiples ou les tentatives de dissimulation par dissémination.

Enfin, à partir de l'ensemble des résultats obtenus, nous avons généré deux fiches méthodologiques simplifiées, destinées aux enquêteurs et aux médecins légistes pour donner un cadre au prélèvement, à l'enregistrement des données sur le terrain et à l'analyse des os brûlés.

## **From burned bone to forensic identification: methodological contributions.**

Key words: burned bones; osteological determination; forensic anthropology; archaeology; identification; cremation.

### **Abstract**

In both ancient and modern societies, fire and death are often associated. Fire can be linked to the cause or mechanism of death (accidental, suicidal, criminal...) and is also at the center of many burial rituals. Its destructive action is often emphasized, but the essential point is that fire does not totally make a body disappear! Even in cases of extreme charring, bone fragments remain. When a traditional autopsy is no longer an option, all attention must be paid to examining these surviving fragments.

Burnt bone undergoes a series of changes during combustion and is therefore difficult to analyze. Despite a vast bibliography on the subject, in France, no methodological consensus has been reached yet on the question of how to deal with charred bodies in a forensic context.

The burnt and fragmented remains are often overlooked. Investigators, rarely trained in this type of finding, don't know how to deal with them, and medical examiners are sometimes just as clueless. The scene recovery is often neglected, and only the largest and most "valuable" fragments are removed for analysis.

The main purpose of this study is to focus the analysis back on the bone fragment. We want to show that there is no correlation between the size of a fragment and the amount of information it provides and that exhaustive sampling over the scene is essential for reliable analysis.

We decided to work on an archaeological sample (bone fragments and raw data from anthropological analysis). This choice was motivated by the availability of a large sample of consistent, reliable data, and allowed us to free ourselves from the ethical and legal restrictions associated with all research on human remains. After ensuring the comparability of material, we included data corresponding to 263 burial structures or bone assemblages that yielded burnt human remains. These data came from the excavation and analysis of three Roman-period necropolises in Italy (Porta Nocera in Pompeii, Porta Mediana in Cumae, and Santa Rosa in the Vatican), as well as the Salammbô Tophet in Carthage, (Tunisia).

In this analysis, we have included a total of 277509 burnt bone fragments with a total mass of 258022.9 g.

The identification issue was treated in its entirety, from the anatomical determination of bone fragments to the biological identification of the individual. We also incorporated a spatial dimension into the data analysis, to assess the benefits of field recording.

In this way, we have highlighted a series of fragments of interest, to be preferentially analyzed, to answer various questions such as determining the minimum number of individuals or highlighting the main biological identification criteria.

Unlike expected, the fragments providing the greatest amount of information are not the largest or generally collected by the investigators.

We have also demonstrated the value of exhaustive field data recording and anatomical linkage research, for a better understanding of events and their chronology. This is an essential dimension of forensic science, particularly in the criminal context, when dealing with multi-corpse scenes or crime concealment by dispersal.

Finally, using all the results obtained, we have generated two simplified methodological worksheets, intended for investigators and medical examiners, to provide a framework for the recovery, field data recording, and analysis of burnt bones.



*« J'ai appris que la voie du progrès n'était ni rapide ni facile »*  
Marie Curie

---

## *Remerciements*

---

Je suis heureuse de pouvoir exprimer ici mes remerciements à toutes celles et ceux sans qui cette thèse et ces dernières années n'auraient pas été les mêmes. D'avance, merci et pardon à tous ceux que j'oublie au moment d'écrire ces lignes, mais qui ont pourtant participé à cette réalisation !

Avant toute chose, je souhaite remercier Mme Cristina Cattaneo et M. Laurent Martrille d'avoir accepté d'examiner ce manuscrit en tant que rapporteurs ainsi que les membres du jury m'ayant fait l'honneur de juger ce travail : M. Norbert Telmon, M. Stéphane Rottier, et M. Henri Duday. Je vous remercie pour le temps que vous avez accepté de consacrer à mon travail.

En premier lieu j'aimerais grandement remercier Henri Duday sans qui cette thèse n'aurait jamais pu voir le jour.

Au tout début mon internat en médecine légale, je me suis rendu compte assez rapidement des difficultés que nous avons pour aborder les corps carbonisés : les restes osseux fragmentés étaient négligés, parfois même ils n'étaient pas ramassés.

C'est quelques temps plus tard, en discutant avec toi, Henri, que l'idée de ce sujet mêlant l'archéo-anthropologie et la médecine-légale est née. Deux disciplines pas si éloignées finalement : une enquête, la reconstitution de faits, de gestes, à partir d'indices, de preuves...

L'archéologie du geste, c'est notamment une des problématiques majeures sur laquelle tu travailles à Pompéi avec William Van Andringa, à partir de la fouille et l'étude d'une nécropole d'époque romaine...à crémation ! La boucle est bouclée, on en revient aux corps carbonisés !

C'est lors d'un premier voyage à Pompéi avec Christine Couture que la problématique de cette thèse est construite. Redonner toute leur importance aux fragments d'os brûlés, prouver qu'avec une méthodologie solide ces petits fragments peuvent livrer une quantité considérable d'informations.

Merci Henri, de m'avoir permis de travailler sur ce fabuleux corpus de données, tes notes, tes dossiers, sont une mine d'informations exceptionnelles.

Merci de m'avoir enseigné avec patience l'art de la détermination anatomique des fragments d'os brûlés.

Merci de m'avoir transmis ta rigueur scientifique.

Merci de m'avoir fait découvrir des sites exceptionnels.

Merci de m'avoir inspiré et appris pendant toutes ces années.

Enfin, et surtout merci pour ces heures de discussions passionnantes et de réflexions autour de la méthodologie, l'archéologie mais aussi la poésie et la cuisine !

Une immense gratitude va à ma directrice de thèse.

Christine, je ne pourrais jamais assez te remercier pour ton encadrement dans ce travail. Tu as toujours été attentive, disponible malgré tes lourdes charges de travail.

Tu m'as apporté ton appui, ton expérience, tes compétences et toujours avec gentillesse et bienveillance.

J'ai pris un immense plaisir à travailler avec toi, découvrir tes qualités humaines d'écoute et ton soutien sans faille dans ce travail.

Merci pour toutes les heures de discussions méthodologiques, de relectures, de réunion zoom. J'ai énormément appris à tes côtés.

Je tiens également à remercier François Paraf qui a accepté de co-diriger cette thèse. Merci de m'avoir accueilli au sein de votre équipe depuis mes premières années d'externat, de m'avoir enseigné et fait confiance tout au long de ces années. Merci de votre soutien au cours de ces quatre années de thèse et de m'avoir offert la possibilité « matérielle » de terminer cette dernière année dans les meilleures conditions. Je suis très reconnaissante pour l'ensemble de vos conseils, vos qualités pédagogiques et scientifiques.

Je tiens à remercier William Banks, et Priscilla Bayle, à la direction de l'UMR 5199, PACEA, pour m'avoir accueillie au sein de votre institution. J'associe mes remerciements à l'École doctorale Sciences et Environnements de Bordeaux, et en particulier à Brigitte Bordes pour sa disponibilité et sa gentillesse.

Je souhaite remercier également l'université de Limoges de m'avoir permis de bénéficier d'une allocation de recherche afin de me consacrer une année entière à la réalisation de cette thèse. Un grand merci en particulier à M. le Professeur Robert, Doyen de l'Université, pour son soutien et ses encouragements.

Je souhaite adresser mes remerciements à l'ensemble des membres de mon comité de suivi de thèse : Gérald Quatrehomme, Stéphane Rottier et Henri Duday. Vos commentaires et discussions autour des différents axes de ma thèse ont beaucoup apporté à ce travail.

Je désire vivement remercier Frédéric Santos pour toute son aide au cours de cette thèse. Frédéric, tu as su m'aider à affronter la « masse » de données à analyser ! Merci d'avoir rendu l'utilisation de « R » presque compréhensible ! Merci pour ta patience, ta gentillesse et tout ton travail sur cette thèse !!! Sans toi j'aurais pu finir noyée sous les bases de données.

Je souhaite grandement remercier William Van Andringa de m'avoir accueillie au sein de son équipe à Porta Nocera à Pompéi. William, un grand merci pour ton accueil chaleureux, merci pour ces discussions passionnantes autour de la reconstitution du geste, qui rapprochent tellement nos deux disciplines. Je souhaite également remercier toute l'équipe de Porta Nocera, et en particulier Émilie, Paloma, Sandra, Anselme, Letizia, Aude, Jean Patrick, François, Kevin, Eliza, Flore, Marion, Sophie, Phillipe, Laudine merci pour tous ces excellents moments et ces soirées inoubliables !

Je souhaite tout particulièrement remercier François Fouriaux, pour son aide dans la simplification des méthodes d'enregistrement des données sur le terrain, merci François d'avoir su t'adapter aux contraintes matérielles, et surtout merci pour ta gentillesse, ta disponibilité et ta réactivité.

Je souhaite également remercier Imed Ben Jerbania de m'avoir permis de participer à plusieurs sessions d'étude du Tophet de Salammbô. Merci à toi et toute l'équipe pour ces séjours inoubliables en Tunisie. Merci en particulier à Victoria et Nesrine pour leur contribution à cet échantillon de données. Et un grand merci à Tarek pour son aide précieuse dans la discrimination humain / animal.

Un immense merci à Émilie Portat ! Émilie, merci de m'avoir transmis tes connaissances et ton expérience des sujets immatures brûlés. Merci de t'extasier avec moi devant ces fragments « miniatures ». Merci Émilie, pour ces discussions passionnantes mais aussi et surtout, comme il n'y a pas que le travail dans la vie, merci pour tous ces bons moments et ces fous rires !

Je souhaite également remercier l'ensemble du service de médecine légale et du service mortuaire du CHU de Limoges et tout particulièrement mes collègues : Fanny, Sylvine, Charline, Sarah, Marc, Hugo et Coco. Merci à tous pour votre soutien.

Fanny, depuis le début de mon externat j'ai énormément appris à tes côtés, merci pour ton soutien sans faille et tes encouragements, tes conseils avisés, et merci d'avoir été là pour moi dans les moments compliqués !

Merci aussi à mes deux internes Pierre et Maxime de m'avoir supporté au cours de cette dernière année intense.

Un grand merci également à tous les TICs de la Haute-Vienne, de la Corrèze, et de la Creuse, merci aux ASPTS et TPTS ainsi qu'à tous les enquêteurs avec qui j'ai eu l'honneur de travailler.

Un merci particulier à Martial pour ton aide et nos discussions méthodologiques.

Ce manuscrit a vu le jour grâce à de nombreuses relectures, corrections orthographiques et typographiques. À toutes celles et ceux qui y ont consacré du temps et des efforts dans des délais parfois très courts, je souhaite vous remercier du fond du cœur : Matthieu, Alain, Danielle, Cathy, Fanny, Sarah, merci pour votre aide inestimable, vos commentaires constructifs !

Aux autres doctorants de PACEA, merci pour votre accueil pendant ces quatre ans et surtout un grand merci à Eliza, ma co-thésarde, avec qui j'ai partagé cette aventure ! Merci pour tous les moments agréables mais merci également d'avoir été là pour me rassurer dans les périodes difficiles !

Je dédie ce passage à mes amis proches, Sarah, Marie, Ysé, Seb, Marcela, Aubin, Lili, Enzo, Pauline, je vous remercie d'avoir été là pendant ces quatre années, vous vous êtes tenus près de moi, m'avez entourée, accompagnée, soutenue dans les moments difficile (et il y en a eu !!!).

Merci de m'avoir permis de penser à autre chose que la thèse.

Merci d'avoir sauvé ma santé mentale et physique.

Merci pour tout ! Je vous aime fort !

Sarah, tu as été ma famille au cours de ces quatre années, je n'aurais jamais pu y arriver sans toi, ton soutien, ton amitié, merci pour ces moments rares et précieux. Tu es fabuleuse, ne change jamais

Marc, tu es un peu comme un troisième grand frère pour moi, merci d'avoir toujours été présent.

Parce que ma famille est sans doute la chose la plus précieuse et que sans elle je ne serais pas là aujourd'hui, je remercie mes parents Alain et Danielle pour leur soutien sans faille.

Merci de m'avoir toujours laissé faire mes propres choix, sans jamais porter de jugement et toujours en me conseillant avec bienveillance.

Papa, Maman, si je suis arrivée là aujourd'hui c'est grâce à vous, merci d'avoir toujours été fier de moi.

Je veux remercier également ma grand-mère, mes frères et sœurs : Cathy, Jean Phi, Babou, (et leur compagnes, Chris et Vivi), mes neveux et nièces, Hugo, Aëlia, Inès, Ellis, Prune, Gaël et Jeanne, merci à tous de m'avoir accompagné et d'avoir cru en moi.

Et le meilleur pour la fin : Matthieu, tu as toujours été là pour moi d'une thèse à l'autre... Je ne saurais jamais te remercier suffisamment au regard de tout ce que tu as fait pour moi, depuis le début. Ton soutien inconditionnel, tes paroles rassurantes, ta patience dans les moments les plus difficiles et ta tendresse m'ont permis d'aller au bout de ce travail. À moi de te rendre la pareille maintenant !!!!

À tous ceux que j'oublie... Merci, merci, merci !

---

# Table des matières

---

<b>Remerciements</b> .....	<b>- 8 -</b>
<b>Table des illustrations</b> .....	<b>- 15 -</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>- 23 -</b>
<b>Liste des annexes</b> .....	<b>- 25 -</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>- 27 -</b>
<b>Prérequis et contexte scientifique</b> .....	<b>- 30 -</b>
<b>A. Rappel à propos du tissu osseux</b> .....	<b>- 31 -</b>
1. Nature du tissu osseux.....	- 31 -
2. Texture du tissu osseux.....	- 36 -
3. Structure du tissu osseux (figure 4) .....	- 37 -
4. Microarchitecture osseuse .....	- 38 -
5. Macroarchitecture du tissu osseux.....	- 39 -
6. Le remodelage osseux .....	- 39 -
7. La diagenèse de l'os normal.....	- 43 -
<b>B. Le corps soumis à l'action du feu</b> .....	<b>- 45 -</b>
1. Quelques généralités sur le feu .....	- 45 -
2. Résultats des effets de la chaleur sur le corps humain.....	- 46 -
3. Modifications osseuses.....	- 48 -
4. La diagenèse de l'os brûlé.....	- 65 -
<b>C. Les techniques conventionnelles d'identification biologique des individus</b> .....	<b>- 67 -</b>
1. Généralités sur l'identification d'un individu.....	- 67 -
2. L'identification comparative .....	- 67 -
3. L'identification reconstructive .....	- 74 -
4. Problématique spécifique d'identification des restes humains carbonisés.....	- 93 -
<b>Problématique et objectifs</b> .....	<b>- 94 -</b>
<b>A. Les restes humains carbonisés : fréquence, origine et réquisition judiciaire</b> .....	<b>- 95 -</b>
<b>B. Le constat d'un réel manque d'information et de formation</b> .....	<b>- 96 -</b>
<b>C. Objectifs de la thèse</b> .....	<b>- 97 -</b>
<b>Matériels et Méthodes</b> .....	<b>- 99 -</b>
<b>A. Pourquoi choisir un échantillon archéologique ?</b> .....	<b>- 100 -</b>
1. Accessibilité et taille de l'échantillon.....	- 100 -
2. Homogénéité des données .....	- 101 -
3. La problématique juridique et éthique .....	- 102 -
<b>B. Présentation des sites archéologiques</b> .....	<b>- 106 -</b>
1. La nécropole de Porta Nocera à Pompéi .....	- 106 -
2. La nécropole de Porta Mediana à Cumés .....	- 113 -

3.	La nécropole de Santa Rosa au Vatican .....	- 117 -
4.	Le Tophet de Salammbô à Carthage .....	- 119 -
<b>C.</b>	<b>Présentation du protocole mis en place dans le cadre de l'étude .....</b>	<b>- 121 -</b>
1.	Documentation préalable à l'étude .....	- 121 -
2.	Protocole relatif à notre étude .....	- 123 -
<b>D.</b>	<b>Établissement d'une fiche méthodologique .....</b>	<b>- 141 -</b>
<b>Résultats .....</b>		<b>- 142 -</b>
<b>A.</b>	<b>La détermination anatomique du fragment osseux brûlé .....</b>	<b>- 143 -</b>
1.	Données générales .....	- 143 -
2.	Pompéi : Porta Nocera .....	- 144 -
3.	Comparaison avec les résultats de Cumes et du Vatican .....	- 175 -
4.	Les ossements des immatures de Pompéi, Cumes et le Vatican .....	- 185 -
5.	Les individus de la classe des périnataux (données du Tophet de Salammbô à Carthage) ....	- 190 -
<b>B.</b>	<b>Données biologiques et pondérales .....</b>	<b>- 195 -</b>
1.	Les critères principaux .....	- 196 -
2.	Les critères secondaires .....	- 213 -
<b>C.</b>	<b>NMI, Analyse spatiale : les liaisons et les exclusions ostéologiques .....</b>	<b>- 228 -</b>
1.	Analyse des liaisons et des exclusions à Porta Nocera .....	- 229 -
2.	Analyse des liaisons et des exclusions à Santa Rosa .....	- 246 -
<b>Discussion .....</b>		<b>- 263 -</b>
<b>A.</b>	<b>La valeur d'un fragment d'os brûlé .....</b>	<b>- 264 -</b>
1.	La conservation différentielle .....	- 265 -
2.	La question de la fragmentation différentielle .....	- 268 -
3.	Interprétation et éléments de reconnaissance générale .....	- 272 -
4.	Les régions anatomiques d'intérêts .....	- 277 -
5.	Tableau résumé des fragments d'intérêts .....	- 292 -
6.	Biais possibles et facteurs limitants .....	- 297 -
<b>B.</b>	<b>Les indicateurs biologiques appliqués à l'os brûlé .....</b>	<b>- 302 -</b>
1.	Dans l'idéal, une identification exacte de l'individu .....	- 302 -
2.	En pratique : l'identification reconstructive .....	- 308 -
3.	L'analyse des éléments pathologiques : la frontière entre identification reconstructive et comparative .....	- 323 -
<b>C.</b>	<b>Position, manipulations du corps, chronologie : l'intégration des données spatiales .....</b>	<b>- 326 -</b>
1.	L'enregistrement sur le terrain : un prérequis nécessaire à l'analyse spatiale .....	- 327 -
2.	L'examen du squelette : analyses pondérales et spatiales .....	- 331 -
3.	L'apport de la recherche des liaisons ostéologiques à partir de trois exemples précis .....	- 337 -
4.	Les biais méthodologiques .....	- 365 -
5.	Limites et perspectives .....	- 366 -
<b>Fiches méthodologiques .....</b>		<b>- 369 -</b>
<b>Conclusions .....</b>		<b>- 371 -</b>
<b>Bibliographie .....</b>		<b>- 373 -</b>
<b>Annexes .....</b>		<b>- 423 -</b>

---

# Table des illustrations

---

Figure 1 : représentation des cinq niveaux d'analyse permettant de décrire l'os : nature, texture, structure, microarchitecture et macroarchitecture. D'après Chappard et al. (2011). .....	- 33 -
Figure 2 : représentation schématique de la fraction cellulaire du tissu osseux. D'après Balas & Philip (2010). .	- 34 -
Figure 3 : image d'un ostéoclaste en culture sur une tranche d'os observé en microscopie à balayage. Photographie Boyde (2015). .....	- 34 -
Figure 4 : représentation schématique de la structure du tissu osseux, d'après Huch & Jürgens (2019). .....	- 38 -
Figure 5 : représentation schématique des différentes étapes du remodelage osseux. D'après la banque d'images Servier Medical Art). .....	- 41 -
Figure 6 : exemple d'un corps dans une attitude pugilistique. Elle associe une flexion des doigts dans la paume de la main, une flexion palmaire du poignet, une flexion du coude et une légère abduction des épaules. Exemple issu de Gaha et al. (2022). .....	- 47 -
Figure 7 : mise en évidence de l'attitude pugilistique persistante au membre supérieur droit sur un corps dans un état de carbonisation avancée. ....	- 47 -
Figure 8 : schématisation d'un squelette humain dans une attitude pugilistique (vue antérieure et postérieure). Cette image met en évidence une chronologie d'atteinte des différentes parties du corps : en marron les zones atteintes en premier en bleu celles atteintes en dernier. Les lignes vertes indiquent les zones communes de fracture thermique. D'après Symes et al. (2015). .....	- 48 -
Figure 9 : évolution colorimétrique de l'os brûlé, à partir de l'os intact (jaune translucide) jusqu'à l'os calciné (blanc). D'après Nikita (2021), adapté de Devlin & Herrmann (2013). .....	- 49 -
Figure 10 : évolution colorimétrique de l'os selon l'élévation de la température. Extrait de Thompson (2016)..	- 50 -
Figure 11 : (A) diaphyse de radius brûlé et fracturé par la chaleur ; (B) diaphyse d'humérus brûlé et fracturé par la chaleur. La variation de couleur montre que les os brûlent selon un gradient de l'extérieur vers l'intérieur et en dernier dans les zones de tissus mou épais. Extrait de Symes et al. (2015). .....	- 52 -
Figure 12 : déformation osseuse induite par la chaleur (fragments osseux provenant de la nécropole de Porta Nocera, Pompéi). .....	- 55 -
Figure 13 : fractures longitudinales (flèches noires) ; à noter la présence de quelques fractures transversales (flèches grises). Fragments osseux issus de la nécropole de Porta Nocera, Pompéi. ....	- 57 -
Figure 14 : aspect de patine ou fissuration réticulée. Fragments osseux issus de la nécropole de Porta Nocera, Pompéi. ....	- 58 -
Figure 15 : décortication et délamination. La zone la plus externe de la voûte crânienne a tendance à se détacher laissant apparaître le diploé. Fragments osseux issus de la nécropole de Porta Nocera, Pompéi. ....	- 58 -
Figure 16 : fractures transverses arciformes (flèches rouges) ; fracture en bulbe d'oignon (flèche noire). Fragments osseux issus de la nécropole de Porta Nocera, Pompéi. ....	- 59 -
Figure 17 : amputation thermique de la jambe droite. ....	- 59 -
Figure 18 : deux exemples de la mise en évidence de la fragmentation consécutive à un état de carbonisation avancée. ....	- 60 -
Figure 19 : diagramme de diffraction des rayons X d'os de chèvres chauffés à différentes températures obtenues par Shipman et al. (1984). On observe une accentuation des pics traduisant une augmentation de la taille des cristaux avec l'intensité de chauffage. Il y a un changement majeur dans le modèle à 645°C avec des pics beaucoup plus étroits et plus nets. ....	- 65 -
Figure 20 : image d'une des premières identifications par dactyloscopie où 17 points de concordance étaient nécessaires. Empreinte obtenue par ancrage, comparée au dossier de comparaison. Source PJGN, (2023). ....	- 68 -

Figure 21 : radiographie ante-mortem (à gauche) et radiographie post-mortem (à droite) de la première comparaison d'identification radiologique en 1926. Extrait de Christensen & Hatch (2018). D'après Culbert & LAW (1927). .....	- 70 -
Figure 22 : comparaison radiologique du sinus frontal <i>ante mortem</i> (cliché de gauche) et <i>post mortem</i> (cliché de droite) d'après Christensen & Hatch (2018).....	- 70 -
Figure 23 : différence dans le mode de fracturation dentaire selon le caractère ante mortem ou post mortem. Extrait de Dumaure & Paul (2015), d'après Georget et al. (2001). .....	- 72 -
Figure 24: système de cotation du dimorphisme sexuel gradé de 1 (hyperféminin) à 5 (hypermasculin). D'après Buikstra et Ubelaker (1994).....	- 78 -
Figure 25 : illustration des cinq caractères proposés par Bruzek et al. (2002), à observer dans la méthode visuelle de détermination du sexe à partir de l'os coxal. D'après Bruzek et al. (2005) .....	- 83 -
Figure 26 : illustration des six phases de modification de la symphyse pubienne, d'après le système de Brooks & Suchey (1990).....	- 87 -
Figure 27 : dessin représentant la région de l'aile iliaque figurant la surface auriculaire et les régions anatomiques d'intérêt dans l'estimation de l'âge au décès des individus. D'après Nikita (2017). .....	- 89 -
Figure 28 : modification des caractères morphologiques de la surface sacro-pelvienne iliaque avec l'âge : système de cotation utilisé dans la méthode Schmitt. D'après Schmitt (2005). .....	- 91 -
Figure 29 : représentation du remaniement de l'extrémité sternale des côtes au cours de la vie. 1 : adulte jeune ; 2 : adulte ; 3 : adulte âgé. Issue de Wilczak & Dudar (2011). .....	- 92 -
Figure 30 : photographie de droite, enlèvement des déblais de la fouille de Porta Nocera (1951 ou 1952) ; photographie de gauche, dégagement du secteur OS de la nécropole de Porta Nocera (1954). Extrait de Van Andringa et al. (2013). .....	- 107 -
Figure 31 : plan général du quartier de la nécropole de Porta Nocera fouillé entre 2003 et 2007 (enclos 21, 23, 25 et 25 a/c), extrait de Van Andringa et al. (2013). .....	- 109 -
Figure 32 : vue générale de la nécropole de Porta Nocera, extrait de Van Andringa et al. (2016). .....	- 110 -
Figure 33 : vue générale de la fouille de la zone A au cours de la campagne 2015. Extrait de Van Andringa et al. (2016). .....	- 110 -
Figure 34 : photogrammétrie du chantier de la zone B en 2019 montrant les aires fouillées. Document J. Laiho, extrait de Van Andringa & Duday (2020). .....	- 111 -
Figure 35 : localisation de la ville de Cumes, carte de la Campanie antique. Source CNRS, Centre Jean-Bérard.-	- 113 -
Figure 36 : site de Cumes, la nécropole de la Porte médiane se trouve au premier plan. E. Botte, CNRS, CCJ / © CC BY-NC-ND. ....	- 114 -
Figure 37 : plan des secteurs A et D de la nécropole de Porta Mediana. En rose, deux secteurs fouillés lors de l'opération de 2011. Extrait de Brun et al. (2012). .....	- 116 -
Figure 38 : plan général de la nécropole de Santa Rosa. D'après Duday et al. (2015) .....	- 119 -
Figure 39 : localisation du site archéologique du Tophet de Salammbô à Carthage ; données cartographiques ©2023 Google. ....	- 120 -
Figure 40 : fouille du Tophet de Salammbô. Le niveau visualisé est daté du III <sup>ème</sup> siècle avant notre ère (US 1216) avec les urnes en place ; en haut à droite, quelques stèles sont implantées au voisinage des fosses dans lesquelles ont été déposées les urnes contenant les os brûlés des enfants. © Imed Ben Jerbania, INP.....	- 120 -
Figure 41 : dessin représentant les différents segments à prendre en compte dans le calcul du coefficient de synostose des sutures crâniennes. D'après Olivier (1960). .....	- 130 -
Figure 42 : évolution morphologique de l'articulation costo-claviculaire. Dessin de Perrot (2006), adapté de Kunos et al. (1990). .....	- 132 -
Figure 43 : évolution morphologique de la tête de la première côte. Dessin de Perrot (2006), adapté de Kunos et al. (1999). .....	- 133 -
Figure 44 : divers exemples d'os brûlés présentant des lésions d'hyperostose frontale interne (HFI) dans l'échantillon de Porta Nocera à Pompéi. Clichés A et B F. Giraud ; C et D H. Duday.....	- 134 -

Figure 45 : nombre de fragments « identifiés » appartenant à chaque région anatomique. Les fragments « non identifiés » sont classés comme « indéterminés » et sont distribués selon des critères morphologiques dans les catégories « os plats » ; « os courts » et « diaphyses indéterminées »..... - 144 -

Figure 46 : représentation simplifiée des effectifs par grandes régions anatomiques. Les fragments qui n'ont pas pu être identifiés de façon précise ont été exclus. Tous les fragments appartenant à l'humérus, au radius, à l'ulna, au fémur, au tibia et à la fibula ainsi que les fragments classés « diaphyses membres sup. » et « diaphyses membres inf. » ont été regroupés dans la catégorie « grands os longs des membres ». L'atlas, l'axis, les autres vertèbres cervicales, les vertèbres thoraciques et lombaires ont été regroupés dans la catégorie « Vertèbres »..... - 145 -

Figure 47 : représentation simplifiée des taux de latéralisation par grandes régions anatomiques. Les fragments indéterminés ont été exclus. Il s'agit des mêmes régions anatomiques que celles représentées sur la figure 46 et dont l'ordre a été respecté : de gauche à droite les effectifs des fragments sont décroissants..... - 146 -

Figure 48 : effectif des fragments par région anatomique du bloc crânio-facial. Les fragments non identifiés de façon précise sont classés dans la catégorie « Voute/face/base ». ..... - 147 -

Figure 49 : représentation graphique de la répartition des effectifs des fragments crâniens déterminés de façon précise (mandibule incluse)..... - 147 -

Figure 50 : taux de latéralisation des fragments crâniens par région anatomique. Les fragments non identifiés de façon précise sont classés dans la catégorie « Voute/face/base ». ..... - 148 -

Figure 51 : taux de latéralisation des fragments crâniens par région anatomique, version corrigée. Seuls les os nasaux retrouvés isolés ont été pris en compte pour le calcul du taux de latéralisation. Les fragments non identifiés de façon précise sont classés dans la catégorie « Voute/face/base ». ..... - 148 -

Figure 52 : histogramme comparatif permettant de visualiser la différence entre le nombre total de fragments d'os longs identifiés et le nombre de fragments latéralisés pour chacune de ces régions anatomiques. .... - 149 -

Figure 53 : histogramme comparatif permettant de visualiser la différence entre le nombre total de fragments de diaphyses d'os longs identifiés et le nombre de fragments latéralisés pour chacune d'elles..... - 149 -

Figure 54 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la mandibule. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 151 -

Figure 55 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os temporal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 152 -

Figure 56 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os maxillaire. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 152 -

Figure 57 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os frontal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 153 -

Figure 58 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os occipital. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 154 -

Figure 59 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os zygomatique. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. - 155 -

Figure 60 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os sphénoïde. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 155 -

Figure 61 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os pariétal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 156 -

Figure 62 : effectif total des fragments de côtes. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées..... - 157 -

Figure 63 : effectif total des fragments de fémur. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées..... - 158 -

Figure 64 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt du tibia. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 159 -

Figure 65 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'humérus. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 159 -

Figure 66 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la fibula. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 160 -

Figure 67 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt du radius. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 161 -

Figure 68 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'ulna. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 161 -

Figure 69 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'atlas. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 162 -

Figure 70 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'axis. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 163 -

Figure 71 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt des vertèbres cervicales (hors atlas et axis). Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 164 -

Figure 72 : histogramme représentant l'effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt des vertèbres thoraciques. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 164 -

Figure 73 : histogramme représentant l'effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt des vertèbres lombaires. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 165 -

Figure 74 : histogramme représentant l'effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os coxal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 165 -

Figure 75 : histogramme comparatif des effectifs des fragments des os du carpe identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge). .... - 166 -

Figure 76 : histogramme comparatif des effectifs des fragments des os du tarse identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge). .... - 167 -

Figure 77 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la patella. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 167 -

Figure 78 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la clavicule. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 168 -

Figure 79 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la scapula. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées. .... - 169 -

Figure 80 : histogramme comparatif des effectifs des fragments de métatarsiens, identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge). ..... - 169 -

Figure 81 : histogramme comparatif des effectifs des fragments de métacarpiens identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge). ..... - 170 -

Figure 82 : représentation schématique des effectifs de fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique sur le site de Porta Nocera. Pompéi. Le nombre de fragments est figuré par une échelle colorimétrique. .... - 173 -

Figure 83 : représentation schématique des pourcentages de latéralisation des fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique sur le site de Porta Nocera. Pompéi. Le pourcentage de latéralisation des fragments est figuré par une échelle colorimétrique. .... - 174 -

Figure 84 : représentation schématique des effectifs de fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique sur le site de Porta Mediana. Cumes. Le nombre de fragments est figuré par une échelle colorimétrique. .... - 178 -

Figure 85 : représentation schématique des pourcentages de latéralisation des fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique sur le site de Porta Mediana. Cumes. Le pourcentage de latéralisation des fragments est figuré par une échelle colorimétrique. .... - 179 -

Figure 86 : représentation schématique des effectifs de fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique sur le site de Santa Rosa au Vatican. Le nombre de fragments est figuré par une échelle colorimétrique. .... - 183 -

Figure 87 : représentation schématique des pourcentages de latéralisation des fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique sur le site de Santa Rosa au Vatican. Le pourcentage de latéralisation est figuré par une échelle colorimétrique. .... - 184 -

Figure 88 : représentation schématique des effectifs de fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique pour l'ensemble des fragments osseux des individus immatures des sites de Porta Nocera à Pompéi, Porta Mediana à Cumes et Santa Rosa au Vatican. Le nombre de fragments est figuré par une échelle colorimétrique. .... - 188 -

Figure 89 : représentation schématique des pourcentages de latéralisation des fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique pour l'ensemble des fragments osseux des individus immatures des sites de Porta Nocera à Pompéi, Porta Mediana à Cumes et Santa Rosa au Vatican. Le pourcentage de latéralisation des fragments est figuré par une échelle colorimétrique. .... - 189 -

Figure 90 : représentation schématique des effectifs de fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique pour l'ensemble des fragments osseux d'individus immatures et périnataux du site du Tophet de Salammbô à Carthage. Le nombre de fragments est figuré par une échelle colorimétrique. .... - 193 -

Figure 91 : représentation schématique des pourcentages de latéralisation pour chaque région anatomique pour l'ensemble des fragments osseux d'individus immatures périnataux du site du Tophet de Salammbô à Carthage. Le pourcentage de latéralisation des fragments est figuré par une échelle colorimétrique. .... - 194 -

Figure 92 : représentation des effectifs d'individus selon la détermination du sexe. La classe « déterminé » correspond aux individus dont le sexe est déterminé de façon certaine par des arguments biologiques ; la classe « probable » correspond à une orientation concernant l'évaluation du sexe ; le sexe était classé « indéterminé » lorsque les arguments en faveur de l'orientation du sexe étaient insuffisants. .... - 197 -

Figure 93 : représentation des effectifs des individus selon l'attribution de leur sexe pour l'ensemble des trois sites. .... - 197 -

Figure 94 : représentation en *box plot* de la distribution du nombre de critères observés chez chacun des individus analysés, afin d'évaluer le sexe des individus. .... - 199 -

Figure 95 : représentation en *box plot* de la distribution du nombre de critères observés selon le sexe chez chacun des individus analysés. .... - 200 -

Figure 96 : effectif des individus de sexe « déterminé », « probable » ou « indéterminé » selon que la fragmentation est considérée « faible », « forte » ou « moyenne ». ©XLSTAT 2023. .... - 202 -

Figure 97 : <i>box plot</i> représentant la dispersion du poids total des individus selon les critères d'évaluation biologiques du sexe. ....	- 203 -
Figure 98 : <i>box plot</i> représentant la dispersion du poids total des individus selon les critères d'évaluation biologiques du sexe. La figure (a) agrège en une seule catégorie les individus diagnostiqués de manière certaine et probable, la figure (b) compare les individus identifiés de manière certaine uniquement. ....	- 205 -
Figure 99 : deux exemples de stèle. La photographie de gauche, enclos 21 - tombe 201 stèle de Bebryx, mentionne « Bebryx a vécu 6 ans » ; la photographie de droite, est la stèle de la tombe 202 de l'enclos 21 « STALLIA HAPHE » correspond à un individu d'âge adulte et de sexe féminin. Clichés H. Duday.....	- 206 -
Figure 100 : nombre de critères observés pour l'évaluation de l'âge au décès en fonction des classes d'âges retenues. ....	- 209 -
Figure 101 : évolution du pourcentage d'observation des critères dentaires en fonction des classes d'âges. ..	- 210 -
Figure 102 : Évolution du pourcentage d'observation des dimensions du squelette infra-crânien en fonction des différentes classes d'âges.....	- 211 -
Figure 103 : évolution de la fréquence d'observation des critères de maturité en fonction des différentes classes d'âges. ....	- 212 -
Figure 104 : représentation graphique des effectifs d'individus pour chaque catégorie de robustesse selon le sexe.-	214 -
Figure 105 : lésion dégénérative vertébrale, sujet de la tombe 47, Porta Nocera.....	- 217 -
Figure 106 : lésion dégénérative de type arthrose (extrémité distale du fémur, tombe 31).....	- 217 -
Figure 107 : hyperostose frontale interne, tombe 1F-7 (clichés F. Giraud et H. Duday).....	- 219 -
Figure 108 : atteinte vertébrale d'allure infectieuse (tuberculose ?), sujet de la tombe 1F-4 et structure 14, Porta Nocera. ....	- 221 -
Figure 109 : Fracture de côte, sujet de la tombe 33, Porta Nocera. ....	- 221 -
Figure 110 : fracture de l'extrémité distale des deux os de l'avant-bras. Vue antérieure, postérieure et latérale. Tombe 7, Porta Nocera, Pompéi. ....	- 222 -
Figure 111 : fracture de la clavicule vue supérieure et inférieure. Tombe 32, Porta Nocera. ....	- 223 -
Figure 112 : fragment de bloc bi-vertébral, sujet de la tombe 206 à Porta Nocera (vue externe et interne).....	- 224 -
Figure 113 : tumeur osseuse au dépend du sinus frontal, Porta Nocera. ....	- 224 -
Figure 114 : lésion nummulaire non caractérisée de la tête et de la diaphyse tibiale. Porta Nocera, sujet de la tombe 46.....	- 225 -
Figure 115 : représentation graphique des proportions d'individus présentant ou non des pathologies dégénératives par classes d'âges. ....	- 226 -
Figure 116 : représentation graphique des pourcentages des différentes catégories d'incompatibilités recherchées parmi les fragments osseux de Porta Nocera, Pompéi. ....	- 230 -
Figure 117 : histogramme représentant les effectifs de fragments impliqués dans la mise en évidence d'exclusion : doublets et incompatibilités (BCF= bloc crânio-facial). ....	- 231 -
Figure 118 : histogramme mettant en évidence les effectifs de fragments de crâne impliqués dans la constitution de doublets.....	- 232 -
Figure 119 : histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions du crâne impliquées dans un doublet. ....	- 233 -
Figure 120 : histogramme mettant en évidence les effectifs de fragments de crâne impliqués dans la mise en évidence d'une incompatibilité. ....	- 234 -
Figure 121 : histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions anatomiques du bloc-crânio-facial impliquées dans la mise en évidence d'une incompatibilité. ....	- 234 -
Figure 122 : effectif total de l'ensemble des exclusions mises en évidence par régions anatomiques du squelette infra-crânien.....	- 235 -
Figure 123 : effectif total des exclusions par doublets établies à partir des régions anatomiques du squelette infra-crânien.....	- 236 -
Figure 124 : Effectif total des exclusions par incompatibilités établies selon les régions anatomiques du squelette infra-crânien. ....	- 237 -

Figure 125 : histogramme représentant les effectifs de fragments impliqués dans la mise en évidence de liaisons par collage, symétrie, contiguité et concordance. (BCF= bloc crânio-facial).....	- 238 -
Figure 126 : histogramme mettant en évidence les effectifs de fragments de bloc crânio-facial impliqués dans un collage. ....	- 239 -
Figure 127 : histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions du bloc crânio-facial impliqués dans un collage. ....	- 240 -
Figure 128 : histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions du bloc crânio-facial impliqués dans une liaison par symétrie.....	- 241 -
Figure 129 : histogramme comparant les effectifs des collages et des symétries pour les fragments de crâne. ....	- 241 -
Figure 130 : histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions du bloc crânio-facial impliqués dans une liaison par concordance anatomique.....	- 242 -
Figure 131 : effectif total de l'ensemble des liaisons mises en évidence par régions anatomiques du squelette infra-crânien.....	- 243 -
Figure 132 : histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions du squelette infra-crânien impliqués dans une liaison par collage. ....	- 244 -
Figure 133 : histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions du squelette infra-crânien impliqués dans une liaison par symétrie. ....	- 245 -
Figure 134: histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions du squelette infra-crânien impliqués dans une liaison par concordances. ....	- 246 -
Figure 135 : représentation graphique des pourcentages des différentes catégories d'incompatibilités recherchées au Vatican.....	- 247 -
Figure 136 : répartition anatomique du nombre de fragments impliqués dans la mise en évidence d'une exclusion au sein des ensembles étudiés au Vatican. ....	- 248 -
Figure 137 : répartition du nombre de fragments issus des différents os du bloc crânio-facial impliqués dans la mise en évidence de doublets. ....	- 249 -
Figure 138 : répartition du nombre de fragments selon les régions anatomiques d'intérêts impliqués dans la mise en évidence de doublets au sein du bloc crânio-facial.....	- 250 -
Figure 139 : répartition du nombre de fragments issus des différents os du bloc crânio-facial, impliqués dans la mise en évidence d'une incompatibilité. ....	- 251 -
Figure 140 : répartition du nombre de fragments selon les régions anatomiques d'intérêts, impliqués dans la mise en évidence d'une incompatibilité au sein du bloc crânio-facial. ....	- 252 -
Figure 141: histogramme mettant en évidence les effectifs cumulés des fragments ayant mis en évidence des exclusions. ....	- 253 -
Figure 142 : répartition du nombre de fragments selon les régions anatomiques d'intérêts impliqués dans la réalisation de doublets, parmi les fragments issus du squelette infra-crânien.....	- 254 -
Figure 143 : répartition du nombre de fragments selon les régions anatomiques d'intérêts impliqués dans la mise en évidence d'une exclusion par incompatibilité, parmi les fragments issus du squelette infra-crânien.....	- 256 -
Figure 144 : Répartition anatomique du nombre de fragments impliqués dans la mise en évidence d'une liaison, au sein des ensembles étudiés au Vatican. ....	- 257 -
Figure 145 : histogramme représentant les effectifs des fragments du bloc crânio-facial ayant mis en évidence des liaisons par collage. ....	- 258 -
Figure 146 : histogramme représentant les effectifs des fragments du bloc crânio-facial, ayant mis en évidence des liaisons par symétrie.....	- 259 -
Figure 147 : histogramme représentant les effectifs cumulés des fragments du squelette infra-crânien ayant mis en évidence des liaisons. ....	- 260 -
Figure 148 : histogramme représentant les effectifs des fragments du squelette infra-crânien ayant mis en évidence des liaisons par collages. ....	- 261 -
Figure 149 : histogramme représentant les effectifs des fragments du squelette infra-crânien ayant mis en évidence des liaisons par symétries. ....	- 262 -

Figure 150 : schéma simplifié montrant les intervalles de synostoses en années des épiphyses et des points d'ossifications secondaires (Depierre 2013, p. 192, d'après Brothwell 1981). .....	- 287 -
Figure 151 : exemple de comparaison des proportions de latéralisation entre divers types de fragments à Pompéi. On observe une différence significative entre les fragments les plus nombreux et identifiables tels que les côtes ou les fragments de diaphyses d'os longs des membres et certains petits fragments particulièrement bien latéralisables tels que les fragments du conduit auditif externe de l'os temporal par exemple. La région du conduit auditif externe montre également un pouvoir de latéralisation significativement plus élevé que certaines extrémités d'os longs. Il n'y pas de différence significative entre proportions de latéralisation des diaphyses des différents os longs. Ces exemples concernent Pompéi, la même tendance est retrouvée pour les autres sites. ....	- 296 -
Figure 152 : représentation schématique d'une grille de recherche montrant comment une zone est parcourue deux fois et à des approches différentes par deux enquêteurs. Chaque enquêteur est symbolisé par une flèche. Les flèches indiquent la direction du déplacement de chaque chercheur dans son secteur respectif. L'espace entre les deux enquêteurs est d'environ un mètre. (dessin de S. Fairgrieve ; Fairgrieve et al., 2008). .....	- 330 -
Figure 153 : incompatibilité d'âge entre deux fémurs de la tombe 15, Enclos 23-25 US 23116 et US 23114. ...	- 335 -
Figure 154 : 4ème et 5ème métatarsiens droits en connexion anatomique stricte. Urne 497, Carthage. Cliché H. Duday .....	- 336 -
Figure 155 : collage entre le processus styloïde du temporal retrouvé dans les cendres déversées dans la fosse SP 1F-13 et le temporal gauche de la SP 1F-17. ....	- 342 -
Figure 156 : collage entre l'aire de crémation AC 615 et la tombe Sp 1F-5 : fémur gauche, région sous trochantérienne. ....	- 343 -
Figure 157 : collages entre l'aire de crémation AC 615 et la tombe Sp 1F-5 : os temporal, vue externe et vue interne. ....	- 343 -
Figure 158 : collages entre l'aire de crémation AC 615 et la tombe Sp 1F-5 : dent de l'axis.....	- 344 -
Figure 159 : collage réalisé entre un fragment de l'aire de crémation AC 615 et un fragment de la tombe Sp 1F-7 : axis, vue face externe et face interne. ....	- 344 -
Figure 160 : Symétrie des pétreux entre la Sp 1F-11 et la Sp 1F-3bis. ....	- 346 -
Figure 161 : collage entre la structure 1F-14 et la Sp 1F-1 : branche mandibulaire processus coronoïde gauche et incisive mandibulaire gauche. Vue interne et vue externe. ....	- 347 -
Figure 162 : Aire de crémation AC 615 coupe Nord-Sud, Est-Ouest et vue zénithale. Extrait du rapport final d'opération Porta Nocera, campagne 2020 (Van Andringa W & Duday H, 2020).....	- 350 -
Figure 163 : plan du secteur 1F. Extrait du rapport final d'opération, Porta Nocera, campagne 2020 (Van Andringa W & Duday H, 2020). ....	- 353 -
Figure 164 : Mausolée XX de la nécropole de Santa Rosa au Vatican. Fouille G.-D. Spinola et L di Blasi. Duday et al. (2015). ....	- 354 -
Figure 165 : mausolée XXV de Santa Rosa au Vatican, extrait de Duday et al. (2015). ....	- 359 -
Figure 166 : mausolée XXXI de Santa Rosa au Vatican extrait de Duday et al. (2015) .....	- 360 -
Figure 167 : mausolée XXXIV de Santa Rosa au Vatican extrait de Duday et al. (2015). ....	- 361 -
Figure 168 : liaison par symétrie entre UR 511 R7 et UR 508 N1, Carthage. Clichés H. Duday. ....	- 364 -
Figure 169 : photographie de la fouille de l'US US 1135 – 1195 (première moitié IIe s. avant notre ère), visualisations de l'emplacement des urnes ayant permis de réaliser un collage. ....	- 364 -
Figure 170 : collage réalisé entre deux fragments d'os temporal (région pétreuse) entre l'urne 4 et l'urne 91, de l'US US 1135 – 1195 (première moitié IIe s. avant notre ère). ....	- 365 -

---

# Liste des tableaux

---

Tableau 1 : différentes étiologies possibles des ostéoporoses d'après la Société Française d'Endocrinologie (CEEDMM, 2022). .....	- 42 -
Tableau 2 : paramètres qualitatifs et quantitatifs de l'index de préservation histologique selon Hedges & Millard (1995), repris par Delannoy (2016). .....	- 43 -
Tableau 3 : modification des couleurs en fonction des températures d'ustion, d'après Grévin (2004). .....	- 51 -
Tableau 4 : évaluation de la fragmentation à partir du calcul du poids moyen des fragments (sauf esquilles) d'après Duday dans Van Andringa et al. (2013). .....	- 60 -
Tableau 5 : différents stades de modification histologique en fonction de l'augmentation de la température d'exposition lors d'un processus de crémation. D'après Mayne Correira (1997). .....	- 61 -
Tableau 6 : caractères crâniens et mandibulaires permettant d'orienter la détermination du sexe en fonction de leur morphologie et de leur développement (d'après Beauthier, 2008). .....	- 79 -
Tableau 7 : tableau présentant les 10 variables à mesurer pour la méthode de la diagnose sexuelle probabiliste (DSP). En gras les 8 variables les plus discriminantes. D'après Murail et al. (2005). .....	- 84 -
Tableau 8 : présentation des six phases de modification de la symphyse pubienne. D'après Brooks & Suchey, 1990. ....	- 86 -
Tableau 9 : détermination de l'âge des individus de sexe masculin à partir des six phases de modification de la symphyse pubienne (âge en années). D'après Brooks & Suchey (1990). .....	- 88 -
Tableau 10 : détermination de l'âge des individus de sexe féminin à partir des six phases de la symphyse pubienne (âge en années). D'après Brooks & Suchey (1990). .....	- 88 -
Tableau 11 : critères d'observation de l'extrémité sternale de la clavicule selon l'âge, d'après Cunningham et al. (2016). .....	- 128 -
Tableau 12 : évolution morphologique de l'articulation costo-claviculaire. D'après Perrot (2006), adapté de Kunos et al. (1999). .....	- 132 -
Tableau 13 : évolution morphologique de la tête de la première côte. D'après Perrot (2006), adapté de Kunos et al. (1999). .....	- 133 -
Tableau 14 : distribution des effectifs de l'ensemble des fragments osseux pris en compte pour les quatre sites inclus dans notre étude (BCF = Bloc crânio-facial). .....	- 143 -
Tableau 15 : décompte du nombre d'individus par catégorie de sexe : déterminé, probable ou indéterminé. L'évaluation du sexe a été réalisée uniquement à partir des critères biologiques. ....	- 196 -
Tableau 16 : résultats des statistiques descriptives concernant le nombre d'observations possibles et réalisées afin d'évaluer le sexe biologique des individus. ....	- 199 -
Tableau 17 : résultats de l'analyse de variance. ©XLSTAT 2023. ....	- 200 -
Tableau 18: moyenne du nombre de critères observés pour le facteur sexe. ©XLSTAT 2023. ....	- 200 -
Tableau 19 : résultats du test du $Kh^2$ entre les données de sexe et de fragmentation. ©XLSTAT 2023. ....	- 202 -
Tableau 20 : résumé numérique concernant les données du poids total des fragments de chaque individu en fonction du site et du sexe. ....	- 204 -
Tableau 21 : tableau regroupant les évolutions concernant l'évaluation du sexe des individus en prenant en compte les données archéologiques en supplément des données biologiques. ....	- 206 -
Tableau 22 : décompte du nombre d'individus par classes d'âges, pour l'ensemble des sites considérés. ....	- 207 -
Tableau 23 : critères les plus souvent recherchés et observés (nombre de « Oui » dans la base de données) par classes d'âges. La mention « Oui » dans la base de données correspond à l'objectivation de l'observation ou de la recherche de ce critère dans les données manuscrites relatives à chaque structure funéraire. (HFI = hyperostose frontale interne). .....	- 208 -

Tableau 24 : critères les plus souvent recherchés et observés (pourcentage de « Oui » dans la base de données) par classes d'âges. La mention « Oui » correspond à l'objectivation de l'observation ou de la recherche de ce critère dans les données manuscrites relatives à chaque structure funéraire. (HFI = hyperostose frontale interne). ..	- 208 -
Tableau 25: tableau de contingence robustesse / sexe. ©XLSTAT 2023. ....	- 213 -
Tableau 26 : résultats de l'analyse statistique sur le tableau de contingence. Test du $Khi^2$ . ©XLSTAT 2023. ....	- 214 -
Tableau 27 : résultats de l'analyse statistique sur le tableau de contingence. Test du $G^2$ de Wilks. ©XLSTAT 2023..	214 -
Tableau 28 : tableau récapitulatif de l'ensemble des lésions pathologiques relevées sur les ossements de Porta Nocera, Porta Mediana et Santa Rosa.....	- 216 -
Tableau 29 : tableau de contingence présentant l'effectif d'individus comportant ou non des lésions dégénératives pour chaque classe d'âge. ....	- 226 -
Tableau 30 : résultats de l'analyse statistique sur le tableau de contingence. Test du $Khi^2$ . ©XLSTAT 2023. ....	- 226 -
Tableau 31 : pourcentage de représentation des fragments dans les cinq catégories les plus représentés à Pompéi, Cumes et au Vatican, chez les sujets adultes et les sujets immatures (hors périnataux). ....	- 271 -
Tableau 32 : pourcentage de représentation des fragments les mieux identifiés à Pompéi, Cumes et au Vatican, chez les sujets adultes et les sujets immatures (hors périnataux). ....	- 272 -
Tableau 33 : tableau récapitulatif des fragments osseux d'intérêt pour l'extrémité céphalique : en gras les fragments les plus pertinents, retrouvés pour tous les sites de notre échantillon ; en noir ceux retrouvés pour au moins deux sites ; en gris ceux retrouvés sur un seul site ; en bleu les fragments les plus pertinents chez les immatures et en rose chez les périnataux. ....	- 293 -
Tableau 34 : tableau récapitulatif des fragments osseux d'intérêt pour l'extrémité céphalique : en gras les fragments les plus pertinents, retrouvés pour tous les sites de notre échantillon ; en noir ceux retrouvés pour au moins deux sites ; en gris ceux retrouvés sur un seul site ; en bleu les fragments les plus pertinents chez les immatures et en rose chez les périnataux. ....	- 294 -
Tableau 35 : résultats du test de corrélation entre la fragmentation et le taux de détermination anatomique.-	298 -
Tableau 36 : changements induits par la chaleur pour les dents déciduales, d'après Karkhanis et al. (2009). ..	- 307 -
Tableau 37: impact des hautes températures sur les méthodes d'identification. Certaines méthodes sont présentées à titre d'exemple et n'ont pas vocation d'être exhaustives. D'après Fairgrieve (2008). ....	- 317 -
Tableau 38 : tableau récapitulatif des masses d'os brûlés livrées par chaque structure du mausolée XX et du nombre minimal d'individus (NMI) associé. NC pour information non communiquée. ....	- 356 -

---

# Liste des annexes

---

- **Annexe 1** : exemple de la documentation utilisée dans le cadre de l'étude. Documents scannés : notes de travail rédigées par H. Duday lors de l'analyse anthropologique des restes humains de Porta Nocera (2017). Ces notes sont relatives à la sépulture 5 du secteur 1F dans la Zone B (Sp 1F-5, US 6171).
- **Annexe 2** : exemple de la documentation utilisée dans le cadre de l'étude. Tableurs regroupant les données de la sépulture 1F-5 de la zone B (nombre et masse des fragments par région anatomique et par passe de démontage) génération de graphiques mettant en évidence la répartition des fragments. D'après le modèle décrit par Duday et al. (2000).
- **Annexe 3a** : extrait de la base de données relatives aux critères de détermination anatomique ; classeur concernant l'extrémité céphalique, incluant la mandibule, chez l'adulte. Données de Porta Nocera à Pompéi.
- **Annexe 3b** : extrait de la base de données relatives aux critères de détermination anatomique ; classeur concernant le squelette infra-crânien, chez l'adulte. Données de Porta Nocera à Pompéi.
- **Annexe 3c** : extrait de la base de données relatives aux critères de détermination anatomique ; classeurs concernant les restes dentaires (tous âges confondus). Données de Porta Nocera à Pompéi.
- **Annexe 3d** : extrait de la base de données relatives aux critères de détermination anatomique ; classeurs concernant les données relatives aux individus immatures. Données du Tophet de Salammbô à Carthage.
- **Annexe 4a** : extrait du tableur regroupant l'ensemble des indicateurs biologiques relatifs à chaque structure. Données de la nécropole de Porta Mediana à Cumes.
- **Annexe 4b** : Extrait du tableur répertoriant les stigmates de la crémation pour chaque assemblage osseux : niveau et homogénéité de la crémation, différentes atteintes de l'os (déformation, fissuration, torsion, clivage...) et la couleur de l'os. Données de Porta Nocera à Pompéi.
- **Annexe 4c** : Extrait du tableau reprenant les données pondérales, le taux de détermination, de fragmentation et la représentation par région anatomique, pour chaque assemblage osseux. Données de Porta Nocera à Pompéi.

- **Annexe 5a** : extrait du tableau relatif à l'enregistrement des liaisons ou des exclusions ostéologiques. Ce tableau précise le type de liaison (collage, symétrie et concordance) ou le type d'exclusion (doublet, incompatibilité). Données issues de la nécropole de Santa Rosa au Vatican.
- **Annexe 5b (1)** : extrait du tableau relatif à l'enregistrement des liaisons ou des exclusions ostéologiques. Il dénombre les fragments selon leur origine anatomique et le type de liaison et/ou d'exclusion qu'ils ont permis de réaliser. Tableau concernant les fragments de l'extrémité céphalique uniquement. Données issues de la nécropole de Santa Rosa au Vatican.
- **Annexe 5b (2)** : extrait du tableau relatif à l'enregistrement des liaisons ou des exclusions ostéologiques. Il dénombre les fragments selon leur origine anatomique et le type de liaison et/ou d'exclusion qu'ils ont permis de réaliser. Tableau concernant les fragments du squelette infra-crânien. Données issues de la nécropole de Santa Rosa au Vatican.
- **Annexe 6a** : Ensemble des résultats (tables et figures) relatif à la détermination anatomique, ayant permis de réaliser les bilans globaux des fragments d'intérêts et les comparaisons entre les sites. Résultats concernant la nécropole de Porta Mediana à Cumes.
- **Annexe 6b** : Ensemble des résultats (tables et figures) relatif à la détermination anatomique, ayant permis de réaliser les bilans globaux des fragments d'intérêts et les comparaisons entre les sites. Résultats concernant la nécropole de Santa Rosa au Vatican.
- **Annexe 7** : publication : Du Fayet de la Tour A, Couture C, Paraf F, Duday H. 2023. Hyperostosis frontalis interna: A new perspective in burned individuals' analysis for determining age and sex from archeo-anthropological and medicolegal contexts. *International Journal of Osteoarchaeology* **33**: 114–127.
- **Annexe 8** : fiches méthodologiques

---

## *Introduction*

---

Dans les sociétés anciennes ou modernes, le feu et la mort sont souvent associés. Le feu peut être lié à la cause, ou au mécanisme du décès : catastrophes naturelles, incendies (domestiques ou industriels), accidents, attentats à la bombe, suicide, homicide... Il peut permettre la dissimulation de preuves dans un contexte criminel. Il est également au centre de différents rituels de purification post-mortem, intégré dans de nombreuses pratiques funéraires. Sur le plan archéologique, les bûchers funéraires sous une forme ou une autre ont été utilisés comme moyen de destruction du corps tout au long de l'histoire de l'Humanité. Plusieurs auteurs notent que la pratique de la crémation du corps s'est répandue en Europe à partir du Néolithique (Gatto, 2003; Jallet et al., 2005; Kaczmarek & Piontek, 1982). En Australie, des restes humains carbonisés datant de 25 000 à 32 000 ans attestent d'une pratique encore plus précoce de la crémation (Bowler et al., 1970).

Les implications médico-légales des effets du feu sur le corps humain, sont déjà décrites à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, dans un article du journal *The Lancet*, en 1893 (Lancet, 1893). Depuis, de nombreuses études expérimentales explorent ce sujet.

À la question peut-on faire disparaître un corps dans un incendie de maison ou d'appartement, Bass (1984) donne une réponse extrêmement claire : non ! Il argumente que le corps humain est composé d'eau à 70% environ, ce qui fait de lui un mauvais carburant et ce malgré ses parties lipidiques. Il ajoute que la combustion nécessite de l'oxygène qui peut être rapidement consommé dans un milieu fermé. Enfin, la contrainte des vêtements ou même du sol entraîne un déficit d'oxygène en regard de certaines parties anatomiques qui de fait, vont moins bien brûler. Même dans les cas de crémation conduite lors de bûchers rituels par exemple, des fragments osseux et dentaires persistent et sont encore identifiables. Un dernier argument exposé par Bass est que les températures d'incendie domestique excèdent rarement 900°C. Or, la température optimale pour brûler un corps serait de 980 à 1100°C avec une durée d'exposition minimale à cette température d'1h30 (DiMaio & DiMaio, 2001).

Même dans certains cas extrêmes, tels qu'une catastrophe industrielle ou l'implication de produits chimiques accélérateurs, il subsiste toujours des fragments osseux.

Quelles que soient la cause et le mécanisme du décès, un corps exposé au feu subit un large éventail d'effets post-mortem pouvant entraîner des changements de couleur, des déformations et une importante fragmentation.

Pour l'ensemble de ces raisons, les anthropologues, les médecins légistes et les enquêteurs dans le domaine de la criminalistique, doivent posséder certaines compétences générales. Il est indispensable de connaître les altérations physiques et biochimiques que peuvent subir des os exposés à différents degrés de chaleur, mais également de pouvoir les analyser dans leur contexte, à travers une approche spécifique à la fois sur le terrain et au laboratoire.

Nous souhaitons à travers cette recherche doctorale, mettre en évidence les éléments fondamentaux à prendre en compte dans l'analyse de restes humains brûlés, afin d'obtenir les données d'identifications les plus fiables. Nous proposons d'analyser un large corpus de fragments osseux brûlés, issu de quatre sites archéologiques ayant mis au jour des sépultures à crémation (matériel osseux présentant un état de carbonisation avancé). L'objectif principal est

de déterminer si certaines régions anatomiques présentent un potentiel d'identification plus élevé et de les identifier clairement. Ces résultats permettront à l'issue de ce travail, de construire une documentation sous la forme de deux fiches méthodologiques. Ces documents simplifiés, à destination du personnel d'investigation criminelle et des médecins légistes auront pour but d'établir un cadre à la prise en charge des restes humains brûlés, lors de la levée de corps et au cours de leur analyse.

---

## *Prérequis et contexte scientifique*

---

Après avoir réalisé quelques rappels à propos du tissu osseux, sa structure et sa fonction, nous présenterons un résumé des stigmates de combustion à connaître préalablement à l'analyse de l'os brûlé. Enfin, dans un dernier chapitre, nous rappellerons les techniques conventionnelles d'identification biologique des individus, en évoquant les deux volets d'identification : comparative et reconstructive.

## A. Rappel à propos du tissu osseux

---

Afin de mieux comprendre les effets de la chaleur sur l'os, il est nécessaire d'effectuer quelques rappels, à propos de sa structure et sa fonction de base.

L'os est un tissu conjonctif qui constitue, avec le cartilage, le squelette. C'est un tissu vivant, complexe et perfectionné qui revêt une importance capitale pour l'organisme assurant trois fonctions essentielles au corps humain (Echard, 2017) :

- une fonction mécanique de soutien, de protection des organes vitaux et de locomotion ;
- une fonction métabolique de libération et stockage des sels minéraux (calcium et phosphore) ;
- enfin, une fonction hématopoïétique à l'origine des trois lignées de cellules sanguines ainsi que des cellules multipotentes.

De son bon développement dépend celui de nombreux autres tissus, ce qui explique sa mise en place très tôt au cours de la vie fœtale et son étroit contrôle endocrinien (GH ; IGF-1), pendant toute la croissance de l'individu et chez l'adulte (Pastoureau, 1990).

Selon Chappard et al. (2011), le tissu osseux peut s'envisager en cinq niveaux structurels de l'échelle nanoscopique à l'échelle macroscopique, permettant de décrire l'os dans sa nature, sa texture, sa structure et son architecture (figure 1).

### 1. Nature du tissu osseux

---

Le tissu osseux est constitué d'une fraction cellulaire à hauteur de 10 % (ostéoblastes, ostéocytes et ostéoclastes), ainsi que d'une substance intercellulaire ou matrice osseuse extracellulaire (90 %), présentant la particularité de pouvoir se calcifier.

#### a) *La fraction cellulaire*

---

La fraction cellulaire du tissu osseux est formée de cellules ostéoformatrices et de cellules ostéorésorbantes. Elle est représentée schématiquement sur la figure 2.

## (1) Les cellules ostéoformatrices

Elles dérivent toutes des cellules souches mésenchymateuses pluripotentes. Elles sont constituées des cellules suivantes.

### – Les ostéoblastes

Les ostéoblastes sont des cellules mononuclées qui couvrent l'ensemble de la surface libre du tissu osseux. Elles sont localisées aux faces externe et interne de l'os et sont reliées entre elles et avec les ostéocytes par des jonctions communicantes. Ces cellules sont présentes à la fois pendant la croissance et à l'âge adulte en période de remaniement. Elles sont impliquées dans la formation osseuse en sécrétant les constituants organiques de la matrice extracellulaire, appelée ostéoïde. La présence de protéines dans cette matrice va favoriser localement la nucléation des cristaux apatitiques.

### – Les ostéocytes

Les ostéocytes sont des ostéoblastes entourés de tissu osseux et piégés dans la matrice extracellulaire. Ils sont différenciés et ne sont plus capables de se diviser (cellules post mitotiques). Ce sont des cellules fusiformes, aplaties, au noyau condensé et central et au cytoplasme acidophile. Ils siègent dans des logettes (ostéoplastes) d'où partent des canalicules anastomosés. Tous les ostéocytes d'un même ostéon sont interconnectés par ces canalicules. Ils possèdent des prolongements cytoplasmiques leur permettant de communiquer entre eux grâce à des jonctions communicantes et de se nourrir : le transport intra-canaliculaire des nutriments se fait sur environ 100  $\mu$ . Moins actifs que les ostéoblastes, les ostéocytes, sous l'effet de la parathormone, participent également au maintien de la matrice osseuse en élaborant ses constituants ou en la détruisant : c'est la résorption périostéocytaire.

### – Les cellules bordantes

Les surfaces osseuses qui ne sont pas impliquées dans une activité de remodelage sont couvertes par une couche de cellules inactives appelées cellules bordantes. Elles sont allongées et aplaties et séparent la surface et sa fine couche de tissu ostéoïde, du tissu hématopoïétique de la moelle osseuse. Ces cellules pourraient jouer un rôle important dans l'homéostasie minérale et dans la préparation des mécanismes de remodelage. Ce sont des ostéoblastes au repos qui sont capables s'ils sont stimulés de redevenir des ostéoblastes actifs.

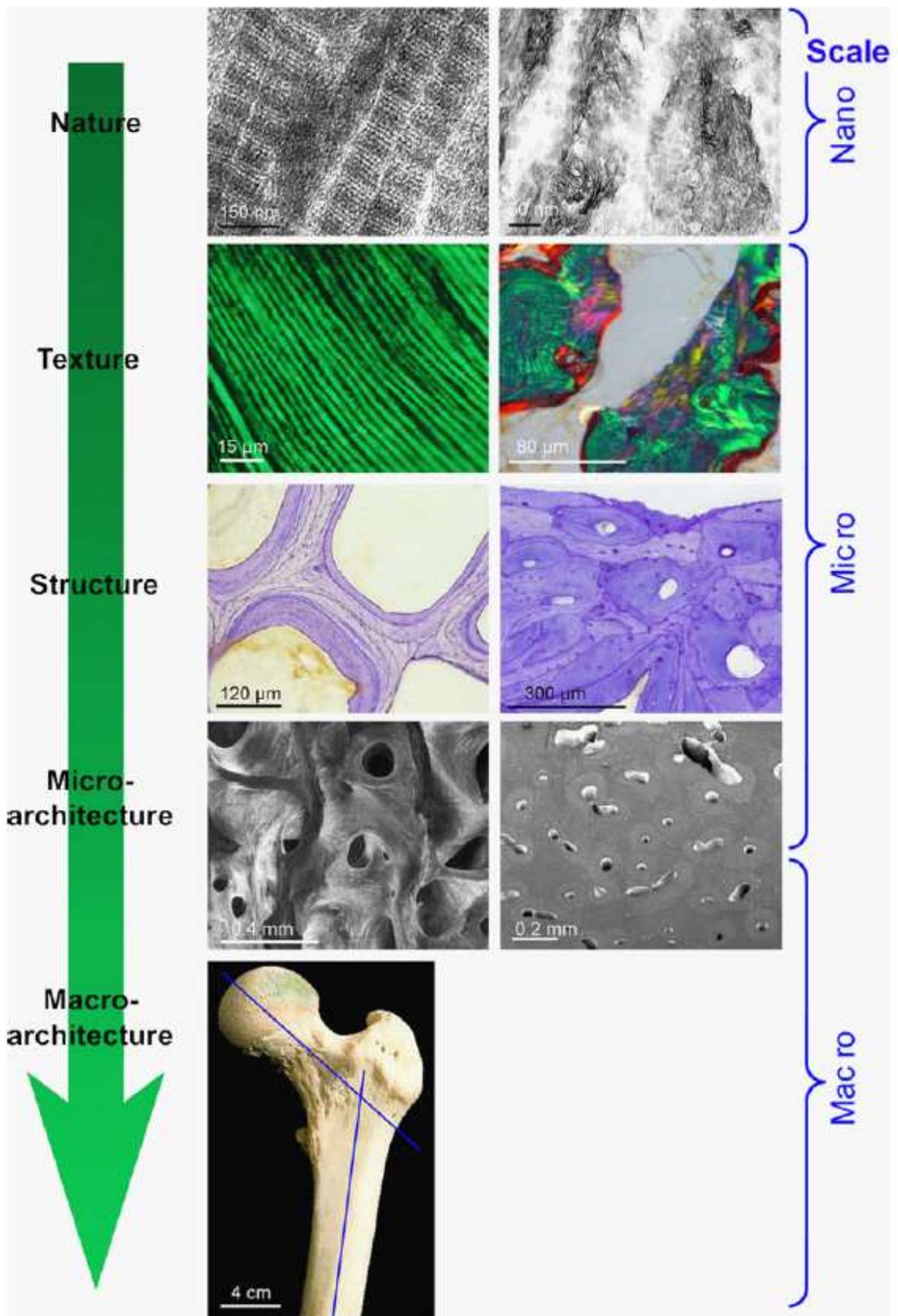


Figure 1 : représentation des cinq niveaux d'analyse permettant de décrire l'os : nature, texture, structure, microarchitecture et macroarchitecture. D'après Chappard et al. (2011).

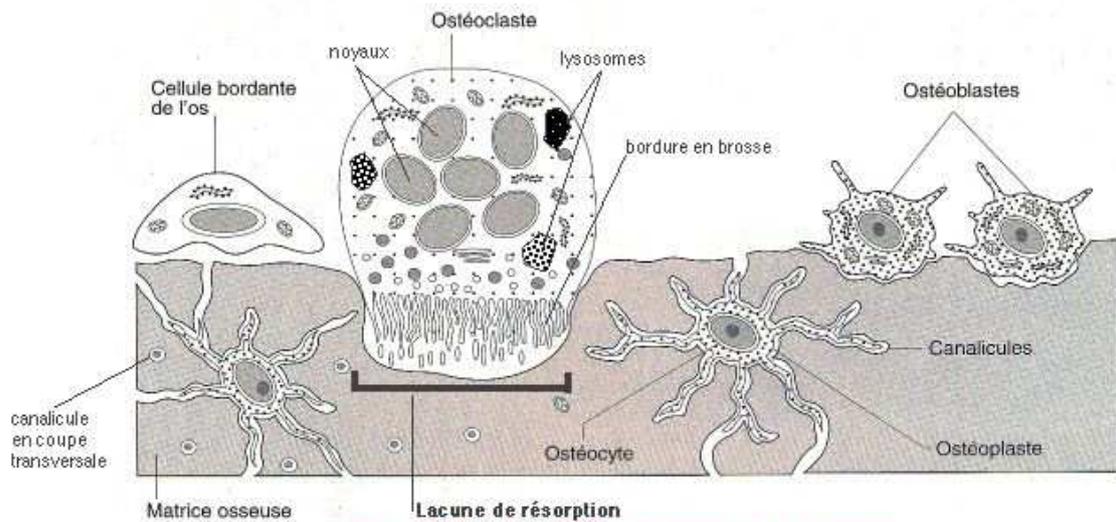


Figure 2 : représentation schématique de la fraction cellulaire du tissu osseux. D'après Balas & Philip (2010).

## (2) Les cellules ostéorésorbantes

**Les ostéoclastes**, sont de grosses cellules multinucléées d'origine hématopoïétique. Ils dérivent des mêmes précurseurs que les monocytes. Ces cellules peuvent atteindre jusqu'à 100µm de diamètre et sont mobiles : elles ont la capacité de se déplacer à la surface du tissu osseux. Ils ont pour action de résorber le tissu osseux. Ils se situent à la surface de la matrice osseuse et procèdent dans un premier temps en décalcifiant la matrice organique, puis en la dégradant. Les lacunes créées après l'action des ostéoclastes sont appelées lacunes de Howship et sont visibles en microscopie optique (figure 3).

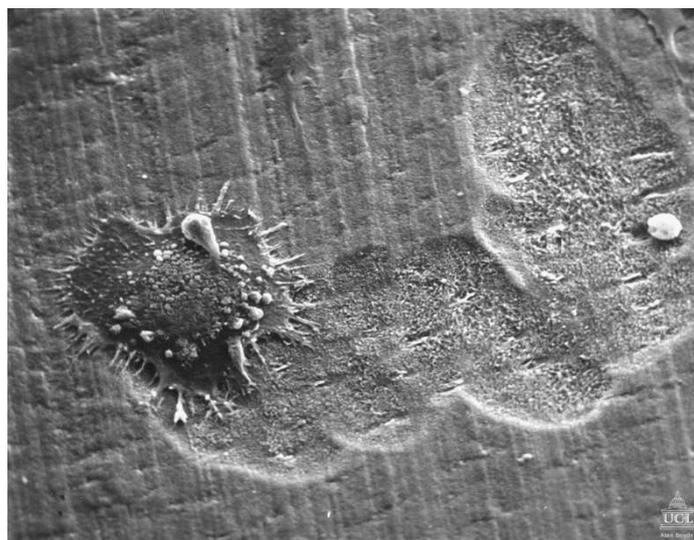


Figure 3 : image d'un ostéoclaste en culture sur une tranche d'os observé en microscopie à balayage. Photographie Boyde (2015).

## *b) La matrice extra-cellulaire*

---

Elle occupe environ 90 % du volume tissulaire et peut être subdivisée en matrice organique (de l'ordre de 20 %) et inorganique (environ 70 %). Les 10 % restants sont constitués d'eau, mais la teneur en eau est variable selon l'âge et le degré de minéralisation.

## *c) La matrice organique*

---

La trame organique du tissu osseux est principalement constituée d'une substance fibrillaire, contenant des protéines fibreuses structurales (majoritairement composée de collagène de type 1), d'une substance interfibrillaire protéique non collagénique et de lipides.

### **– Le collagène de type 1**

Le collagène de type 1 est également nommé collagène fibrillaire. Il représente quasiment 90 % des macromolécules de la matrice organique. Il est formé de l'assemblage de trois chaînes alpha de polypeptides synthétisés par les ostéoblastes. Ce réseau fibreux caractéristique, favorise la minéralisation par la fixation sur les fibres de collagène, de cristaux d'hydroxyapatite qui confère sa dureté au tissu osseux. C'est l'orientation des fibrilles de collagène qui va conférer à l'os sa capacité de résistance aux forces de tension (Alberts et al., 1995).

### **– La substance interfibrillaire**

Les fibrilles de collagène sont séparées entre elles par une substance fondamentale interfibrillaire qui représente 10 % de la matrice organique osseuse. Elle est composée d'éléments très variés tels que des glycoprotéines (ostéonectines et sialoprotéine), des phosphoprotéines, des protéolipides, des protéines contenant des acides gamma-carboxyglutamiques (ostéocalcines) et des protéoglycans (Pastoureau, 1990). Les protéoglycans sont des molécules à fort pouvoir osmotique qui attirent et retiennent l'eau pour former des gels hydratés. La phase aqueuse de ces gels, permet la diffusion rapide des nutriments, des métabolites et des hormones entre le sang et les cellules du tissu. Cependant dans le tissu osseux, la phase aqueuse sera rapidement remplacée par les minéraux qui vont durcir la matrice et les phénomènes de diffusion seront fortement amoindris.

## *d) La phase minérale*

---

L'os est un réservoir métabolique de sels minéraux. La dureté et la rigidité du tissu osseux sont dues à la présence de sels minéraux dans la matrice ostéoïde et plus particulièrement de calcium et d'hydroxyde de phosphate. Lorsqu'ils précipitent, ils forment des cristaux d'hydroxyapatite thermodynamiquement stables, dont la formule chimique est  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  (ou en terme cristallographique  $\text{Z}_{10}\text{B}_6\text{A}_2$ ), qui cristallisent dans le système hexagonal (Zazzo, 2010). Ces

cristaux se fixent entre et sur les fibres de collagène afin d'assurer la minéralisation de l'ostéoïde. Outre le calcium et les phosphates, on trouve également dans la matrice inorganique des carbonates, un tiers des réserves corporelles de sodium, du magnésium, du zinc, des fluoroapatites, du manganèse et du cuivre ainsi que sous forme de traces, du plomb, du fer, des citrates, des esters de phosphate, des diphosphonates, des pyrophosphates et des amines acides qui peuvent se substituer à l'un des éléments du cristal d'hydroxyapatite.

L'ensemble des propriétés mécaniques du tissu osseux repose sur cette dualité organique/minéral. Les constituants minéraux assurent la rigidité et permettent la résistance aux sollicitations mécaniques (Gupta et al., 2006).

## 2. Texture du tissu osseux

---

L'orientation des fibres de collagène au sein de la matrice extra cellulaire, va permettre de distinguer deux types de tissus osseux. Le tissu osseux fibreux et le tissu osseux lamellaire.

### a) *L'os fibreux*

---

L'os fibreux ou réticulé est un os immature. Il est de dépôt rapide et de faible résistance mécanique. C'est un os de transition ayant une courte durée de vie en réponse à une période physiologique spécifique (développement fœtal et périnatal, stress inflammatoire, tumoral ou traumatique). Il est caractérisé par la structure plexiforme (peu structurée) de sa trame collagénique et des cristaux phosphocalciques de taille réduite. Il est rapidement remplacé par de l'os lamellaire, mais il peut toutefois persister (os fibreux fasciculé) dans certaines zones à fort remodelage, telles que les insertions tendineuses ou ligamentaires et les alvéoles dentaires (Olejnik, 2014).

### b) *L'os lamellaire*

---

L'os lamellaire est un tissu mature mécaniquement résistant. Les fibres de collagène sont organisées en lamelles concentriques et forment des ostéones. Au sein d'une lamelle, les fibres sont parallèles entre elles et forment des angles variables, proches de 90°, avec les fibres adjacentes. En microscopie optique en lumière polarisée, il a un aspect bi-réfringent caractéristique.

Tous les systèmes lamellaires sont composés de deux types de lamelles différentes qui s'alternent régulièrement et lui confèrent son aspect stratifié :

- **les lamelles fibrillaires** très riches en fibres de collagène, de minéralisation et d'épaisseur moindre. Elles possèdent un aspect bi-réfringent ;
- **les lamelles cémentantes** très riches en ciment et possédant un aspect isotropique.

### 3. Structure du tissu osseux (figure 4)

---

Le tissu osseux est constitué de deux catégories d'os : l'os cortical et l'os trabéculaire. L'ensemble est entouré d'un tissu osseux périosté et du périoste.

#### *a) L'os cortical*

---

L'os cortical, compact et dense, représente à lui seul 80 % du squelette (paroi externe de toutes les pièces osseuses et diaphyses des os longs). Il a une fonction de protection et de résistance mécanique. Sa structure, de type Haversienne est composée d'ostéons : l'unité histophysiological. Chaque ostéon est formé par un canalicule vasculaire entouré de lamelles osseuses concentriques. Ils sont reliés par des canaux transversaux ou canaux de Volkmann. Dans le canal central, des vaisseaux sanguins et des fibres nerveuses peuvent être observés (Thomas et al., 2010).

#### *b) L'os trabéculaire*

---

L'os trabéculaire ou spongieux représente 20 % du squelette (centre des épiphyses, zones métaphysaires, os courts et plats). Il est caractérisé par des travées osseuses en forme de plaques ou de colonnes, interconnectées entre elles et formant un réseau tri-dimensionnel au contact du tissu médullaire. Il est formé d'ostéons incomplets avec une apparence en arc de cercle.

Son rôle est principalement métabolique. Il possède une large surface d'échange avec les tissus interstitiels.

Il s'agit d'un tissu très vascularisé, riche en éléments adipeux et hématopoïétiques qui bénéficie d'une capacité de renouvellement rapide (Rho et al., 1998).

#### *c) Le tissu osseux périosté*

---

Le tissu osseux périosté est un tissu intermédiaire constitué de lamelles circonférentielles situées entre l'os cortical et le périoste.

#### *d) Le périoste*

---

Le périoste, enfin, est une couche de tissu conjonctif dense et orienté, fortement vascularisé qui adhère à la majorité des parties superficielles de l'os.

Il est constitué de deux couches : une couche externe fibreuse et une couche interne cellulaire, à partir de laquelle se forme le tissu osseux diaphysaire qui entoure la cavité médullaire centrale. Sa couche externe est riche en fibre de collagène de type 1, entre lesquelles il est possible de visualiser des noyaux aplatis de fibroblastes. Ce périoste externe est qualifié de stérile, car il ne participe pas à la formation du tissu osseux. La couche interne en revanche, plus riche en cellules, forme le périoste fertile. Il est responsable de l'élargissement de la diaphyse en période de croissance ou de la cicatrisation de l'os après une éventuelle fracture.

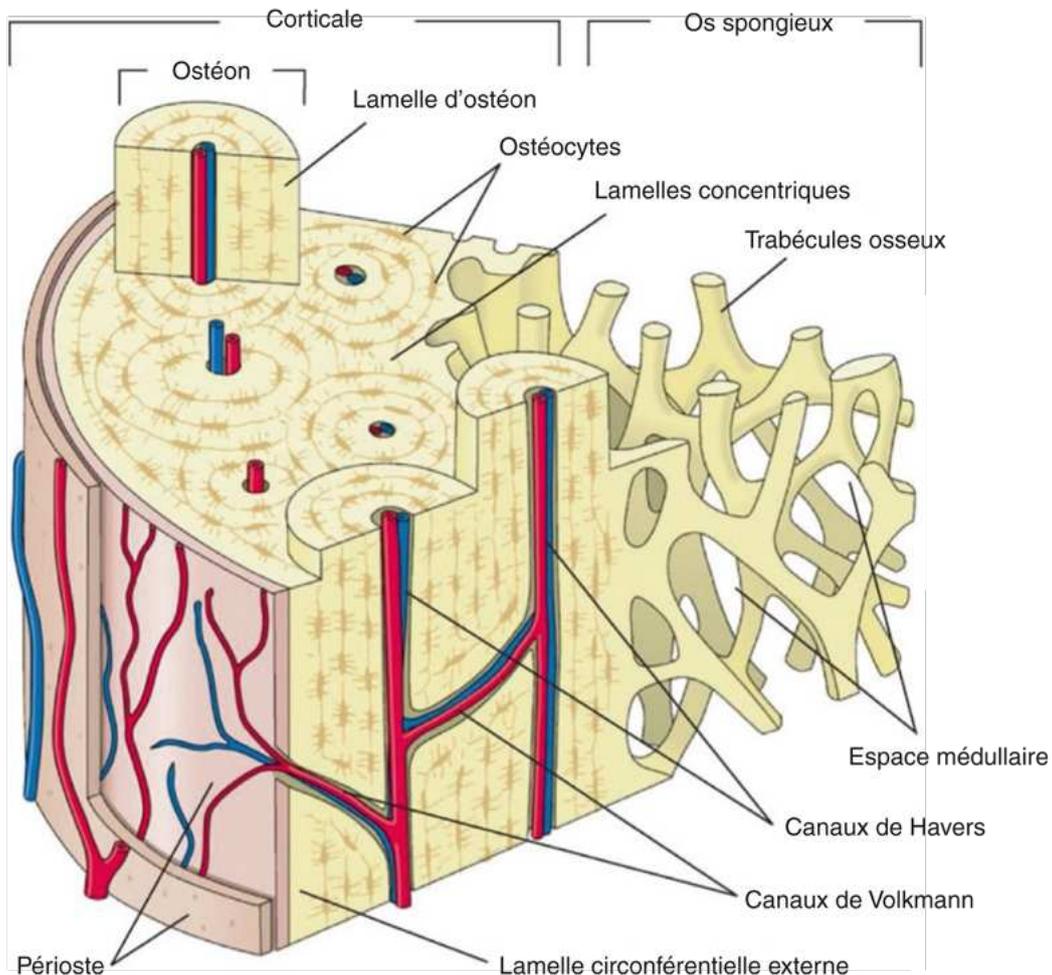


Figure 4 : représentation schématique de la structure du tissu osseux, d'après Huch & Jürgens (2019).

#### 4. Microarchitecture osseuse

Dans l'os cortical les ostéons sont disposés de telles sortes que les canaux de Havers sont parallèles à la résultante des lignes de contraintes qui s'opposent à l'os. L'os trabéculaire en revanche, est dépourvu de système Haversien. Il est composé de deux types de trabécules. Le premier type correspond à des trabécules disposées le long des lignes de stress.

Elles sont reliées entre elles, par un second type, plus fines, permettant d'assurer la cohésion du réseau.

Grâce à son architecture, l'os trabéculaire joue un rôle dans la résistance à la compression et au transfert des forces à l'os cortical.

La microarchitecture osseuse de l'os trabéculaire est un facteur important dans l'appréciation de la qualité du tissu osseux. En effet, la valeur biomécanique de l'os dépend d'une part de son volume mais aussi de sa répartition spatiale, c'est à dire de sa microarchitecture (Chappard, 2010).

## 5. Macroarchitecture du tissu osseux

---

Les os peuvent être classés suivant des critères morphologiques en quatre catégories : os longs (fémur, tibia, humérus...), os courts (tarse, carpe...) os plats (sternum, crane, scapula...) et os complexes (vertèbres, base du crâne...). C'est la forme particulière d'un os qui lui confère sa capacité de résistance aux forces de tension, de traction et de cisaillement.

Les os longs servent classiquement de modèle pour décrire la structure de l'os.

Chez l'adulte, l'os long est constitué d'une partie centrale, la diaphyse et de deux extrémités élargies et arrondies, recouvertes de cartilage : les épiphyses. Les métaphyses connectent la diaphyse à chaque épiphyse. Pendant la croissance, l'épiphyse est séparée de la métaphyse par une couche intermédiaire de cartilage hyalin où les chondrocytes subissent d'intenses divisions, il s'agit de la plaque de croissance métaphysaire.

**Quelles que soient les modifications diagénétiques subies par un os, si le fragment observé a conservé sa forme initiale, il est généralement possible de l'identifier visuellement ou au moins le classer dans l'une de ces quatre catégories macro-architecturales.**  
**Cette classification morphologique est celle qui sera utilisée dans notre étude, lorsque nous traiterons de la problématique de la détermination anatomique des fragments osseux.**

## 6. Le remodelage osseux

---

Afin de maintenir son intégrité et assurer une balance phosphocalcique équilibrée, le tissu osseux se régénère continuellement.

Les cellules, ostéoblastes et ostéoclastes, participent activement à son renouvellement permanent. On estime que le temps nécessaire pour remplacer la totalité de l'os spongieux est d'environ cinq ans et d'une dizaine d'années pour l'os cortical (Meunier, 2003). Chez un sujet jeune et en bonne santé, l'ensemble des taux de résorption et de formation reste constant, permettant la conservation de la masse osseuse. Chaque année, un homme adulte renouvelle environ 25 % de son os trabéculaire et 4% de son os cortical, soit environ 10 % du squelette.

Lors du remodelage, les ostéoclastes et les ostéoblastes travaillent d'une manière conjointe sous la forme d'unités de bases multicellulaires ou BMU (basal multicellular unit).

Il se déroule ainsi en quatre phases successives (figure 5).

#### *a) La phase d'activation*

---

La phase d'activation est sous l'influence de facteurs ostéo-résorbants (parathormone, vitamine D3, prostaglandine E2). Les cellules bordantes se rétractent, dégradent la couche collagénique et attirent par chimiotactisme les pré-ostéoclastes sur la zone exposée afin qu'ils fusionnent entre eux pour devenir des ostéoclastes actifs. Cette différenciation est sous la dépendance de trois molécules : OPG, ODF et RANK. Cette phase a une durée d'environ 10 jours.

#### *b) La phase de résorption*

---

La phase de résorption est constituée de deux étapes, après fixation des ostéoclastes sur la matrice. La première étape consiste en la dissolution de la phase minérale par acidification du compartiment de résorption. Dans un second temps, il y a une dégradation de la matrice organique sous l'action d'enzyme protéolytique lysosomale.

#### *c) La phase d'inversion*

---

La phase d'inversion correspond au remplacement des ostéoclastes, par des cellules de type macrophagique, au niveau de la lacune. Ces cellules sont rapidement remplacées par des précurseurs ostéoblastiques qui vont se différencier en ostéoblastes matures et assurer une nouvelle phase de formation.

#### *d) La phase de formation*

---

La nouvelle phase de formation du tissu osseux est la phase la plus longue et dure approximativement trois mois. Elle comporte deux étapes : la production de matrice osseuse par les ostéoblastes et la minéralisation de cette matrice.

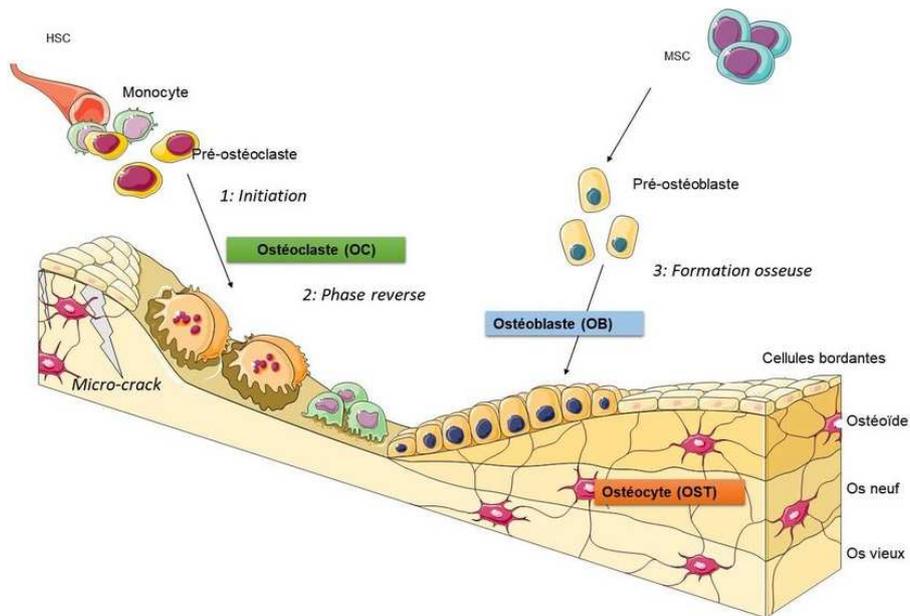


Figure 5 : représentation schématique des différentes étapes du remodelage osseux. D'après la banque d'images Servier Medical Art).

### e) *Contrôle du remodelage osseux*

Le contrôle du remodelage osseux est une étape essentielle dans le maintien de l'homéostasie phosphocalcique. Il est soumis à l'influence de multiples facteurs hormonaux, agissant par voie systémique et des facteurs locaux capables de modifier l'activité des cellules osseuses. Tout dérèglement dans les processus de contrôle entraîne des répercussions sur cet équilibre.

Le pic de masse osseuse est normalement atteint à la fin de l'adolescence. Il est sous l'influence de facteurs génétiques et environnementaux, tels que l'alimentation ou l'exercice physique. Par la suite la masse osseuse décroît avec l'âge. Toutefois, il existe des mécanismes pouvant accentuer ce phénomène, en particulier après la ménopause chez la femme.

Le profil de la perte osseuse est très différent selon le sexe. Au-delà de 50 ans, la femme subit une perte osseuse plus importante que celle de l'homme, l'accélération du remodelage osseux étant liée à la carence oestrogénique. La raréfaction osseuse s'accélère en particulier au niveau de l'os spongieux : avec l'âge, le nombre de travées diminue de manière irréversible. De plus, la carence en œstrogène induit une augmentation de la fréquence du remodelage avec une résorption plus élevée que la formation. Le bilan est donc négatif.

On observe que la perte osseuse est très importante dans les années qui suivent la ménopause puis se ralentit par la suite. De nos jours, un traitement hormonal substitutif est capable d'interrompre ce phénomène et par conséquent de diminuer les risques d'ostéoporose.

Par ailleurs, d'autres facteurs peuvent influencer la perte osseuse : il s'agit des ostéoporoses secondaires dont les étiologies multiples sont détaillées dans le tableau 1.

Pathologies endocrines	Causes génétiques
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hypogonadisme</li> <li>- Syndrome de Cushing</li> <li>- Hyperthyroïdie</li> <li>- Hyperparathyroïdie</li> <li>- Diabète de type 1 et 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ostéogenèse imparfaite</li> <li>- Mutations du récepteur aux œstrogènes*</li> <li>- Mutations du gène de l'aromatase*</li> <li>- Homocystinurie</li> </ul>
Pathologies digestives	Causes médicamenteuses
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Malabsorption</li> <li>- Entérocolopathie inflammatoire chronique</li> <li>- Cirrhose biliaire I</li> <li>- Chirurgie bariatrique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Corticothérapie</li> <li>- Hormones thyroïdiennes (doses freinatrices)</li> <li>- Agonistes GHRH</li> <li>- Inhibiteurs de l'aromatase</li> <li>- Thiazolidinediones</li> <li>- Anticonvulsivants</li> <li>- Anticalcineurines (cyclosporine A, Tacrolimus)</li> <li>- Chimiothérapie</li> <li>- Héparines non fractionnées</li> <li>- Inhibiteurs de la recapture de la sérotonine</li> <li>- Inhibiteurs de la pompe à protons</li> <li>- Antirétroviraux</li> </ul>
Pathologies générales	Autres causes
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Arthrite rhumatoïde</li> <li>- Polyarthrite ankylosante</li> <li>- Lupus érythémateux disséminé</li> <li>- Myélome multiple</li> <li>- Mastocytose</li> <li>- Insuffisance rénale, hémodialyse chronique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alcoolisme, tabagisme</li> <li>- Hypercalciurie</li> <li>- Immobilisation</li> <li>- VIH</li> </ul>

\* Chez l'homme.

**Tableau 1 : différentes étiologies possibles des ostéoporoses d'après la Société Française d'Endocrinologie (CEEDMM, 2022).**

## 7. La diagénèse de l'os normal

---

La diagénèse correspond aux modifications post-mortem du tissu osseux. Elle est influencée par son environnement immédiat et va résulter d'un échange entre du matériel exogène qui va être incorporé dans l'os (absorption de cations et d'anions par l'hydroxyapatite, de matériel organique environnemental...) et ce dernier qui va relarguer ses composants endogènes vers le milieu extérieur (perte de l'hydroxyapatite, lessivage des molécules organiques osseuses solubles dans l'eau...). Ce phénomène intègre des processus microbiologiques, des mouvements d'eau et une recristallisation minérale pouvant entraîner la désintégration complète du matériau osseux (Delannoy, 2016; Delannoy et al., 2016; Hedges, 2002; Hedges & Millard, 1995; Turner-Walker & Mays, 2007). L'ensemble des processus diagénétiques peut être mesuré par différentes méthodes (Delannoy, 2016).

### a) *L'index de préservation histologique (tableau 2)*

---

Il permet à partir de coupes histologiques de mettre en évidence l'altération structurelle de l'os. Il est classé sur une échelle allant de 0 à 5 selon Hedges & Millard (1995)

Index	Pourcentage d'os intact	Description
0	<5	Pas de structure identifiable autre que les canaux de Havers.
1	<15	Petites surfaces d'os préservé.
2	<33	Os lamellaire présent entre les lacunes osseuses.
3	>67	Préservation d'os ostéonique.
4	>85	Quelques lacunes présentes entre les structures ostéoniques et lamellaires.
5	>95	Pas de différence structurelle avec un os frais.

Tableau 2 : paramètres qualitatifs et quantitatifs de l'index de préservation histologique selon Hedges & Millard (1995), repris par Delannoy (2016).

### b) *L'analyse de la perte de collagène*

---

La perte du collagène est essentiellement le fait des attaques microbiennes sur l'os. Nous avons vu précédemment que l'os frais avait une teneur protéique de l'ordre de 20% de sa masse et était composée de 90 % de collagène de type 1. À mesure que le tissu osseux se dégrade, sa

teneur en protéine diminue quantitativement et qualitativement. Cette perte peut être mesurée par différentes méthodes : l'analyse de la teneur en azote, l'analyse radio-isotopique du  $^{14}\text{C}$ , l'analyse de la phase minérale (étude des ratios de phases par méthodes spectroscopiques) et la mesure de porosité de l'os. Cette perte en collagène, est à l'origine d'une fragilité de l'os à l'échelle macroscopique et laisse les cristaux de bioapatite sans protection à l'échelle microscopique et nanoscopique.

### *c) La modification de la cristallinité*

---

Il a été mis en évidence au cours de la diagénèse une augmentation de l'index de cristallinité. Cette augmentation serait majoritairement due aux phénomènes de recristallisation de l'hydroxyapatite et d'altération collagénique, qui provoqueraient d'une part une réorganisation de la microporosité et d'autre part une perte de la stabilité de la matrice minérale (Hedges, 2002).

### *d) Les modifications de porosité*

---

La disposition et la distribution de la taille des pores au moment de l'enfouissement sont de grands prédictors de la décomposition ou de la survie osseuse. En effet, les pores interviennent dans l'accès des agents destructeurs tels que les bactéries et l'eau. Au fur et à mesure du processus de diagénèse, la porosité va augmenter et sera due à des modifications tant minérales qu'organiques. Une mesure de la porosité pourra être effectuée en quantifiant la teneur en humidité de l'os. D'autres méthodes existent comme les méthodes d'infiltration au mercure ou à l'azote ainsi que les analyses par microtomographie.

### *e) La teneur en carbonates*

---

Lors de la diagénèse, on observe une diminution de la teneur en carbonate de l'os, reliée à des phénomènes de dissolution minérale. Elle peut être évaluée par la mesure du ratio carbonate/phosphate par spectrométrie.

## B. Le corps soumis à l'action du feu

---

### 1. Quelques généralités sur le feu

---

Le feu est une réaction d'oxydation exothermique qui génère de la lumière et de la chaleur (DeHaan, 2015, 2002).

Pour qu'un incendie survienne, trois conditions doivent être réunies : c'est ce que l'on appelle le triangle de feu.

- La première condition est la présence d'un combustible sous la forme appropriée.
- La deuxième condition sera la présence d'un comburant (en général, l'oxygène de l'air). La quantité d'oxygène doit être suffisante afin qu'elle puisse entretenir la combustion.
- Enfin il sera nécessaire qu'il y ait une source d'inflammation (étincelle, flamme, chaleur...).

Sans ces trois éléments, le feu ne peut pas exister. La quantité disponible des différents éléments et leur interaction déterminent la durée et l'intensité du feu et donc son impact sur le corps (DeHaan, 2015; Devlin & Herrmann, 2013).

Le feu existe sous deux formes : la combustion vive et la combustion lente.

#### *a) La combustion vive ou le feu de flamme*

---

Elle résulte de la combustion d'un combustible à l'état gazeux brûlant en présence d'oxygène (réaction gaz-gaz). Ce combustible peut être sous la forme d'un gaz (méthane par exemple), de vapeurs d'un combustible liquide (essence, pentane...) ou également les vapeurs dégagées de la dégradation d'un combustible solide. À l'exception des combustibles métalliques réactifs tels que le sodium ou le potassium, les combustibles solides doivent être transformés en une forme vapeur qui subira une combustion enflammée. Cela peut se faire par sublimation (cas du naphthalène), fusion et évaporation (cire de bougie) ou décomposition thermique (pyrolyse). La pyrolyse est le processus fondamental. C'est une étape nécessaire pour presque tous les feux avec des combustibles solides.

Au sein du corps humain, le meilleur « combustible » est représenté par la graisse sous cutanée (DeHaan & Nurbakhsh, 2001; Nikita, 2021). La graisse fraîche, présente une température d'auto-inflammation d'environ 350°C, mais ses vapeurs peuvent s'enflammer dès 250°C (Babrauskas, 2003; DeHaan, 2015). La quantité de tissu graisseux disponible aura donc un impact sur la durée et l'intensité du feu (Devlin & Herrmann, 2013; Nikita, 2021).

## *b) La combustion lente ou feu couvrant*

---

La combustion est dite lente lorsqu'un combustible solide est en contact direct avec l'oxygène (réaction solide-gaz). Si cette réaction se déroule assez rapidement pour que la température du combustible atteigne 500°C, l'incandescence de la surface le rendra visible à l'œil humain (DeHaan, 2015).

Le feu de flamme est la forme la plus courante de feu destructeur. Il est capable de se propager à des vitesses très élevées et engendrer des températures extrêmes.

Les flammes peuvent être soit laminaires, soit turbulentes. Les petites flammes, comme celles d'une bougie, sont laminaires, avec des zones ou des couches superposées de réaction chimique. Certaines zones d'une flamme laminaire peuvent atteindre des températures très élevées de l'ordre de 1400°C et une flamme remélangée dans une lampe à souder par exemple possède une zone dont la température est supérieure à 3000°C (DeHaan, 2015).

## 2. Résultats des effets de la chaleur sur le corps humain

---

Même soumis à des températures extrêmes, le corps humain ne brûle pas en totalité et ne peut être entièrement détruit (Bass, 1984; Brickley et al., 2007; Steckel et al., 2018; Zana et al., 2017). Les effets de la chaleur sont variables selon la proximité du corps dans le feu, la température et la durée d'exposition. De plus, la température atteinte dépendra de la quantité d'oxygène disponible, de la taille et du volume du corps et des vêtements ou de tout autres éléments recouvrant le corps (Binford, 1963; Symes et al., 2015). Si l'on ne considère ici que le squelette, l'ensemble des tissus mous peuvent donc avoir un effet protecteur, limiter les transferts de chaleur et restreindre la quantité d'oxygène disponible.

L'attitude pugilistique (figures 6 et 7) également connue sous le nom « d'attitude du boxeur » correspond à un rétrécissement induit par la chaleur, des muscles, des tendons et des ligaments. Elle surviendrait en 10 à 15 minutes (Quatrehomme et al., 2015; Symes et al., 2015; Ubelaker, 2009). Cette position caractéristique engendre une protection pour certaines régions du squelette alors que d'autres sont paradoxalement beaucoup plus exposées à la chaleur. La figure 8, issue de Symes et al. (2015) représente une cartographie schématique de la séquence d'atteinte thermique d'un squelette en posture pugilistique.

Chaque partie du squelette est affectée par sa propre séquence de destruction initiale, secondaire ou finale en raison de la dynamique des tissus qui protègent l'os. Toutefois, il est à noter que chaque cas est unique et que la position initiale du corps, la corpulence de l'individu, la pathologie ou la présence de vêtements sont autant de paramètres pouvant modifier cette séquence.

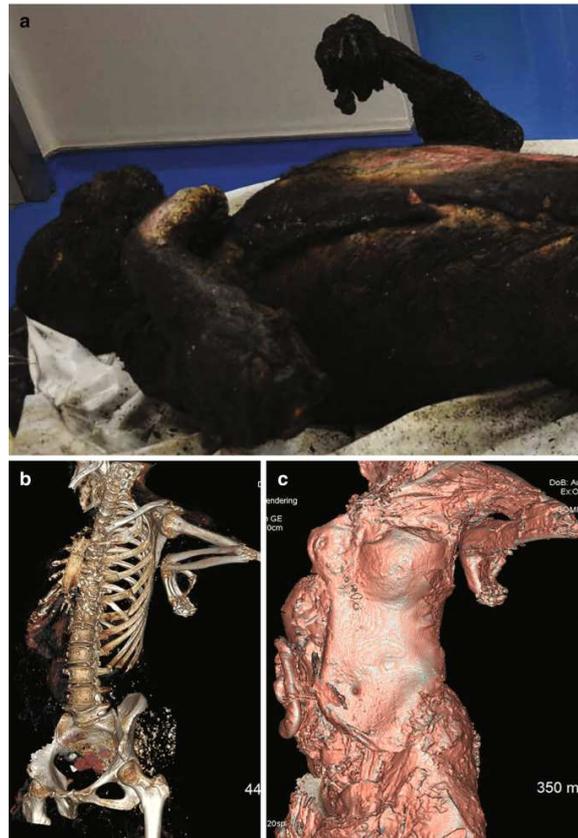


Figure 6 : exemple d'un corps dans une attitude pugilistique. Elle associe une flexion des doigts dans la paume de la main, une flexion palmaire du poignet, une flexion du coude et une légère abduction des épaules. Exemple issu de Gaha et al. (2022).



Figure 7 : mise en évidence de l'attitude pugilistique persistante au membre supérieur droit sur un corps dans un état de carbonisation avancée.

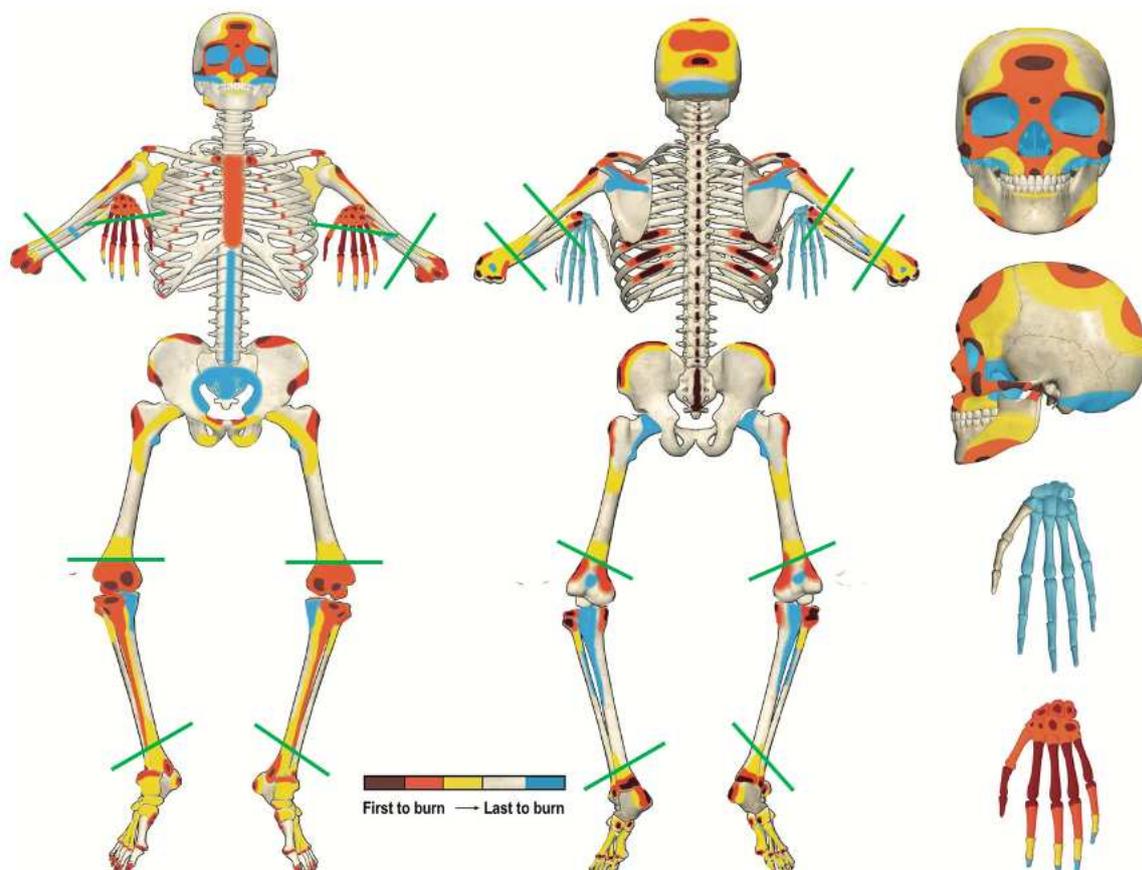


Figure 8 : schématisation d'un squelette humain dans une attitude pugilistique (vue antérieure et postérieure). Cette image met en évidence une chronologie d'atteinte des différentes parties du corps : en marron les zones atteintes en premier en bleu celles atteintes en dernier. Les lignes vertes indiquent les zones communes de fracture thermique. D'après Symes et al. (2015).

### 3. Modifications osseuses

Il a été établi qu'il existait une intime relation entre la fraction organique et la fraction minérale qui forment la matrice osseuse. La chaleur va affecter ces deux éléments de différentes façons. Dans une première partie, nous allons présenter les différentes atteintes de l'os d'un point de vue macroscopique, puis nous détaillerons dans un second temps les changements qui se produisent à l'échelle microscopique.

### (1) **Évolution de la couleur de l'os**

L'évolution de la couleur est une des données les plus couramment utilisée pour caractériser l'action du feu sur l'os. Les changements d'aspect visuel de l'os soumis à la chaleur se traduisent par une échelle de couleur qui évolue de façon progressive avec l'augmentation de la température d'exposition selon cette trame (figure 9) :

- aspect jaune translucide qui correspond à un os intact ;
- coloration brune qui correspond à la dégradation de l'hémoglobine (Gejvall, 1969; Lisowski, 1968) ;
- aspect noirci qui signe la carbonisation ;
- coloration gris-bleu cendré qui est due à la pyrolyse des composants organiques de l'os ;
- enfin, l'os apparaît blanc lorsqu'il se trouve au stade de calcination (Shipman et al., 1984; Symes et al., 2015).

D'autres couleurs, ocre, rose, rouge, vert ont également été observées (Dunlop, 1978; Mays, 1998). Elles sont plus anecdotiques et correspondraient à la présence d'éléments tels que le cuivre, le fer, le bronze ou le zinc dans l'environnement (Dunlop, 1978; Mayne Correia, 1997) ou plus rarement le sujet lui-même dans le cadre de pathologie telle que la maladie de Wilson<sup>1</sup> par exemple (Duclos-Vallée et al., 2006).



Figure 9 : évolution colorimétrique de l'os brûlé, à partir de l'os intact (jaune translucide) jusqu'à l'os calciné (blanc). D'après Nikita (2021), adapté de Devlin & Herrmann (2013).

Depuis des décennies les auteurs ont donc décrit, étudié macroscopiquement et par système colorimétrique ces changements de couleurs afin d'en tirer des informations supplémentaires sur les températures d'exposition (Binford, 1963; Buikstra & Swegle, 1989; Devlin & Herrmann, 2008; Shipman et al., 1984; Walker et al., 2008).

---

<sup>1</sup> La maladie de Wilson est une maladie génétique due au dysfonctionnement d'une protéine localisée dans le foie, qui se caractérise par l'accumulation excessive de cuivre dans l'organisme, en particulier dans les cellules du foie et du cerveau.

De façon générale, les données suivantes ont été établies. Jusqu'à 200°C l'os conserve son aspect et sa couleur naturelle blanc-jaunâtre (ivoire) ensuite, le léchage des flammes ou l'enfumage lui donne une couleur jaunâtre tirant vers le brun-marron entre 300 et 400 °C (Bonucci & Graziani, 1975; Herrmann, 1988). L'aspect noir de l'os survient autour de 400 °C environ et correspond au dépôt de carbone lors de la combustion incomplète des substances organiques (Grevin, 2011). Au-delà de 500°C, l'atteinte devient sévère (Van Vark, 1970). L'os devient bleu-grisâtre, évoluant progressivement jusqu'à une couleur blanche à partir de 800°C (Bonar & Glimcher, 1970; Ubelaker, 1989).

Thompson (2016) propose une photographie montrant l'évolution colorimétrique à des températures de combustion définies (figure 10) et Grevin (2004) a proposé un tableau résumant les changements de couleurs en fonction des températures d'ustion (Tableau 3).

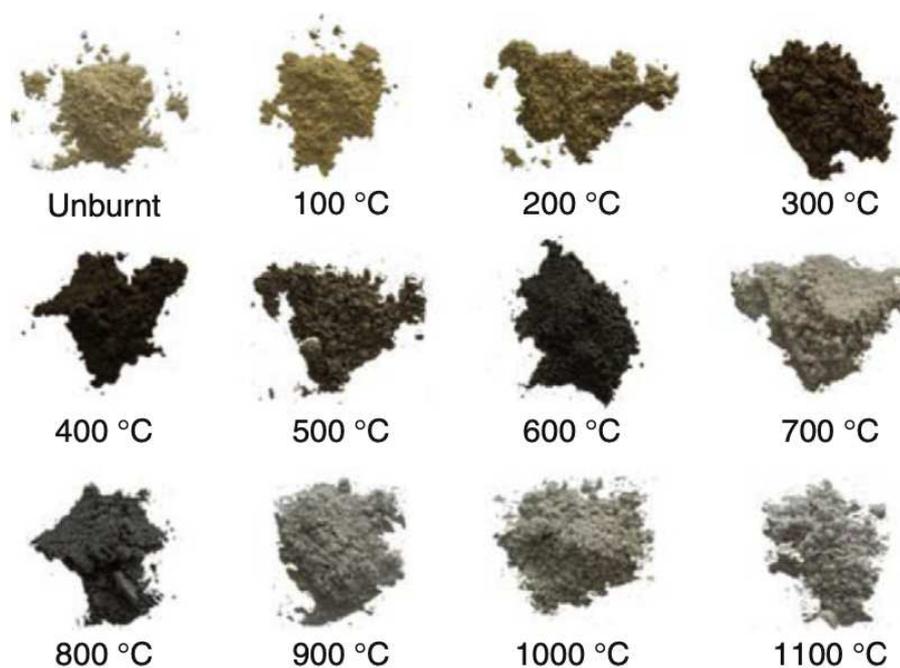


Figure 10 : évolution colorimétrique de l'os selon l'élévation de la température. Extrait de Thompson (2016).

Stades	Couleurs	Températures
I	Blanc jaunâtre Blanc cassé Brunâtre	<200°C Autour de 250°C
II	Marron Marron foncé Noir	Autour de 300°C Autour de 400°C
III	Gris Gris bleu Gris clair laiteux	Autour de 550°C
IV	Blanc laiteux mat Blanc crayeux	A partir de 650-700°C
V	Blanc	Environ 800°C

Tableau 3 : modification des couleurs en fonction des températures d'ustion, d'après Grévin (2004).

L'ensemble de ces couleurs reflète la réaction des matières organiques et inorganiques qui composent l'os (humain ou animal) à une augmentation de la température.

Toutefois, la température ne serait pas le seul élément intervenant dans la modification de l'aspect et plus précisément de la couleur de l'os (Bonucci & Graziani, 1975; Heglar, 1984; Herrmann, 1988; Shipman et al., 1984; Susini et al., 1988).

Grévin (2005), souligne que les changements de couleurs sont dépendants de la température mais également de la distance du foyer, de la durée d'exposition et de l'activité du foyer, même si ces données sont encore controversées (Grevin, 2005). En effet, pour certains auteurs, la durée d'exposition intervient peu (Walker et al., 2008) alors que d'autres insistent sur son importance (Buikstra & Swegle, 1989).

D'autres éléments peuvent également entrer en jeu, tel que l'origine anatomique par exemple. Les os brûlent dans les tissus mous et cette combustion n'englobe jamais uniformément toute la surface de l'os à un moment donné (Symes et al., 2015).

Symes et al. (1996) ont tenté de corréliser les modifications chimiques de l'os brûlé avec des bandes de couleurs reconnaissables. En effet, les os ne brûlent pas de façon uniforme. La chaleur produit un gradient de couleur au fur et à mesure que l'os se déshydrate et s'expose à la rétraction du tissu musculaire.

Il a été ainsi proposé quatre niveaux d'atteinte de l'os permettant de fournir des indications sur la progression thermique. Les catégories proposées sont les suivantes et sont illustrées sur la figure 11.

- **L'os calciné**, lorsque toute la matière organique et l'humidité de l'os ont disparu. Dans la plupart des cas, l'os calciné est déformé et fracturé, ce qui limite fortement ses possibilités de détermination anatomique et d'identification. Il est très fréquent que les régions calcinées des squelettes soient négligées par les enquêteurs ou les secours chargés de la levée de corps. Souvent, seul l'os cortical mince, soutenu par les travées

osseuses résiste à la déformation et reste reconnaissable et mesurable (Symes et al., 2015).

- **L'os carbonisé**, l'os est de couleur noire (qui demeure même après traitement en laboratoire). Cette couleur représente l'action par contact direct de la flamme (Herrmann, 1970). Sur le terrain bien que reconnaissable car il conserve ses caractéristiques morphologiques, il est extrêmement difficile à différencier des autres types de débris.
- **La zone de bordure** est une zone particulière identifiée par (Symes et al., 1996). Elle est de couleur blanc cassé et entoure les zones carbonisées. Cet aspect provient de la protection que confèrent les tissus mous du contact direct des flammes et des fumées. Toutefois, elle subit une déshydratation pouvant entraîner des fractures ou un écaillage des couches corticales externes. Cette zone est plus difficile à visualiser sur des restes archéologiques ayant subi une action taphonomique, en particulier à l'œil nu : les vestiges archéologiques présentent rarement ce gradient de couleurs.
- **La ligne de chaleur** est une zone étroite qui se situe à côté de la zone de bordure à la jonction entre l'os brûlé et non brûlé. Cette zone n'est pas toujours visible et est généralement plus étroite que la zone de bordure.

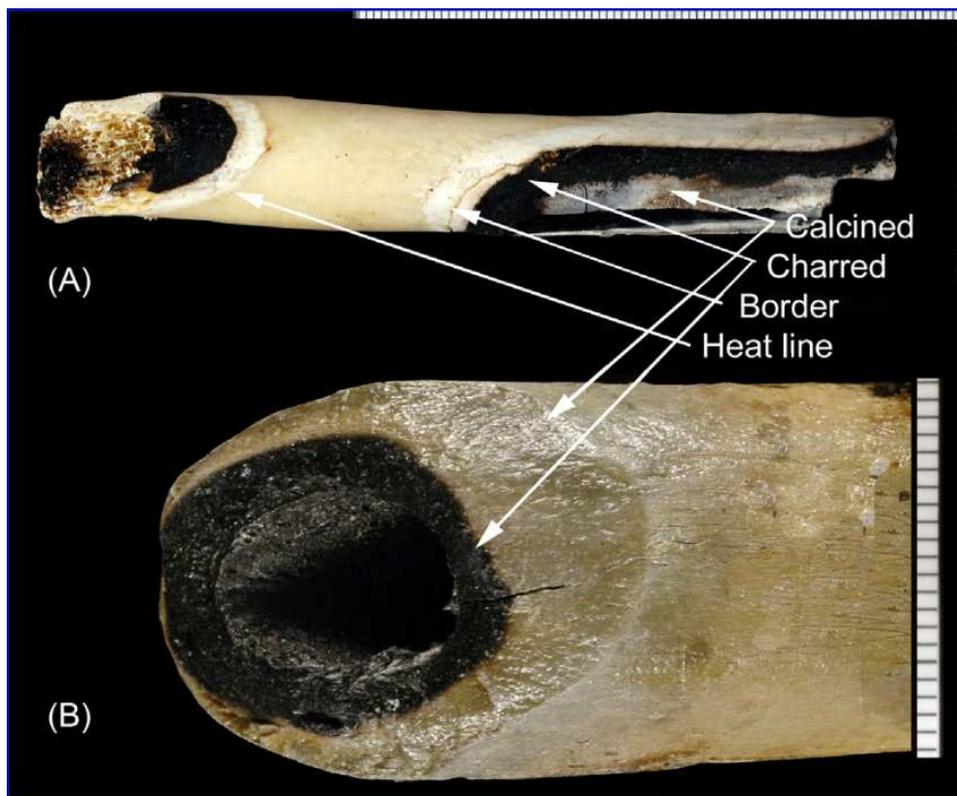


Figure 11 : (A) diaphyse de radius brûlé et fracturé par la chaleur ; (B) diaphyse d'humérus brûlé et fracturé par la chaleur. La variation de couleur montre que les os brûlent selon un gradient de l'extérieur vers l'intérieur et en dernier dans les zones de tissus mou épais. Extrait de Symes et al. (2015).

Il faut néanmoins rester prudent quant à l'interprétation des changements de couleur, en effet, certains auteurs ont suggéré que l'environnement des os pouvait exercer une influence sur la ou les couleurs de ceux-ci. Les sédiments peuvent entraîner une coloration noirâtre de l'os (Franchet, 1933). Depierre (2013) souligne un cas présenté par Grevin lors de la session 1994 du stage « Approche anthropologique des sépultures à incinération » d'une aile iliaque présentant une face blanche opposée à une face grise qui avait acquis cette teinte à la suite d'un contact de plusieurs jours avec les cendres d'un bûcher.

## (2) Atteinte morphologique

### ➤ La rétraction

Une réduction de la longueur et de la largeur des os se produit lors de la crémation en réponse à la déshydratation et la rétraction de la matière organique (Dokládál, 1971; Malinowski & Porawski, 1969; Piontek, 1975). Cette rétraction est un phénomène majeur à prendre en compte, car elle peut influencer les résultats de l'analyse anthropologique en termes d'identification. En effet, elle peut biaiser les observations réalisées et les conclusions concernant l'âge, le sexe ou la stature de l'individu (Depierre, 2013). Des restes féminins par exemple pourraient être surreprésentés du fait d'une erreur de sexe, liée à la rétraction thermique.

Certains chercheurs ont donc tenté de quantifier l'ampleur de ce changement à la fois dans l'os spongieux et dans l'os compact. Dokládál (1971) a établi un taux de rétraction de l'ordre de 5 à 12 % et Strzalko et al. (1974) de 6 à 13 %.

Herrmann (1976, 1977a, 1977b), a reconnu trois phases de rétraction corrélées avec l'augmentation de la température :

- 150 – 300°C → 1 à 2 % de rétraction ;
- 750 – 800°C → 1 à 2 % de rétraction également ;
- 1000 – 1200°C → 14 à 18 % de rétraction.

Ces résultats ont été confirmés par Byers (2005) retrouvant une rétraction minimale de 2% pour des températures inférieures à 700°C, puis 1 à 2% entre 700 et 800°C et enfin 10 à 15 % au-delà de 800°C.

Nous pouvons donc retenir après une revue de la littérature que la rétraction est inférieure à 5% si la température est inférieure à 700-800° C (Shipman et al., 1984). Au-delà, elle peut aller jusqu'à 25 % selon les auteurs 21 % pour Van Vark (1970) 25 % pour Heglar, (1984).

Selon Grevin (2005), le rétrécissement par évaporation existe de façon modeste (1% environ) jusqu'à 300 °C puis reste stable jusqu'à 750°C puis devient maximal à partir de 750-800°C (10 à 12%).

Outre la température, d'autres éléments sont à prendre en compte dans l'évaluation de la rétraction :

- **La localisation osseuse** : Van Vark (1970) a testé l'impact de la rétraction sur trois localisations osseuses différentes, le fémur, la patella et la mandibule. Des différences ont été observées. La mandibule présente le taux de rétraction le plus important, suivie de la patella puis du fémur. La densité de l'os semble donc également avoir un certain impact sur la rétraction. De même, l'étude expérimentale de Thompson (2005) sur des os longs de mouton a enregistré un rétrécissement plus important dans les épiphyses et a attribué ce résultat à la disposition aléatoire des fibres de collagène dans l'os trabéculaire.
- **La durée d'exposition à des températures extrêmes** : Thompson (2005) lors d'une étude expérimentale a constaté des changements dimensionnels sur les os brûlés pendant différentes durées d'exposition au feu (15' et 45') ainsi qu'à différents moments après le retrait du four (5', 15', et 25'). Les travaux de Gonçalves et al. (2011b) ont confirmé ces données toutefois, ils précisent l'absence de relation linéaire entre la rétraction et la durée d'exposition.
- **Le sexe des individus** : Herrmann (1976, 1977a) a constaté un pourcentage de rétraction plus élevé chez les hommes que chez les femmes. Il a associé cette observation à une différence de la densité osseuse et du taux de minéralisation.
- **L'âge des individus** : de nombreux auteurs ont constaté que les taux de rétraction moyens chez les foetus étaient supérieurs à ceux observés chez les adultes en raison de la proportion relativement élevée de collagène dans les os en développement (Bradt Miller & Buikstra, 1984; Harsányi, 1993; Herrmann, 1977a; Holland, 1989; Muller et al., 1952). Ces résultats confirment que les éléments du squelette sont moins sensibles à la rétraction à mesure que la minéralisation osseuse augmente.
- Enfin, **l'état de l'os** (os sec, os vert, présence des parties molles...) rentre également en jeu (Ubelaker, 2009).

### ➤ **La déformation (figure 12)**

Si la rétraction paraît difficile à évaluer à l'œil nu, ce n'est pas le cas de la déformation qui affecte visuellement l'apparence de l'os ou du fragment d'os soumis à des chaleurs extrêmes (Depierre, 2013). Elle peut aller d'une simple incurvation dans un plan, à une torsion en vrille dans les trois plans de l'espace. Kühl (1986) a défini la déformation comme la résultante d'une contrainte de stress appliquée au tissu osseux alors qu'il subit une déformation plastique. La contrainte est la force qui modifie l'os et la déformation correspond à la description de ce changement (Rogers, 1982). Au fur et à mesure que la contrainte augmente, la déformation augmente jusqu'au point d'inflexion aboutissant à la rupture ou la fracture de l'os. Avant que l'os n'atteigne sa limite d'élasticité, il peut revenir à son état initial si la contrainte est supprimée. Il s'agit de la déformation élastique. Lorsque l'os rentre dans le stade de déformation plastique, il ne peut plus se rétablir et peut céder si la contrainte se poursuit (Mayne Correia, 1997).

Des auteurs suggèrent que la survenue d'une déformation implique que l'os était vert lorsqu'il a subi l'action de la chaleur et que les parties molles étaient présentes (Ubelaker, 1989).



Figure 12 : déformation osseuse induite par la chaleur (fragments osseux provenant de la nécropole de Porta Nocera, Pompéi).

### ➤ La fracturation

Les fractures thermiques ont été largement étudiées depuis plus d'un siècle et de nombreuses classifications ont été réalisées. Nous présentons ici les données de Symes et al. (2008) reprises par Quatrehomme et al. (2015) qui en réalisent une description complète :

- **Les fractures longitudinales (figure 13)** sont les fractures les plus communément rencontrées. La rupture intervient parallèlement le long des canaux ostéoniques. Pour certains auteurs il peut s'agir d'une action sur os sec (Ubelaker, 1989).
- **Les fractures transversales (figure 13)** sont très fréquentes également ; elles traversent les canaux Haversiens et sont perpendiculaires à l'axe des os longs. Elles ont tendance à pénétrer dans la cavité médullaire et peuvent traverser complètement l'os. Parfois elles atteignent l'os d'un seul côté du fait de la posture pugilistique ou d'un bouclier thermique. Pour certains auteurs, elle signe une action sur un os vert (Ubelaker, 1989).
- **Les fractures en marche d'escalier** correspondent à une petite fracture transversale rejoignant deux fractures longitudinales.
- **La patine ou fissuration réticulée (figure 14)** correspond à une multitude de petite fractures superficielles qui se présentent sous la forme d'un fin maillage de fissures. Elles sont souvent observées sur les zones plates des os post-crâniens. Elles pourraient être le résultat de larges zones recevant des quantités uniformes de chaleur obligeant l'os

- cortical superficiel à se rétracter uniformément sur la surface, ou, des zones protégées par de minces tissus mous comme les os du crâne ou les extrémités épiphysaires.
- **Les décortications ou délaminations (figure 15)** : ces fractures consistent en une séparation des couches de l'os cortical et de l'os spongieux ou trabéculaire. Elles affectent majoritairement le crâne avec une séparation des tables internes et externes. On peut les retrouver également au niveau des épiphyses et des extrémités ostéochondrales des côtes.
  - **Les fractures de la ligne de frontière** : elles suivent la limite de la zone brûlée et séparent les os brûlés des os non brûlés.
  - **Les fractures transversales arciformes (figure 16)** : elles siègent le long de la diaphyse des os longs et sont le résultat de l'échauffement de l'os puis de sa fissuration lorsque les tissus mous protecteurs et le périoste se rétractent, entraînant la surface fragile de l'os altéré (on parle de lignes de rétraction musculaire). Comme l'extrémité de la masse musculaire est arciforme, la fracture qui siège à la limite de la zone exposée est arciforme (Quatrehomme et al., 2015). Le processus se répète à plusieurs reprises à mesure que la rétraction musculaire se poursuit sous l'effet de la chaleur, d'où les lignes de fractures arciformes, plus ou moins parallèles entre elles, le long de la diaphyse. Ces fractures indiquent donc que les os ont été brûlés en présence des parties molles.
  - **Les fractures en bulbe d'oignon ou en œil de bœuf (figure 16)** sont des fractures qui prennent la forme d'anneaux concentriques. Elles se produisent généralement dans les fosses ou dans les zones de concentration de tissu comme le creux poplité. Elles sont la conséquence de l'épaisseur de la corticale osseuse, de la forme de l'articulation et de l'obstruction des tissus mous. Elles indiquent une exposition moins importante à la chaleur dans la mesure où l'attitude pugilistique par exemple, protège la face postérieure du genou qui est la dernière zone à subir l'action thermique.
  - **Les fractures en bec de flûte ou en forme de cône** font référence aux extrémités de diaphyses combinant un aspect de fracture arciforme avec un biseautage entre l'os cortical et l'os spongieux. Ces fractures correspondent à la suite possible d'une fracture arciforme quand l'autre partie de l'os se détache. Elles sont très fréquentes au niveau des os longs des membres. En effet, ils brûlent souvent de la partie distale vers le tronc laissant souvent des becs de flûtes aux extrémités.
  - **Le cas particulier de l'extrémité céphalique** : La faible épaisseur des tissus mous au niveau de la face et du crâne en fait une zone particulièrement exposée qu'il semblait nécessaire de traiter à part. Exposé à des températures extrêmes, on observe dans un premier temps une mise à nu de l'os puis rapidement une délamination (perte de la corticale externe). Les fissurations se présentent de façon bilatérale à berges irrégulières. Elles peuvent être de forme elliptique, circulaire ou encore en toile d'araignées (Herrmann, 1976). Elles peuvent parfois irradier d'un centre commun et traverser les sutures crâniennes (Spitz & Fisher, 1980). Certaines fractures suivent les sutures. Concernant le diastasis (ou disjonction) des sutures, cette notion est à ce jour controversée. Pour Spitz (1993), la pression intracrânienne engendrée par la chaleur ne semble pas capable d'engendrer un tel diastasis des sutures. Par ailleurs, l'ouverture de

la boîte crânienne en réponse à la pression interne est également controversée. Selon Bass (1984), le crâne pourrait exploser du fait de l'expansion rapide des liquides à l'intérieur de la boîte crânienne. Cette notion de crâne explosif très répandue, a été remise en question par Symes et al., (2008) qui indiquent après expérimentation n'avoir jamais trouvé de preuve de fractures explosives. Les ouvertures du crâne seraient la conséquence logique des fissures, fractures et dislocation thermique. Enfin, contrairement aux fractures de la voûte crânienne qui sont très répandues, les fractures de la base, elles sont beaucoup plus rares (Bohnert et al., 1997). Par conséquent, une fracture de la base du crâne dans une carbonisation évoquera avant tout un traumatisme péri-mortem et non pas une fracture thermique.



**Figure 13 : fractures longitudinales (flèches noires) ; à noter la présence de quelques fractures transversales (flèches grises).  
Fragments osseux issus de la nécropole de Porta Nocera, Pompéi.**

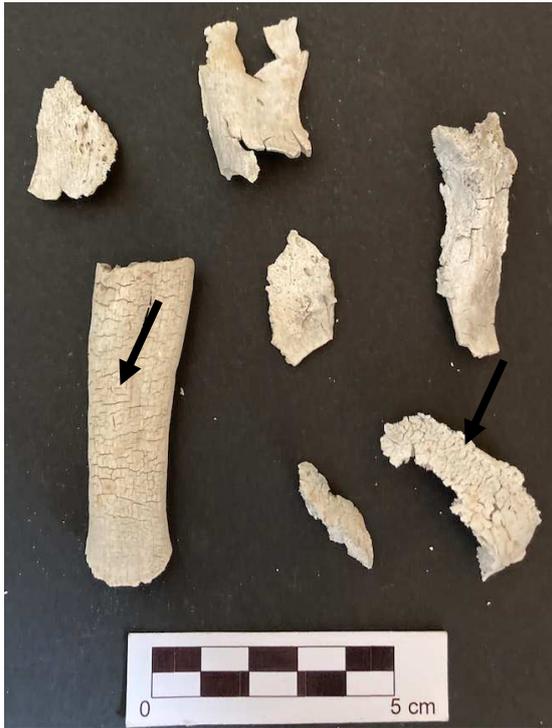


Figure 14 : aspect de patine ou fissuration réticulée. Fragments osseux issus de la nécropole de Porta Nocera, Pompéi.



Figure 15 : décortication et délamination. La zone la plus externe de la voûte crânienne a tendance à se détacher laissant apparaître le diploé. Fragments osseux issus de la nécropole de Porta Nocera, Pompéi.



Figure 16 : fractures transverses arciformes (flèches rouges) ; fracture en bulbe d'oignon (flèche noire). Fragments osseux issus de la nécropole de Porta Nocera, Pompéi.

### ➤ Les amputations thermiques (figure 17)

Les amputations thermiques des membres sont fréquentes et impliquent une haute température et/ou une durée d'exposition suffisante. Elles se produisent en général au niveau des mains et des pieds alors que le tronc et le bassin sont relativement préservés (DiMaio & DiMaio, 2001). En effet, les bras et les jambes brûlent bien plus que le tronc en raison de leur taille réduite et de la présence d'air tout autour.



Figure 17 : amputation thermique de la jambe droite.

## ➤ La fragmentation (figure 18)

Le devenir d'une carbonisation avancée est la fragmentation de l'os qui peut parfois s'avérer extrême. En effet, la fragmentation est la conséquence de l'ensemble des traumatismes décrits précédemment. Selon Bontrager & Nawrocki (2015) et Watson et al. (2015), la longueur maximale de chaque fragment devrait être enregistrée afin d'évaluer le degré de fragmentation. Duday dans Van Andringa et al., (2013) évalue le degré de fragmentation à partir du poids moyen des fragments sauf esquilles (tableau 4).

Poids moyen sauf esquilles (en g.)	Fragmentation
> 2,00	Extrêmement faible
1,75 – 1,99	Très faible
1,50 – 1,74	Faible
1,25 – 1,49	Moyenne ou modérée
1,00 – 1,24	Sous moyenne
0,75 – 0,99	Forte
0,50 – 0,74	Très forte
< 0,49	Extrêmement forte

Tableau 4 : évaluation de la fragmentation à partir du calcul du poids moyen des fragments (sauf esquilles) d'après Duday dans Van Andringa et al. (2013).

Dans un cadre médico-légal le degré de fragmentation peut aussi être en lien avec d'autres éléments que l'action du feu lui-même. Il peut s'agir par exemple d'un refroidissement brutal notamment en raison de l'utilisation de grandes quantités d'eau pour mettre fin à l'incendie.



Figure 18 : deux exemples de la mise en évidence de la fragmentation consécutive à un état de carbonisation avancée.

## b) Les caractéristiques microscopiques de l'os soumis à la chaleur extrême

Nous avons précédemment traité des modifications macroscopiques de l'os en réponse à une chaleur extrême. Les changements de couleurs, les mécanismes de fissuration et de rétractions sont les éléments les plus visibles mais d'autres altérations existent au niveau microscopique. Les données portées par ces changements histologiques sont précieuses et peuvent fournir des informations utiles sur les conditions de combustion et leurs effets sur le matériel squelettique (Bradtmillier & Buikstra, 1984; Castillo et al., 2013; Castillo et al., 2013; Hanson & Cain, 2007; Herrmann, 1977a; Quatrehomme et al., 1998; Squires et al., 2011).

Selon Mayne Correira (1997), Forbes (1941) est le premier auteur à décrire les changements histologiques dans les os brûlés. Son étude consistait initialement à déterminer l'origine osseuse ou non d'un fragment brûlé. Il a fourni une description simple des changements à la fois dans l'os compact et dans l'os spongieux. Les observations étaient réalisées en microscopie optique, à partir de lame mince d'os décalcifié.

À propos de l'os compact, il décrit de profonds changements au niveau des canalicules, des lacunes, des structures lamellaires et de la matrice osseuse. La prédominance initiale des canalicules disparaît progressivement, les structures lamellaires deviennent grossières et granuleuses, les systèmes haversiens semblent diminués en taille avec des canaux augmentés en diamètre et remplis de débris. Il décrit également l'apparition d'un réseau de fissures à la périphérie du système haversien.

Concernant l'os spongieux, il décrit des changements similaires à l'exception de ceux notés pour les systèmes haversiens. Les lacunes et les structures lamellaires finissent par disparaître, et seule une matrice granulaire subsiste.

Par la suite, diverses approches techniques ont permis de renforcer ces observations et ont conduit à décrire quatre étapes de modifications histologiques en fonction de la température d'exposition. Ces stades sont résumés dans le tableau 5 d'après Mayne Correira (1997) et décrits ci-après.

Stade	Modification histologique	Température approximative en °C
<b>Déshydratation</b>	Disparition de l'eau (physique ou chimique)	105-600
<b>Décomposition</b>	Disparition des composés organiques	500-800
<b>Inversion</b>	Disparition des carbonates Conversion de l'hydroxyapatite en $\beta$ -tricalcium phosphate	700-1100
<b>Fusion</b>	Fusion des cristaux	<1600

Tableau 5 : différents stades de modification histologique en fonction de l'augmentation de la température d'exposition lors d'un processus de crémation. D'après Mayne Correira (1997).

## (1) La phase de déshydratation

Elle a été identifiée et décrite par Bonucci & Graziani (1975) à l'aide du procédé de thermogravimétrie, technique permettant de mesurer, en fonction du temps ou de la température, la masse d'un échantillon chauffé ou refroidi selon un programme de température déterminé.

Elle débute à une température moyenne d'environ 105°C et reste constante jusqu'à environ 300°C. Lors de cette phase, une grande partie de l'eau est adsorbée. Cette phase se termine en moyenne aux alentours de 500-600°C (Civjan et al., 1972).

En microscopie électronique à balayage, cette première phase est identifiée par l'apparition de bulles dans les lamelles externes de l'os. Ensuite, l'os commence à se fissurer (Hunger & Leopold, 2011; Susini et al., 1988). La structure fine de l'os cortical reste visible et plutôt bien préservée dans cette phase. Les lacunes s'étendent et se resserrent. Shipman et al. (1984) décrivent des modifications de la structure qui devient rugueuse jusqu'à environ 285°C puis vitreuse et lisse. Selon Evans (1973), l'augmentation de la température et la diminution de la teneur en eau entraîneraient une augmentation de la micro-dureté de l'os. Cette diminution de la capacité d'absorption de l'énergie aboutirait à un matériau déshydraté beaucoup plus cassant que l'os frais.

Il est important de noter que cette première phase de déshydratation n'inclut pas l'eau présente dans les cristaux d'hydroxyapatite. En effet nous verrons plus loin dans notre exposé que cette eau est perdue pour des températures bien supérieures, au-delà de 700°C.

## (2) La phase de décomposition organique

Cette seconde phase débute réellement dans la dernière partie de la phase de déshydratation, lorsque la température augmente au-delà de 500°C.

Dans cette phase, les substances organiques (mucopolysaccharides, acides aminés, collagène...) sont pyrolysées. L'élimination du collagène peut être illustrée en microscopie optique entre 500°C et 600°C. En effet, à partir de cette température, le tissu osseux devient isotrope. Le collagène perd sa biréfringence en lumière polarisée.

En microscopie électronique à balayage, la structure osseuse brute reste encore identifiable à ce stade (Bonucci & Graziani, 1975). En revanche, la taille des cristaux d'hydroxyapatite augmente pour atteindre un diamètre d'environ 80 Å.

De plus, d'autres changements peuvent être détectés : les lacunes augmentent de taille et les bords des canaux haversiens deviennent de plus en plus rugueux (Schultz, 1986). Hunger & Leopold (2011) identifient également de grandes fissures diagonales et réticulaires. La surface lisse et vitreuse décrite dans le chapitre précédent par Shipman et al. (1984) change également d'aspect et est devenue « mousseuse et molle » en apparence.

Macroscopiquement, c'est à cette étape que l'os devient visuellement noir, sous l'effet de la carbonisation de la matière organique. Après l'élimination de celle-ci, au-delà de 700°C, il passera à une teinte grise puis blanche crayeuse.

### (3) La phase d'inversion

La phase d'inversion intervient entre 600°C et 900°C ou entre 700°C et 900°C selon les auteurs (Bonucci & Graziani, 1975; Civjan et al., 1972). Au cours de cette phase, les carbonates disparaissent, ce qui entraîne une libération de magnésium. Les cristaux d'hydroxyapatite augmentent en taille et le changement structural de l'hydroxyapatite en  $\beta$ -phosphate tricalcique induit une diminution de la masse. Selon Shipman et al. (1984) il ne s'agit pas d'une conversion chimique mais simplement d'une augmentation de la taille des cristaux. Cependant, Newesely (1988), grâce à la diffraction des rayons X, a soutenu la conclusion selon laquelle la structure de l'hydroxyapatite (HAP) est modifiée entre 700°C et 1 000°C pour ressembler au  $\beta$ -phosphate tricalcique. Il a attribué cette altération à une coalescence des cristaux.

En microscopie électronique à balayage, on observe un élargissement des fissures vues précédemment. Les lamelles osseuses disparaissent et la matrice devient de plus en plus homogène. Les cristaux perdent leur aspect hexagonal et sont remplacés par des cristaux polygonaux beaucoup plus irréguliers.

À partir de 800°C, les ostéons semblent se plier (Schultz, 1986) et des vésicules ou de grandes ouvertures ovales apparaissent (Hunger & Leopold, 2011; Schultz, 1986; Shipman et al., 1984). L'origine de la formation de ces vésicules n'est pas claire. La structure lamellaire de l'os est perdue en raison de la formation de cristal. Il n'y a plus d'ostéons, canaux de Volkmann ou de canalicules visibles. Selon Schultz (1986), à partir de 1100°C les lacunes commencent à disparaître et les fissures précédemment formées s'agrandissent, traversant entre les ostéons. Les cristaux augmentent de taille (0,2 à 0,3  $\mu\text{m}$ ) et apparaissent plus irréguliers (Susini, 1988). C'est à la fin de ce stade, que l'on observe une diminution du taux de rétraction (Hermann, 1977; Schultz, 1986).

### (4) La phase de fusion

La dernière étape de l'altération thermique est la phase de fusion qui débute à 1600°C. Cette phase consiste en une fusion complète des cristaux d'hydroxyapatite. Il s'agit d'une coalescence structurale totale. Toutes les structures sont complètement détruites. Les ostéons, les canaux de Volkmann et les canalicules ne sont plus discernables. Il persiste toutefois quelques systèmes Haversiens mal formés (Carroll & Squires, 2020).

Tous ces changements sont des produits de la combustion dans des conditions oxydantes. Il est capital de noter que si un os est porté à des températures supérieures à 300°C sans apport d'oxygène, un schéma différent d'altération thermique apparaîtra. Ceci a été démontré dans des expériences contrôlées. De nombreux facteurs peuvent influencer les modifications histologiques survenant dans les os brûlés, comme le type d'élément squelettique (région anatomique), la position du corps, la température et la durée de l'exposition au feu. L'analyse des modifications micro-structurelles de l'os brûlé, pourrait fournir des informations détaillées sur l'environnement de combustion (Squires, 2015). Shipman et al. (1984) ont noté qu'un examen des changements histologiques de l'os modifié par la chaleur est plus précis que de se

fier à la seule couleur de l'os, bien que dans la plupart des cas la couleur de l'os et son caractère histologique correspondent extrêmement bien (Squires et al., 2011). Malheureusement, le travail et le temps nécessaire à la préparation de coupes fines découragent souvent l'étude de ces changements histologiques (McKinley, 1994b). Les coupes d'os doivent être extrêmement fines pour pouvoir identifier les principales caractéristiques histologiques au microscope. En outre, le chauffage de l'os entraîne une déshydratation et la perte de composants organiques, ce qui rend l'os plus cassant et plus fragile. Par conséquent, la coupe de sections fines est un vrai défi, car les échantillons s'effritent et se brisent souvent au cours des premières étapes de la préparation. La région osseuse préférentielle afin d'étudier les changements histologiques, sera la partie corticale des os longs (Thompson et al., 2017).

## (5) La structure cristalline du tissu osseux

L'os a une structure cristalline dont les cristaux existent sous la forme d'hydroxyapatite  $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ . Différentes méthodes permettent d'examiner les changements de cristallinité osseuse induits par la chaleur : diffraction des rayons X (XRD) (figure 19), diffusion des rayons X aux petits angles (SAXS), spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), spectroscopie Raman, et autres (Mamede et al., 2018; Munro et al., 2007; Sui et al., 2014; Thompson et al., 2009). Il faut rester cependant prudent, lorsqu'on compare les résultats issus de ces différentes méthodes, car les valeurs d'indices de cristallinité ne sont pas toujours directement comparables, bien que les tendances générales qu'elles révèlent soient similaires.

Chez les individus vivants, la structure cristalline du tissu osseux est désordonnée et composée de petits cristaux à forte contrainte (Paschalis et al., 1996; Thompson et al., 2009). Lorsque l'os est brûlé, elle se transforme avec des cristaux plus grands, mieux ordonnés, avec moins de porosité : ils présentent moins de contraintes entre eux et par conséquent, leur indice de cristallinité augmente. Cette transformation cristalline est universelle à tous les événements de chauffage de l'os. Il semblerait exister une corrélation entre les phénomènes de transformation cristalline et l'intensité de la combustion. Cependant, l'influence de variables incontrôlées telles que la disponibilité en oxygène, la présence de tissu mou ou l'utilisation d'accélérateurs de combustion, rends difficile cette interprétation. De plus, la cristallinité n'est pas uniforme dans l'ensemble du squelette (Nakano et al., 2002; Thompson et al., 2009) et elle est affectée par l'âge des individus : les os jeunes présentent des valeurs plus faibles que les os matures (Paschalis et al., 1996).

L'indice de cristallinité (CI) traditionnel est défini comme suit :

$$CI = \{A_{565} + A_{605}\} / A_{595}$$

où  $A_x$  correspond à l'absorbance à une longueur d'onde  $x$  donnée.

Une correction de la ligne de base est généralement appliquée entre 750 et 450  $cm^{-1}$  (Shemesh, 1990; Thompson et al., 2011).

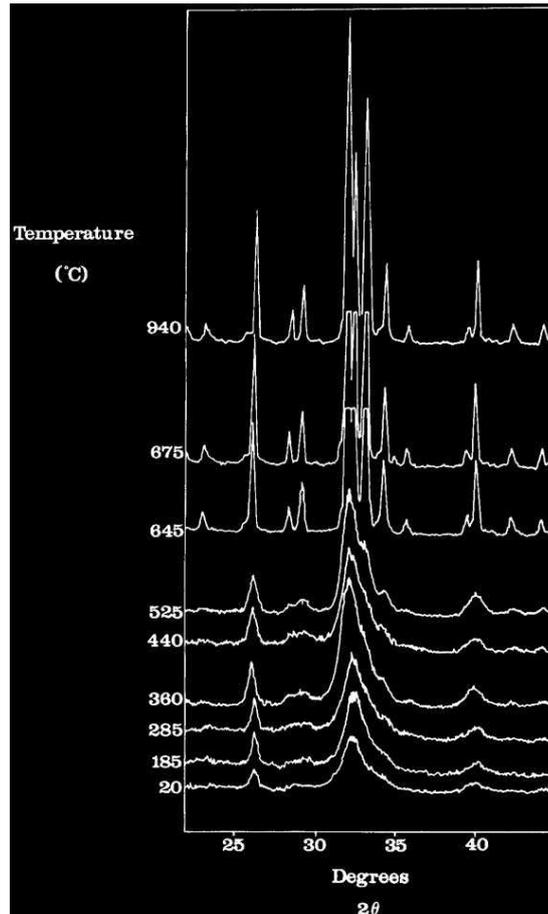


Figure 19 : diagramme de diffraction des rayons X d'os de chèvres chauffés à différentes températures obtenues par Shipman et al. (1984). On observe une accentuation des pics traduisant une augmentation de la taille des cristaux avec l'intensité de chauffage. Il y a un changement majeur dans le modèle à 645°C avec des pics beaucoup plus étroits et plus nets.

#### 4. La diagénèse de l'os brûlé

Il a été suggéré par plusieurs auteurs que les os brûlés auraient plus de chance d'être préservés que les os non brûlés (Alexandersen et al., 1981; Iregren & Jonsson, 1973; Lange et al., 1987) et qu'ils seraient nettement plus résistants à la destruction que les os non brûlés.

Les changements morphologiques et compositionnels rapides du tissu osseux brûlé, sont similaires aux changements observés sur des périodes prolongées dans la diagénèse de l'os non brûlé. Ces changements, comme nous avons pu le voir précédemment, consistent en l'élimination des composants organiques et de l'eau, ainsi que la recristallisation des cristaux de bioapatite. L'étendue immédiate de ces changements dans l'os brûlé se traduit par un biomatériau nettement différent de l'os intact, avec une plus grande susceptibilité à la fragmentation. La déshydratation et l'élimination complète du collagène, modifie de manière significative les propriétés de résistance de l'os brûlé, altérant sa densité, son intégrité structurelle et sa relation contrainte-déformation. Tous ces changements, se traduisent par une plus grande probabilité de fractures mécaniques, corrélées à la quantité de collagène perdue, laissant l'os calciné le plus vulnérable mécaniquement. En raison de cette extrême friabilité,

souvent, les fragments d'os brûlés ne reflètent pas la taille initiale lors du dépôt en raison de processus tels que l'enterrement et le piétinement.

Toutefois, la diagénèse de l'os brûlé est un processus complexe et multifactoriel. La fragilité, la présence de fragments de petite taille et la disparition des composants organiques de l'os brûlé à des températures plus basses offre une plus grande surface et un accès facile aux agents diagénétiques. Cependant, le minéral osseux soumis à de hautes températures, subit une croissance et une réorganisation considérable des cristallites entraînant une protection accrue de l'os calciné à la contamination, en raison de son index de cristallinité élevée.

Une étude sur la vulnérabilité des os brûlés a été réalisée par Gallo et al. (2021). Les résultats de cette étude proposent une hypothèse de survie différentielle de ces os à différents seuils de température, dans des assemblages de faunes archéologiques à mouvements hydriques fluctuants. Cette étude suggère que les os à faible densité et forte porosité, tels que les os trabéculaires et juvéniles, sont davantage susceptibles de se dissoudre s'ils sont carbonisés. Cela est due à l'hypothèse selon laquelle les porosités ouvertes et l'absence de protection organique exacerbent l'accès aux agents diagénétiques. Néanmoins, l'os qui a été calciné y compris trabéculaire et juvénile, a potentiellement une plus grande probabilité de résister à la dissolution grâce à une plus grande taille de ses cristaux et une plus grande stabilité thermodynamique. Ces résultats sont en accord avec ceux de l'étude de Kalsbeek & Richter (2006) et Stiner et al. (1995).

## C. Les techniques conventionnelles d'identification biologique des individus

---

### 1. Généralités sur l'identification d'un individu

---

L'identification selon la définition du centre national de ressources textuelles et lexicales est une action qui consiste « identifier, assimiler une personne ou une chose à une autre ». L'identification d'un individu au sens médico-légal du terme consiste à le définir et le reconnaître avec certitude.

Le travail d'identification est pluridisciplinaire et les moyens utilisés peuvent être multiples.

La procédure la plus couramment employée est l'identification visuelle par la famille, ou les proches du défunt. Toutefois, la condition primordiale de ce type d'identification est l'intégrité du cadavre. Dans le cadre de l'anthropologie médico-légale, qui par définition s'applique aux corps altérés, fragmentés ou squelettisés, cette intégrité n'est jamais respectée et d'autres moyens doivent être mis en place.

Le résultat d'un travail d'identification peut conduire à une identification dite « certaine » ou « positive absolue », « exclue », « probable » ou « possible » (Quatrehomme et al., 2015).

Nous aborderons dans ce chapitre les deux types d'identification qui peuvent exister et les méthodes associées à chacun d'eux.

### 2. L'identification comparative

---

L'identification comparative est la seule, qui, sous certaines conditions, permet d'obtenir avec certitude et sans ambiguïté, l'identité précise du sujet. Elle a une valeur légale selon les recommandations européennes R99-3, relative à l'harmonisation des règles en matière d'autopsie médico-légale : « **une identification exacte devrait être faite, conformément au Guide de l'identification des victimes de catastrophes, adopté par l'Assemblée générale d'Interpol en 1997 et d'après les critères suivants : identification visuelle, effets personnels, caractéristiques physiques, examen dentaire, empreintes digitales, examen anthropologique et identification génétique.** »

Dans tous les cas, les méthodes comparatives nécessitent impérativement de disposer d'une piste d'identification (identité présumée) et/ou d'un matériel biologique ante-mortem appartenant au sujet lui-même ou éventuellement à un parent biologique.

L'identification comparative peut être réalisée selon quatre méthodes essentielles (Quatrehomme et al., 2015).

## a) La dactyloscopie

La dactyloscopie correspond au procédé d'identification par les empreintes digitales. Il s'agit d'une technique utilisée par les forces de police depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle en France.

La face palmaire des mains, de la pulpe des doigts, la face plantaire des pieds et des orteils présentent toutes des dessins complexes aussi appelés dermatoglyphes. Ils sont constitués de crêtes et de sillons et sont uniques à chaque individu. Chaque doigt a son empreinte propre et ils ne changent pas avec le temps, à moins qu'une couche profonde ou basale de la peau ne soit détruite ou volontairement modifiée. Il existe trois grandes classes de formes des dessins digitaux : les arcs, les boucles et les verticilles. La forme, la taille, le nombre et la disposition des détails qui caractérisent ces motifs rendent chaque empreinte digitale unique. Les crêtes par exemple, présentent des points caractéristiques propres à chaque individu et sont au nombre de 100 à 200 pour chaque doigt.

Lors des premières identifications entre la fin du 19<sup>ème</sup> et le début du 20<sup>ème</sup> siècle, 17 points de concordance étaient nécessaires (figure 20), mais en 1914, le Dr Edmond Locard, pionnier de la criminalistique moderne introduisit la règle des 12 points, encore utilisée de nos jours (Locard, 1914).

Lorsqu'une empreinte est relevée, elle est comparée à une base de données pouvant permettre l'identification absolue. En France, le Fichier Automatisé des Empreintes Digitales (FAED), a été créé officiellement par le décret du 8 avril 1987. Il permet le traitement automatisé des empreintes digitales par les services de police et de gendarmerie. Depuis le 27 mai 2005, le traité de Prüm permet d'échanger les informations concernant les données dactyloscopiques ou les profils ADN entre la Belgique, l'Allemagne, l'Espagne, la France, le Luxembourg, les Pays-Bas et l'Autriche. En 2018, 6,2 millions d'individus étaient enregistrés sur ces fichiers (EUR-Lex, 2008). Néanmoins, après combustion d'un corps, cette technique n'est que très rarement réalisable : les extrémités sont souvent totalement carbonisées, rétractées, voire carrément absentes. Il devient impossible de réaliser des relevés d'empreintes digitales.

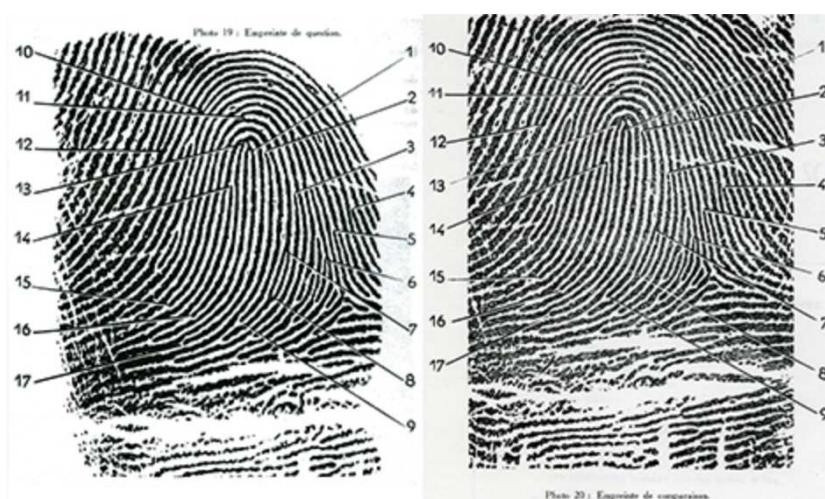


Figure 20 : image d'une des premières identifications par dactyloscopie où 17 points de concordance étaient nécessaires. Empreinte obtenue par ancrage, comparée au dossier de comparaison. Source PJGN, (2023).

Les comparaisons radiologiques sont très peu coûteuses, rapides et particulièrement performantes. Elles sont très intéressantes à utiliser dans le cadre de l'anthropologie, en présence de restes très altérés. Deux conditions sont cependant nécessaires pour leur utilisation :

- disposer du dossier médical ante-mortem de la personne à identifier ;
- disposer de clichés de qualité suffisante pour bénéficier d'éléments de comparaison fiables.

Actuellement un *listing* des soins réalisés chez tous les patients peut être demandé auprès de l'assurance maladie, si besoin.

Cette technique permet parfois à l'aide d'un simple fragment osseux d'obtenir une identification positive absolue, que ce soit à travers l'analyse de structure osseuse particulière ou d'éléments pathologiques. Nous allons présenter les deux techniques d'analyse.

### (1) **Identification non pathologique : régions d'intérêts**

Il existe différentes régions particulières du squelette qui peuvent être utiles par leur structure dans un cadre d'identification comparative.

#### ➤ **Le sinus frontal (Figure 21 et 22)**

Le sinus frontal est la région la plus intéressante dans un contexte d'identification (Campobasso et al., 2007; Christensen & Hatch, 2018; Kirk et al., 2002; Marlin et al., 1991; Pereira et al., 2021; Quatrehomme et al., 1996; Ubelaker, 1984). En effet, il possède un caractère unique, propre à chaque individu. Sous l'influence de facteurs génétiques et environnementaux, sa morphologie et ses dimensions sont très différentes d'un individu à l'autre. De plus, passé la période de croissance crânio-faciale (jusqu'à l'âge de 20 ans environ), il ne se modifie plus au cours de la vie (Marek et al., 1983). Seuls quelques cas de résorption osseuse chez le sujet âgé susceptibles d'entraîner un élargissement de la chambre sinusale ont été rapportés (Fatu et al., 2006; Haglund, 1992; Ubelaker, 1984).

#### ➤ **Les autres régions d'intérêts du squelette crânien**

En dehors du sinus frontal, les autres composantes crâniennes intéressantes permettant une identification radiologiquement sont les cellules mastoïdiennes, le sinus sphénoïdal (Rhine & Sperry, 1991), les vaisseaux de la voûte du crâne (Messmer & Fierro, 1986) et la selle turcique (Ravina, 1960).

## ➤ Le squelette infra-crânien

Tout le squelette infra-crânien peut potentiellement être utilisé dans le cadre de l'identification comparative sur la base de la comparaison des travées osseuses, de variations anatomiques. La comparaison des travées osseuses peut être réalisée sur n'importe quelle partie du squelette et elles présentent elles aussi un caractère unique d'un sujet à l'autre (Quatrehomme et al., 2015). Mais, l'élément le plus fréquemment utilisé est la radiographie thoracique. Cela est aisément compréhensible au vu du très grand nombre de clichés réalisés chaque année. Sur une radiographie de thorax, une multitude d'éléments peuvent être visualisés : les clavicules, le bord médial des scapulas, les huit premières côtes droites, les cinq premières côtes gauches, les dernières vertèbres cervicales et les premières vertèbres thoraciques ainsi que bon nombre de variations anatomiques du squelette thoracique, telle que la côte cervicale par exemple, qui concerne un peu moins de 1% de la population.

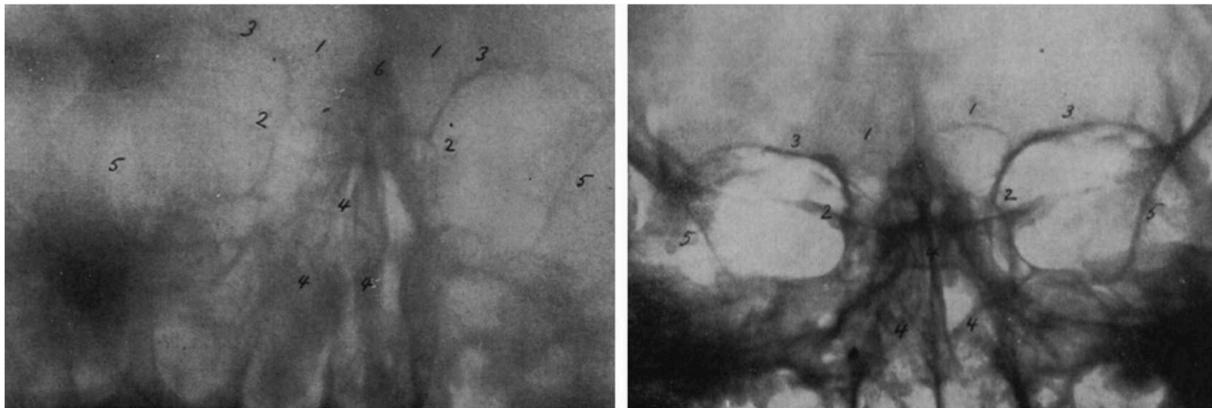


Figure 21 : radiographie ante-mortem (à gauche) et radiographie post-mortem (à droite) de la première comparaison d'identification radiologique en 1926. Extrait de Christensen & Hatch (2018). D'après Culbert & LAW (1927).

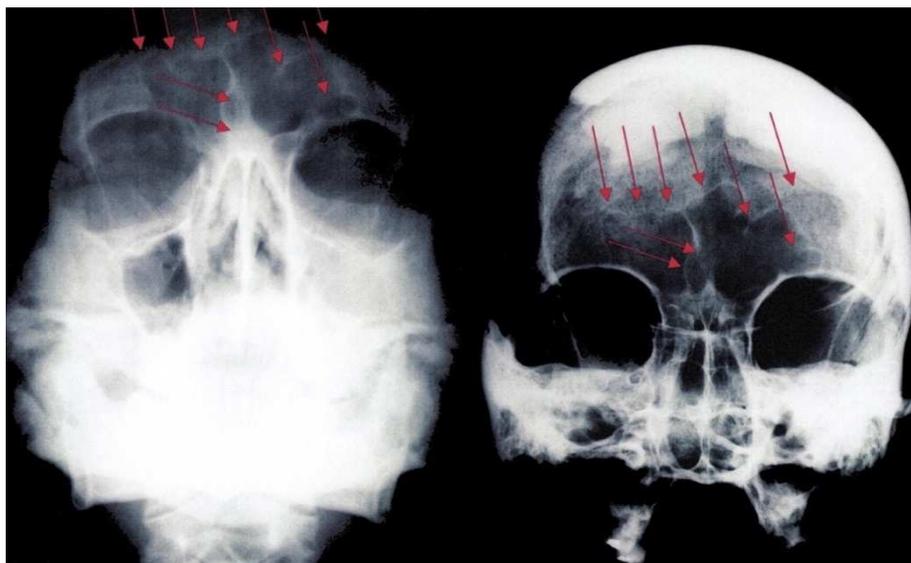


Figure 22 : comparaison radiologique du sinus frontal *ante mortem* (cliché de gauche) et *post mortem* (cliché de droite) d'après Christensen & Hatch (2018).

## (2) Identification dans un cadre pathologique

La radiographie peut également fournir de nombreux éléments ou indices dans un cadre pathologique. Il peut s'agir de tous les antécédents de fracture ou maladie touchant le squelette, mais également du matériel d'ostéosynthèse. En effet, la recherche de matériel d'ostéosynthèse est capitale, car chaque élément est identifié précisément par un numéro constructeur unique facilement accessible dans le dossier médical du patient.

### *c) L'identification comparative dentaire*

---

L'identification odontologique est une des méthodes les plus utilisées actuellement. Elle est fiable et objective. Les informations ante-mortem sont facilement accessibles et cette technique est peu onéreuse et rapide (Knell & Bussmann, 1999).

Il existe plusieurs méthodes qui peuvent conduire à une identification odontologique :

- l'utilisation de radiographies (panoramique dentaire le plus souvent) ;
- l'utilisation de photographies ;
- le prélèvement des mâchoires sur le cadavre pour une analyse directe.

Dans ce cadre, plusieurs indices sont recherchés.

#### **(1) Recherche des indices thérapeutiques**

Les indices thérapeutiques sont très variables d'un individu à l'autre. Il peut s'agir de :

- rechercher des indices d'extraction dentaire ou de perte dentaire ante mortem ;
- rechercher des traces de soins dentaires (l'utilisation de radiographie permet de faire la distinction entre les différents types de soins, par exemple, l'amalgame sera plus radio-opaque que le composite) ;
- rechercher les traces de soins endodontiques ;
- rechercher les éléments de soins prothétiques (il sera important de pouvoir obtenir des informations détaillées sur le type de prothèse visualisée, l'usure de la prothèse, sa configuration ou d'éventuelles traces de réparation) ;
- rechercher la présence de matériel d'orthodontie actuel ou passé (bagues, quad-helix, contention, résidu de colle...) ;
- étudier l'implantologie.

La principale limite de ces techniques réside dans la difficulté de les appliquer à une population d'individus immatures. En effet en dehors des soins prodigués pour traiter des caries dentaires et de la mise en évidence de matériel orthodontique, ces méthodes sont rarement applicables chez l'enfant.

#### **(2) Recherche d'indices anatomiques**

Les indices anatomiques peuvent également fournir des informations. Il sera important de rechercher :

- les variations anatomiques en termes d'anomalies (anomalies de nombre, de forme, de volume, de position et de structure de la (ou des) dent(s)) ;
- les autres caractéristiques anatomiques singulières (ou variations anatomiques non métriques) ;
- les variations des sillons de lèvres propres à chaque individu : études chéiloscopiques ;
- les variations de la muqueuse palatine : études rugoscopiques, qui consistent à analyser les crêtes palatines. Ces reliefs sont spécifiques à une personne et restent utilisables même en cas de traumatismes ou d'extraction dentaire.

### (3) Recherche d'indices pathologiques

Il sera essentiel de rechercher :

- des traumatismes *ante-mortem* tels que des fractures dentaires coronaires par exemple. Il existe des différences dans les traits de fractures coronaires entre les dents *ante* et *post-mortem* (figure 23) ;
- des pathologies tumorales ;
- des caries dentaires (mais leur taux de significativité est très faible).

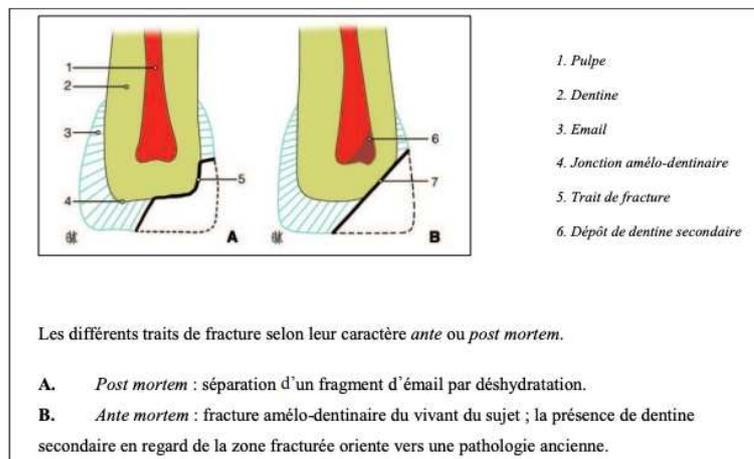


Figure 23 : différence dans le mode de fracturation dentaire selon le caractère ante mortem ou post mortem. Extrait de Dumaure & Paul (2015), d'après Georget et al. (2001).

### (4) Recherche d'indices physiologiques

Ils peuvent correspondre à :

- un défaut de minéralisation dentaire ;
- des signes de sénescence ;

- un défaut d'hygiène ou une coloration particulière (qui peut communiquer des informations sur le mode de vie par exemple) ;
- la présence de tartre.

#### d) *L'identification comparative génétique*

---

La molécule d'ADN est le support universel de l'information génétique, elle est propre à chaque individu et identique à l'intérieur de chacune de ses cellules. Les deux rôles fondamentaux de l'ADN sont la synthèse des protéines et la transmission du patrimoine génétique. Il existe chez l'être humain, deux types de molécule d'ADN :

- l'ADN nucléaire, localisé dans le noyau des cellules et contenu dans les 23 paires de chromosomes ;
- l'ADN mitochondrial, molécule d'ADN circulaire, qui possède un mode d'organisation et un code génétique légèrement différent de l'ADN nucléaire. L'ADN mitochondrial nous permet d'établir la filiation maternelle.

En matière pénale l'identification comparative génétique est la méthode de référence. Elle aurait été initiée par Sir Alec Jeffreys dans les années 80 et consistait à l'époque à réaliser un Southern blot afin d'analyser le polymorphisme de longueur de fragment de restriction ou RFLP (Crawford & Beaty, 2013). Pour appliquer cette technique il était nécessaire de posséder de grande quantité d'ADN. Elle a donc été rapidement remplacée par la technique de PCR (*Polymerase Chain Reaction*), une méthode d'amplification de l'ADN in vitro, permettant d'obtenir une empreinte génétique à partir de traces d'ADN ou d'ADN dégradé.

Actuellement les variations recherchées concernent de courtes séquences de 2 à 6 paires de nucléotides, répétées jusqu'à une dizaine de fois et désignées par l'acronyme STR (*Short Tandem Repeats*). Les STR sont amplifiées par PCR multiplexe à l'aide d'amorces spécifiques dont l'une est couplée à un fluorochrome. Les amplicons obtenus sont ensuite séparés et détectés par électrophores capillaires. Les résultats sont représentés par des pics de fluorescence dont la position sur l'axe des abscisses correspond à la taille du fragment amplifié. Si les marqueurs STR sont polymorphes, le nombre d'allèles, pour chacun, est relativement faible (quelques dizaines au maximum) et sont partagés par 5 à 20 % de la population, en moyenne. Le pouvoir de discrimination de cette méthode repose sur l'analyse combinée d'une vingtaine de marqueurs STR autosomaux, ce qui permet d'obtenir une probabilité d'apparition d'un profil génétique dans une population de référence, de l'ordre d'une sur plusieurs milliards de milliards (Laurent et al., 2017).

L'ADN va donc permettre une identification absolue entre un échantillon recueilli sur l'individu à identifier et son ADN de comparaison (base de données, ADN prélevé sur une brosse à cheveux, brosse à dents, membre de sa famille...).

Nous venons de présenter les différentes techniques de l'identification comparative et nous avons pu remarquer que sa principale limite est la nécessité absolue de posséder un élément de comparaison. Toutefois, cette condition n'est pas toujours possible à respecter. Dans ce cas, il

est nécessaire de se tourner vers un autre mode d'identification : la méthode estimative ou reconstructive.

### 3. L'identification reconstructive

---

L'identification reconstructive ou estimative regroupe l'ensemble des méthodes permettant d'obtenir toutes informations sur l'individu à identifier. Cette étape est cruciale en identification puisqu'elle va permettre de réduire au maximum les possibilités théoriques d'identité de l'individu. Par exemple, la détermination du sexe est le premier élément qui permettra de diminuer les possibilités de 50 % (Quatrehomme et al., 2015).

Les différents éléments qui constituent le noyau de l'identification reconstructive sont la détermination du sexe, l'estimation de l'âge au décès, la détermination de la stature et la recherche de tout signe particulier.

Il est évident qu'elle ne permettra pas une identification certaine mais pourra fournir un statut d'identité « probable » ou « possible » et pourra peut-être constituer une première étape vers une identification comparative.

Dans les analyses de squelettes, il est d'usage de déterminer si l'os incinéré est d'origine animale ou humaine et quel est le nombre d'individus représentés. Ces tâches doivent être effectuées avant toute analyse de l'âge, du sexe, de la stature et de l'ascendance (Gejvall, 1969; Lisowski, 1968; Malinowski & Porawski, 1969; Stewart, 1979; Wells, 1960). Nous commencerons donc par quelques brefs rappels relatifs à ces questions avant d'aborder les principaux critères d'identifications biologiques.

#### a) *Question préliminaire sur l'origine des restes*

---

La première question posée dans le cadre de la découverte de restes très altérés est celle de l'origine humaine ou animale de ces restes. Tout particulièrement lorsque ces ossements sont très fragmentés ou carbonisés. De plus, en contexte criminel de dissimulation, il n'est pas rare que des os de gros animaux (restes de boucherie essentiellement) puissent être mélangés aux restes de la victime (Quatrehomme et al., 2015).

L'estimation de l'origine humaine ou animale peut se faire par différentes méthodes.

#### **(1) L'observation macroscopique**

L'observation macroscopique est la méthode la plus simple, qui ne présente que peu de difficulté si l'os est entier. Les critères morphologiques et anatomiques permettent généralement de faire facilement la distinction entre un os humain et animal. Les éléments les plus probants à observer

vont être l'anatomie générale de l'os, les surfaces articulaires qui seront plus saillantes et plus marquées chez l'animal ainsi que les reliefs d'insertions musculaires plus marqués également.

## **(2) Le calcul de l'indice cortico médullaire**

Il correspond au rapport entre le diamètre minimum du canal médullaire et le diamètre minimum de la diaphyse au même niveau. Chez l'homme adulte, ce rapport équivaut à 0,45. Il est un peu plus faible chez la femme, alors que chez l'animal il est compris entre 0,47 et 0,77 (Durigon, 1987).

## **(3) Analyse radiologique**

En radiologie, certains caractères sont utilisables pour distinguer l'os humain de l'os animal. Chez l'animal, la trame osseuse diaphysaire est un peu moins dense avec une zone périphérique de condensation distincte du périoste, permettant de distinguer la nature animale et non immature de l'os (Quatrehomme et al., 2015 d'après Dérobert et al. 1974). Les épiphyses quant à elles seraient trop proches pour tenter une distinction.

Quatrehomme et al. (2015) reprend les critères mis en évidence par Chilvarquer et al. (1987) permettant de distinguer une diaphyse humaine et animale. On retrouve chez l'animal :

- un aspect plus homogène des travées, plus dense avec une apparence granulaire ;
- un bord net entre le cortex interne et l'os spongieux ;
- de petites invaginations de l'os cortical paraissant s'étendre du cortex vers l'os spongieux comme des spicules vers le milieu de la diaphyse ;
- la présence de foramen nourricier vers le milieu de la diaphyse.

## **(4) Analyse immunologique**

Les méthodes immunologiques font appels à des sérums spécifiques anti-protéines humaines qui précipitent en présence de poudre d'os humain. Néanmoins, il faut rester prudent car cette méthode peut ne pas fonctionner si l'os a été soumis à des processus taphonomiques (Quatrehomme et al., 2015 d'après Lowenstein et al., 2006).

## **(5) Analyse histologique**

Ces critères sont utilisables sur tous les os ou fragments d'os, y compris les fragments ayant été soumis à des processus taphonomiques ou dans le cas qui nous intéresse particulièrement, les os carbonisés (Mulhern & Ubelaker, 2001).

Les éléments qu'il conviendra d'observer sont :

- la forme des ostéoplastes (rectiligne et de forme régulière chez l'homme) ;

- le diamètre des canaux de Havers (toujours supérieur à 25 microns chez l'homme alors qu'il est toujours inférieur à 20 microns chez l'animal) ;
- la densité des canaux de Havers (10 à 15 canaux par mm<sup>2</sup> chez l'homme vs. toujours supérieur à 20 par mm<sup>2</sup> chez l'animal) ;
- l'épaisseur des lames osseuses.

De plus, l'architecture histologique est différente entre l'homme et l'animal : chez l'homme les ostéons sont éparpillés alors qu'ils vont avoir tendance à s'aligner chez l'animal.

Par ailleurs, chez l'animal, le tissu compact prédomine avec des systèmes de Havers imposants et une hypertrophie de la couche périostée sans organisation ostéoplastique concentrique (Dérobert et al., 1974; Quatrehomme et al., 2015).

## (6) Analyse ADN

L'identification génétique, enfin, est la dernière technique à notre disposition pour différencier de façon certaine l'os humain de l'os animal (Bataille et al., 1999).

### *b) Le dénombrement des individus*

---

Le dénombrement des individus est capital qu'il s'agisse d'une affaire médico-légale ou d'une analyse archéo-anthropologique.

En pratique, lorsque nous nous retrouvons face à un mélange osseux, il n'est possible d'estimer que le nombre minimal d'individus ou NMI, qui correspond au plus petit nombre d'individus nécessaires pour expliquer la présence de tous les os observés au sein de l'assemblage. Leur nombre exact est bien souvent impossible à affirmer.

Une multitude de critères peuvent être pris en considération afin de déterminer le NMI :

- l'aspect général des restes (observation des tissus mous encore présents, de la couleur de peau, présence de poils, état de décomposition...S'il s'agit uniquement de restes osseux, il conviendra alors d'analyser la gracilité/robustesse, la coloration des os...)
- les indicateurs biologiques : sexe, âge et stature ;
- l'identification de doublets anatomiques. Cette méthode d'analyse des doublets est appelée NMI de fréquence et tient compte de la latéralité ;
- la notion d'appariements : par définition le NMI par appariement est la somme des NMI de fréquence droits et gauche auxquels sont soustraites les paires pouvant être appariées. Cet appariement doit être réalisé en tenant compte de la stature et de la robustesse/gracilité ;
- la concordance peut également être affirmée par deux os dont les surfaces articulaires sont parfaitement congruentes. En contexte de crémation il sera nécessaire de prendre en compte les phénomènes de déformation et de rétraction qui pourraient biaiser cette analyse en créant une incompatibilité de taille ;

- les éléments pathologiques pourront également parfois réaliser des exclusions sur une incompatibilité pathologique ;
- des clichés radiologiques peuvent également être réalisés dans certains cas avec pour objectif de regarder la densité générale des os en prenant soin bien évidemment d'utiliser les mêmes paramètres radiologiques sur les os pairs. Il peut également exister une concordance des travées osseuses radiologiques d'un fragment à l'autre (Mann, 1998). Cette méthode peut s'avérer intéressante, par exemple lorsque les os ont été altérés par un processus taphonomique.

### c) *La diagnose sexuelle biologique*

---

La diagnose sexuelle est une étape primordiale et incontournable dans toute étude anthropologique, qu'elle soit réalisée dans un domaine archéologique ou lors d'une expertise médico-légale. Elle se base sur l'existence d'un dimorphisme sexuel. Pendant la croissance, le squelette acquiert des caractéristiques sexuelles secondaires, qui, au stade adulte, conduisent à la distinction de l'homme et de la femme (Bruzek, 1992). Le sexe biologique représente le génotype alors que le genre est basé sur le phénotype de l'individu.

À ce jour encore, malgré l'avènement des techniques moléculaires, les méthodes morphologiques et morphométriques sont encore extrêmement utilisées lors de la détermination du sexe.

Mays et Cox, dans *Human osteology in archaeology and forensic science* (Mays & Cox, 2000), ont présenté une revue des techniques d'identification pour les vestiges osseux matures et immatures. Il en ressort que les deux éléments les plus traditionnellement utilisés pour déterminer le sexe d'un squelette, sont le crâne et les os du bassin, où les différences apparaissent les plus extrêmes. Dans la littérature, il existe une multitude d'autres études sur les différents os du corps : les os longs (İşcan et al., 1998; Mall et al., 2001; Özer et al., 2014; Steyn & İşcan, 1997) suivi par les côtes (İşcan et al., 1985; İşcan et al., 1984; Wiredu et al., 1999) les vertèbres (Kaeswaren & Hackman, 2019; Rohmani et al., 2021), la clavicule (McCormick et al., 1991), puis le sternum (Ekizoglu et al., 2014; García-Parra et al., 2014) les os des mains et des pieds (Navega et al., 2015). Nous ne détaillerons ici, que les méthodes les plus fiables et les plus usitées et ne nous intéresserons qu'aux sujets matures.

#### **(1) Diagnose sexuelle à partir de l'extrémité céphalique**

Le crâne est la pièce osseuse la plus souvent présentée par les enquêteurs lors d'une étude anthropologique en contexte médico-légal (Beauthier, 2008).

Plusieurs critères anatomiques de robustesse générale ont été répertoriés sur les os du crâne, et permettraient de les classer en caractères féminins ou masculins. Ces critères généraux sont répertoriés dans le tableau 6. De nombreuses études se sont intéressées à l'observation de ces critères. Buikstra & Ubelaker (1994), par exemple, observent cinq critères parmi les critères

généraux et les classent en hyperféminin ; féminin ; indéterminé ; masculin et hypermasculin. Ces critères sont représentés sur la figure 24, chacun doit être observé de façon indépendante.

Les méthodes morphoscopiques basées sur l'évaluation visuelle des caractères morphologiques du crâne atteignent en moyenne 80 % de fiabilité (Masset, 1987) mais sont souvent jugées subjectives car dépendantes de l'expérience de l'observateur (Guyomarc'h & Bruzek, 2010). Parallèlement les méthodes morphométriques sont plus objectives (basées sur des mesures et donc moins dépendantes de l'expérience de l'observateur) mais elles dépassent rarement les 80 % de fiabilité. De plus, Guyomarc'h & Bruzek (2010), ont montré qu'au sein du crâne humain, le dimorphisme sexuel se manifestait principalement par une différence de taille. Une fois la taille extraite, la conformation crânienne ne présentait globalement que peu de dimorphisme sexuel. Toutefois, l'examen de la conformation de certaines parties du crâne, par le biais d'analyses discriminantes témoignaient d'un degré de dimorphisme plus élevé : les régions nasales, temporales et zygomatiques par exemple, révélaient des variations morphologiques.

Par ailleurs, les dents peuvent également être une source d'informations à ne pas négliger en matière de diagnose sexuelle. En effet, elles sont souvent l'élément le mieux préservé du squelette, facilement retrouvées et identifiées. Il existe un dimorphisme sexuel dans les tailles des couronnes dentaires humaines. Il est le plus marqué sur les canines et en particulier la canine inférieure. Cependant, il existe des variations entre les populations et la précision de l'estimation suivant les mesures oscille entre 60 et 90% (White et al., 2016).

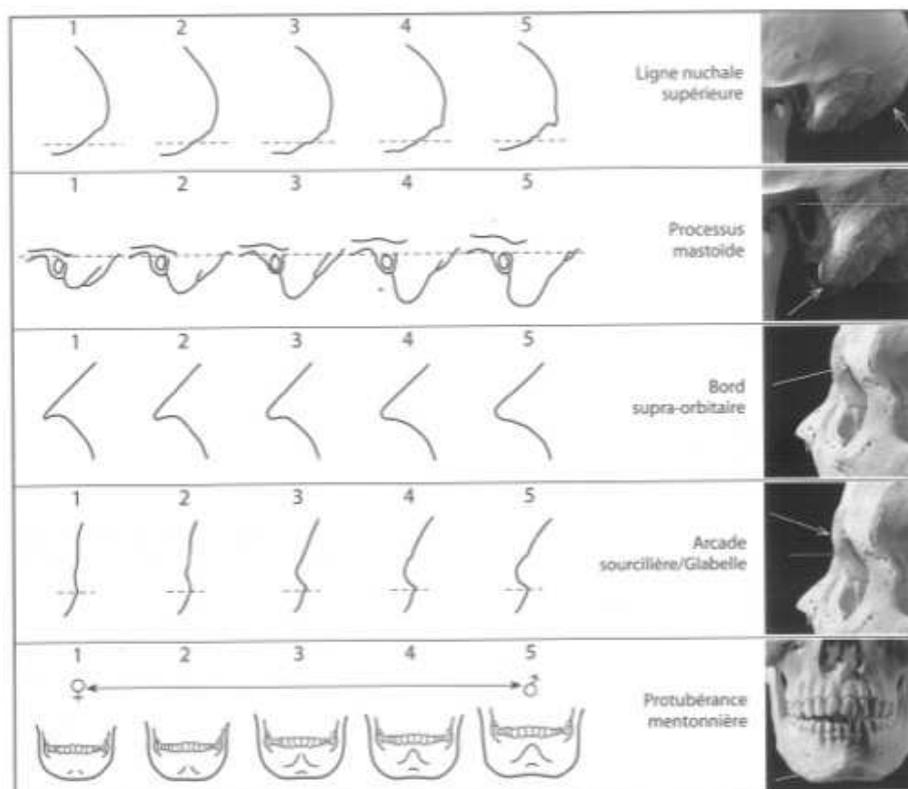


Figure 24: système de cotation du dimorphisme sexuel gradé de 1 (hyperféminin) à 5 (hypermasculin). D'après Buikstra et Ubelaker (1994).

	SEXE MASCULIN	SEXE FEMININ
<b>Caractéristiques générales</b>	Crâne robuste, anguleux	Crâne fin, mousse, plus petit
<b>Capacité crânienne</b>	> 1450	<1300
<b>Poids du crâne</b>	> 880 g	<430g
<b>Crêtes d'insertions musculaires</b>	Très marquées	Peu marquées
<b>Palais osseux</b>	Large	Étroit
<b>Arcade alvéolaire maxillaire</b>	Volumineuse	Fine
<b>Dents</b>	Larges	Étroites
<b>Glabelle</b>	Saillante	Effacée
<b>Processus mastoïde</b>	Grand	Petit
<b>Région nuchale</b>	Lignes marquées, rugueuses	Lignes mousses ou effacées
<b>Processus zygomatique du temporal</b>	Épais et haut	Mince et bas
<b>Arcade sourcilière</b>	Marquée saillante et arquée	Peu accentuée
<b>Os zygomatique</b>	Haut, irrégulier, tubercule marginal proéminent	Peu marquée
<b>Crête supra mastoïdienne</b>	Marquée et sillon distinct profond	Peu marquée
<b>Angle d'inclinaison frontale</b>	Incliné	Vertical
<b>Orbite</b>	Quadrangulaire, marge arrondie	Ronde, plus haute, marge marquée
<b>Aspect général mandibulaire</b>	Robuste	Gracile
<b>Protubérance mentonnière</b>	Proéminente	Petite et arrondie
<b>Angle goniale</b>	Très marqué	Doux et arrondi
<b>Bord caudal de la mandibule</b>	Épais	Mince

Tableau 6 : caractères crâniens et mandibulaires permettant d'orienter la détermination du sexe en fonction de leur morphologie et de leur développement (d'après Beauthier, 2008).

## (2) La diagnose sexuelle à partir du squelette infra-crânien

De multiples études du squelette infra-crânien ont examiné le dimorphisme sexuel par la taille de différents éléments adultes. D'après Bass (2005), les résultats sur les os des membres les plus dimorphiques, montrent qu'à partir de simples mesures ou combinaisons de mesures, il est possible d'estimer correctement le sexe d'entre 80 et 90% de tous les individus. Une multitude d'études a été menée sur des échantillons de sexe connu, afin d'obtenir des méthodes capables de classer les individus en fonction du sexe dans plus de 85 % des cas pour une variété d'éléments osseux allant du métacarpe (Falsetti, 1995; Stojanowski, 1999) aux métatarses (Robling & Ubelaker, 1997) passant par l'humérus (Rogers, 1999) l'ulna (Purkait, 2001) ou le calcaneus (Introna et al., 1997). Toutefois, il est admis que l'os le plus dimorphique du corps humain et offrant la plus grande fiabilité en termes de diagnose sexuelle est incontestablement l'os coxal (Bruzek, 2002; Ferembach et al., 1979). Des procédés fiables aussi bien morphoscopiques que morphométriques ont été développés ces dernières années permettant une classification des individus avoisinant les 100 % en s'affranchissant des spécificités populationnelles. Les principales méthodes permettant la détermination du sexe à partir du bassin osseux sont les suivantes.

### ➤ La méthode de Bruzek (2002)

Il s'agit d'une méthode morphologique composite qui prend en compte l'observation simultanée de cinq caractères (figures 25) permettant d'approcher 98 % d'identification sexuelle fiable. La principale limite de cette méthode est la nécessité de l'appliquer sur des os coxaux entiers (Murail et al., 2005).

### ➤ La méthode de Steckel et al. (2005)

Elle utilise également une méthode composite en reprenant les recommandations pour la détermination du sexe proposées par plusieurs auteurs : Ferembach et al. (1979), Buikstra & Ubelaker (1994) et (Acsadi & Nemeskeri (1970). Elle se base sur l'utilisation de six critères :

- la concavité de la branche ischio-pubienne ;
- l'angle sous pubien ;
- l'aspect de la branche ischio-pubienne ;
- l'arc ventral sous pubien ;
- l'arc composé ;
- l'ouverture de la grande échancrure sciatique.

### ➤ La DSP : méthode Murail et al. (2005)

La DSP ou diagnose sexuelle probabiliste est une méthode morphométrique, proposant un outil de diagnose sexuelle basée sur un ensemble de mesures réalisées sur l'os coxal. Cet outil utilise

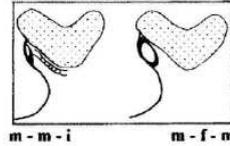
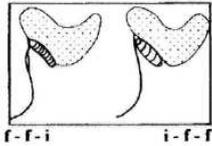
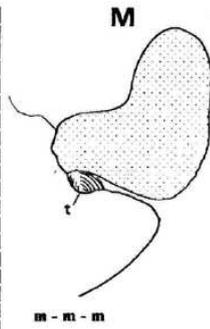
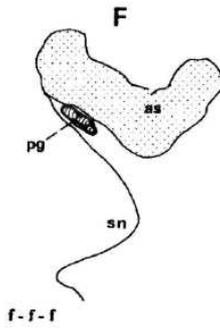
le principe de l'analyse discriminante et offre pour chaque individu, la probabilité individuelle d'appartenir au groupe féminin ou au groupe masculin, en comparant les données métriques de l'os coxal à un échantillon de référence mondial. L'application de cette méthode nécessite de disposer d'un minimum de quatre variables. Toutefois, plus le nombre de variables enregistrées est important plus grande est la probabilité d'obtenir un résultat significatif. Dix variables sont disponibles, réparties en deux groupes, elles sont décrites dans le tableau 6. Le premier groupe de huit variables représente celles à fort pouvoir discriminant dans un ordre décroissant, elles doivent être utilisées en priorité. Les deux autres variables sont des variables de secours à n'utiliser que si le nombre minimum n'est pas atteint (Murail et al., 2005). L'avantage de cette méthode, est qu'elle peut être utilisée sur des os coxaux très fragmentaires.

### ➤ **Les méthodes globales**

Certains auteurs, ont établi une méthodologie d'observation globale des critères, à la fois du crâne et du squelette infra-crânien. C'est le cas d'Acsádi & Nemeskéri (1970), qui étudient trente caractères sexuels du crâne et du post-crâne. Pour chaque caractère, la variabilité descriptive est répartie en cinq possibilités, auxquelles les auteurs attribuent une valeur algébrique allant de -2 (caractère hyperféminin) à +2 (caractère hypermasculin). En outre, à chaque caractère est attribué le coefficient 1 ou 2, correspondant à son dimorphisme sexuel. Un caractère coefficienté 2 aura donc une plus grande importance dans la diagnose sexuelle, que celui coefficienté 1. Janssens & Perrot (2006) ont travaillé sur un dérivé de cette méthode en utilisant 54 caractères.

### ➤ **Autres méthodes : utilisation de l'imagerie**

Les radiographies numériques peuvent fournir une technique de mesure alternative et précise. Effectuées directement sur les os ou sur des individus vivants, elles ont montré des résultats presque similaires en termes de précision dans l'estimation du sexe obtenue à partir du diamètre minimal du col supéro-inférieur et du diamètre maximal de la tête du fémur (Kranioti et al., 2009; Mostafa et al., 2012). La tomодensitométrie et l'IRM sont également des méthodes non invasives qui présentent des résultats intéressants dans la détermination du sexe. Biwasaka et al. (2009) ont montré l'utilisation de la grande échancrure sciatique pour construire une image tridimensionnelle afin d'évaluer le sexe des individus avec une fiabilité de 89,4 %.



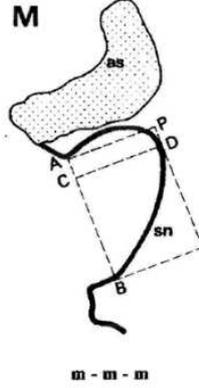
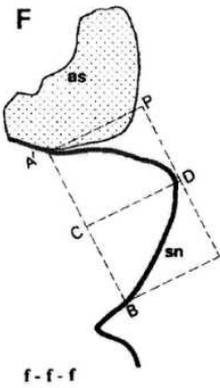
### Surface auriculaire

as : surface auriculaire  
 pg : sillon pré-auriculaire  
 t : tubercule piriforme  
 sn : grande échancrure ischiatique

À gauche : forme féminine typique F-F-F  
 1) Surface pré auriculaire large  
 2) Sillon pré-auriculaire bien marqué  
 3) Tubercule piriforme absent

À droite : forme masculine typique M-M-M  
 1) Surface pré auriculaire étroite  
 2) Sillon pré-auriculaire absent  
 3) Tubercule piriforme bien marqué

En bas : quatre formes intermédiaires

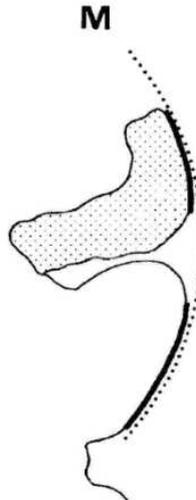
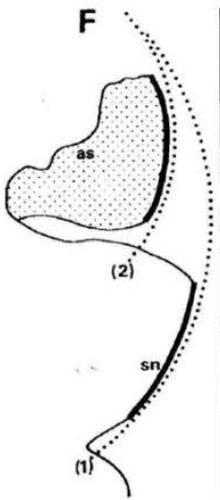


### Grande échancrure ischiatique

as : surface auriculaire  
 sn : grande échancrure ischiatique  
 A : sommet de l'épine iliaque postéro inférieure  
 A' : sommet du tubercule piriforme  
 D : point le plus profond de sn  
 C : projection orthogonale de D sur A'B (AB)  
 AB (A'B) : ouverture de la grande échancrure ischiatique  
 A'P (AP) : droite parallèle à CD

À gauche : forme féminine typique : F-F-F  
 1) AC (A') > ou = CB  
 2) Grande échancrure ischiatique très symétrique  
 3) Courbe A'D (AD) ne coupant pas A'P (AP)

À droite : forme masculine typique : M-M-M  
 1) AC (A') < ou = CB  
 2) Grande échancrure ischiatique dissymétrique  
 3) Courbe A'D (AD) coupant A'P (AP)

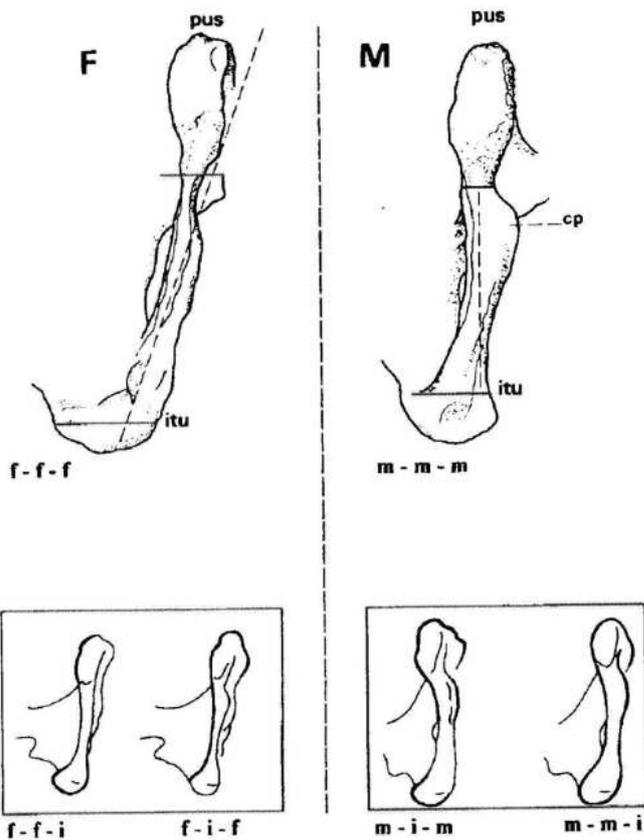


### Dimorphisme sexuel de l'arc composé

as : surface auriculaire  
 sn : grande échancrure ischiatique  
 (1) : arc antérieur grande échancrure ischiatique  
 (2) : arc antérieur surface auriculaire

À gauche : forme féminine typique : F  
 Les deux arcs sont séparés, double courbe

À droite : forme masculine typique : M  
 Les deux arcs forment une courbe unique



### Bord inférieur de l'os coxal

**pus** : symphyse pubienne  
**cp** : crista phallica  
**itu** : tubérosité ischiatique

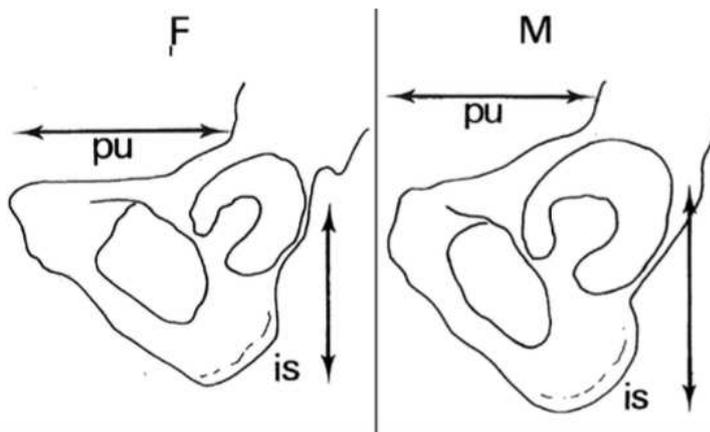
À gauche : forme féminine typique F-F-F

- 1) Éversion externe du ramus ischio pubien
- 2) *Crista phallica* absente
- 3) Gracilité d'ensemble

À droite : forme masculine typique M-M-M

- 1) Ramus ischio pubien vertical
- 2) *Crista phallica* présente
- 3) Robustesse d'ensemble

En bas, quatre formes intermédiaires. La *crista phallica* ne permet pas de diagnostiquer le sexe masculin si elle est présente mais peu marquée



### Rapports ischio-pubien

**pu** : pubis  
**is** : ischion

À gauche : forme féminine typique : F  
 Longueur du pubis > Longueur de l'ischion

À droite : forme masculine typique : M  
 Longueur du pubis < Longueur de l'ischion

Figure 25 : illustration des cinq caractères proposés par Bruzek et al. (2002), à observer dans la méthode visuelle de détermination du sexe à partir de l'os coxal. D'après Bruzek et al. (2005)

Variables	Mesure	Définition	Références
<b>PUM</b>	<b>Longueur pubienne acétabulo-symphysaire</b>	Distance minimale entre les points supérieur et médial de la symphyse pubienne et le point le plus proche du bord de l'acétabulum au niveau de la surface lunaire.	M 14 - (Brauer, 1988)
<b>SPU</b>	<b>Largeur cotylo-pubienne</b>	Largeur du pubis entre le point acétabulaire le plus latéral et la partie médiale du pubis. La mesure est perpendiculaire au grand axe de l'os pubien. Les branches du pied à coulisse sont donc parallèles au plan du foramen obturé.	(Gaillard, 1960)
<b>DCOX</b>	<b>Hauteur pelvienne maximale</b>	Hauteur maximale de l'os coxal mesurée du bord inférieur de l'os coxal à la partie supérieure de la crête iliaque. Peut être mesurée avec un pied à coulisse ou une planche ostéométrique.	M1 - (Brauer, 1988)
<b>IIMT</b>	<b>Profondeur de la grande échancrure sciatique</b>	Distance entre l'épine iliaque postéro-inférieure et le bord antérieur de la grande échancrure sciatique. L'axe de la mesure doit être perpendiculaire au bord antérieur. En raison de la configuration de l'os coxal, il est plus facile d'utiliser les petits bras du pied à coulisse.	M 15.1 - (Brauer, 1988)
<b>ISMM</b>	<b>Longueur de l'ischion post-acétabulaire</b>	Distance entre le point le plus antérieur de la tubérosité ischiatique et le point le plus éloigné du bord de l'acétabulum	(Schulter-Ellis et al., 1983)
<b>SCOX</b>	<b>Largeur de l'aile iliaque</b>	Distance entre l'épine iliaque antéro-supérieure et l'épine iliaque postéro-supérieure	M 12 - (Brauer, 1988)
<b>SS</b>	<b>Longueur spino-sciatique</b>	Distance minimale entre l'épine iliaque antéro-inférieure et le point le plus profond de la grande échancrure sciatique.	(Gaillard, 1960)
<b>SA</b>	<b>Longueur spino-auriculaire</b>	Distance entre l'épine iliaque antéro-inférieure et le point auriculaire. Le point auriculaire est défini comme l'intersection de la ligne arquée avec la surface auriculaire.	(Gaillard, 1960)
<b>SIS</b>	Largeur cotylo-sciatique	Distance entre le bord latéral de l'acétabulum et le point médian de la partie antérieure de la grande échancrure sciatique. La branche fixe du pied à coulisse est parallèle au plan acétabulaire.	M 14.1 - (Brauer, 1988)
<b>VEAC</b>	Diamètre acétabulaire vertical	Diamètre vertical maximal de l'acétabulum, mesuré sur le bord de l'acétabulum, dans le prolongement de l'axe longitudinal de l'ischium.	M22 – (Brauer, 1988)

Tableau 7 : tableau présentant les 10 variables à mesurer pour la méthode de la diagnose sexuelle probabiliste (DSP). En gras les 8 variables les plus discriminantes. D'après Murail et al. (2005).

#### *d) La question de la détermination du sexe chez les immatures*

---

L'ensemble des méthodes précédemment décrites n'est utilisable que chez les individus adultes. En effet, les différences biologiques même si elles existent dès le stade fœtal, se marquent au fur et à mesure de la croissance et principalement au moment de la puberté sous l'influence de pic hormonaux (Scheuer & Black, 2000).

À l'heure actuelle il est quasiment impossible de déterminer le sexe d'un squelette immature. C'est l'analyse génétique qui donne les résultats les plus fiables (Cunha et al., 2000). De nouvelles méthodes sont actuellement explorées telle que l'analyse du labyrinthe osseux de l'oreille interne (un des rares éléments osseux à atteindre sa taille adulte in utero) dont le dimorphisme sexuel serait marqué dès la naissance (Boucherie et al., 2021; Braga et al., 2019; Osipov et al., 2013; Ward et al., 2020).

#### *e) L'estimation de l'âge au décès des individus*

---

L'âge au décès sépare la date de naissance de la personne de la date de sa mort. Lorsqu'il est inconnu, cet âge peut être approché par la détermination d'un âge squelettique (âge osseux et dentaire), pouvant être basé sur la morphologie, l'imagerie ou l'histologie.

Comme pour la détermination du sexe, l'estimation de l'âge squelettique consiste à observer des critères morphologiques et comparer ces informations avec des variations enregistrées dans une population connue (Ubelaker, 1989). L'un des prérequis important, est que l'estimation de l'âge au décès des sujets matures n'est pas toujours fiable et souvent imprécise (Schmitt, 2002). Les marqueurs de la sénescence du corps humain sont variables dans le temps et d'un individu à l'autre au sein d'une même population. Le déclin de l'organisme avec l'âge n'est pas un phénomène simple invariant et linéaire, il dépend de nombreux facteurs et de l'interaction entre les gènes et le milieu environnant. C'est la raison pour laquelle, la corrélation entre l'âge chronologique et les changements du squelette est faible. Il existe malgré tout une multitude de méthodes d'estimation de l'âge au décès. À ce jour, les plus fiables sont celles utilisant l'os coxal, la quatrième côte droite, ainsi que les méthodes basées sur l'observation des caractères de dégénérescence arthrosique et du remodelage osseux. Nous évoquerons également la méthode des sutures crâniennes, qui du fait de son imprécision ne devrait être utilisée que par défaut, lorsque aucune autre méthode n'est disponible.

#### **(1) Méthodes utilisant la symphyse pubienne**

Chez l'homme, la surface symphysaire pubienne subit de nombreuses modifications au cours de la vie. Chez l'adulte jeune elle présente un aspect rugueux, traversé par des crêtes horizontales et des rainures intermédiaires qui vont avoir tendance à s'éroder avec l'âge. Todd (1920) fut le premier auteur à décrire dix phases de modifications de la symphyse pubienne entre l'âge de

18/19 ans et 50 ans et plus. Les phases I à III comprennent les stades post adolescents, les phases IV à VI sont les stades de développement et les phases VII à X représentaient les stades dégénératifs. Tous les travaux ultérieurs sur les modifications de la symphyse pubienne découlent de cette étude. La méthode d'Acsádi & Nemeskéri (1970) présente cinq phases, chacune correspondant à un âge moyen accompagné de son écart type. Puis Brooks & Suchey (1990), dans leurs travaux plus récents, ont élargi cette méthode à six phases de modification symphysaire (tableau 8 et figure 26) en introduisant une composante de sexe qui n'existait pas avec la méthode d'Acsádi & Nemeskéri (1970). Chaque phase correspond à une classe d'âge chez les hommes et chez les femmes avec un intervalle de confiance à 95 % (tableaux 9 et 10).

<b>Phase 1</b>	La symphyse pubienne, présente une surface ondulante, faite de sillons et de rides transverses bien marqués. Des nodules osseux peuvent être observés sur l'extrémité supérieure. Un aspect clé de cette phase est l'absence de délimitation des deux extrémités.
<b>Phase 2</b>	La surface symphysaire peut encore montrer un développement de rides. Les deux extrémités présentent un <b>début de délimitation</b> , avec ou sans nodules osseux. Le <b>début de la formation du rempart ventral</b> correspond à l'extension d'une ou des deux extrémités.
<b>Phase 3</b>	Le rempart ventral occupe l'extrémité inférieure de la surface de la symphyse. La <b>surface peut être lisse ou présenter des crêtes</b> encore distinctes. Le <b>plateau dorsal est complet</b> . On ne note aucun <i>lipping</i> de la marge dorsale ni d'ossifications ligamentaires.
<b>Phase 4</b>	La surface symphysaire montre généralement de <b> fines granulations</b> , bien que les sillons et les crêtes, puissent encore persister. On note un <b>contour ovale habituellement complet</b> à ce stade, bien qu'un hiatus puisse exister dans la partie supérieure. Le tubercule pubien est nettement séparé de la symphyse qui, par ailleurs, peut présenter un rempart distinct. À la partie antérieure, des <b>ossifications ligamentaires peuvent apparaître</b> dans la portion inférieure du pubis. Un léger <i>lipping</i> peut s'observer sur le bord dorsal
<b>Phase 5</b>	On observe une <b>légère dépression de la face symphysaire</b> , par rapport au rempart maintenant complet. Un <b><i>lipping</i> modéré</b> est habituellement visible sur le bord dorsal avec de volumineuses ossifications ligamentaires sur le bord ventral.
<b>Phase 6</b>	La symphyse montre une <b>dépression marquée</b> , avec des <b>érosions du rempart</b> . Les insertions ligamentaires ventrales sont marquées. Le tubercule pubien peut apparaître comme une saillie osseuse indépendante. La surface symphysaire peut être rongée ou poreuse donnant une apparence de délabrement en même temps que des ossifications erratiques se produisent. La surface symphysaire prend une forme souvent irrégulière et des anfractuosités peuvent s'y produire.

Tableau 8 : présentation des six phases de modification de la symphyse pubienne. D'après Brooks & Suchey, 1990.



Figure 26 : illustration des six phases de modification de la symphyse pubienne, d'après le système de Brooks & Suchey (1990).

Phases	Moyenne	SD	95% range
I	19,4	2,6	15-24
II	25,0	4,9	19-40
III	30,7	8,1	21-53
IV	38,2	10,9	26-70
V	48,1	14,6	25-83
VI	60,0	12,4	42-87

Tableau 9 : détermination de l'âge des individus de sexe masculin à partir des six phases de modification de la symphyse pubienne (âge en années). D'après Brooks & Suchey (1990).

Phases	Moyenne	SD	95% range
I	18,5	2,1	15-23
II	23,4	3,6	19-34
III	28,7	6,5	21-46
IV	35,2	9,4	23-57
V	45,6	10,4	27-66
VI	61,2	12,2	34-86

Tableau 10 : détermination de l'âge des individus de sexe féminin à partir des six phases de la symphyse pubienne (âge en années). D'après Brooks & Suchey (1990).

## (2) La surface auriculaire de l'os coxal (figure 27)

L'autre région anatomique de l'os coxal particulièrement intéressante pour l'estimation de l'âge au décès des adultes est la surface auriculaire de l'ilium. Elle est présentée comme un indicateur fiable de l'âge, quel que soit le sexe ou l'origine biogéographique. De plus, elle est souvent mieux préservée que la symphyse pubienne dans les cas médico-légaux et ses modifications contrairement à la symphyse pubienne, se prolongent bien au-delà de l'âge de 50 ans (White et al., 2016).

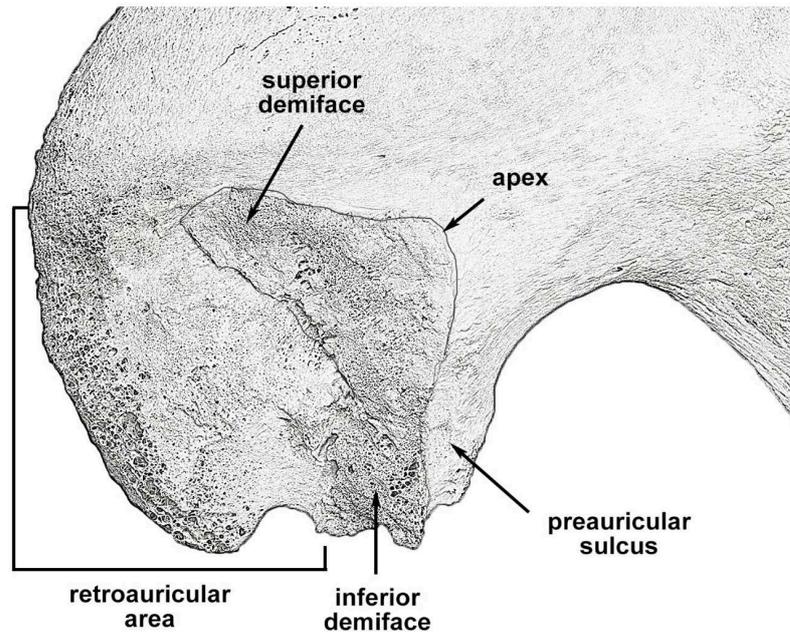


Figure 27 : dessin représentant la région de l'aile iliaque figurant la surface auriculaire et les régions anatomiques d'intérêt dans l'estimation de l'âge au décès des individus. D'après Nikita (2017).

Lovejoy et al. (1985) ont décrit huit phases de modification de la typologie de la surface auriculaire avec l'âge, révisés par Buckberry & Chamberlain (2002) afin d'en rendre la compréhension plus facile. Un autre système de cotation a été développé par Schmitt (2005) afin de proposer une méthode simple et fiable, à partir des quatre caractères morphologiques de la surface sacro-pelvienne iliaque suivants et illustrée par la figure 28.

### ⇒ L'organisation transverse (SSPIA)

- **Score 1** : ondulations ou stries sur une partie ou sur toute la surface articulaire, organisées perpendiculairement par rapport à l'axe du segment vertical et horizontal de la surface.
- **Score 2** : absence d'ondulation ou de strie.

### ⇒ Modification de la surface auriculaire (SSPIB)

- **Score 1** : absence de granulation, toutefois îlots de granulations fines et porosités isolées possibles.
- **Score 2** : granulations sur la majorité de la surface articulaire, porosités éparses possibles.

- **Score 3** : combinaison de granulations grossières et de porosités profondes ou partielles, celles-ci étant regroupées sur une aire limitée de la surface.
- **Score 4** : granulations grossières et/ou porosités profondes et nombreuses.

⇒ **Modification apicale (SSPIC)**

- **Score 1** : le bord est fin, il peut être au même niveau que la surface articulaire ou légèrement surélevé, il forme un angle.
- **Score 2** : le bord est émoussé, il s'épaissit. Il peut former une simple lèvre ou une formation osseuse amorphe.

⇒ **Modification de la tubérosité iliaque (SSPID)**

- **Score 1** : surface lisse, aucun signe de remaniement osseux
- **Score 2** : remaniements osseux ou enthèses fines

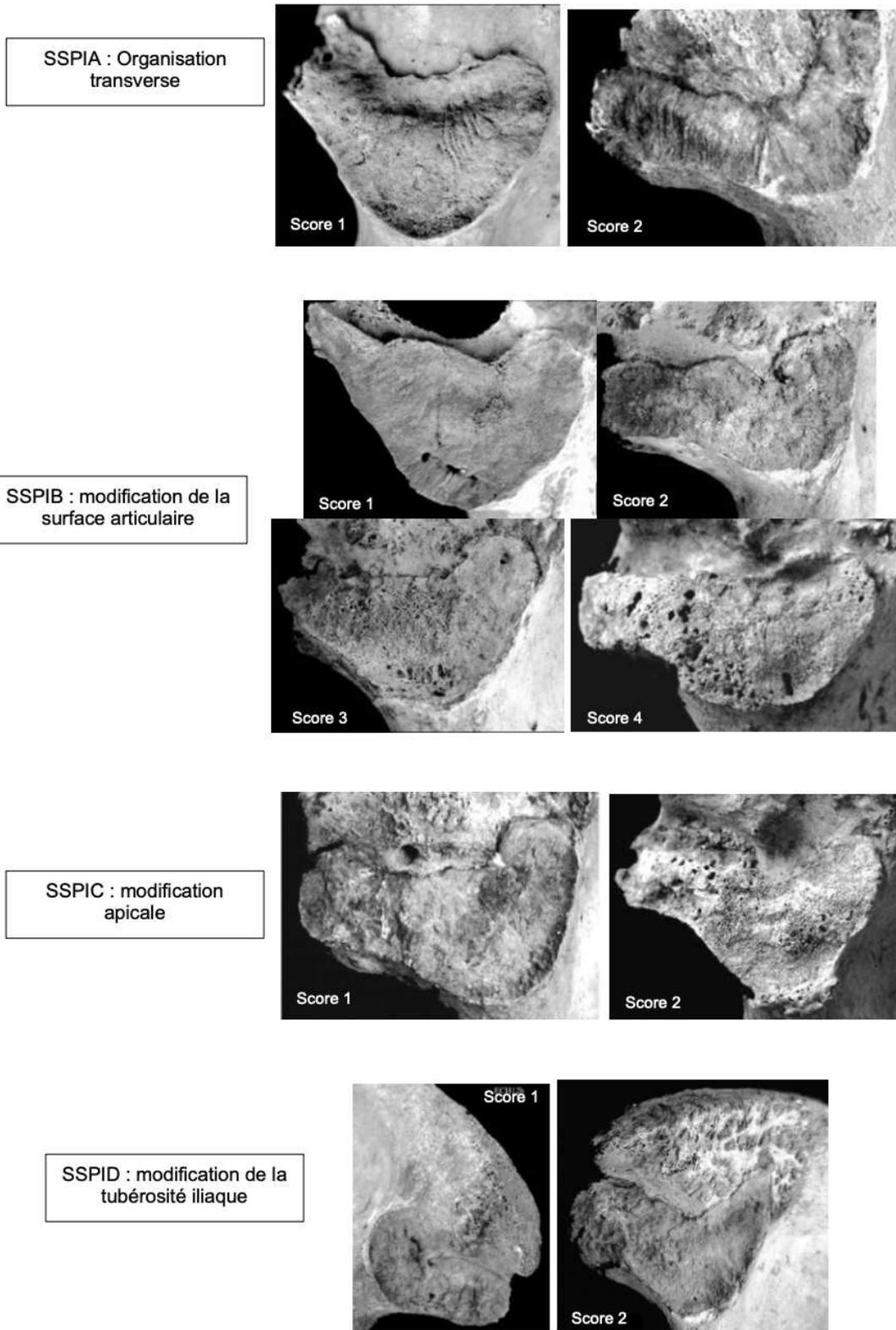


Figure 28 : modification des caractères morphologiques de la surface sacro-pelviennne iliaque avec l'âge : système de cotation utilisé dans la méthode Schmitt. D'après Schmitt (2005).

### (3) Estimation de l'âge à partir des côtes

L'articulation costo-sternale subit d'importants remaniements au cours de la vie. Le vieillissement agit sur l'extrémité sternale de la côte, en creusant la surface de l'articulation dont la profondeur est corrélée à l'âge (figure 29). Selon la méthode İşcan et al. (1985); İşcan et al. (1984), trois critères sont observés : la profondeur, la forme, l'aspect des bords. Pour chacun des critères, six phases sont associées pouvant chacune correspondre à une tranche d'âge. Cette méthode a été améliorée par İşcan & Krogman (1986), distinguant neuf phases et intégrant le sexe de l'individu. Ces méthodes présentent un certain nombre de limites, notamment la préservation et l'identification de la quatrième côte. D'autres chercheurs ont fait de la première côte, plus robuste et plus facilement identifiable une meilleure cible pour des travaux sur l'estimation de l'âge (DiGangi et al., 2009; Kunos et al., 1999).



Figure 29 : représentation du remaniement de l'extrémité sternale des côtes au cours de la vie. 1 : adulte jeune ; 2 : adulte ; 3 : adulte âgé. Issue de Wilczak & Dudar (2011).

### (4) L'observation des sutures crâniennes

Les os crâniens sont articulés entre eux par des sutures. Leur ouverture lors de la croissance du cerveau est une nécessité. Une fois achevée, elles n'ont plus lieu d'exister. Sur chacune des sutures, il est possible d'individualiser des segments. La technique consiste à examiner le degré d'ossification de chaque segment. L'âge retenu sera une synthèse de l'ensemble des observations. La méthode d'observation de la synostose des sutures crâniennes est classique. Cependant, selon Masset (1982), la relation entre l'âge et la fermeture des sutures est purement statistique et cette méthode ne devrait pas être utilisée à l'échelle de l'individu ou seulement lorsqu'aucune des méthodes précédentes n'est utilisable.

### (5) Méthode histo-morphologique

Cette dernière méthode est basée sur l'observation du déséquilibre entre le taux de formation et de résorption osseuse, qui tend vers une diminution du capital osseux avec l'âge. Cette perte

osseuse est variable entre les individus (Robling & Stout, 2003, 2007) et dépend du sexe, de la masse osseuse initiale, de facteurs environnementaux, hormonaux (Frost, 1988), génétiques (Bachrach et al., 1999). Deux éléments principaux sont observés :

- La diminution de l'os spongieux de l'épiphyse des os longs (Acsadi & Nemeskeri, 1970).
- L'observation des structures corticales microscopiques (Kerley, 1965) et notamment les relations entre le nombre d'ostéons, les fragments d'ostéons, le pourcentage d'os lamellaire et les canaux non-haversiens (Frost, 1987; Robling & Stout, 2007).

Les principaux facteurs limitant ces études sont leur caractère destructeur et leur faible degré de précision avec des écarts types s'étendant jusqu'à 12 ans (Wallin et al., 1994).

#### 4. Problématique spécifique d'identification des restes humains carbonisés

---

Nous venons de rappeler les principales méthodes d'identification des restes humains squelettiques. Dans les cas de carbonisations extrêmes, elles ne seront pas toujours applicables. Les altérations des tissus mous et du matériel osseux, telles que nous venons de les décrire vont fortement compromettre les méthodes d'identification.

Lorsqu'un corps est brûlé, la peau est altérée ou peut avoir totalement disparue. Les tatouages ne sont plus visibles. Les globes oculaires ne sont plus identifiables. Le cuir chevelu est brûlé partiellement ou en totalité. Dans ces cas-là, l'identification visuelle, est impossible. De plus, en raison de leur position et leur anatomie, les mains et les pieds sont souvent les premiers éléments altérés par les flammes, rendant l'identification dactyloscopique irréalisable.

Par ailleurs, lorsque la combustion est poussée à l'extrême, même les techniques d'identifications moléculaires ne pourront plus être utilisées. Nous avons décrit les altérations osseuses et pu voir qu'à partir de 600°C la matière organique est oxydée, donc l'ADN dégradé. Il en est de même, si la durée d'exposition au feu est trop longue. Plusieurs études expérimentales et *cases reports* indiquent que dans ces cas-là, l'ADN peut difficilement être récupéré (Cattaneo et al., 1999; Nelson & Melton, 2007; Rees & Cox, 2010; Von Wurmb-Schwark et al., 2004).

Les principales techniques d'identification comparative ne pourront pas être appliquées aux restes humains carbonisés. Les méthodes reconstructives devront mettre en évidence le plus d'éléments d'identification pertinents possible et ce en dépit des altérations subies par les os lors d'une carbonisation complète.

---

## *Problématique et objectifs*

---

## A. Les restes humains carbonisés : fréquence, origine et réquisition judiciaire

---

Les incendies sont quasi quotidiens, voire pluriquotidiens dans la plupart des grandes métropoles. En France, un incendie domestique survient toutes les deux minutes. Chaque année, plus de 300 000 cas sont détectés et engendrent la mobilisation d'au moins une équipe d'intervention incendies selon le ministère de l'intérieur.

Selon les données de l'INPES 2021, ils sont à l'origine de 460 décès/an en France. Quatrehomme et al., 2015 cite plusieurs milliers de décès par an aux Etats-Unis. La plupart surviennent dans des appartements ou des maisons individuelles et sont pour le quart d'entre eux, dues à des installations électriques défectueuses. Les autres causes d'incendies domestiques les plus fréquentes sont les cigarettes mal éteintes chez un sujet endormi, les installations de chauffages défectueuses, les vêtements qui prennent feu en cuisinant ou chez l'enfant et le sujet âgé (Fédération nationale des sapeurs-pompiers de France, 2023).

Les incendies domestiques ne sont pas les seuls à être meurtrier. Les feux de forêts sont de plus en plus fréquents ces dernières années en raison de grands épisodes de sécheresse et causent également de nombreux morts. À titre d'exemple, sur les dizaines d'incendies qui ont sévi en Algérie en aout 2022, un bilan provisoire établi le 18 aout faisait déjà mention de 38 morts.

À ceux-là s'ajoutent également, les accidents industriels, routiers, ferroviaires, aériens... Dans l'incendie du tunnel du Mont blanc en 1999 où un poids lourd s'était embrasé accidentellement, 39 personnes avaient péri et la température vers le milieu du souterrain avait été évaluée à 1300°C (Duffe & Marec, 1999).

Les suicides par immolation et les homicides (mise à mort par l'action du feu ou actes de dissimulation du corps) s'ajoutent encore au lourd bilan de perte évoqué précédemment.

Enfin, en dehors des grandes causes décrites ci-dessus, il existe également des cas plus anecdotiques. Plusieurs « *case-report* » font état d'erreur ou de mélanges de restes incinérés rendu à la mauvaise famille après des crémations commerciales ayant nécessité une enquête judiciaire avec recours à une expertise anthropologique (Kennedy, 1996; Murray & Rose, 1993).

Quelle que soit la cause du décès, un corps exposé à l'action du feu est soumis à un large éventail d'effets post-mortem qu'il convient d'être capable d'analyser afin de restituer le profil biologique de la victime et son identité.

De façon générale, la réquisition judiciaire va se construire autour de quatre questions.

- **Qui ?** La question de l'identité est la première question posée et aussi la plus importante dont pourra découler l'enquête.
- **Comment ?** Quel est le mécanisme lésionnel à l'origine du décès ? En d'autres termes : quelle est la cause de la mort ? Y-a-t-il eu l'intervention d'un tiers dans le mécanisme du décès ?
- **Quand ?** Quel est le délai post-mortem entre la découverte du corps et l'analyse ?

- **Où ?** Le corps a-t-il été déplacé, a-t-il été soumis à des modifications ? des tentatives de dissimulation ?

Les restes humains brûlés, au point de ne laisser que très peu ou plus de tissus mous vont nécessiter une attention particulière.

Pour de nombreux professionnels d'investigation (enquêteurs, médecins légistes) aborder une scène de découverte de restes humains carbonisés est difficile. Une prise en charge pluridisciplinaire est souvent nécessaire, incluant les experts incendies, les enquêteurs, les personnels d'identifications criminalistiques, les médecins légistes et les anthropologues. Il faudrait que les divers intervenants soient présents dès le temps de la levée de corps, afin que l'interprétation de la scène d'incendie reflète au mieux la réalité. Malheureusement, ceci reste théorique et rarement appliqué. Les scènes d'incendies, à fortiori si elles ne sont pas d'emblée qualifiées comme criminelles, sont très souvent négligés.

## B. Le constat d'un réel manque d'information et de formation

---

Aujourd'hui en France, de nombreux médecins légistes ne sont pas formés à la prise en charge de restes squelettisés. Il existe peu d'enseignements d'anthropologie biologique et/ou forensique et l'analyse des os brûlés n'est pas toujours abordée.

En effet lors du cursus médical, en dehors des cours d'ostéologie dispensés lors des premières années du premier cycle d'études médicales, les médecins sont rarement confrontés à l'os dans leur pratique courante (reconnaissance ou analyse).

Dans la spécialité de médecine légale, les enseignements concernant l'anthropologie sont souvent centre-dépendants. Dans les cours du DES (Diplôme d'Études Spécialisées), ils sont assez limités. Les internes doivent prendre l'initiative de s'inscrire dans un DU (Diplôme d'Université) ou DIU (Diplôme Inter Universitaire) supplémentaire ou de réaliser des stages particuliers, afin de recevoir une formation méthodologique plus complète.

Par ailleurs, les médecins légistes ou les anthropologues inscrits sur les listes d'experts sont encore trop rarement sollicités pour se déplacer sur les scènes de découvertes de restes squelettisés. Bien souvent, les restes humains sont directement transportés à l'institut médico-légal pour analyse. Ce sont donc des cartons ou des sacs d'os mélangés qui sont apportés par les enquêteurs. Sur place, les enquêteurs ramassent généralement en premier lieu les fragments qui leur semblent les plus pertinents (fragment les plus gros, os long, fragments de crâne) et parfois raclent les restes des débris afin de récupérer les fragments les plus petits. Pour des « non spécialistes », la valeur d'un fragment osseux est souvent considérée comme proportionnelle à sa taille. De ce fait, les petits fragments sont quasi systématiquement négligés. Ceci est à l'origine d'une perte d'informations majeures, pour de nombreuses raisons.

- Il existe un phénomène de fragmentation secondaire consécutif à la fragilité des os soumis à l'action du feu. La plupart des lieux d'incendies sont intensément arrosés et refroidis brutalement, ce qui ajoute une composante supplémentaire au phénomène de fragmentation. Si les petits fragments sont laissés sur place, la perte d'information est majeure.
- Il est quasiment impossible en utilisant ces techniques de réaliser une collecte exhaustive de l'ensemble des fragments. Ceci est particulièrement vrai dans les cas de carbonisation où la fragmentation est intense.
- Ce type de ramassage va générer d'importants déplacements des fragments les uns par rapport aux autres. Il rend impossible la mise en évidence des connexions anatomiques, pourtant importantes pour la compréhension des circonstances du décès, a fortiori dans un contexte criminel. Par ailleurs l'absence de relevé ou de couverture photographique suffisamment précise rend impossible l'analyse secondaire de ces liaisons anatomiques sur planches photographiques, même après retraitement de l'image. Il est extrêmement difficile sur les photographies de restes carbonisés de distinguer les restes humains des fragments structurels par exemple dans des incendies d'habitation (Fairgrieve, 2008).
- Une collecte peu soignée des fragments peut être à l'origine de la survenue de lésions *post-mortem* difficiles à interpréter. (Fairgrieve, 2008a; Quatrehomme et al., 2015; Symes et al., 2015).

## C. Objectifs de la thèse

---

L'objectif principal de ce travail de recherche doctoral est de démontrer qu'une analyse rigoureuse, de l'ensemble des éléments osseux et des éléments constitutifs de l'environnement immédiat du cadavre sont indispensables en contexte de carbonisation extrême.

Le fait que des restes humains archéologiques, datant de plusieurs centaines voire milliers d'années, puissent être examinés afin de déterminer le profil biologique des individus, et que leurs analyses permettent de reconstituer des données chronologiques et des gestes, suggèrent que les mêmes résultats puissent être obtenus dans des situations modernes avec des restes humains d'origine médico-légale (Fairgrieve, 2008b; Lange et al., 1987).

Nous souhaitons démontrer l'importance de se rendre sur place pour effectuer une levée de corps, afin de documenter rigoureusement la position des fragments, les collecter correctement, et les préserver. Tous ces éléments sont capitaux pour la reconstruction d'une scène criminelle, accidentelle ou suicidaire. Nous souhaitons donc mettre en place un protocole simple, applicable par tous, dès le terrain.

Il est capital de replacer l'os au centre de l'analyse. La carbonisation entraîne de fait des modifications importantes sur le squelette, mais n'est pas entièrement destructrice (Bass, 1984; Fairgrieve, 2008b; Mayne Correia, 1997; Quatrehomme et al., 2015; Symes et al., 2008). Nous

souhaitons montrer que de nombreuses informations peuvent découler de l'analyse des fragments d'os brûlés. De plus, il est essentiel de réussir à prouver que ce n'est pas la dimension d'un fragment qui est corrélée à sa valeur, mais bien sa pertinence en termes de détermination anatomique, et de critères d'identification.

Nous allons explorer la valeur du fragment d'os brûlé à travers trois dimensions d'analyses : anatomique, biologique et spatiale, afin de tenter d'établir s'il existe des différences quantitatives et qualitatives dans l'information portée par ces différentes régions anatomiques.

---

## *Matériels et Méthodes*

---

## A. Pourquoi choisir un échantillon archéologique ?

---

À partir de la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, les recherches concernant les os brûlés ont pris de plus en plus d'ampleur et ont pu se développer selon divers axes, en fonction du type de matériel utilisé. Les études réalisées étaient soit expérimentales, soit observationnelles. Dans la littérature, on retrouve des séries d'expérimentations à partir de restes humains ou animaux (DeHaan, 2012; DeHaan et al., 1999; DeHaan & Nurbakhsh, 2001; Krogman, 1949), des observations ethnologiques de bûchers actuels (Grevin, 2005), l'analyse de restes provenant de crématoriums (Depierre, 2013; Schultz et al., 2008; Warren & Maples, 1997), ou des séries d'observations consécutives à des affaires médico-légales (Alunni et al., 2014; Bass, 1984; Bennett & Benedix, 1999; Delattre, 2000; Eckert et al., 1988; Glassman & Crow, 1996; Herrmann & Bennett, 1999a; Owsley, 1993). D'autres chercheurs, quant à eux, se sont plutôt intéressés au matériel issu de crémations archéologiques (Baby, 1954; Binford, 1963; Duday et al., 1990, 2000; Duday, 2019a; Gatto, 2003; McKinley, 1994a; Stewart, 1979; Wells, 1960). C'est la voie que nous avons décidé d'emprunter dans le cadre de ce travail. Les raisons qui ont motivé notre choix sont multiples, mais les quatre principales sont les suivantes :

- l'accessibilité du matériel,
- la taille de l'échantillon disponible,
- l'homogénéité des données,
- l'affranchissement des difficultés éthiques et juridiques.

Nous détaillerons chacun de ces aspects dans la première partie de ce chapitre.

### 1. Accessibilité et taille de l'échantillon

---

Compte tenu du temps imparti à la réalisation d'un travail de recherche doctoral, il était nécessaire de pouvoir travailler sur un échantillon qui soit déjà constitué. En effet, la constitution d'un échantillon médico-légal d'effectif suffisant et présentant une variabilité satisfaisante, en termes d'âges et de sexes afin d'obtenir des résultats statistiquement fiables, aurait nécessité plusieurs années. Une alternative aurait pu être de réaliser une étude multicentrique de grande ampleur. Toutefois, même si les cas de carbonisations ne sont pas rares en médecine légale, leur survenue est évidemment totalement aléatoire. Des cas multiples peuvent survenir lors d'accidents de la circulation de grande ampleur, de catastrophes industrielles ou d'accidents domestiques collectifs (incendie d'un immeuble d'habitation par exemple), mais il peut exister également des périodes où aucun cas n'est recensé pendant plusieurs semaines et ce, indépendamment du centre où vont se dérouler les analyses.

Choisir un échantillon archéologique nous a permis d'accéder à un jeu de données concernant 263 structures ou assemblages ayant mis au jour des restes humains ayant subis un processus de crémation.

Nous avons pu bénéficier d'un accès au matériel analysé, mais également à l'ensemble des données recueillies lors des fouilles archéologiques et de l'étude anthropologique (notes et rapports de fouilles, notes de laboratoire, photographies, base de données).

## 2. Homogénéité des données

---

Le deuxième avantage de cet échantillon archéologique, réside dans une très grande homogénéité concernant les méthodes de recueil et d'analyse des données brutes accumulées. Ce critère d'homogénéité est indispensable pour obtenir des résultats fiables. En effet, un préalable indispensable à ce travail, était que l'ensemble des restes humains brûlés inclus dans notre étude aient pu être analysés de façon exhaustive, selon un protocole précis et reproductible.

Si nous avons travaillé sur un échantillon médico-légal dans le cadre d'une analyse rétrospective multicentrique, il aurait malheureusement été impossible d'obtenir de telles conditions.

À ce jour, il n'existe pas de réel consensus méthodologique dans l'analyse des carbonisations. Comme nous l'avons évoqué précédemment, de grandes disparités demeurent au sein de la formation des médecins légistes sur la façon d'aborder un corps squelettisé, à fortiori s'il est carbonisé.

De plus, les contraintes de temps imposées à la fois par la justice dans le cadre d'une enquête et la nécessité de restitutions des corps à la famille dans les plus brefs délais, ne permettent que très rarement d'obtenir le même degré de précision qu'une analyse archéologique, dans les observations réalisées sur l'ensemble des fragments osseux.

Ces disparités méthodologiques auraient pu être à l'origine d'importants biais dans notre analyse.

L'étude archéo-anthropologique de toutes les structures funéraires ou assemblages osseux que nous avons inclus dans notre analyse a été réalisée par Henri Duday ou sous sa direction. Il en résulte une très grande homogénéité méthodologique à la fois dans les techniques d'enregistrements des données sur le terrain, du mode de prélèvement des os, de leur conservation et enfin de leur analyse complète tant sur le plan de l'identification biologique des individus que de la restitution des données spatiales, afin de reconstituer au mieux les gestes ayant conduit à la constitution de cet assemblage osseux.

Pour chaque structure ou chaque assemblage, un travail considérable de détermination anatomique des fragments osseux a été réalisé.

Pour un maximum de fragments identifiés, les notes de fouilles ou d'analyses de laboratoire sur lesquelles nous avons travaillé, comportaient des informations précises sur les éléments discriminants ayant permis l'identification du fragment (reliefs osseux d'insertions musculaires, surfaces articulaires, sillons vasculaires, foramens particuliers...) ainsi que sa latéralisation chaque fois que cela s'est avéré possible. De plus toutes les caractéristiques anatomiques se rapportant à l'identification biologique de l'individu, étaient rigoureusement décrites (degré d'oblitération des segments de sutures crâniennes, stades de maturation osseux et dentaire, observation des caractères sexuels secondaires...).

Enfin, nous avons eu accès à l'ensemble des données relatives aux différents aspects de la crémation (couleur des fragments, déformation, fragmentation...) ainsi qu'à toutes les données pondérales, consignées dans un tableur Excel© relatif à chaque structure.

Par ailleurs, une recherche systématique des liaisons ostéologiques a pu être réalisée pour un grand nombre de structures. Ce travail nécessitait d'avoir à la fois des données anatomiques extrêmement précises et détaillées, une grande homogénéité de ces données et une vision d'ensemble du matériel examiné.

### 3. La problématique juridique et éthique

---

#### a) Statut juridique du corps humain dans le droit français

---

Le corps humain ne fait pas réellement l'objet d'une définition juridique. En France, si le statut du corps humain vivant et les droits et libertés qui en découlent sont plus ou moins clairs, il n'en est pas toujours de même concernant le corps en devenir (avant la naissance) et encore moins après la survenue du décès. Toutefois, les lois de bioéthique de 1994<sup>2</sup> ont tenté de clarifier cette situation. Elles consacrent le statut juridique du corps humain en dissociant pour mieux les protéger la personne et le corps. La personne est protégée par les articles 9 et suivants du code civil<sup>3</sup> (Henry et al., 2022)(droit au nom, à la vie privée, à la présomption d'innocence...) alors que le corps humain a son propre corpus de règles, introduit aux articles 16 et suivants<sup>4</sup> (respect de la dignité, de l'intégrité physique et non patrimonialité du corps ou de ses produits...). Il existe deux axes principaux à la loi du 29 juillet 1994 : l'inviolabilité et l'indisponibilité du corps humain tant pour la personne que pour les tiers.

- L'inviolabilité est l'interdiction de porter atteinte à l'intégrité corporelle d'une personne sans son consentement (article 16-1 alinéa 2). Elle ne peut être violée qu'en cas de nécessité thérapeutique (article 16-3).
- L'indisponibilité se traduit par la nullité des conventions à titre onéreux portant sur le corps (article 16-5 du code civil) et par le fait que le corps humain se trouve être en dehors du commerce (article 16-6 du code civil ; Henry et al., 2022) .

Par ailleurs, selon l'article L. 225-17 (alinéa 1<sup>er</sup>) du code pénal (Mayaud & Gayet, 2022) : « *Toute atteinte à l'intégrité du cadavre, par quelque moyen que ce soit, est punie d'un an d'emprisonnement et de 15 000 euros d'amende.* »

Le « *respect dû au corps humain* », et donc à l'intégrité corporelle, « *ne cesse pas avec la mort* ». Ce que rappelle l'article R. 4127-2 (alinéa 2) du Code de la santé publique (Markus et al, 2023),

---

<sup>2</sup> Loi n°94-653 du 29 juillet 1994 relative au respect du corps humain ; Loi n°94-654 du 29 juillet 1994 relative au don et à l'utilisation des éléments et produits du corps humain, à l'assistance médicale à la procréation et au diagnostic prénatal ; Loi n°2004-800 du 6 août 2004 relative à la bioéthique.

<sup>3</sup> C. civ., articles 9 et 9-1

<sup>4</sup> C. civ., articles 16-1 à 16-9

l'article 2 *in fine* du Code de déontologie médicale<sup>5</sup> (interne à la profession ; code de déontologie médicale, 2021), et l'article 16-1-1 du Code civil (notamment depuis sa nouvelle rédaction issue de la loi funéraire N° 2008-1350 du 19 décembre 2008). Selon cet article : « *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* (Henry et al., 2022) .

## b) *Les recherches sur le corps humain*

---

### (1) **Le cas des prélèvements**

Les cadavres peuvent faire l'objet de prélèvements d'organes ou de tissus d'origine biologiques dans trois cas particuliers :

- Le prélèvement à des fins thérapeutiques (greffes d'organes ou de tissus).
- Le prélèvement à des fins scientifiques ou de recherche.
- Le prélèvement médico-légal, afin de rechercher les causes de la mort : il est toujours prioritaire sur tout acte ou toute autre décision.

Dans le droit français, chaque personne peut disposer librement de son corps justifiant l'absolue nécessité de l'obtention du consentement de la personne de son vivant avant tout usage de son corps (don de tissu ou d'organe) ou de son cadavre (don du corps à la science). D'une manière générale, les droits de la personne sont aujourd'hui, en principe, jugés supérieurs aux intérêts généraux de la communauté, et en premier lieu à ceux de la recherche médicale.

Dans la réalisation d'un prélèvement à but purement scientifique, trois conditions majeures prévues par la loi doivent donc être remplies :

- Le prélèvement ne peut être effectué sans le **consentement de la personne décédée** : ce consentement, selon le cas, pouvant être présumé ou devant être explicite ;
- Il ne peut être effectué qu'après **l'établissement par un médecin d'un procès-verbal de constat de la mort spécifique**<sup>6</sup> (Markus et al, 2023). Les conditions de constatation de ce décès sont décrites par un décret en Conseil d'État<sup>7</sup> qui précise les personnes ayant les compétences pour constater la mort, la procédure du constat et les formes à respecter pour celui-ci). Ce document est entièrement indépendant du certificat de décès exigé par l'état civil.
- Les médecins ayant procédé à un prélèvement sur une personne décédée sont tenus de s'assurer de la **restauration décente de son corps**<sup>8</sup> dans le souci d'épargner à la famille une douleur supplémentaire justifiant cette obligation (Markus et al, 2023). Cette restauration peut être effectuée, pour tout ou partie du corps, par les agents de la chambre mortuaire.

---

<sup>5</sup> Figurant dans le code de santé publique sous les numéros R.4127-1 à R.4127-112.

<sup>6</sup> Code de santé publique, art. L. 1232-1

<sup>7</sup> Décret N° 96-1041 du 2 déc. 1996

<sup>8</sup> Code de santé publique article L.1232-5

Le Code de la santé publique prévoit également que pour cette catégorie de prélèvements, une information claire soit présentée à la famille<sup>9</sup>. Mais il est bien entendu qu'il s'agit d'une information et non d'une autorisation. En pratique, il n'est pas précisé si cette information doit être effectuée avant ou après le prélèvement. Elle n'indique pas non plus qui doit procéder à cette information. Cependant, la loi prévoit également le recueil préalable du témoignage de la famille et semble indiquer que le prélèvement ne puisse être réalisé sans que le médecin ait prévenu la famille. Il est donc généralement admis que cette information doit avoir lieu au préalable à tout prélèvement et simultanément au recueil du témoignage de la famille, lorsque celui-ci est possible ; Le médecin qui se chargeait plus particulièrement du malade dans le service où il était hospitalisé (ou qui était en lien direct avec le malade ou sa famille) devrait procéder à cette information. À défaut, il devrait s'assurer de la bonne réalisation de cette information par un confrère ou un membre de l'équipe soignante.

Si un prélèvement est effectué dans un but scientifique, autre que celui de rechercher les causes de la mort (prélèvements au titre de recherche de toute nature), le consentement recherché doit être explicite. Le prélèvement ne pourra être réalisé sans consentement exprimé soit directement par le défunt, soit par le témoignage de sa famille (cas d'un majeur non protégé) ou directement par un des titulaires de l'autorité parentale (cas du mineur). La loi ne prévoit pas la possibilité de procéder à de tels prélèvements sur une personne majeure protégée. Ceux-ci ne sont donc pas licites (Markus et al, 2023).

**Dans tous les cas, aucun prélèvement d'organe et/ou tissus ne peut être opéré sur une personne décédée âgée de plus de treize ans sans interrogation obligatoire et préalable du Registre National des Refus<sup>10</sup>**

## (2) Le cas du don du corps à la science.

Le don du corps à la science a longtemps fait l'objet d'un vide juridique. Il est aujourd'hui encadré par la loi 2021-1017 du 2 août 2021 relative à la bioéthique<sup>11</sup> qui précise que « *une personne majeure peut consentir à donner son corps après son décès à des fins d'enseignement médical et de recherche. Le consentement du donneur est exprimé par écrit. Le présent alinéa ne s'applique pas aux personnes majeures faisant l'objet de mesure de protection juridique avec représentation relative à la personne. Ce don ne peut être effectué qu'au bénéfice d'un établissement de santé, de formation ou de recherche titulaire d'une autorisation délivrée par les ministres de tutelle de cet établissement. Les conditions d'ouverture, d'organisation et de fonctionnement de ces structures sont définies en Conseil d'État.* » Ce décret précise les conditions de prise en charge financières des transports de corps et les conditions de restitution des corps ayant fait l'objet d'un tel don en prenant en compte la volonté du donneur ainsi qu'en informant et en associant

<sup>9</sup> code de santé publique, art. L. 1232-3.

<sup>10</sup> décret n°97-704 du 30 mai 1997 dans le Code de Santé Publique (code de santé publique, 2023)

<sup>11</sup> article L. 1261-1 dans le Code de Santé Publique (code de santé publique, 2023)

sa famille aux décisions. Les établissements de santé et de formation s'engagent à apporter respect et dignité aux corps qui leur sont confiés (Rougé-Maillart, 2023) .

### (3) Les corps en médecine légale

Dans le cadre de cette recherche, l'accès aux corps issus d'affaires médico-légales, dans un objectif purement de recherche scientifique, aurait permis idéalement l'obtention d'un échantillon plus « *authentique* ». Cependant, les prélèvements dans le cadre de procédures judiciaires sont très règlementés et la législation concerne avant tout des prélèvements à des fins thérapeutiques.

Par exemple, en cas de mort accidentelle ou suspecte, le coordonnateur du prélèvement doit contacter l'officier de police judiciaire ou prévenir le magistrat de permanence afin de l'informer de toutes les opérations de prélèvements envisagées et de l'obtention des autorisations requises. Le magistrat après concertation avec le service d'enquêtes et les médecins légistes donne son accord ou fait part de son refus. Sans être nécessairement écrite, la décision doit être expresse et, le cas échéant, préciser les organes dont le prélèvement est autorisé. Les prélèvements effectués sont strictement limités à ceux autorisés par l'autorité judiciaire.

De plus, aucun prélèvement ne peut être réalisé si le donneur n'est pas identifié.

Concernant les informations issues des autopsies ou des expertises anthropologiques réalisées sur réquisitions judiciaires, elles sont consignées dans un rapport à destination de l'autorité requérante (magistrat, officier de police judiciaire).

Si nous avons fait le choix de travailler sur un échantillon médico-légal, nous aurions dû nous assurer en amont de l'analyse que l'ensemble des critères suivants soit respecté :

- individu déjà identifié ;
- obtention de l'autorisation de prélèvements par l'autorité requérante (magistrat en charge du dossier) ;
- interrogation du registre national de refus des dons d'organes ;
- autorisation de la famille ;
- obtention de l'autorisation d'accès aux données issues de l'autopsie et/ou de l'expertise anthropologique par le magistrat en charge du dossier.

Choisir de réaliser une analyse sur un échantillon médico-légal, même dans le cadre d'une étude rétrospective aurait été très complexe à la fois d'un point de vue éthique mais aussi juridique.

Même si cela aurait été techniquement réalisable, un tel échantillon aurait nécessité un temps considérable pour le constituer et obtenir les autorisations au cas par cas, de surcroît pour une analyse multicentrique.

Nous avons donc préféré travailler sur un matériel d'origine archéologique ce qui nous permettait de nous affranchir de tous ces obstacles et réaliser une étude avec un échantillon suffisamment grand pour générer des résultats fiables.

Nous allons présenter, dans un premier temps les quatre sites dont sont issus les restes humains inclus dans cette étude et dans un second temps nous exposerons en détail le protocole suivi au cours de cette analyse.

## B. Présentation des sites archéologiques

---

Notre avons travaillé sur un ensemble des données brutes issues de l'analyse anthropologique de trois nécropoles d'époque romaine en Italie, dont la pratique funéraire était la crémation : la nécropole de Porta Nocera à Pompéi, la nécropole de Porta Mediana à Cumes et la nécropole de Santa Rosa au Vatican. Afin d'accroître notre échantillon de sujets immatures et particulièrement des sujets de la classe des périnataux, nous avons également intégré des données provenant d'une partie des fouilles du Tophet de Salammbô à Carthage en Tunisie. Dans un cadre strictement médico-légal, la classe des périnataux est une classe de population qui revêt une grande importance. La découverte de restes d'enfants en bas âge et brûlés, devrait toujours faire rechercher un contexte d'infanticide avec tentative de dissimulation de preuves. De plus, compte tenu des difficultés d'analyses des restes humains d'individus immatures et plus particulièrement des très jeunes enfants, il semblait approprié dans une étude à visée méthodologique d'intégrer ce type de population dans notre échantillon.

### 1. La nécropole de Porta Nocera à Pompéi

---

#### a) *Présentation générale du site*

---

La nécropole de Porta Nocera, à Pompéi fut mise au jour dans les années 50, lors de fouilles extensives menées par Amadéo Maiuri, Surintendant de Pompéi (figure 30). Ces premiers travaux avaient permis de dégager les monuments funéraires des couches de cendres et de pierres ponces qui s'étaient accumulées lors de l'éruption du Vésuve de 79 après J.-C., laissant intacte une grande partie des niveaux d'implantation et d'occupation des aires funéraires. Ces dernières étaient constituées de tombeaux ou d'enclos monumentaux d'architectures variées à l'intérieur desquels étaient disposées les tombes à incinération des défunts.

La nécropole de Porta Nocera est située au sud-est de la ville antique de Pompéi, le long de la route menant à la cité voisine de Nocera. L'occupation de cette nécropole est datée de 80 avant J.-C. à 79 après J.-C. À l'époque romaine, la tombe était un lieu de représentation sociale destinée à cultiver le souvenir d'un défunt et de son rang dans la société locale d'où la disposition des tombes des nécropoles suburbaines le long des routes (Tranoy et al., 2009; Van Andringa et al., 2013).

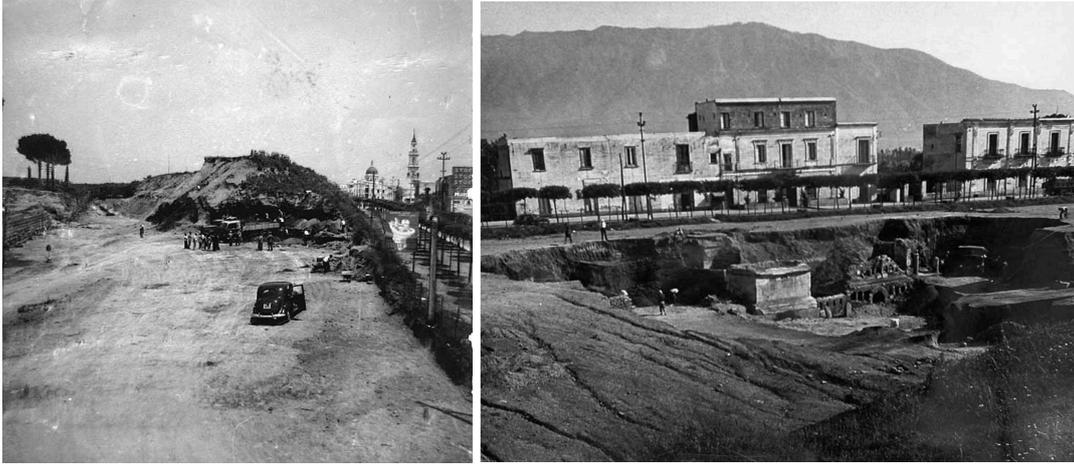


Figure 30 : photographie de droite, enlèvement des déblais de la fouille de Porta Nocera (1951 ou 1952) ; photographie de gauche, dégagement du secteur OS de la nécropole de Porta Nocera (1954). Extrait de Van Andringa et al. (2013).

À Pompéi, comme dans le reste du monde romain à cette époque, le mode de traitement du cadavre était majoritairement l'incinération. Dans la nécropole de Porta Nocera, les inhumations existent, mais elles sont rares et concernent majoritairement les très jeunes enfants.

Concernant les crémations, elles sont le plus souvent retrouvées dans des urnes qui contiennent un unique individu. Dans certains cas, plusieurs individus ont pu y être placés successivement. C'est le cas par exemple de la tombe 21, qui contenait les restes de trois sujets : un enfant de la classe 0-1 ans et deux adolescents de la classe 15-19 ans.

La plupart du temps, les nécropoles de ce type étaient utilisées sur de longues durées et le terrain des concessions pouvait être perturbé par l'aménagement successif de plusieurs tombes en un même lieu. À Pompéi, contrairement à beaucoup de sites, ces perturbations sont très limitées car la nécropole n'a eu qu'une faible durée d'utilisation estimée à environ 2 ou 3 générations (Van Andringa et al., 2013). C'est entre autres cette caractéristique qui la rend particulièrement intéressante pour notre étude.

Entre 2003 et 2007, un premier programme de recherche concernant un quartier de la nécropole de Porta Nocera (enclos 21, 23, 25 et 25aOS, dont le plan est présenté figure 31) a donné lieu à une réflexion sur les pratiques et la gestion de l'espace funéraire à l'époque romaine.

Les résultats de cette étude ont été publiés dans un ouvrage de synthèse (Van Andringa et al., 2013) et ont conduit à un nouveau projet interdisciplinaire.

À partir de 2014, deux nouvelles zones de fouilles ont été ouvertes : les zones A et B (figure 32). La zone A, nécropole ouest, est située près des portes de la ville, autour de l'enclos funéraire 26a (figure 33). La zone B, nécropole est, se trouve le long de la route de Nocera (figure 34).

L'ouverture de la zone B le long de la route de Nocera, était motivée par la volonté de comparer deux situations funéraires : la première proche des portes de la ville associée aux tombeaux de l'aristocratie locale, l'autre plus éloignée de l'espace urbain en relation avec une route fréquentée (Van Andringa et al., 2016).

Les objectifs de ces nouvelles études étaient de mieux comprendre l'évolution et la gestion d'une nécropole à l'époque romaine, ainsi que l'organisation de la société urbaine.

Pour répondre à ces objectifs, une méthodologie de fouille fine et très précise des structures (sépultures, aires de crémation, niveaux de circulation) a été mise en place. La totalité du remplissage des tombes et des aires de crémation ainsi qu'une partie des niveaux d'occupation et de remblais ont ainsi été passés à l'eau sur des tamis de 1,5 mm et 0,5 mm permettant une récolte de l'ensemble du matériel, en particulier les tout petits fragments d'os qui auraient pu passer au travers de la fouille. Cette méthode de fouille « exhaustive » a permis la documentation non seulement du matériel retrouvé dans les tombes, mais aussi des remplissages des tombes et des remblais d'occupation.

Les données ainsi générées ont conduit à une perception très précise des gestes de la crémation et une meilleure connaissance biologique des populations étudiées.

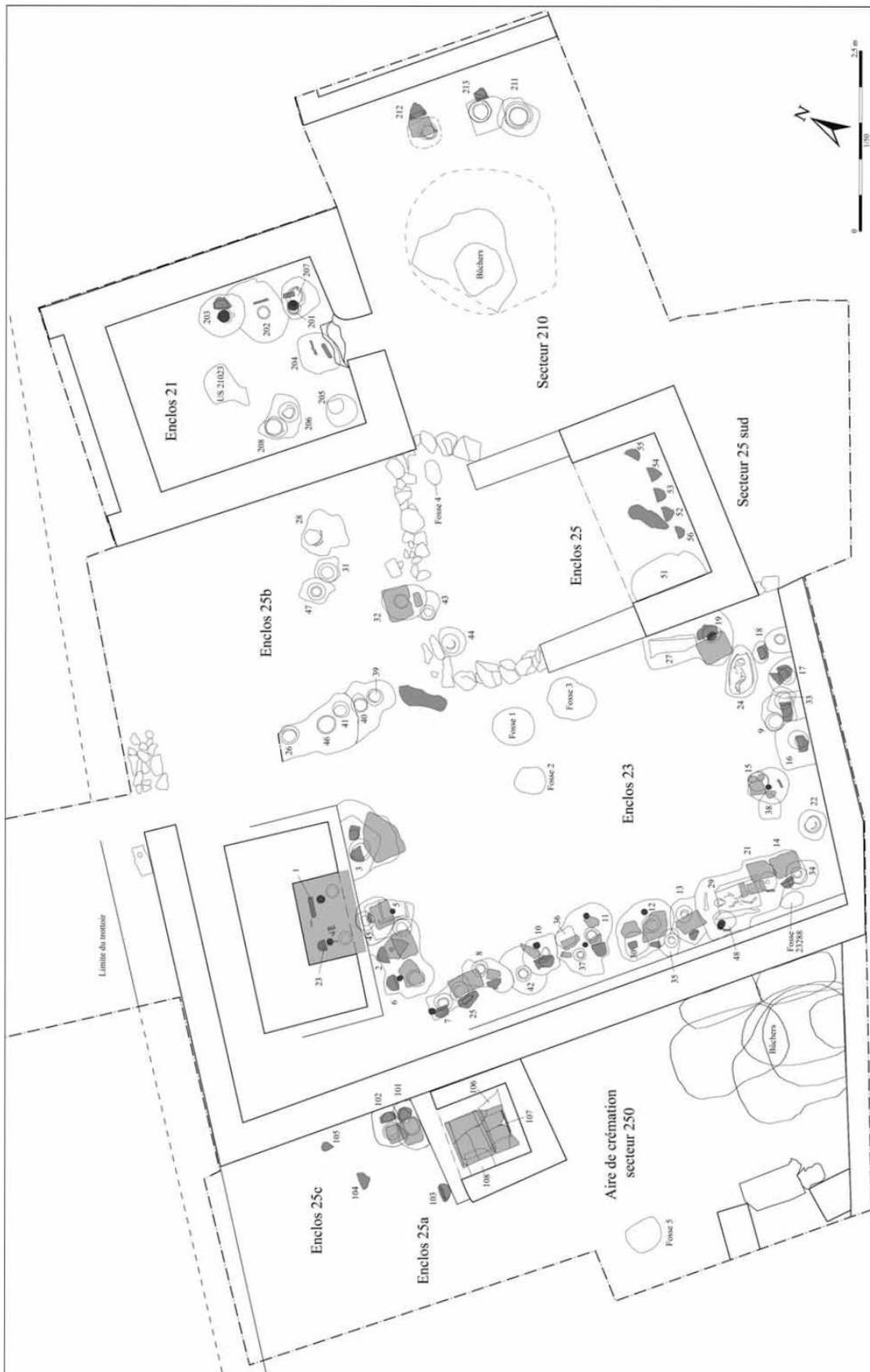


Figure 31 : plan général du quartier de la nécropole de Porta Nocera fouillé entre 2003 et 2007 (enclos 21, 23, 25 et 25 a/c), extrait de Van Andringa et al. (2013).

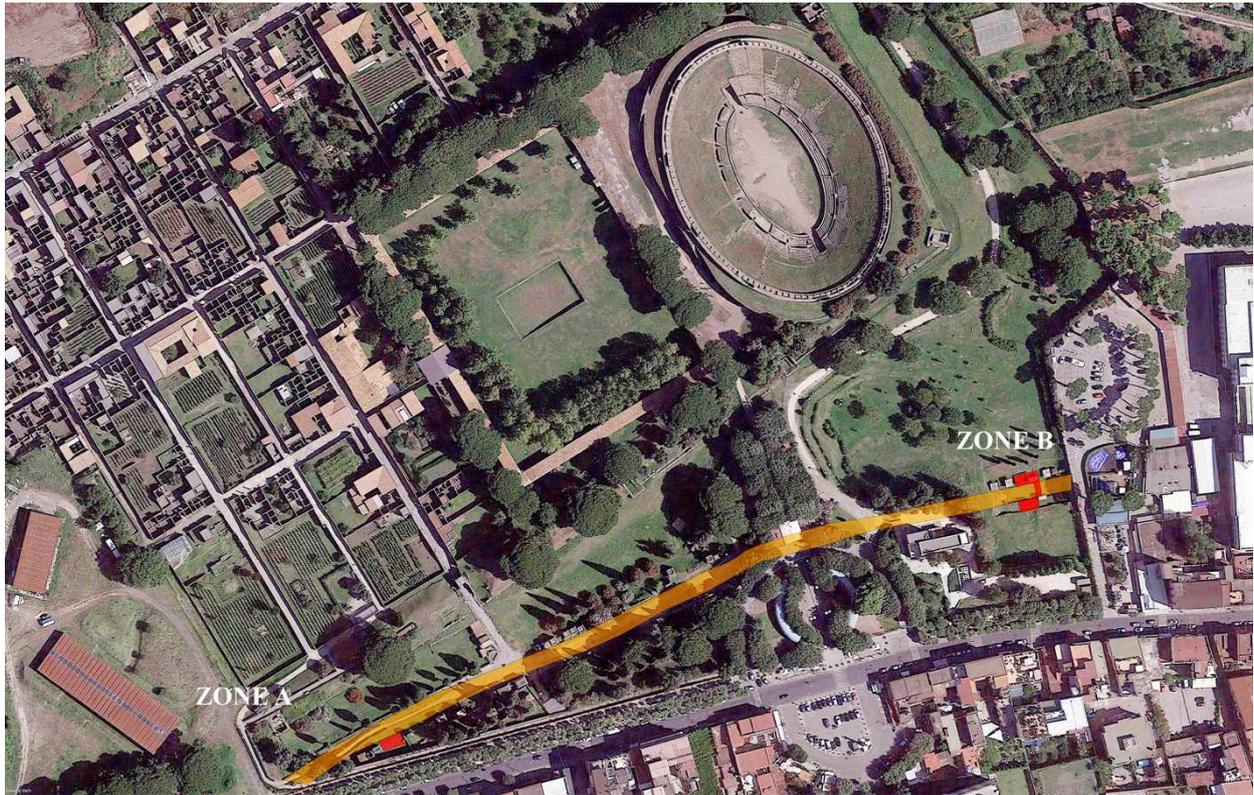


Figure 32 : vue générale de la nécropole de Porta Nocera, extrait de Van Andringa et al. (2016).



Figure 33 : vue générale de la fouille de la zone A au cours de la campagne 2015. Extrait de Van Andringa et al. (2016).



Figure 34 : photogrammétrie du chantier de la zone B en 2019 montrant les aires fouillées. Document J. Laiho, extrait de Van Andringa & Duday (2020).

### *b) Description de l'échantillon*

---

L'échantillon sur lequel nous avons travaillé à Pompéi concerne à la fois les ossements et les données de l'étude anthropologique résultants des différents programmes de recherche cités précédemment entre 2003 et 2021.

Une partie des données de l'étude anthropologique a déjà été publiée en 2013 alors que certains résultats concernant le second programme de recherche sont encore à ce jour inédits.

Nous avons travaillé en grande partie sur les données brutes, issues de l'analyse anthropologique (archives personnelles d'Henri Duday : notes de terrain et d'analyses de laboratoire) ainsi que sur les données pondérales relatives à chacune des structures étudiées (tableurs H. Duday). Un exemple de ces données est présenté dans les annexes 1 et 2, elles concernent des données relatives à la sépulture 5 de l'enclos 1F.

Par ailleurs, nous avons également participé à trois missions sur le terrain en septembre 2018, septembre 2019 et septembre 2021. Elles nous ont permis de nous former à l'analyse des os brûlés et de réaliser des observations directement sur le matériel archéologique. C'est également au cours de ces diverses missions que nous avons pu évaluer la comparabilité de notre échantillon avec les restes issus d'affaires médico-légales.

Dans le cadre de cette étude nous avons pris en compte 94 **structures funéraires ou assemblages** ayant livré des restes humains brûlés :

- les tombes de l'enclos 25 : tombes 43 et 44 ;
- les tombes de l'enclos 25 b : tombes 28, 31 (et 31 ext), 47, 32, 46, 41, 40, 39 et 26 ;
- les tombes de l'enclos 23 : tombes 42, 35, 34, 33, 8, 19, 9, 16, 18, 17, 7 et 25, 10, 11 et 37, 12 et 30, 1 et 3, 45, 6, 2, 5, 13, 21 (a, b et c), 15 (A et B) et 22 ;
- les fosses de l'enclos 23/25 : fosses F1, F2 et F3 ;
- l'enclos 21 OS : les tombes 201 à 208 ;
- le secteur 210 : trois tombes (211, 212, 213) et une aire de crémation ;
- les tombes de l'enclos 25 a : 101, 106, 107 et 108 ;
- l'aire de crémation du secteur 250 ;
- la Fosse F5 ;
- la Fosse F19 ;
- l'enclos 1E : sépulture 1E-4 ;
- l'enclos 1 F : sépultures 1F-1, 1F-3 (US 3126 et US 3128), 1F-3 bis, 1F-4, 1F-5, 1F-6, 1F-7, 1F-9, 1F-11, 1F-13, structures 14, 1F-16, 1F-17, 1F-19 ; aire de crémation AC 615 ; AC 603.
- l'enclos 3E : sépultures 3E-3, 3E-4 (urne et fond de fosse), 3E-5, 3E-6, 3E-7, 3E-8, US 5141, 3E-10, 3E-11, 3E-13, 3E-14, 3E-17 ;
- l'enclos 1D : sépulture 1D-1 ;
- l'enclos 3D : sépulture 3D-3 ;
- l'enclos 1G : sépulture 1G-2 et US 8519 ;
- Dans la zone A : les tombes 303, 304, 307, 309 (US 1523 et US 1524), 310, 311 (US 1417, US 1410, comblement), 312, 313.

Les tombes suivantes ont été exclues de l'analyse :

- tombe 48 : tombe à inhumation correspondant au dépôt d'un enfant de 7 à 10 mois ;
- tombe 38 : tombe à inhumation correspondant au dépôt d'un enfant de 1 an et demi à 2 ans ;
- tombe 27 : tombe à inhumation correspondant au dépôt d'un enfant de 1 an ;
- tombe 23 : tombe individuelle non utilisée qui n'a jamais reçu de restes humains ;
- tombe 24 : tombe à inhumation correspondant au dépôt d'un enfant de 6 mois ;
- tombe 29 : tombe à inhumation correspondant au dépôt d'un enfant de 11 à 15 mois ;
- tombe 14 : tombe individuelle non utilisée qui n'a jamais reçu de restes humains ;
- tombes 104 et 105 : structures non fouillées ;
- tombe 102 : sépulture d'attente de la tombe 107 qui n'a pas fourni de restes humains ;
- tombe 103 : sépulture programmée mais jamais utilisée.

**Un total de 129073 fragments d'os (hors esquilles) a été pris en compte pour le site de Porta Nocera.**

## 2. La nécropole de Porta Mediana à Cumes

### a) Présentation générale

La nécropole de Porta Mediana à Cumes en Italie, est située à une vingtaine de kilomètres à l'Ouest de la ville de Naples en Campanie, sur la côte de la mer Tyrrhénienne, au bord du golfe de Gaète, en face de l'île d'Ischia (figure 35).



Figure 35 : localisation de la ville de Cumes, carte de la Campanie antique. Source CNRS, Centre Jean-Bérard.

La cité de Cumes (ou Cuma) est considérée par les historiens comme la plus ancienne colonie grecque d'Occident. Elle aurait été fondée en 740 avant J.-C. par des colons de l'île d'Eubée qui étaient déjà présents sur l'île d'Ischia, puis aurait été abandonnée vers 1200 après J.-C.

Géographiquement, le site est bâti sur une plaine côtière bordée par le Monte Grillo, dominé par une cheminée volcanique culminant à 80 mètres d'altitude ainsi que par un cordon littoral formé par les alluvions du fleuve Volturne dont l'embouchure est située au nord de Cumes.

Dès le 17<sup>ème</sup> siècle, la cité de Cumes a fait l'objet de nombreux programmes de fouilles archéologiques discontinues. En 1990, le surintendant de Naples a décidé de relancer des travaux sur le site afin d'en déterminer l'extension et le valoriser dans le but de créer un grand parc ouvert au public.

L'étude de la nécropole de Cumes (figure 36) qui s'étend à l'extérieur des fortifications septentrionales, a été entreprise en 2001 par Le Centre Jean Bérard.



Figure 36 : site de Cumes, la nécropole de la Porte médiane se trouve au premier plan. E. Botte, CNRS, CCJ / [© CC BY-NC-ND](#).

Les fouilles anciennes avaient démontré que dès la fondation de la colonie, la nécropole s'étendait en direction du nord sur une longueur de plusieurs kilomètres, entre le lac de Licola et la colline du Monte Grillo.

Disséminée le long des deux voies partant de la Porte Médiane, la nécropole est constituée de monuments témoignant de pratiques funéraires et d'occupations diverses : tombes à chambre semi hypogée pour des inhumations multiples, tombes à stèles ou à fosses avec cippes en tufs destinées à accueillir les restes de crémations (Centre Jean Bérard, 2021).

La plus ancienne sépulture fouillée dans ce programme est une tombe Samnite datée du IV<sup>ème</sup> siècle ou du début du III<sup>ème</sup> siècle avant J.C. totalement pillée à l'époque moderne. D'autres tombes analogues ont été repérées dans le même secteur. Puis leur succédant au II<sup>ème</sup> siècle avant JC, des tombes individuelles, cippes parallélépipédiques comportant une cavité à la base pour déposer les os incinérés du défunt. À partir du I<sup>er</sup> siècle avant JC, les cippes connaissent une évolution : les ossements n'étaient plus placés dans la pierre elle-même mais dans une urne en céramique enterrée sous le cippe, devant lui ou dans une niche creusée dans la pierre. Souvent un autre bloc recouvrait l'urne et le cippe pouvait porter le nom du défunt et sa filiation. Ce mode de sépulture laissa la place vers le milieu du I<sup>er</sup> siècle à des tombeaux monumentaux ainsi qu'à de petits monuments destinés à des dépendants et des affranchis des grandes familles. Au II<sup>ème</sup> siècle, de nouveaux édifices d'un modèle différent de ceux du I<sup>er</sup> siècle vinrent s'ajouter aux tombeaux existants, le plus souvent en prenant la place de tombeaux antérieurs rasés ou ennoyés. Ces monuments en forme de petits temples, abritaient des tombes à inhumation dans

des coffres maçonnés. La construction des monuments funéraires s'essouffle dans le 2<sup>ème</sup> quart du III<sup>ème</sup> siècle. À partir de cette période les tombes à inhumation deviennent modestes. Dès le IV<sup>ème</sup> siècle le mobilier dans les tombes devient rare et par conséquent les datations incertaines, hormis au IV<sup>ème</sup> et V<sup>ème</sup> siècle pour les individus immatures et quelques adultes qui sont inhumés dans des amphores lusitaniennes ou africaines. La position stratigraphique des tombes les plus récentes montre que des inhumations le long de la voie Domitienne se sont poursuivies au moins jusqu'au VI<sup>ème</sup> siècle, soit jusqu'au siège et la prise de la ville en 553 lors de la guerre Greco gothique (Munzi & Brun, 2011).

Lors des fouilles effectuées entre 2001 et 2014, environ 24 monuments et plus de 200 tombes individuelles ont été mises au jour. Un plan de la nécropole est présenté figure 37.

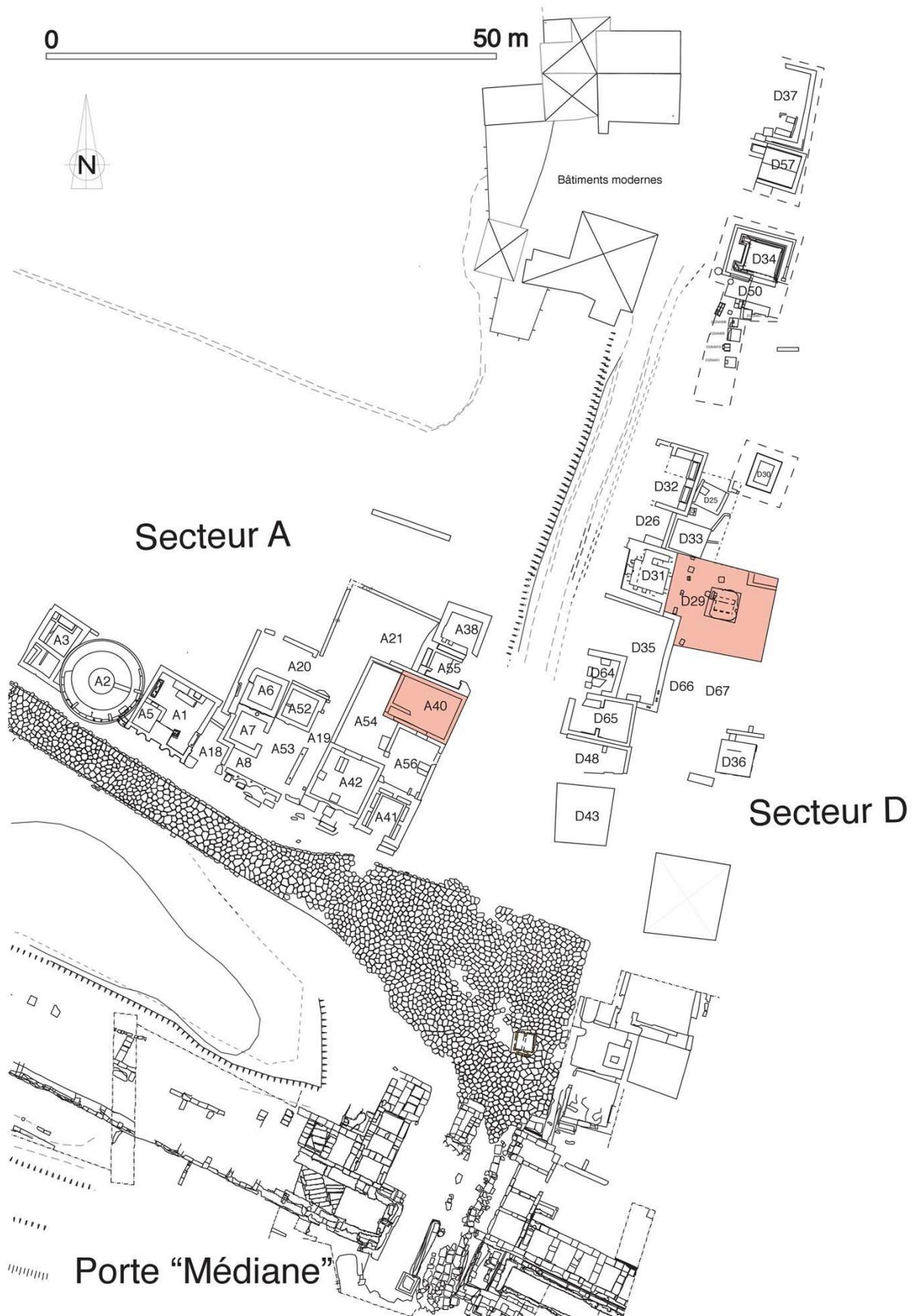


Figure 37 : plan des secteurs A et D de la nécropole de Porta Mediana. En rose, deux secteurs fouillés lors de l'opération de 2011. Extrait de Brun et al. (2012).

## b) Description de l'échantillon

---

Dans le cadre de cette étude, nous avons pris en compte 60 structures funéraires impliquant des os brûlés :

- Cumes 2010 zone 29 : Sp 29008, Sp 29014, Sp 29050, Sp 29060 ;
- Cumes 3 : Sp 34174, Sp 35203, Sp 35258, Sp 35291 ;
- Cumes 3b
  - o Sp 35300, Sp 35306, Sp 35309, Sp 35335, Sp 35362, Sp 35380, Sp 35385, Sp 35394, Sp 35408, Sp 35427, Sp 35451, Sp 35458, Sp 35487 ;
  - o Sp 37043, Sp 37044, Sp 37045 ;
  - o Sp 39052, Sp 39091, Sp 39207, Sp 39211, Sp 39304, Sp 39305, Sp 39306, Sp 39325, Sp 39350, Sp 39307, Sp 39388, Sp 39389, Sp 39390, Sp 39391, Sp 39396 ;
  - o Urne 48013 ;
  - o Sp 57034 ;
  - o Sp 63117, Sp 63118, Sp 64024, Sp 66042, Sp 66060, Sp 66096, Sp 66101 ;
- Cumes 2013, EFN 34008 : Sp 34236, Sp 34241, Sp 34253, Sp 34276, Sp 34279, Sp 34283 ;
- Cumes 2013, EFN 34009 : Sp 34242 ;
- Cumes 2013 EFN 34010 : Sp 34218, Sp 34219, Sp 34220, Sp 34221, Sp 34226.

**Les données relatives à 30401 fragments d'os brûlés, hors esquilles, ont été incluses concernant la nécropole de Porta Mediana.**

## 3. La nécropole de Santa Rosa au Vatican

---

### a) Présentation générale du site

---

La nécropole de Santa Rosa fait partie du vaste complexe funéraire des nécropoles du Vatican qui s'étendait sous la *Via Triumphalis*. Les nécropoles de Rome n'ayant pas été conservées, celles préservées du Vatican sont considérées de la plus haute importance pour les historiens.

La nécropole de Santa Rosa fut utilisée entre la fin du I<sup>er</sup> siècle avant J.-C. et le IV<sup>ème</sup> siècle après J.-C. Elle présente une grande variété de sépultures : incinérations, inhumations, simples urnes funéraires, tombeaux richement décorés... Chronologiquement, elle peut être découpée en deux phases importantes.

- La première phase est caractérisée presque exclusivement par le rite de la crémation. Elle aurait débuté à la fin du I<sup>er</sup> siècle de notre ère (même si une phase antérieure ne peut être exclue), et se serait achevée avec un grand glissement de terrain vers 130-140

après J.-C. Cette catastrophe est notamment à l'origine de la protection et de la conservation exceptionnelle du site.

- La seconde phase d'occupation, principalement concernée par des inhumations aurait débuté peu après l'effondrement et se serait achevée au début du IV<sup>ème</sup> siècle après J.-C., probablement avec la construction de la basilique sur la tombe de St Pierre vers 320 après J.C.

La nécropole de Santa Rosa fut mise au jour en 2003, à la suite de l'aménagement d'un parking souterrain sur une surface d'environ 500 m<sup>2</sup>. Les recherches d'archéologie préventive alors engagées ont mis en évidence plus d'une quarantaine de structures funéraires collectives de différentes dimensions et environ 250 tombes individuelles, dont plus de 230 sont des crémations. Le plan de la nécropole est présenté figure 38. En 2012, après une première mission d'évaluation, une convention quadripartite a été signée entre la Direction des *Musei Vaticani*, l'École française de Rome, l'Université de Bordeaux (UMR 5199) et la *Soprintendenza speciale per i Beni archeologici di Roma* afin de réaliser une étude anthropologique des sépultures à crémation. En effet, les mausolées avaient été dégagés lors des travaux de fouilles, mais le contenu des urnes cinéraires prises dans la maçonnerie avait été laissé en place. Ils ont donc pu être prélevés et analysés selon un protocole strict, identique à celui de Porta Nocera à Pompéi et Porta Mediana à Cumae établi par Duday et al. (2000) repris dans Van Andringa et al. (2013).

### b) *Présentation de l'échantillon*

---

Les 47 structures funéraires que nous avons pris en compte dans le cadre de cette thèse sont les suivantes :

- Mausolée XX : urne 1, urne 2, urne 3, urne 4, urne 5, urne 6, urne 7, tombe 8, SI (R0 à R50), TL, US 73
- Mausolée XXV : urne 1, urne 2, urne 3, urne 4, SI chambre inférieure
- Mausolée XXXV : urne 1, urne 2, urne 3, urne 4, TL
- Urne en marbre 52165
- Mausolée XXXI : urne 1, urne 2, urne 3, urne 4, urne 5
- Mausolée XXXIV : urne 1, urne 2, urne 3, urne 4 et 4 bis, US 111 (urne B, C), Riempimento
- Sepolcro III : urne 22 (niche 12, paroi du fond), urne 52403, Nichia N°5, Nichia N°20, Parete Sx (Nicchia sup et med), Nicchia contigua parete di fondo, urne 2, III – A, III – B, OLLE IN US100, urne 7a (parete dextra, nicchia centrale in basso), urna fittile grande (urna 1).

**Les données relatives à un total de 80073 fragments d'os brûlés, hors esquilles, ont été incluses concernant la nécropole de Santa Rosa.**

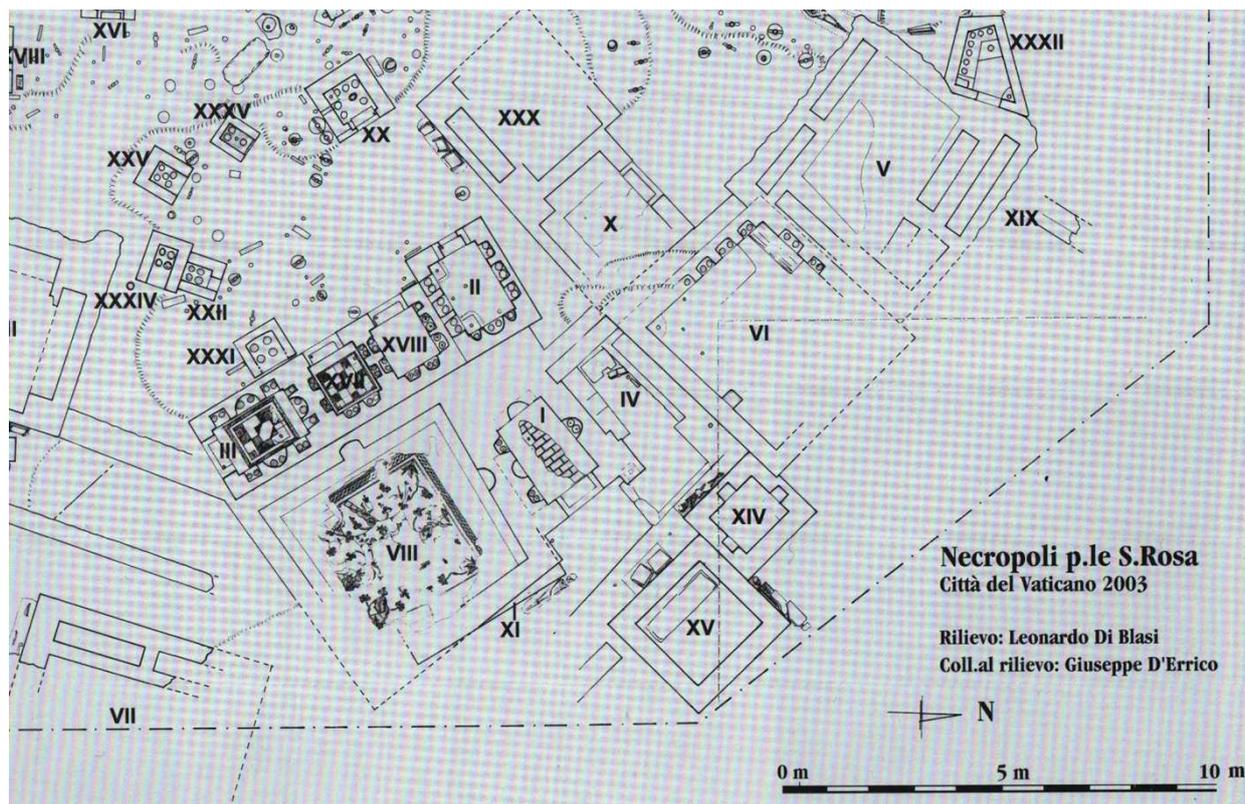


Figure 38 : plan général de la nécropole de Santa Rosa. D'après Duday et al. (2015)

#### 4. Le Tophet de Salammbô à Carthage

##### a) Présentation générale du site

« Tophet » est un terme hébreu utilisé pour désigner des sanctuaires d'enfants, très répandus en Méditerranée centrale (Carthage, Sulci, Motya, Tharros, Nora, Monte...) à partir du VIII<sup>ème</sup> siècle avant J.-C. (Melchiorri, 2012).

Le tophet de Salammbô à Carthage (figure 39), où sont honorés les divinités phéniciennes Tanit et Baal Hammon, fait partie de ces sanctuaires à ciel ouvert, spécifiques de la civilisation punique. Il est constitué par des empilements de strates d'urnes en céramique de morphologies différentes, contenant les restes brûlés d'enfants (principalement des nourrissons) ou d'animaux (très jeunes moutons ou chèvres), enfouis sous des tertres et surmontés de stèles ou de cippes votifs. Le Tophet de Salammbô compte ainsi des milliers de nourrissons ou de très jeunes enfants ensevelis dans ces conditions (Bénichou-Safar, 1995, 2004).

À ce jour, la question des « Tophet » et du sort de ces enfants est fortement sujet de controverse et fait encore l'objet de débats dans les milieux académiques. Les textes anciens rapportaient des sacrifices d'enfants, censés être effectués par les parents eux-mêmes, qui auraient donné leurs enfants au dieu Baal ou Moloch. Bénichou-Safar (1981) au contraire, propose l'hypothèse

que ces enfants seraient morts naturellement dans la période périnatale et pour cette raison auraient été « confiés » au dieu.

C'est dans ce cadre que depuis 2014, un programme de recherche archéologique est mené par Imed Ben Jerbania, chargé de recherche à l'Institut National du patrimoine de Tunis dans un secteur du Tophet Carthage. Ce programme a conduit au dégagement et au prélèvement de 550 nouvelles urnes cinéraires dont l'étude anthropologique est menée par Henri Duday, selon les mêmes modalités méthodologiques que les sites décrits précédemment. Une photographie de la fouille est présentée figure 40.

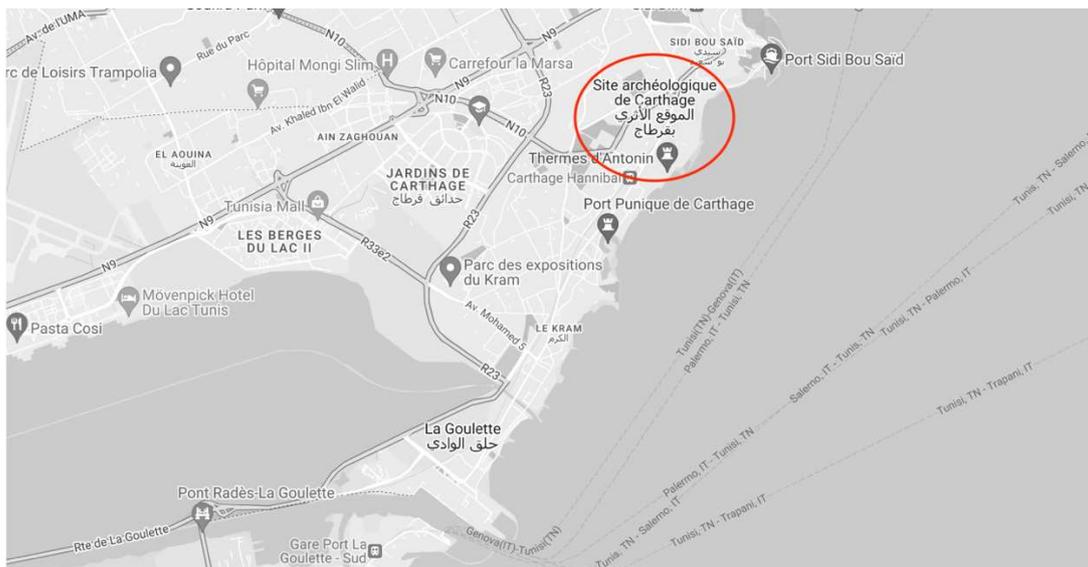


Figure 39 : localisation du site archéologique du Tophet de Salammbô à Carthage ; données cartographiques ©2023 Google.

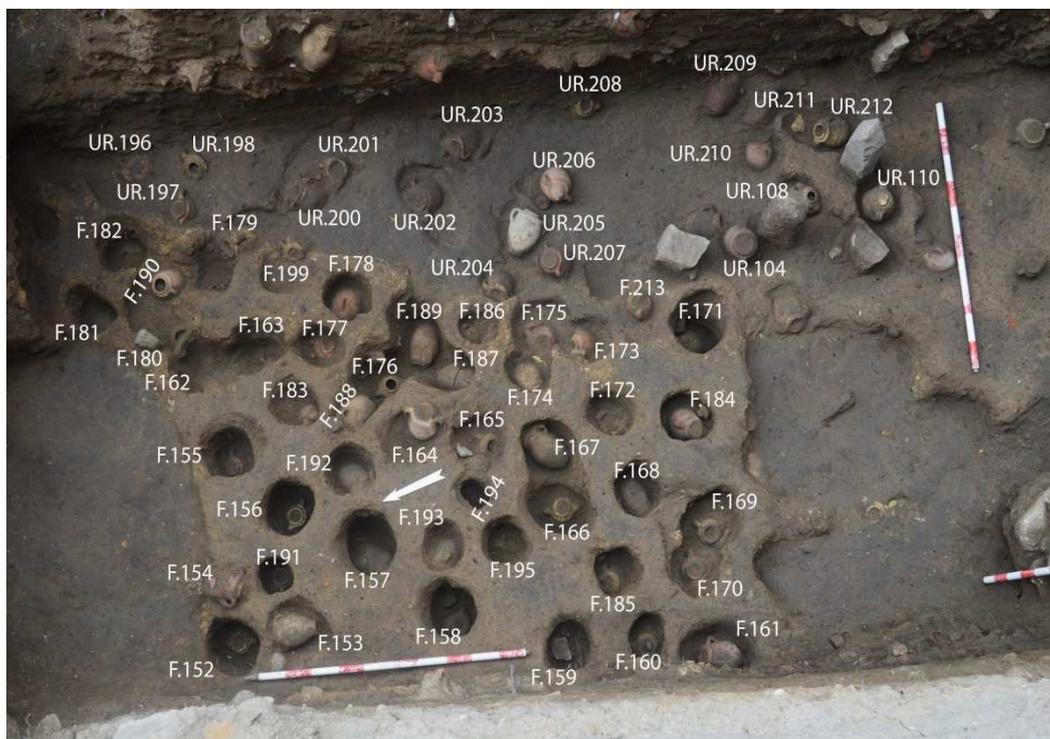


Figure 40 : fouille du Tophet de Salammbô. Le niveau visualisé est daté du III<sup>ème</sup> siècle avant notre ère (US 1216) avec les urnes en place ; en haut à droite, quelques stèles sont implantées au voisinage des fosses dans lesquelles ont été déposées les urnes contenant les os brûlés des enfants. © Imed Ben Jerbania, INP.

## *b) Description de l'échantillon*

---

Nous avons pris en compte dans cette étude, 62 urnes ayant fournies des restes humains brûlés.

Il s'agissait des structures suivantes :

- Tophet 17 : urnes 1, 4, 7, 9, 49, 74, 81, 90, 91 ;
- Tophet 18 : urnes 50, 52, 59, 155, 156, 159, 162, 164, 165, 166, 167, 169, 170, 174, 175, 183, 221, 255, 273, 292, 303, 305, 307, 313, 320, 336, 372, 439, 490, 491, 492, 493, 496, 497, 498, 499, 500, 502, 503, 505, 508, 509, 511, 514, 515, 516, 518, 519, 523, 526, 543, 544, 548 ;
- Tophet 19 : Urne 510.

**Les données concernant 28233 fragments d'os brûlés, hors esquilles ont été incluses concernant le Tophet de Salammbô.**

**Au total, nous avons donc inclus 277 509 fragments d'os brûlés dans notre étude.**

## C. Présentation du protocole mis en place dans le cadre de l'étude

---

### 1. Documentation préalable à l'étude

---

Depuis les dernières décennies, les pratiques de l'archéologie funéraire ont fortement évolué. Elle ne se consacre plus seulement aux seules données épigraphiques et architecturales des tombes, les restes humains ont repris leur place au centre des investigations sur les gestes funéraires (Duday et al., 1990). Toutefois, les seules données de l'analyse anthropologique d'un squelette telle qu'elle pourrait être réalisée en laboratoire ne sont pas suffisantes, les données de l'archéologie, la taphonomie, restent essentielles à la compréhension globale d'un dépôt funéraire (Duday, 2017).

Pour les quatre sites que nous avons inclus dans cette étude, nous avons pu travailler sur un corpus de données brutes, le plus exhaustif possible. La qualité de la fouille, de l'enregistrement des données sur le terrain et de l'analyse anthropologique était la base de ce travail à visée méthodologique.

Le protocole employé pour la fouille et l'analyse des dépôts osseux est décrit de façon précise dans l'ouvrage de Van Andringa *et al.* : *Mourir à Pompéi : Fouille d'un quartier funéraire de la nécropole romaine de porta nocera (2003-2007)* (Van Andringa *et al.*, 2013).

Ce protocole a été mis en place notamment à l'aide des résultats des diverses sessions du stage « Approche anthropologique des sépultures à incinérations » dans la fin des années 90 par Henri Duday, Germaine Depierre et Thierry Janin (Duday *et al.*, 2000).

La fouille des structures a été réalisée par passes consécutives de faible épaisseur (2 cm à 2,5 cm). Entre chaque décapage, des prises de vue zénithales et un enregistrement précis des éléments dans chaque passe ont été effectués.

Concernant l'analyse anthropologique, les étapes clés qui ont été réalisées sont précisées ci-dessous.

- **Détermination anatomique de chaque fragment osseux et latéralisation** chaque fois que cela était possible. L'ensemble des caractéristiques anatomiques ayant permis l'identification des fragments ont été relevés et strictement notés.
- **Détermination du nombre minimal d'individus (NMI)** dans la structure étudiée.
- **Évaluation du sexe** de l'individu (ou des individus), uniquement pour les individus adultes.
- **Estimation de l'âge au décès** de l'individu (ou des individus).
- Mise en évidence des **pathologies osseuses et dentaires**, des **signes de sénescence** et des **signes de traumatismes**.
- **Évaluation visuelle de la robustesse** des os (robustesse vs gracilité). Sur les squelettes non brûlés, la robustesse est basée sur le calcul du périmètre de l'os sur sa longueur maximale. Sur les squelettes incinérés, cette donnée ostéométrique est impossible à obtenir en raison de la fragmentation. La robustesse est donc évaluée visuellement en se basant à la fois sur l'observation des zones d'insertion des muscles ou des ligaments et sur l'épaisseur de l'os cortical. Les individus sont classés dans les catégories "gracile", "robuste", ou "indéterminé". Ils ont été classés comme indéterminés lorsque l'état général des fragments ne permettait pas d'observer suffisamment de zones d'intérêt.
- Analyse des caractéristiques et des **stigmates de la crémation** : couleur des os, texture, déformation, fragmentation...
- **Ostéologie quantitative** selon le protocole suivant.
  - ⇒ Pour chaque passe de démontage, les os ont été répartis en fonction de leur provenance anatomique ;
  - ⇒ Pour chaque région anatomique, les fragments étaient pesés à 0,1 g près et comptés. Les esquilles étaient pesées mais non comptées<sup>12</sup>. Les fragments dont l'origine anatomique exacte n'était pas connue étaient classés dans les catégories

---

<sup>12</sup> Les fragments de très petite taille (<5mm) qui ne pouvaient être attribués à aucun type d'os étaient classés comme esquilles. Leur décompte n'était pas réalisé mais leur masse était relevée en raison de leur importance significative dans la démarche analytique et interprétative.

suivantes : os plats, os courts (épiphyses ou extrémités spongieuses d'os long) et diaphyses ;

- ⇒ L'ensemble de ces **données était saisi et conservé sous forme de tableau** avec le logiciel Excel ©. Ces tableaux comportaient au minimum deux volets dont le premier regroupait les données pondérales et le second le nombre de fragments, ceci pour chaque passe et chaque région anatomique.
- ⇒ À l'aide des données saisies relatives au nombre et à la masse des fragments, il a été possible de **calculer le taux de détermination anatomique, le degré de fragmentation**, ainsi que **la part représentée par chaque région anatomique**. Ces calculs ont été réalisés pour chaque structure ou assemblages d'os brûlés, étudiés.
- **Analyse taphonomique** relative à l'ensemble de la structure ou de l'assemblage osseux.
- Une **étude des liaisons anatomiques**.

Pour chaque structure ou assemblage d'os brûlés, toutes les données brutes ont été consignées dans des dossiers au format « papier » et les données relatives au nombre et au poids des fragments ont été enregistrées au format numérique.

Nous allons maintenant décrire le protocole que nous avons appliqué pour analyser ces données.

## 2. Protocole relatif à notre étude

---

### *a) Constitution des bases de données*

---

Chaque structure ayant livré des restes humains brûlés et ayant fait l'objet d'une analyse anthropologique détaillée selon le protocole exposé ci-dessus, a été prise en compte dans notre recueil de données.

Dans un premier temps, chaque dossier papier a été numérisé pour un accès plus facile aux données, limiter le risque de perte de l'information et rendre ce corpus accessible pour des études ultérieures.

Compte tenu de la quantité de données brutes à traiter, les éléments suivants ont été extraits des notes manuscrites et enregistrés sous forme de fiches de travail. Elles comportaient :

- le nom et le numéro de structure, l'année de la fouille et de l'étude anthropologique ;
- l'identité de l'auteur de l'analyse ;
- les principales données archéologiques relatives à la stratigraphie, aux principaux éléments architecturaux, aux données épigraphiques et aux autres éléments associés

(objets en céramique, métal, verre, ossements animaux ouvragés ou non, brûlés ou non) ;

- les éléments orientant vers l'identification biologique de l'individu ;
- le relevé de tout élément pathologique ou signe traumatique ;
- le relevé des variations anatomiques ;
- les éléments relatifs aux stigmates de crémation ;
- la mise en évidence de critères d'exclusion (doublets, incompatibilité) ;
- la mise en évidence des liaisons anatomiques (collages, symétries...)
- Une conclusion générale évaluant le nombre minimal d'individus présents et une conclusion relative à chaque individu quant à l'estimation de son âge au décès, la détermination de son sexe, sa robustesse et des indications sur les éléments pathologiques ou traumatiques.

Dans un second temps, trois bases de données ont été construites, à partir desquelles nos analyses ont été réalisées.

- La première concerne les critères de détermination anatomique et de latéralisation.
- La deuxième concerne les critères d'identifications biologiques, les données quantitatives et pondérales et les éléments relatifs à la crémation.
- La troisième concerne les données relatives aux liaisons et aux exclusions.
- 

### **(1) Base de données n°1 : critères anatomiques de détermination et de latéralisation des fragments**

Ces données sont enregistrées sous la forme d'un tableau réalisé avec le logiciel Excel ©.

Pour chacune des structures funéraires des quatre sites choisis, nous avons réalisé un décompte du nombre de fragments identifiés par os du squelette humain et plus spécifiquement pour chacune des régions anatomiques potentiellement d'intérêt en termes d'identification ou de latéralisation.

Les différentes catégories anatomiques ont été initialement définies selon la description des régions anatomiques d'intérêt du *Traité d'ostéologie humaine (Anatomie – Anthropologie – Paléontologie)* de White et al. (2016).

Les données ont été séparées en quatre classeurs.

- Le premier classeur concerne toutes les données relatives à l'extrémité céphalique chez l'adulte incluant la mandibule (un extrait du tableau concernant Porta Nocera à Pompéi est présenté en annexe 3a)
- Le second classeur regroupe les informations concernant le squelette infra-crânien chez l'adulte (un extrait du tableau concernant Porta Nocera à Pompéi est présenté en annexe 3b).
- Le troisième classeur regroupe les informations concernant l'identification des germes dentaires (dents définitives et déciduales). Deux extraits du tableau concernant Porta Nocera à Pompéi est présenté en annexe 3c.

- Enfin le quatrième classeur regroupe toutes les informations relatives aux individus immatures (hors dents). Un extrait du tableau concernant le Tophet de Salammbô à Carthage est présenté en annexe 3d.

## **(2) Base de données n°2 : critères d'identifications biologiques, données relatives aux stigmates de crémation et données quantitatives.**

Cette base de données est également réalisée sous la forme d'un tableur Excel et comporte trois classeurs.

Le premier classeur regroupe l'ensemble des données biologiques relatives à chaque structure (Annexe 4a) :

- La première partie du tableau résume les données objectives : le nombre minimum d'individus, l'âge et le sexe (biologique et archéologique) de l'individu identifié. Dans le cas où plusieurs individus ont été identifiés : deux stratégies ont été appliquées. Si la représentation entre les individus n'était pas équilibrée, seul l'individu principal était pris en compte (celui qui était représenté par la plus grande quantité de fragments en nombre et en masse) ; si chacun des individus était bien représenté et de façon équilibrée, ils étaient pris en compte de façon indépendante, dans une sous-structure (par exemple cas de la tombe 15 A et B ou de la tombe 21 A, B et C).
- La deuxième partie regroupe l'ensemble des indicateurs d'âge et de sexe qui ont pu être observés.
- La troisième partie donne le résultat de l'observation des différents fragments en termes de robustesse/gracilité.
- Enfin la quatrième partie regroupe l'ensemble des éléments pathologiques, traumatiques ou les variations anatomiques non métriques recherchés sur les fragments osseux ou dentaires.

Le second volet de ce tableur concerne les stigmates de la crémation : niveau et homogénéité de la crémation, différentes atteintes de l'os (déformation, fissuration, torsion, clivage...) et la couleur de l'os (Annexe 4b).

Enfin le troisième volet regroupe les données pondérales, les informations concernant le pourcentage de détermination anatomique, la représentation par région anatomique et la fragmentation (Annexe 4c).

## **(3) Base de données n°3 : exclusions et liaisons anatomiques.**

Cette base de données n'a été réalisée que pour les sites de Pompéi et du Vatican. Elle est présentée en annexe 5. Elle comprend deux classeurs.

- Le premier répertorie pour chaque structure la présence de liaisons ou d'exclusions et précise le type de liaison (collage, symétrie et concordance) ou le type d'exclusion (doublets, incompatibilités). Un extrait du tableau relatif aux données de Santa Rosa est présenté en Annexe 5a.

- Le second classeur dénombre les fragments selon leur origine anatomique et le type de liaison et/ou d'exclusion qu'ils ont permis de réaliser. Deux extraits du tableau relatif aux données de Santa Rosa sont présentés en Annexe 5b (1) et (2)

## *b) Analyse des données*

---

### **(1) Les données anatomiques**

Dans un premier temps des décomptes généraux ont été réalisés afin de déterminer au sein du squelette quelles étaient les régions anatomiques les mieux représentées. Nous avons également calculé les pourcentages de latéralisation par région anatomique afin de connaître celles qui pourraient être les plus informatives en termes d'identification. Nous avons détaillé pour chacun des quatre sites étudiés, les résultats obtenus pour le squelette crânien et pour le squelette infra-crânien.

Dans un second temps, nous avons tenté d'analyser plus précisément les régions anatomiques ayant obtenues les meilleurs scores en termes d'effectifs et de pourcentage de latéralisation. Nous avons détaillé pour chacune d'elles les éléments anatomiques caractéristiques qui permettaient à un fragment d'être identifié et secondairement latéralisé. Nous avons détaillé les résultats obtenus pour chaque région anatomique du bloc crânio-facial et du squelette infra-crânien dans deux sections indépendantes.

L'ensemble de ces données a été représenté graphiquement et a permis de dresser un bilan global mettant en évidence les fragments osseux les plus nombreux, les plus identifiables et les plus informatifs.

Par ailleurs, des schémas récapitulatifs (type schéma de conservation) ont été dessinés afin de visualiser ces différentes informations.

Enfin, des comparaisons ont été réalisées entre les différents sites étudiés.

Les données concernant la détermination anatomique avec le logiciel « R » version 4.1.3 et le logiciel ©XLSTAT 2023.

### **(2) Les données biologiques**

Ces données permettant une identification biologique de l'individu. Elles regroupent l'ensemble des critères d'identification et des données pondérales relatives à chaque structure.

#### **➤ Les critères d'identifications principaux**

Nous avons effectué dans la première partie de cette thèse un bref rappel des méthodes conventionnelles utilisées en anthropologie, afin d'obtenir des informations sur l'identité biologique d'un individu squelettisé non brûlé.

La détermination du sexe et l'estimation de l'âge au décès sont les deux principaux critères d'identification biologique des individus (Cattaneo, 2007). Il existe également d'autres critères, que nous nommerons « secondaires », qui peuvent soit permettre d'affiner l'identification, soit de s'associer entre eux afin de palier l'impossibilité d'évaluer l'un, l'autre ou les deux critères principaux. Parmi ces critères secondaires, nous pouvons citer par exemple la robustesse du squelette ou certaines pathologies liées à l'âge ou au sexe, telle que l'hyperostose frontale interne. Certains indicateurs de sénescence osseuse ou dentaire ainsi que les signes de déminéralisation osseuse peuvent aussi jouer ce rôle.

Parmi les critères d'identification biologique existants, nous avons souhaité mettre en évidence ceux qui étaient les plus pertinents à évaluer dans un contexte de combustion du corps. Pour cela nous avons recherché au sein de la documentation relative à chaque structure ou assemblage, les régions anatomiques et les critères d'observations qui avaient offert les meilleurs résultats. Nous avons pris en compte uniquement les sites de Porta Nocera, Porta Mediana et de Santa Rosa. L'analyse biologique du Tophet de Salammbô est encore en cours à l'heure actuelle, nous ne disposons pas d'assez d'éléments sur ce site pour l'inclure.

Nous rappelons ci-dessous la liste des critères recherchés pour l'estimation de l'âge au décès, et l'évaluation du sexe des individus, mais également les critères d'identification secondaire.

### **L'âge au décès**

Dans cette étude, pour plus de fiabilité, les individus adultes sont distribués en trois classes d'âges :

- Adultes jeunes (20-29 ans) ;
- Adultes matures (30-59 ans) ;
- Adultes âgés (60 ans et +).

Les individus immatures, quant à eux ont été répartis en classes d'âges selon le schéma suivant :

- 0 – 1 ans ;
- 1 – 4 ans ;
- 5 – 9 ans ;
- 10 – 14 ans ;
- 15 – 19 ans.

Les différents critères que nous avons recherchés pour l'estimation de l'âge au décès ont été classés en deux catégories principales : les critères relatifs au développement et à la maturation des os et ceux relatifs à la sénescence et aux changements dégénératifs.

- **Observation des stades de développement et de maturation osseuse**

Les stades de développement osseux ont été décrits par Scheuer & Black (2000). À ce jour, ce sont les plus complets en ce qui concerne la croissance et le développement des squelettes. Ils permettent des estimations précises de l'âge au décès des immatures. Plusieurs régions du

squelette terminent leur maturation pendant la seconde ou la troisième décennie et ont pu également être utilisées dans l'estimation de l'âge au décès des adultes jeunes. Parmi elles, les zones observées avec beaucoup d'attention sont les suivantes.

○ *L'extrémité sternale de la clavicule*

Une simplification des critères d'observation selon Cunningham et al. (2016) est présentée dans le tableau 11.

Des données existent également selon le sexe : pour les femmes, la fusion se fait entre 17 et 27 ans et pour les hommes entre 19 et 25 ans (Cardoso, 2008).

De manière générale, la fusion n'est habituellement pas observée avant 22 ans et est toujours complète à 30 ans (Cunningham et al., 2016).

Absence de fusion	Age <18 ans
Lamelle de fusion	16-21 ans
Épiphyse couvre la majeure partie de la surface	24-29 ans
Fusion complète	> 30 ans

Tableau 11 : critères d'observation de l'extrémité sternale de la clavicule selon l'âge, d'après Cunningham et al. (2016).

○ *La crête iliaque*

L'ossification de la crête iliaque débute vers l'âge de 12-13 ans chez les femmes et 14-15 ans chez les hommes avec une fusion partielle qui se produit entre 14 et 26 ans pour les femmes et entre 15 et 24 ans pour les hommes. La fusion complète intervient vers l'âge de 26 ans (Cunningham et al., 2016).

○ *Les épiphyses vertébrales ou la fusion des anneaux épiphysaires*

Selon Albert & Maples (1995) les anneaux épiphysaires des vertèbres ne sont pas soudés avant 14 ans pour les femmes et 16 ans et 4 mois pour les hommes.

L'âge le plus jeune pour présenter une suture complète est de 25 ans pour les femmes et 24 ans et 2 mois pour les hommes. Les travaux de Cardoso & Rios (2011) montrent une fusion partielle entre 14 et 27 ans pour les vertèbres thoraciques et 14 et 23 ans pour les vertèbres lombaires.

○ *Le sacrum*

D'une manière générale, si des espaces sont détectés entre les corps vertébraux du sacrum, l'individu est âgé de moins de 20 ans. Si l'on en observe qu'entre S1 et S2 alors l'individu est probablement âgé de moins de 27 ans. La fusion complète est généralement observée à partir de 25 ans (Cunningham et al., 2016).

○ *La synchondrose sphéno-occipitale*

La fusion de la synchondrose sphéno-occipitale intervient à la fin de l'adolescence lorsque la dentition permanente à l'exception de la troisième molaire est presque terminée c'est-à-dire entre 11 et 16 ans chez les femmes et entre 13 et 18 ans chez les hommes (Cunningham et al., 2016). D'autres études s'accordent à dire que la fusion complète est susceptible de se produire à l'adolescence (Krishan & Kanchan, 2013; Lottering et al., 2015).

- *La fusion pétro-occipitale*

Hershkovitz et al., (1997) et Maat et al. (1995) ont constaté qu'aucune fusion n'a été détectée chez les hommes et les femmes avant 22 ans. Une fusion unilatérale n'a été observée qu'entre 22 et 34 ans et à des âges supérieurs à 34 ans (femmes) et 36 ans (hommes), la fusion était bilatérale. À noter toutefois, la fusion peut se produire jusqu'à 50 ans et dans une petite minorité de cas ne pas se produire du tout.

- *L'observation des stades de minéralisation et d'éruptions dentaires.*

Les méthodes basées sur le développement et les stades d'éruptions dentaires sont toujours considérées comme les méthodes les plus précises pour estimer l'âge au décès des individus immatures. Même si certaines maladies métaboliques extrêmes pourraient le retarder (Ives, 2015), le développement dentaire résiste à des facteurs externes néfastes tel que la dénutrition par exemple (Liversidge, 2015).

Moorrees et al., (1963a, 1963b) décrivent 15 stades pour le degré de minéralisation des dents déciduales et permanentes, mandibulaires, mis en correspondance avec un âge moyen à +/- 2 déviations standard. Initialement à visée orthodontique, cette méthode est très utilisée dans le milieu de l'archéo-anthropologie et de la médecine légale. Elle présente l'avantage d'objectiver les observations pour chaque dent étudiée et par sexe. Cependant, il a été mis en évidence que cette méthode pouvait sous-estimer les âges (Phillips & van Wyk Kotze, 2009a, 2009b).

La méthode descriptive de Demirjian & Goldstein (1976) est également largement répandue dans le domaine médico-légal. Elle est simple à utiliser et présente un intérêt pratique. Le principe de la méthode consiste à évaluer le stade de minéralisation des dents permanentes à l'exception de la troisième molaire ou de 4 dents mandibulaires gauches. Ces stades sont transformés en score qu'une table traduit en âge (Demirjian & Goldstein, 1976).

- *L'observation de la troisième molaire mandibulaire*

Liversidge & Marsden (2010) ont indiqué que, bien qu'un biais significatif ait été démontré, si cette dent est mature, alors il est plus que probable que l'âge de 18 ans soit atteint. L'utilisation isolée de cette approche requiert de la prudence mais peut s'avérer utile en combinaison avec d'autres méthodes d'identification (Metsäniitty et al., 2019).

- **Observations des critères de sénescence et des changements dégénératifs**

- *L'oblitération des sutures crâniennes*

Pendant longtemps les anthropologues ont appliqués essentiellement cette méthode pour établir l'âge d'un individu au moment de sa mort. Masset dans sa thèse en 1982 a démontré le peu de fiabilité de ce caractère. Il précise notamment l'influence sexuelle (la synostose des sutures masculines étant plus précoce), les différences entre les groupes humains et l'influence de la forme des crânes (Masset, 1982).

Cependant, cette méthode simple d'observation et objective, pourrait être utilisée afin de s'orienter sur l'estimation de l'âge des individus dans les cas où les autres méthodes ne seraient pas applicables.

En 1937, Vallois a déterminé la délimitation de segments sur les sutures sagittale, coronale et lambdoïde (Vallois, 1937). Plus tard, Masset, (1982) a précisé 10 secteurs suturaux, choisis pour calculer un coefficient de synostose crânienne (figure 41) :

- 4 segments sur la suture sagittale ;
- 6 segments sur la suture coronale ;
- 6 segments sur la suture lambdoïde.

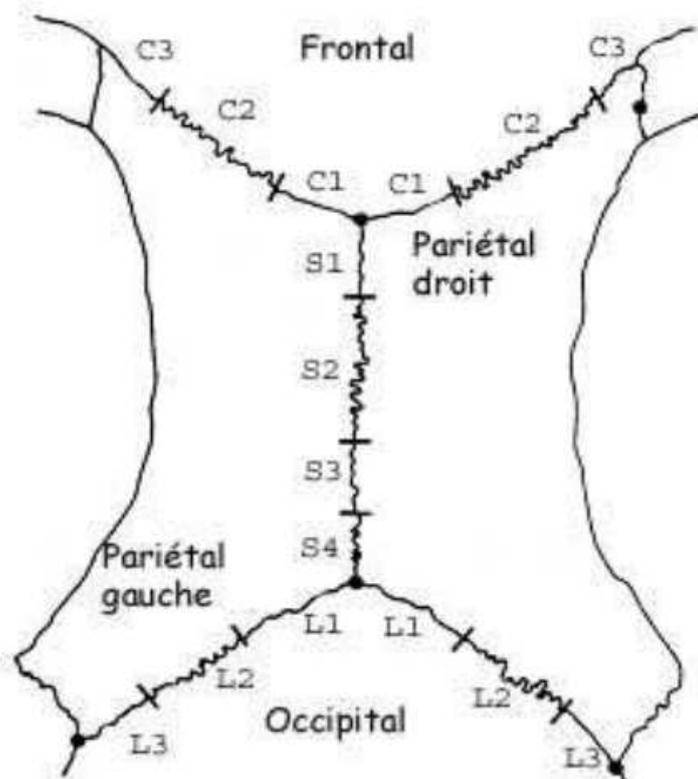


Figure 41 : dessin représentant les différents segments à prendre en compte dans le calcul du coefficient de synostose des sutures crâniennes. D'après Olivier (1960).

La méthode consiste en la quantification du degré d'oblitération de chaque segment. D'après les définitions de Broca (1875), reprise par Ferembach et al. (1986), Frédéric (1906) et Ribbe (1885), il existe cinq degrés possibles (de 0 à 4) :

- Degré 0 : suture ouverte absence totale de synostose.
- Degré 1 : moins de la moitié du segment synostosé (un seul point de synostose suffit pour passer au degré 1).
- Degré 2 : la moitié du segment est synostosé.
- Degré 3 : plus de la moitié du segment est synostosé.
- Degré 4 : la suture est fermée, synostose complète.

Le coefficient de synostose se calcule ensuite en faisant la moyenne des 10 segments.

Pour la suture sagittale, impaire, les quatre segments sont comptés. Pour les sutures paires (coronales et lambdoïdes), on fait la moyenne des segments gauches et droits. Dans les cas où la conservation est mauvaise, ce qui est typiquement notre cas dans la plupart des crémations

ou carbonisations, il est possible de n'utiliser qu'un seul côté. En effet, Masset & Castro e Almeida (1990) ont montré que la différence statistique entre les deux côtés n'était pas significative.

De plus, lorsque le crâne est en mauvais état ou lorsque certains segments sont manquants on peut tout de même calculer un coefficient de synostose compte tenu du fait que le coefficient de chaque segment présente une corrélation de l'ordre de 0,80 avec le coefficient obtenu avec les 10 segments (Masset & Castro e Almeida, 1990).

- *La symphyse pubienne*

L'évaluation de l'âge à partir de la symphyse pubienne est réalisée en utilisant les descriptions de Brooks & Suchey (1990) revues par Hartnett (2010). Elle comprend sept tranches d'âges pour les hommes et les femmes dont la septième introduite par Hartnett (2010) comprend les hommes et les femmes âgées de plus de 70 ans au moment du décès.

- *La surface auriculaire*

La méthode Schmitt (2005) présentée dans le premier chapitre de cette thèse, offre d'excellents résultats en termes de fiabilité.

- *L'extrémité sternale des côtes*

Les premières études ont été utilisées afin de déterminer l'âge au décès à partir de l'extrémité sternale de la quatrième côte, mais des travaux plus récents ont montré qu'il était possible d'en utiliser d'autres. Yoder et al. (2001), ont montré qu'il n'y avait pas réellement de différence entre la deuxième et la neuvième côte. Alsup (2007) a montré qu'il existait une différence significative entre les scores obtenus avec la quatrième côte droite et les deuxième et huitième côtes. Hartnett (2010) quant à elle a calculé des statistiques pour chaque étage.

- *L'évolution morphologique de la première côte*

Kunos et al. (1999) et Kurki (2005) ont montré une évolution de la forme, la taille et la texture de la première côte avec l'âge. Les modifications morphologiques de la tête, du tubercule et de l'articulation sterno-costale peuvent être utilisées comme indicateur d'âge au décès. Bien que des biais aient été identifiés avec cette approche, il a été noté que ceux-ci étaient relativement faibles par rapport à ceux inhérents aux autres méthodes d'estimation de l'âge. Cette méthode peut être utilisée comme indicateur isolé mais également en conjonction avec d'autres indicateurs d'âges afin d'améliorer la qualité des évaluations. Dans ce contexte son observation peut être intéressantes dans un contexte de carbonisation avancée.

L'évolution morphologique de l'extrémité claviculaire est décrite dans le tableau 12 et présentée sur la figure 42.

L'évolution morphologique de la tête de la première côte est décrite dans le tableau 13 et présentée sur la figure 43.

Age (ans)	Évolution morphologique de l'extrémité claviculaire de la première côte
1 – 5	a : la surface est lisse et homogène. b : la marge est floue et arrondie.
5 – 15	c : on observe un dépôt osseux sur la marge donnant l'impression d'un léger rebord. d : l'articulation s'oriente de façon antéro-postérieure.
15 – 20	e : un sillon sépare la face articulaire en 2/3 antérieurs et 1/3 postérieur. f : le rebord est net, bien défini et marqué.
20 – 30	g : début de l'ossification costo-chondrale avec la formation d'un bec osseux au niveau de la marge supéro-antérieure, il se projette médialement.
30 – 40	h : la surface commence à se creuser et prend un aspect cribriforme (accélération de l'ossification enchondrale). i : le cartilage marginal s'ossifie. g : confluence du cartilage marginal avec le bec osseux.
40 – 55	j : le profil est ovoïde, le cartilage est encapsulé par des formations de l'os cortical. k : apparition d'une concavité centrale.
55 – 60	l : la cavité centrale se creuse en forme de U en raison de l'ossification périphérique.
60 – 70	La surface costale et les marges périphériques deviennent rugueuses. La cavité commence à se combler.
70 – 80	m : comblement de la cavité centrale. La surface externe a un aspect globulaire.

Tableau 12 : évolution morphologique de l'articulation costo-claviculaire. D'après Perrot (2006), adapté de Kunos et al. (1999).

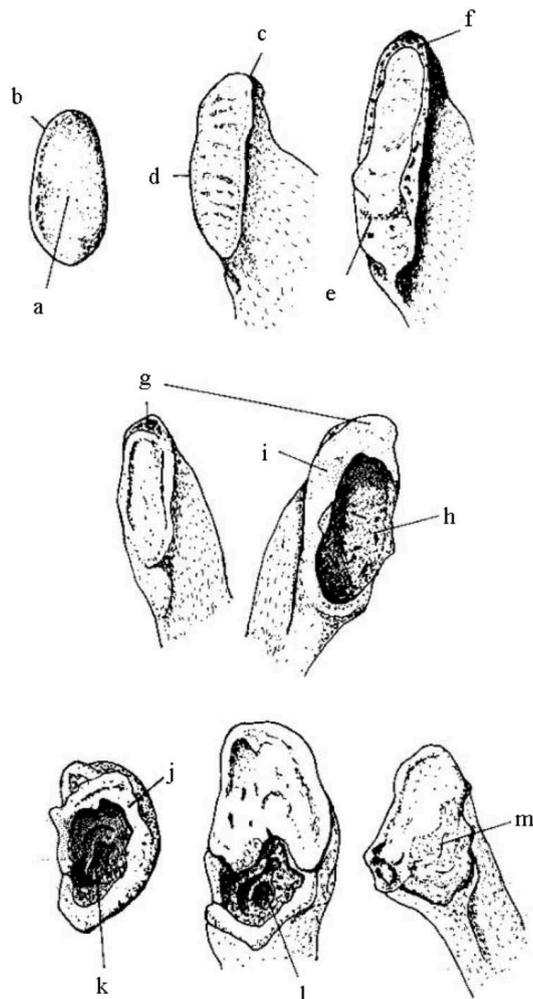


Figure 42 : évolution morphologique de l'articulation costo-claviculaire. Dessin de Perrot (2006), adapté de Kunos et al. (1990).

Age (ans)	Évolution morphologique de la tête de la première côte
1 – 5	a : apparition d'une surface rugueuse de la face sous chondrale immature. Ébauche d'une bordure.
5 – 15	La tête s'arrondie progressivement.
15 – 20	b : début de la fusion épiphysaire. La tête a une forme ovoïde. c : bordure complète usée.
20 – 25	d : la tête est circulaire, la surface est lisse. e : la marge s'arrondie.
25 – 30	Apparition d'irrégularité de surface.
30 – 35	f : augmentation de la robustesse, la surface devient bombée.
35 – 50	g : le rebord est bien marqué, il devient irrégulier.
50 – 60	h : la surface devient poreuse, des sillons se forment. i : des exostoses apparaissent le long des marges.
60 – 80	j : la surface articulaire est boursouflée. k : la surface articulaire prend une apparence comme rongée.

Tableau 13 : évolution morphologique de la tête de la première côte. D'après Perrot (2006), adapté de Kunos et al. (1999).

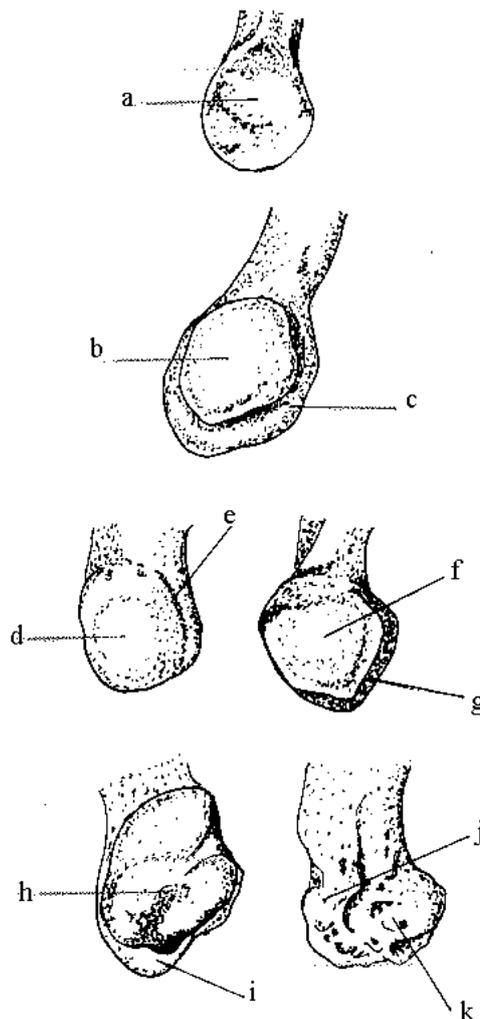


Figure 43 : évolution morphologique de la tête de la première côte. Dessin de Perrot (2006), adapté de Kunos et al. (1999).

○ *Observation de la présence d'une hyperostose frontale interne*

L'hyperostose frontale interne ou HFI est une lésion osseuse bénigne, la plupart du temps asymptomatique qui se manifeste par une accrétion osseuse à la face endocrânienne de l'écaïlle frontale (figure 44). Depuis le XVIII<sup>ème</sup> siècle, cette lésion a fait l'objet d'une multitude de publications. À ce jour, même s'il n'existe toujours pas de consensus quant à son étiologie, l'implication hormonale semble communément admise pour expliquer sa haute fréquence chez les femmes d'âge mûr et ménopausées. Nous avons démontré l'intérêt du diagnostic de l'hyperostose frontale interne pour l'identification des individus carbonisés (estimation de l'âge et déterminations du sexe) à travers une étude réalisée sur l'échantillon de Porta Nocera (Du Fayet de la Tour et al., 2023).

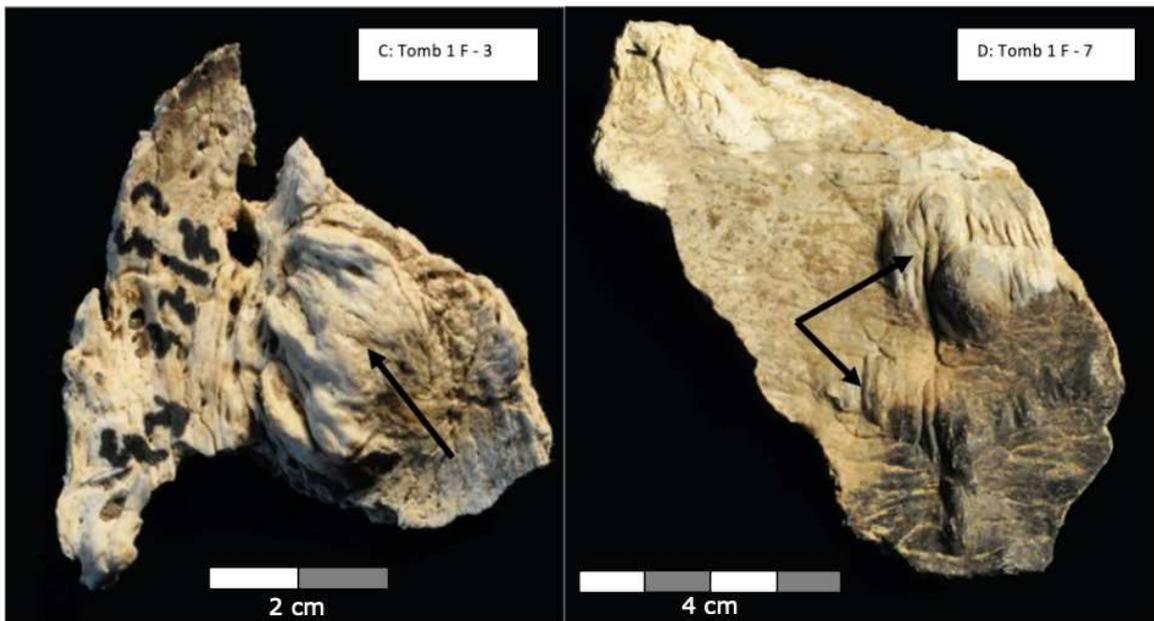


Figure 44 : divers exemples d'os brûlés présentant des lésions d'hyperostose frontale interne (HFI) dans l'échantillon de Porta Nocera à Pompéi. Clichés A et B F. Giraud ; C et D H. Duday.

○ *Observation de l'usure dentaire*

Plusieurs schémas de cotation de l'usure dentaire ont été proposés par exemple (Brothwell, 1981; Miles, 1962). Cependant, il faut rester prudent, cette technique ne peut être utilisée que si le régime alimentaire et le taux d'attrition de la population est connue ou peut être déduit de preuves ethnographiques, iconographiques, documentaires ou cliniques.

## **L'évaluation du sexe**

Dans le cadre de cette thèse, en dehors du sexe archéologique, la détermination du sexe biologique des sujets non adultes n'a pas été abordée.

Certains chercheurs ont étudié la possibilité d'évaluer le sexe des immatures à l'aide de traits morphologiques et métriques (Faruch Bilfeld, 2015; Loth & Henneberg, 2001; Molleson et al., 1998; Schutkowski, 1993; Wilson et al., 2011), mais même si les méthodes sont prometteuses avec l'incorporation de techniques innovantes, elles se heurtent encore aujourd'hui à des difficultés quant à leur précision et leur validation (Coqueugniot et al., 2002; Stull et al., 2020). Les méthodes les plus fiables pour l'évaluation du sexe des immatures restent les méthodes impliquant l'ADN (Skoglund et al., 2012), malheureusement ces techniques n'ont pas pu être appliquées à cet échantillon compte tenu du niveau de crémation.

Concernant les méthodes d'évaluation métrique, compte tenu du taux de fragmentation et de la déformation des fragments osseux brûlés, elles ont été peu utilisées dans ce contexte.

De fait, comme nous l'avons déjà précisé dans le chapitre « prérequis et contexte », la région du squelette la plus discriminante reste incontestablement le bassin (Bruzek, 1992; Dérobert et al., 1974; Ferembach et al., 1979; Masset, 1987). Selon Stewart (1968) le crâne et la mandibule permettraient d'estimer le sexe de 77 % des individus et le squelette complet 94 % des individus. En l'absence du bassin, la précision varierait de 50 à 70 %, ce qui reste très proche du hasard. Malheureusement, lors de la combustion du corps, le bassin se fragmente et il n'est pas toujours possible d'observer l'ensemble des critères relatifs à la diagnose sexuelle. L'observation d'autres régions anatomiques est donc parfois nécessaire pour s'orienter vers l'évaluation du sexe.

Au sein de notre échantillon, les critères d'observations que nous avons recherchés sont décrits ci-dessous.

- **Observation des différents critères élaborés par Bruzek, (2002)**

Cette méthode morphologique a été décrite précisément dans notre première partie. Elle reprend l'observation de cinq régions anatomiques de l'os coxal<sup>13</sup> :

---

<sup>13</sup> Compte tenu des modifications induites par la combustion, en particulier la fragmentation, ces critères ont pu faire l'objet d'observations indépendantes.

- la **surface pré-auriculaire** (Houghton, 1974; Novotný, 1986) comportant le **sillon pré-auriculaire** et **tubercule du muscle piriforme** ;
  - la **grande échancrure sciatique** (Glanville, 1967; Lazorthes & Lhez, 1939; Novotný, 1986; Singh & Potturi, 1978) ;
  - l'**arc composé** (Genovés, 1959) ;
  - la **margo inferior ossis coxae** (Novotný, 1986) ;
  - le **rapport ischio pubien** (Schultz, 1986; Washburn, 1948).
- **Observation des reliefs d'insertions musculaires et des autres éléments pouvant présenter des caractéristiques du dimorphisme sexuel**
    - Analyse des différents reliefs crâniens : proéminences frontales et pariétales, glabellle, arcades sourcillères, processus mastoïdes, protubérance occipitale externe, écaille occipitale, bords supra-orbitaires, arcades zygomatiques, surface des os malaires.
    - Observation du corps mandibulaire, angle mandibulaire et condyle mandibulaire.
    - Observation de la forme du sacrum.
    - Mesure du diamètre de la tête fémorale.
  - **Recherche d'une HFI**

Comme vu précédemment l'hyperostose frontale interne est un indicateur du sexe féminin.

**En raison de la fragmentation et des déformations induites par la combustion, les méthodes utilisant des données métriques n'ont pas pu être appliquées ou uniquement pour de très rares cas.**

### ➤ **Les critères d'identifications secondaires**

#### **La robustesse**

Une évaluation visuelle de la robustesse a été réalisée pour chacun des individus permettant de les classer en gracile ou robustesse moyenne ou robustesse forte.

#### **L'observation d'éléments pathologiques**

Dans un contexte médico-légal, principalement dans le cadre d'une identification comparative, il est souvent possible d'avoir accès au dossier médical des victimes. De nos jours il est rare qu'un dossier médical ne comporte pas au moins un résultat d'imageries (radiographies classiques, TDM, IRM).

La recherche de pathologies ayant un retentissement osseux ou la mise en évidence de traumatismes anciens peut donc apporter des informations capitales sur l'identité de la victime.

Nous avons donc recherché quels fragments osseux étaient les plus susceptibles de permettre l'observation de lésions pathologiques ou traumatiques. Les signes de sénescences et les pathologies dentaires ont également été pris en compte.

Pour classer les différents types de pathologies nous avons réalisé une adaptation de la méthode utilisée dans l'analyse des lésions squelettiques proposée par Ortner (2003) et reprise par Dutour (2011).

Les lésions étaient séparées en deux groupes principaux, si l'atteinte concernait directement l'os ou la région articulaire, puis elles étaient ensuite reclassées en huit groupes en fonction du type d'atteinte :

- les anomalies de l'ostéoformation ;
- les anomalies de l'ostéolyse ;
- les anomalies de formes ;
- les lésions d'allures infectieuses ;
- les lésions d'allures inflammatoires ;
- les pathologies d'origine tumorales ;
- les traumatismes ;
- les autres types de lésions.

### **Les caractères discrets**

Enfin, l'ensemble des éléments relatifs à la présence de variations anatomiques non métriques a également été recherché.

### **➤ Les données pondérales**

Pour chacune des structures étudiées nous disposons des données suivantes.

- Nombre total de fragments (hors esquilles osseuses).
- Poids total des fragments (les esquilles sont comptabilisées dans le poids total).

Ces données étaient disponibles à la fois pour chacune des passes de démontage et pour l'ensemble de la structure.

Afin de présenter les données pondérales de manière cohérente, des classes ont été définies concernant la masse osseuse de chaque structure <sup>14</sup>:

- Extrêmement élevée si elle est supérieure ou égale à 2000 g.
- Très élevée si elle était comprise entre 1750 g. et 1999 g.
- Élevée si elle était comprise entre 1500 g. et 1749 g.
- Faible si elle était comprise entre 1000 g. et 1499 g.
- Très faible entre 750 g. et 999 g.
- Extrêmement faible en dessous de 749 g.

---

<sup>14</sup> Ces qualificatifs ne s'appliquent que pour les individus d'âge adulte.

L'analyse de la masse totale des os permet d'évaluer le degré de complétude du dépôt. Si l'on se réfère aux travaux McKinley (1993) pour un sujet de taille adulte la masse totale des os brûlés doit être supérieure à 1227 g. En deçà de cette valeur, le dépôt devrait être considéré incomplet. À l'inverse, une masse supérieure à 2400 g. indiquerait la présence de plusieurs individus dans le dépôt.

Dans la littérature, il existe plusieurs références relatives aux données pondérales du squelette brûlé (Bass & Jantz, 2004; Depierre, 2013; Forbes et al., 1953; Herrmann, 1976; McKinley, 1993; Mitchell et al., 1945; Trotter & Hixon, 1974a; Warren & Maples, 1997).

En reprenant l'ensemble des résultats de ces études on constate que les squelettes de sexe masculins fournissent systématiquement des moyennes pondérales plus élevées que les squelettes féminins : moyenne constatée pour les hommes de 1841,6 g. (Herrmann, 1976) à 3400 g. (Mitchell et al., 1945) et pour les femmes de 1271 g (McKinley, 1993) à 2350 g. (Bass & Jantz, 2004). L'étude réalisée par Depierre (2013) sur les restes crématisés de 103 individus (48 femmes et 55 hommes morts entre 32 et 103 ans), retrouve une moyenne pour les deux sexes de 2765,8 g (min 1546,3 ; max 4009,6 ; Med 2841,4 ; écart type 604,3) et 2374,3 g. pour les femmes versus 3113,8 g pour les hommes.

Les autres données disponibles étaient :

- les indices pondéraux par régions anatomique (tête, tronc, membres supérieurs, membres inférieurs) pour les individus adultes mais aussi les immatures. En le comparant aux données de référence il était ainsi possible de juger de la représentation des différentes régions anatomiques au sein de l'assemblage.
- Le nombre et la masse totale des fragments indéterminés.
- Le poids moyen sauf esquilles qui communique des informations précieuses sur la fragmentation (cf. tableau 4).
- Le taux global de détermination anatomique (calculé à partir de la masse des fragments déterminés sur la masse totale des os dans l'assemblage). Il était qualifié de :
  - excellent s'il était supérieur ou égal à 95,0 % ;
  - très satisfaisant s'il était compris entre 90 % et 94,9 % ;
  - satisfaisant entre 85 % et 89,9 % ;
  - moyen entre 80 % et 84,9 % ;
  - médiocre entre 75 % et 79,9 % ;
  - très médiocre entre 70 % et 74,9 % ;
  - extrêmement faible s'il était inférieur ou égal à 69,9%.

### ➤ **Exploitation des données biologiques**

Pour l'ensemble des structures, le décompte total de ces observations relatives aux critères d'identifications biologiques a permis de mettre en évidence les régions anatomiques porteuses de la plus grande quantité d'informations ainsi que les observations à privilégier sur le squelette afin d'obtenir des résultats les plus fiables.

Par ailleurs, une série d'analyses a été réalisée afin de déterminer si les données pondérales étaient fiables pour s'orienter sur l'évaluation sexe des individus.

Enfin une analyse de la représentativité de chaque région anatomique était intéressante pour mettre en évidence des différences qui peuvent exister entre différents types de dépôts (tombes, aires de crémation, tombes bûchers).

### (3) Analyses des liaisons et des exclusions ostéologiques

La recherche systématique des liaisons et des exclusions ostéologiques sont des éléments capitaux de l'étude anthropologique, elles permettent de réaliser une estimation plus fiable et plus précise du nombre minimal d'individus (Duday, 1987a; Masset, 1984; Poplin, 1976a, 1976b). La recherche d'exclusion permet d'identifier un individu surnuméraire dans un assemblage. La recherche de liaisons, quant à elle vise à identifier dans un ensemble ou plusieurs structures séparées physiquement, les restes qui se rapportent à un même individu. Ces méthodes existent pour d'autres disciplines que l'anthropologie par exemple on la retrouve en céramologie dans l'analyse de vases ou en préhistoire lors de l'étude de pièces d'industries lithiques (nucléus / éclats de taille) (Duday, 1987a, 2019b).

Cette recherche n'est pas systématique dans le domaine de l'anthropologie malgré des résultats extrêmement intéressants notamment pour la compréhension ou l'interprétation de gestes post-mortem ou l'obtention d'informations sur la chronologie des dépôts. De même en contexte médico-légal, ces données sont rarement exploitées alors que leur apport pourrait être considérable.

#### ➤ Les liaisons anatomiques

Duday (1987) a mis en évidence deux types de liaisons ostéologiques observables lors de l'analyse d'un ensemble osseux : Les liaisons de premier et de deuxième ordre.

- **L'observation des liaisons anatomiques de premier ordre**, nécessitent d'être présent sur le terrain pour les observer (au moment de la fouille ou de la levée du squelette). Il s'agit des connexions anatomiques. Dans un contexte de carbonisation, il est absolument nécessaire que le dégagement des os soit mené avec la plus grande des précautions afin de les mettre en évidence.
- **Les liaisons anatomiques de deuxième ordre**, sont établies lors de l'analyse de l'ensemble osseux au laboratoire. Elles sont de différents types et peuvent concerner le collage de fragments jointifs, des relations de symétrie, une contiguïté articulaire<sup>15</sup>, l'appartenance à un même ensemble pathologique ou au même stade de maturation.

---

<sup>15</sup> Comme tous les vertébrés, l'homme possède un squelette composé d'os pairs et impairs. Les liaisons par symétrie ne concernent que les os pairs alors que les contiguïtés articulaires concernent à la fois les os pairs et les os impairs.

Elle nécessite une prise en compte globale des caractéristiques osseuses suivantes :

- la **forme** et la **disposition** des surfaces articulaires ou des reliefs osseux ;
- la **robustesse** des reliefs osseux ;
- les **dimensions de l'os** ;
- la **texture de l'os** (cortical et spongieux) ;
- la **couleur des fragments**<sup>16</sup> ;
- le **poids ou la densité de l'os**<sup>17</sup>.

### ➤ Les exclusions anatomiques

Il existe majoritairement deux types d'exclusions : les doublets (qui peuvent également être des triplés, quadruplés etc.) et les incompatibilités.

Les mêmes critères de prise en compte globaux peuvent être utilisés afin de mettre en évidence ces exclusions :

- la **forme** des reliefs osseux,
- la **robustesse**,
- les **dimensions** de l'os et les **critères de maturation osseuse**,
- la **texture**, la couleur, le poids, la densité ...

Plusieurs types d'incompatibilités doivent être recherchés :

- les **incompatibilités d'âge**,
- les **incompatibilités de sexe**,
- les **incompatibilités de robustesse**,
- les **incompatibilités pathologiques**,
- les **incompatibilités par dissymétrie**,
- les **incompatibilités de texture, couleur, poids** ou densité osseuse,
- les **incompatibilités** selon les critères d'action sur l'os (**taphonomiques** ou dans le cas qui nous intéresse selon les **critères de crémation**).

Une analyse des liaisons et des exclusions ostéologiques a été réalisée par Henri Duday sur le site de Porta Nocera à Pompéi, de Porta Mediana à Cumes, de Santa Rosa au Vatican et est toujours en cours pour le site du Tophet de Salammbô à Carthage.

Nous avons choisi dans le cadre de cette étude d'analyser l'ensemble des données ayant été obtenues pour le site de Pompéi et du Vatican.

Pour chacun des deux sites, nous avons tenté de mettre en évidence, pour l'ensemble des structures funéraires étudiées :

---

<sup>16</sup> Attention toutefois, il convient d'être prudent concernant le critère de couleur des fragments. Dans un contexte de crémation en raison des phénomènes de fragmentations induits par la chaleur, certains fragments vont chauffer plus que d'autres et peuvent conduire à des erreurs d'interprétation.

<sup>17</sup> De la même façon que pour le critère « coloration », le critère « poids » ou « densité osseuse » est délicat à utiliser en contexte de crémation en raison de modification que nous avons pu détailler dans le premier chapitre de cet ouvrage.

- La **présence ou l'absence de critères d'exclusion** et du **type d'exclusion** qui avaient conduit à majorer le nombre minimum d'individus.
- La **présence de liaisons avec une autre structure ou une autre unité stratigraphique que le dépôt initial** et le **type de liaison anatomique** retrouvé entre différentes structures. Un gradient de fiabilité a été intégré : du plus fiable au moins fiable, le collage, la liaison par symétrie et la liaison par concordance selon des critères morphologique, taphonomique ou des données relatives aux critères de crémation.

Pour la nécropole de Porta Nocera et Santa Rosa, le nombre de fragments associé à chaque région anatomique du bloc crânio-facial, du squelette infra crânien et des dents, impliqués dans chaque type de liaisons ou d'exclusions décrites ci-dessus a été comptabilisé.

Nous avons pu déterminer quels étaient les types de liaisons ou d'exclusion retrouvées le plus fréquemment et quels étaient les fragments d'intérêts à prendre en compte de façon préférentielle pour ce type d'analyse chez des individus brûlés.

## D. Établissement d'une fiche méthodologique

---

Enfin, l'objectif de notre étude était de proposer un protocole méthodologique simplifié rédigé en deux volets : le premier à destination des enquêteurs pour la levée de corps, le second destiné aux médecins légistes en charge de l'analyse anthropologique.

L'établissement de ce protocole a fait l'objet de discussions pluridisciplinaires entre anthropologues, archéologues, topographes, enquêteurs, personnels d'identifications criminelles et médecins légistes.

Il est notamment adapté aux contraintes de matériel et de temps dont nous pouvons disposer pour une levée de corps.

---

## *Résultats*

---

## A. La détermination anatomique du fragment osseux brûlé

---

### 1. Données générales

---

Nous avons pris en compte lors de cette étude, les fragments d'os provenant de 263 structures funéraires, issues des quatre sites archéologiques précédemment décrits. Il s'agissait toujours de crémation. Toutes les inhumations ont été exclues. Dans chaque structure funéraire analysée, le NMI était compris entre 1 et 19 individus. Le nombre total de fragments d'os était de 277509. 225619 fragments appartenaient à des individus de taille adulte, 48399 étaient des fragments osseux d'individus immatures incluant des périnataux et 3491 étaient des fragments dentaires (dents définitives et déciduales).

Concernant chacun des différents sites, 129073 fragments provenaient de la nécropole de Porta Nocera à Pompéi, 40130 de la nécropole de Porta Mediana à Cumes, 80073 de la nécropole de Santa Rosa au Vatican et 28233 du Tophet de Salammbô à Carthage. La distribution de l'effectif total des fragments osseux est présentée dans le tableau 14.

	BCF adulte	Mandibule adulte	Infra crânien adulte	Dents	BCF immature	Mandibule immature	Infra crânien immature	TOTAL
Pompéi	14800	741	98875	1688	3257	96	9616	<b>129073</b>
Cumes	5583	425	31235	398	562	13	1914	<b>40130</b>
Vatican	9050	429	64481	674	965	50	4424	<b>80073</b>
Carthage	0	0	0	731	9966	239	17297	<b>28233</b>
<b>TOTAL</b>	<b>29433</b>	<b>1595</b>	<b>194591</b>	<b>3491</b>	<b>14750</b>	<b>398</b>	<b>33251</b>	<b>277509</b>

Tableau 14 : distribution des effectifs de l'ensemble des fragments osseux pris en compte pour les quatre sites inclus dans notre étude (BCF = Bloc crânio-facial).

Concernant les résultats obtenus à partir des données des individus adultes, nous présenterons dans un premier temps les résultats obtenus pour le site de Porta Nocera, que nous détaillerons, puis nous effectuerons des comparaisons avec les résultats obtenus pour les sites de Cumes et du Vatican.

Nous traiterons dans un second temps les données concernant les individus immatures de Pompéi, Cumes et du Vatican d'une manière globale, compte tenu de la taille de l'échantillon. Enfin, les données relatives aux individus périnataux de Carthage seront traitées isolément et feront l'objet d'un dernier chapitre.

## 2. Pompéi : Porta Nocera

### a) Observations générales

Le nombre total de fragments (hors esquilles) appartenant à des individus de taille adulte que nous avons pris en compte est de 114416 (hors fragments dentaires) pour une masse totale de 102173,8 g.

L'histogramme de la figure 45, représente le nombre de fragments se rapportant à chaque région anatomique. Les fragments dont l'origine anatomique était indéterminée ont été classés selon leurs critères morphologiques en trois catégories : « os plats », « os courts » et fragments de « diaphyses indéterminées ».

En termes d'effectifs, les fragments les plus représentés sont :

- les os plats (N=26774 ; 23,4 %),
- les côtes (N=17864 ; 15,6%),
- les fragments de bloc crânio-facial hors mandibule (N=14800 ; 12,9%),
- les fragments de diaphyses indéterminées (N=14460 ; 12,6%),
- les os courts (N=14186 ; 12,4%).

Ces cinq catégories anatomiques sont largement majoritaires. À elles seules, elles représentent 77% de l'échantillon total. Parmi elles, 55420 fragments sont des « indéterminés », ce qui représente près de la moitié de l'échantillon (48,43 %). Toutefois, en termes de poids, ils sont minoritaires et ne représentent que 21687 g soit 21,3 % de l'échantillon.

Parmi les fragments dont l'origine anatomique a été identifiée avec certitude, les plus représentés sont les fragments de côtes et les fragments issus du crâne (32464 fragments soit près de 30 % de cet échantillon).

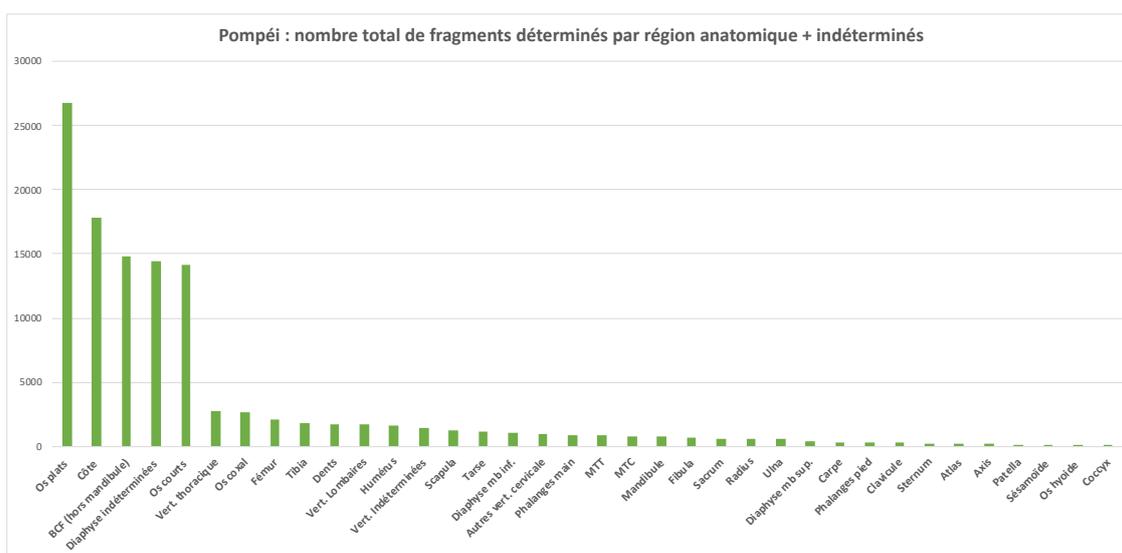


Figure 45 : nombre de fragments « identifiés » appartenant à chaque région anatomique. Les fragments « non identifiés » sont classés comme « indéterminés » et sont distribués selon des critères morphologiques dans les catégories « os plats » ; « os courts » et « diaphyses indéterminées ».

La figure 46 correspond aux mêmes données, mais selon une représentation simplifiée. Les fragments indéterminés ont été exclus. Les fragments des grands os longs des membres (humérus, radius, ulna, fémur, tibia, fibula) et les fragments de diaphyses identifiées comme appartenant aux membres supérieurs ou aux membres inférieurs, ont été regroupés en une seule catégorie « Grands os longs des membres ». L'atlas, l'axis, les autres vertèbres cervicales, les vertèbres thoraciques et lombaires ont été regroupés dans la catégorie « Vertèbres ».

Sur cet histogramme, il est à nouveau possible d'observer les régions anatomiques les mieux représentées : les côtes (N=17664 ; 30,6 %) et le bloc crânio-facial (N=14800 ; 25,7%). Les grands os longs des membres apparaissent à la troisième place (N=8915 ; 14,5%), suivis des fragments de vertèbres et de l'os coxal. Il est à noter que les vertèbres dépassent largement les 5000 fragments identifiés (effectif total de 5809 fragments), soit 10% des fragments déterminés de cet échantillon.

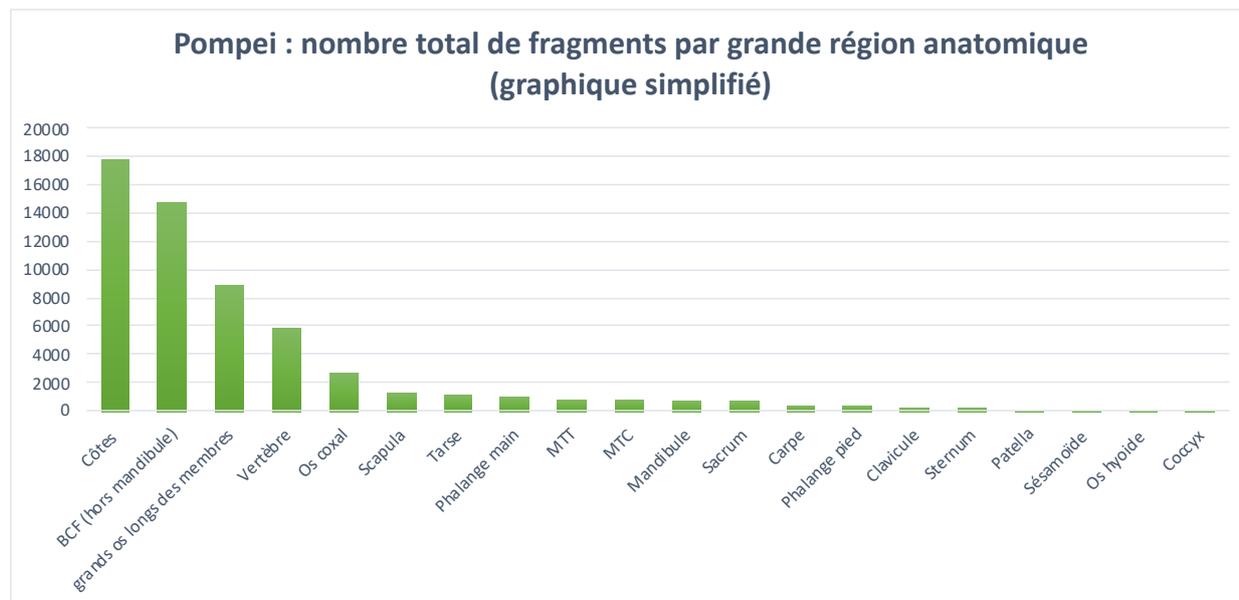


Figure 46 : représentation simplifiée des effectifs par grandes régions anatomiques. Les fragments qui n'ont pas pu être identifiés de façon précise ont été exclus. Tous les fragments appartenant à l'humérus, au radius, à l'ulna, au fémur, au tibia et à la fibula ainsi que les fragments classés « diaphyses membres sup. » et « diaphyses membres inf. » ont été regroupés dans la catégorie « grands os longs des membres ». L'atlas, l'axis, les autres vertèbres cervicales, les vertèbres thoraciques et lombaires ont été regroupés dans la catégorie « Vertèbres ».

Pour chaque région anatomique potentiellement latéralisable, nous avons calculé un taux de latéralisation selon la formule suivante :

$$\% \text{ lat} = (\text{Nb lat} / \text{Nb tot}) \times 100$$

% lat correspond au taux de latéralisation ;

Nb lat au nombre de fragments d'une région anatomique identifié et latéralisé ;

Nb tot au nombre de fragments total identifié dans une région anatomique.

Si l'on ne s'intéresse plus seulement à l'effectif des fragments, mais à l'information qu'ils portent en termes d'identification, exprimée à travers ce taux de latéralisation, associé à chaque région anatomique, on obtient les résultats suivants : les fragments qui affichent les meilleurs taux de latéralisation sont les os du carpe (61,6 %), la patella (58,7 %), les os du tarse (52,8%), les fragments latéralisables de mandibule (50,4 %) et la clavicule (49,5 %).

Ces données sont représentées graphiquement dans la figure 47.

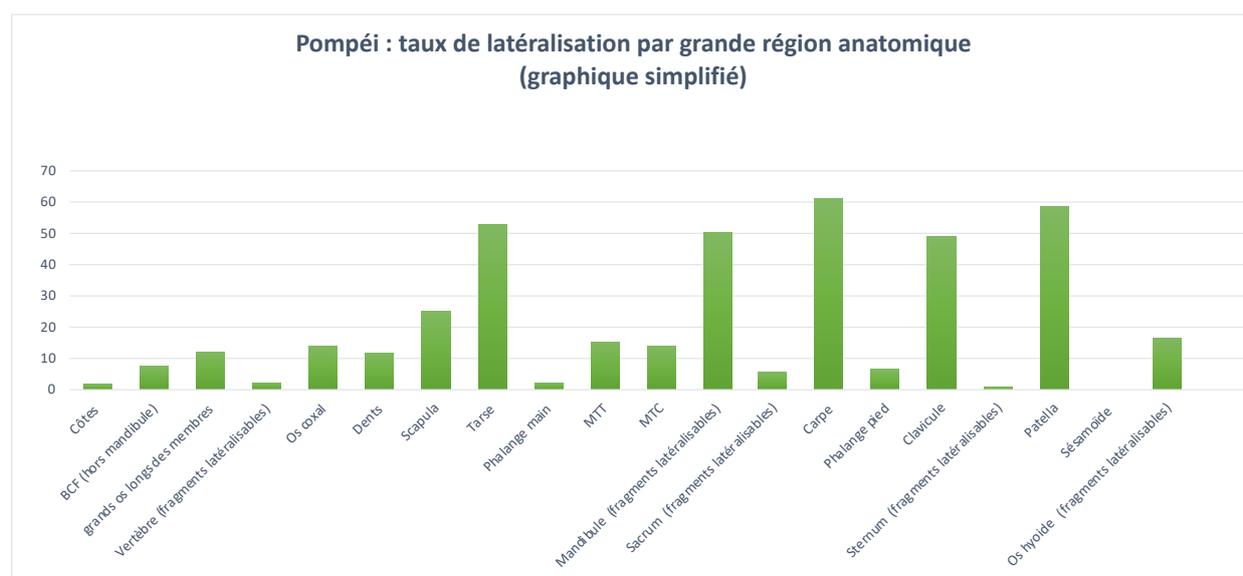


Figure 47 : représentation simplifiée des taux de latéralisation par grandes régions anatomiques. Les fragments indéterminés ont été exclus. Il s'agit des mêmes régions anatomiques que celles représentées sur la figure 46 et dont l'ordre a été respecté : de gauche à droite les effectifs des fragments sont décroissants.

### b) Observations générales relatives au squelette crânien

De très nombreux fragments ont été attribués avec certitude au squelette crânien (n=15541), mais la très grande majorité d'entre eux n'a pas pu être localisée de façon plus précise (n=12236). Ils ont donc été attribués à la catégorie générale « voûte/face/base ».

En dehors de ces fragments que l'on pourrait également qualifier « d'indéterminés crâne », les effectifs les plus importants concernent la mandibule (n=741), l'os temporal (n=589), l'os maxillaire (n=326), l'os frontal (n=283), l'os occipital (n=243), l'os zygomatique (n=182) et l'os sphénoïde (n=167). Ces données peuvent être visualisées sur les figures 48 et 49.

Les taux de latéralisation relatifs à chaque région anatomique ont également été calculés. L'histogramme de la figure 50 présente ces données : l'os nasal (89,58 %), l'os zygomatique (76,7 %), l'os pariétal (67,2 %), l'os temporal (64,3 %), l'os maxillaire (54,4 %) et les régions latéralisables de mandibule (50,44 %) offrent les meilleurs scores de latéralisation. Toutefois, le pourcentage de latéralisation très élevé de l'os nasal a attiré notre attention. En effet, ce résultat présente un biais : la plupart du temps lorsque l'os nasal est identifié, le côté droit et le côté gauche sont encore soudés. Cela majore artificiellement le taux de latéralisation de ce fragment osseux. Il a donc été recalculé, en ne prenant en considération que les fragments d'os nasaux

retrouvés isolés. Le taux de latéralisation corrigé est de 37,5 %. Le nouvel histogramme est présenté en figure 51.

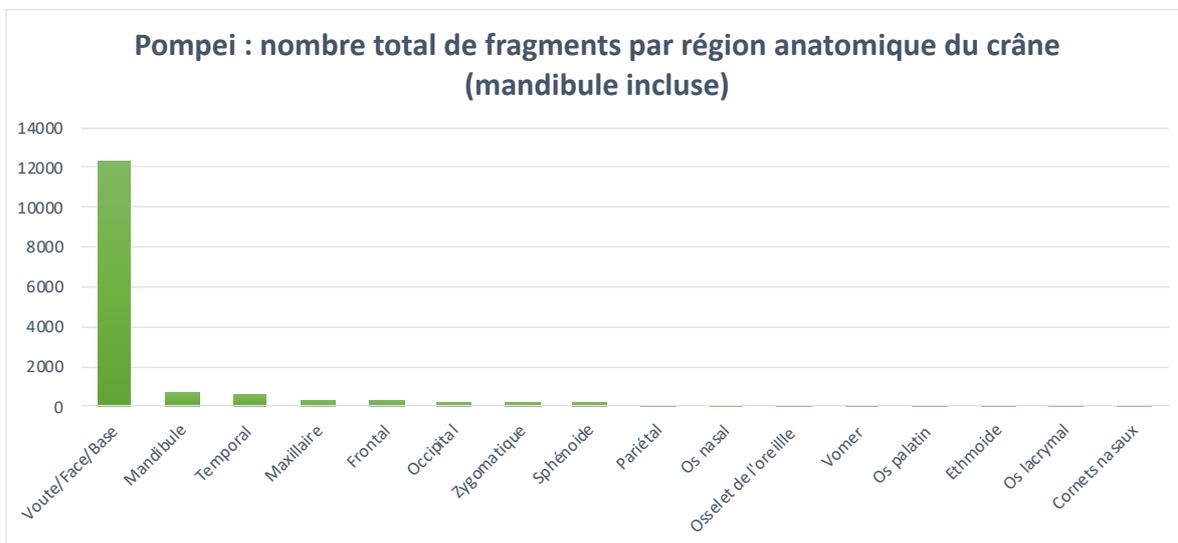


Figure 48 : effectif des fragments par région anatomique du bloc crânio-facial. Les fragments non identifiés de façon précise sont classés dans la catégorie « Voute/face/base ».

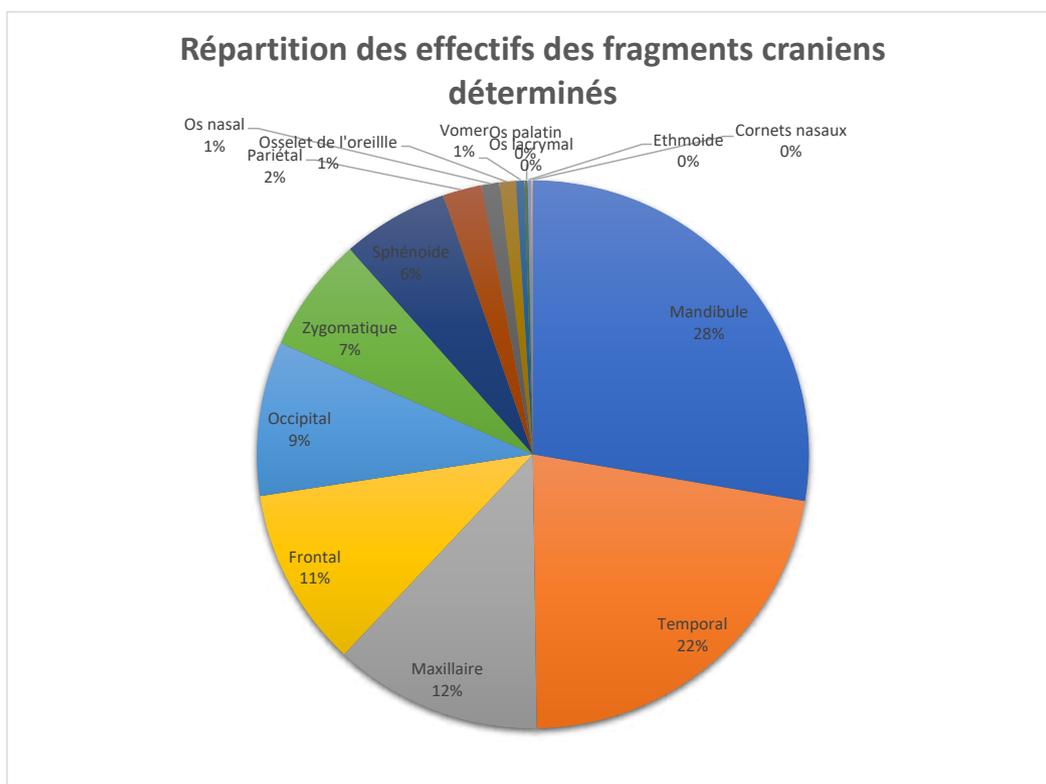
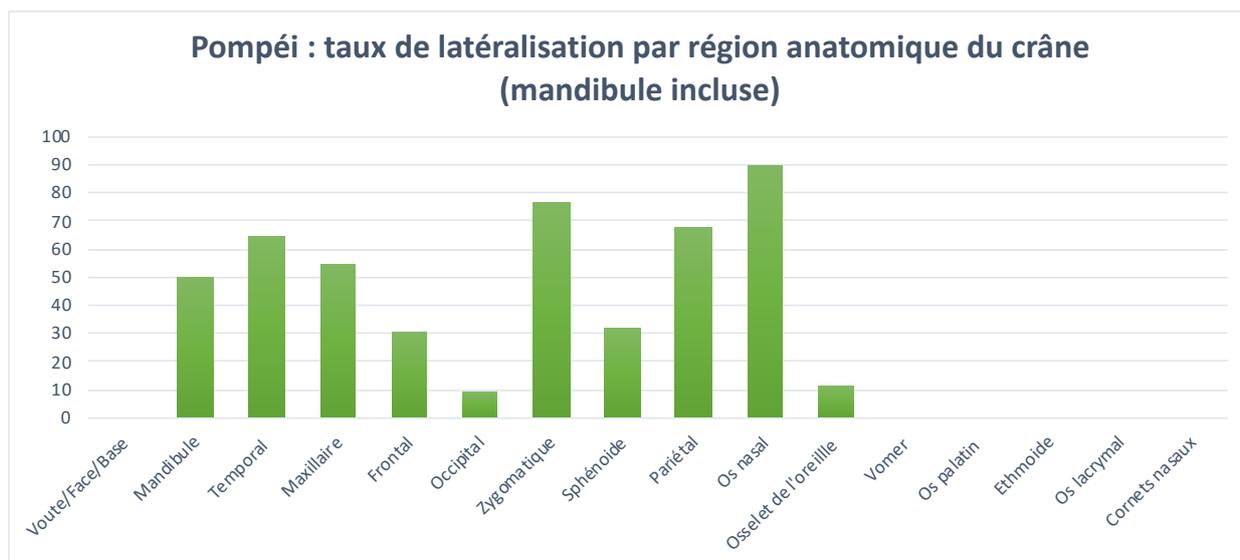
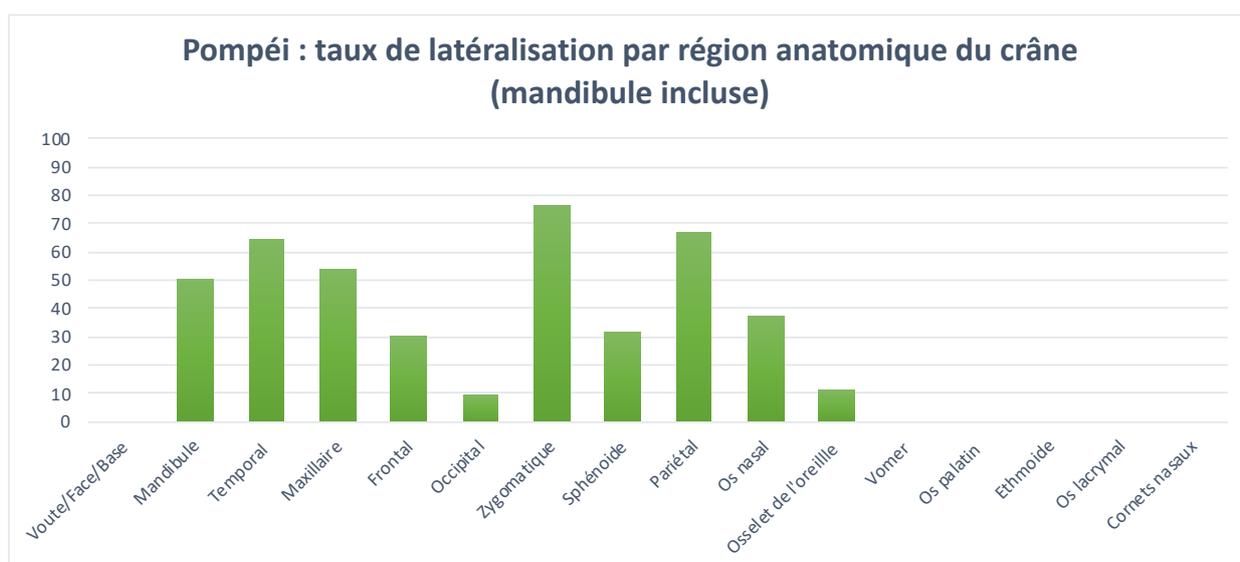


Figure 49 : représentation graphique de la répartition des effectifs des fragments crâniens déterminés de façon précise (mandibule incluse).



**Figure 50 : taux de latéralisation des fragments crâniens par région anatomique. Les fragments non identifiés de façon précise sont classés dans la catégorie « Voute/face/base ».**



**Figure 51 : taux de latéralisation des fragments crâniens par région anatomique, version corrigée. Seuls les os nasaux retrouvés isolés ont été pris en compte pour le calcul du taux de latéralisation. Les fragments non identifiés de façon précise sont classés dans la catégorie « Voute/face/base ».**

### *c) Observations générales relatives au squelette infra crânien*

Considérant le squelette infra crânien, il nous semblait opportun de rechercher des informations concernant les grands os longs des membres. Ce sont avec les fragments de crâne, les os qui sont préférentiellement ramassés sur les scènes de découverte de cadavres carbonisés.

Si l'on compare le nombre de fragment total et le nombre de fragments latéralisés, on observe qu'en terme d'effectif ces fragments sont nombreux et bien reconnus de façon générale, en

revanche le nombre de fragments latéralisés est très faible (figure 52), voire négligeable si l'on ne prend en compte que les diaphyses (figure 53).

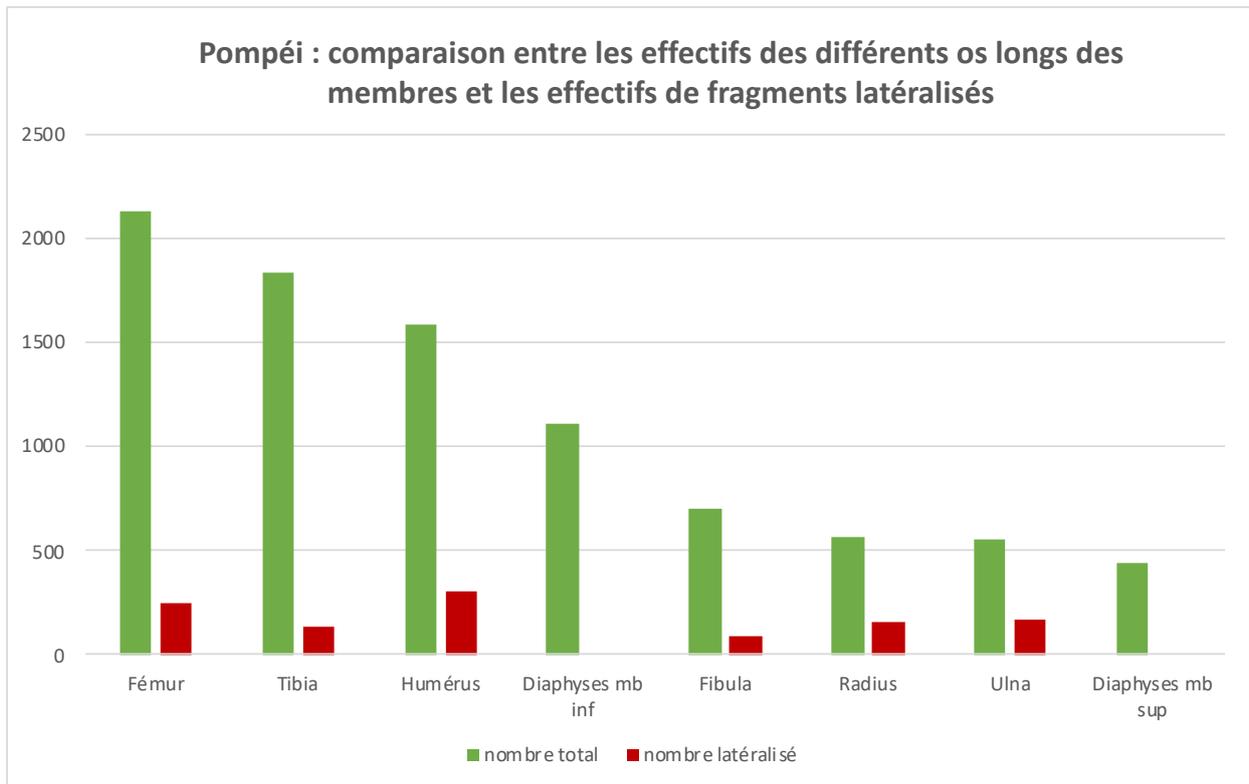


Figure 52 : histogramme comparatif permettant de visualiser la différence entre le nombre total de fragments d'os longs identifiés et le nombre de fragments latéralisés pour chacune de ces régions anatomiques.

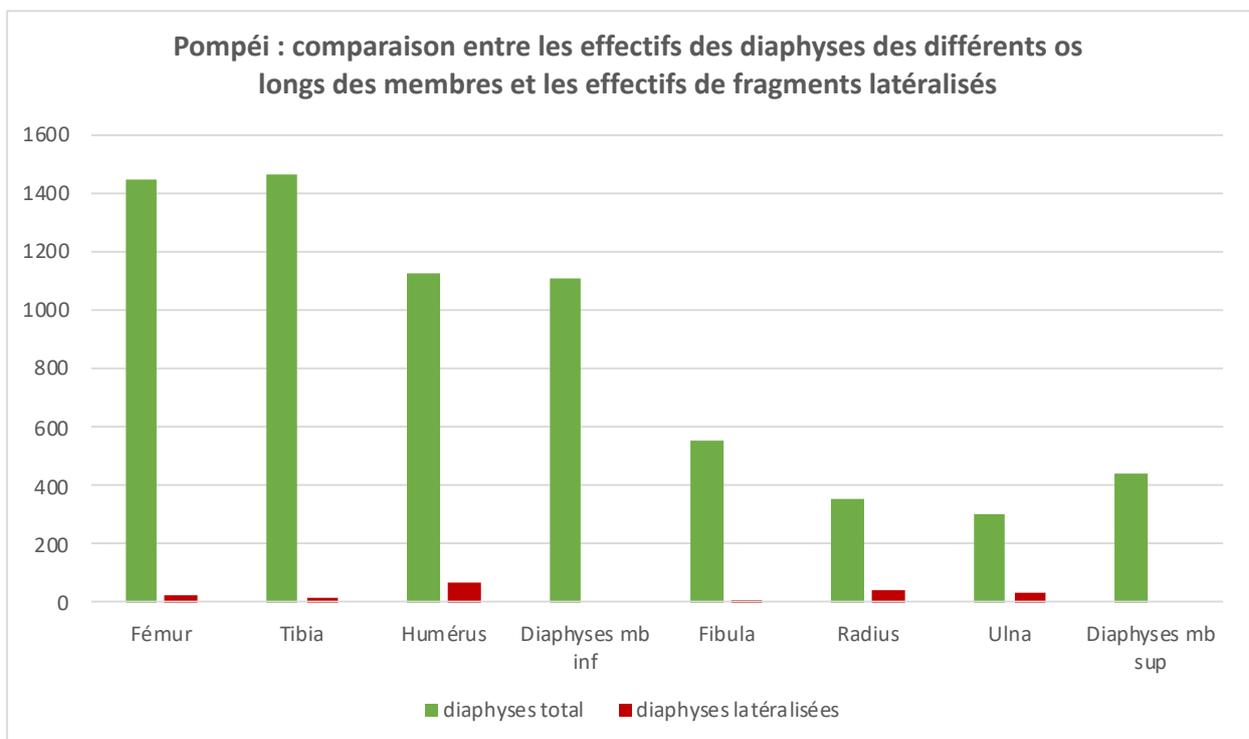


Figure 53 : histogramme comparatif permettant de visualiser la différence entre le nombre total de fragments de diaphyses d'os longs identifiés et le nombre de fragments latéralisés pour chacune d'elles.

Dans cette première partie nous avons pu observer une tendance générale relative à l'ensemble des fragments analysés : ceux qui étaient les plus nombreux, les plus identifiés et les mieux latéralisés.

Nous allons maintenant tenter d'analyser plus précisément les régions anatomiques ayant obtenu les meilleurs scores d'effectifs et de latéralisation. Nous débuterons par le crâne puis nous observerons ensuite la tendance pour le squelette infra crânien.

#### *d) Analyse détaillée des différentes régions anatomiques*

---

### **(1) Le bloc crânio-facial et la mandibule**

Comme nous l'avons observé dans la section précédente (figure 44), les fragments de l'extrémité céphalique les plus fréquemment identifiés (effectifs > 100 fragments) sont ceux de la mandibule, l'os temporal, l'os maxillaire, l'os frontal, l'os occipital, l'os zygomatique et l'os sphénoïde.

Nous allons rechercher pour chacun d'entre eux, les régions anatomiques qui pourraient être les plus informatives en termes d'identification.

#### **➤ La mandibule (figure 54)**

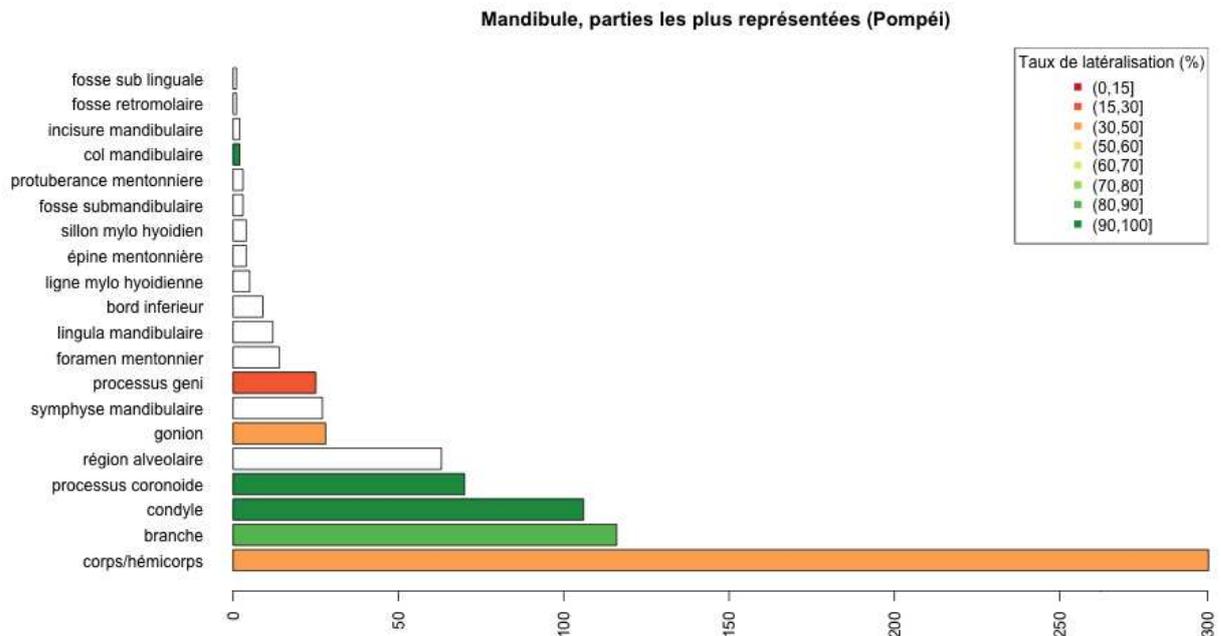
La mandibule comporte des régions anatomiques caractéristiques qui font d'elle un os particulièrement identifiable et reconnaissable :

- les alvéoles dentaires,
- les épines mentonnières ou processus geni,
- les foramens mentonniers,
- la lingula mandibulaire,
- la symphyse mandibulaire,
- la région du gonion ou l'angle goniale,
- la branche mandibulaire comportant le condyle et le processus coronoïde.

Même s'il ne s'agit pas d'un os pair, elle présente des régions latéralisables qui offrent un score global de 50,4 %.

Certaines zones sont particulièrement intéressantes, on peut citer les régions des condyles et des processus coronoïdes (respectivement 95,3 % et 91,4 %).

Le score de 100 % obtenu pour la région du col mandibulaire est à nuancer, en raison de son effectif très faible, mais la branche mandibulaire de façon générale semble un très bon élément puisqu'elle est bien représentée (n=116) avec un taux de latéralisation atteignant 89,7%.



**Figure 54 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la mandibule. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

### ➤ L'os temporal (figure 55)

À Porta Nocera, l'os temporal est l'os du crâne le mieux représenté après la mandibule.

Il comporte également plusieurs régions anatomiques caractéristiques hautement reconnaissables et donc performantes du point de vue de l'identification :

- la région pétreuse,
- la région du conduit auditif externe,
- le processus zygomatique de l'os temporal,
- les condyles temporaux,
- le processus mastoïde.

Il apparaît de façon très nette sur l'histogramme de la figure 55, que chacune de ces régions est très informative puisqu'elles présentent toutes des taux de latéralisation compris entre 60% et 100% (91 % pour le conduit auditif externe et 87 % pour la région pétreuse).

### ➤ L'os maxillaire (figure 56)

Les fragments d'os maxillaire semblent bien identifiés de façon générale, avec 323 fragments reconnus comme « Maxillaire », sans plus de précision sur la région anatomique ayant permis la détermination. Deux régions anatomiques semblent toutefois donner des indices quant à l'origine de l'os :

- la région des alvéoles dentaires (très reconnaissable, comme dans le cas de la mandibule),
- le processus frontal de l'os maxillaire.

Le taux global de latéralisation est plutôt élevé (62,8 %) avec deux régions remarquables : le processus frontal (96,5 %) et la tubérosité maxillaire (90 %).

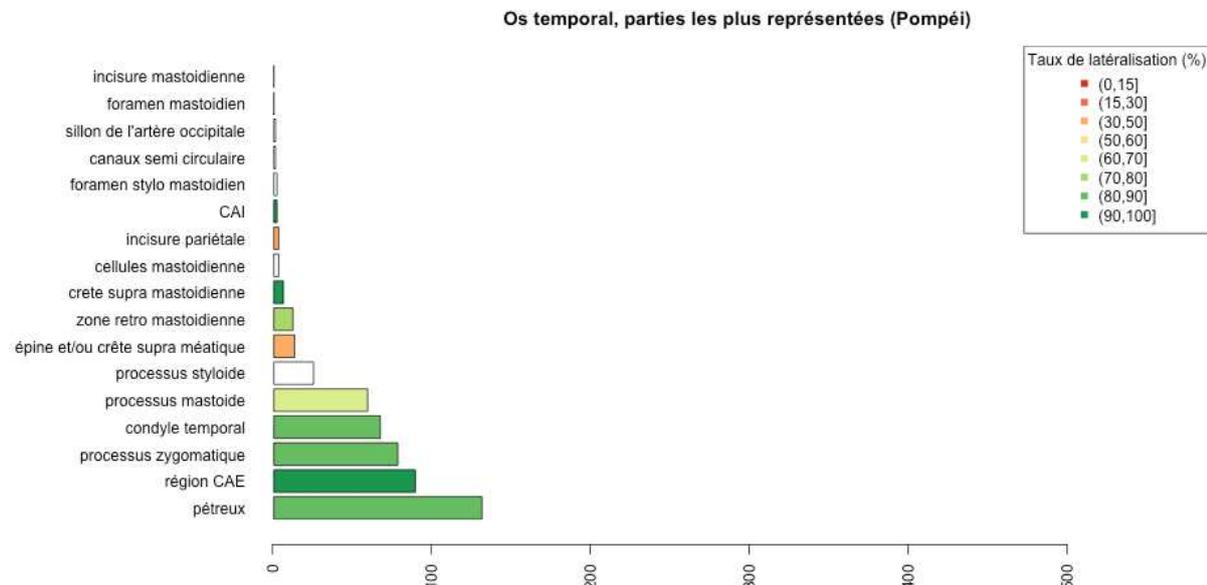


Figure 55 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os temporal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

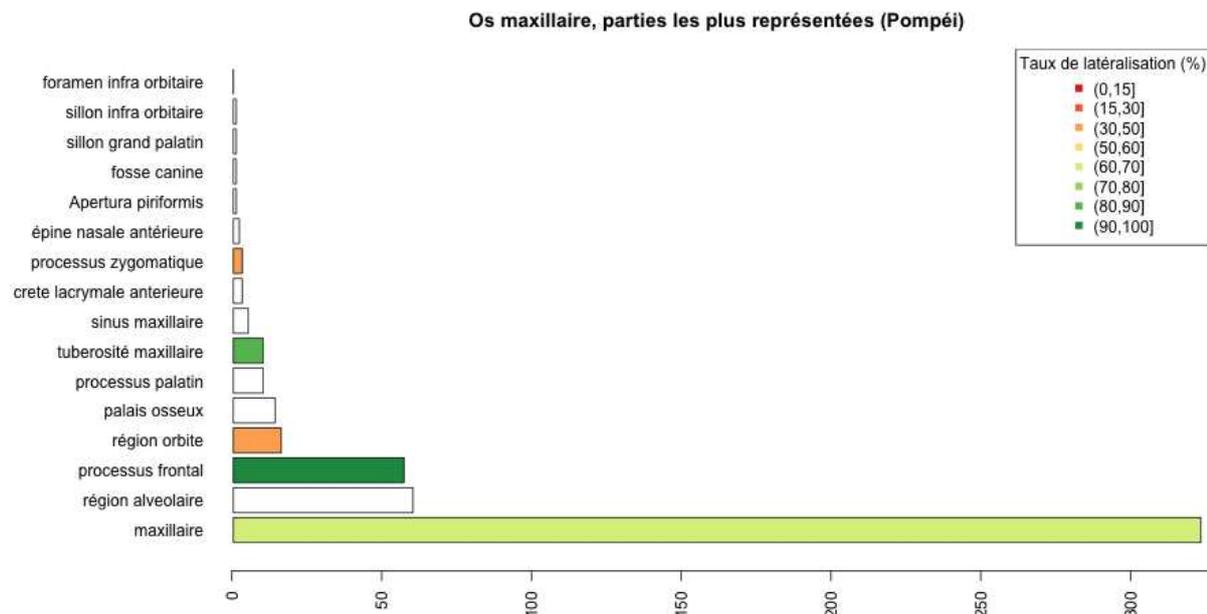


Figure 56 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os maxillaire. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

## ➤ L'os frontal (figure 57)

Parmi les fragments de voûte crânienne, l'écaïlle frontale est la région la mieux identifiée. L'os frontal, en effet, présente des caractéristiques anatomiques aisément reconnaissables :

- les processus zygomatiques,
- les régions orbitaires (toit et bords supérieur des orbites),
- la crête frontale médiane,
- la région de la glabelle,
- les sinus frontaux.

Considérant les taux de latéralisation, il est évident que seules les régions paires sont latéralisables. Les régions orbitaires et les processus zygomatiques fournissent de bons résultats, à la fois en termes d'effectifs et de taux de latéralisation (respectivement 50 % et 88,7 %). Cependant, il est important de noter que des régions impaires et médianes telles que la glabelle ou la crête frontale médiane, peuvent également présenter un réel intérêt dans la mise en évidence d'exclusions, pour le calcul du nombre minimum d'individus ou dans la recherche des liaisons anatomiques.

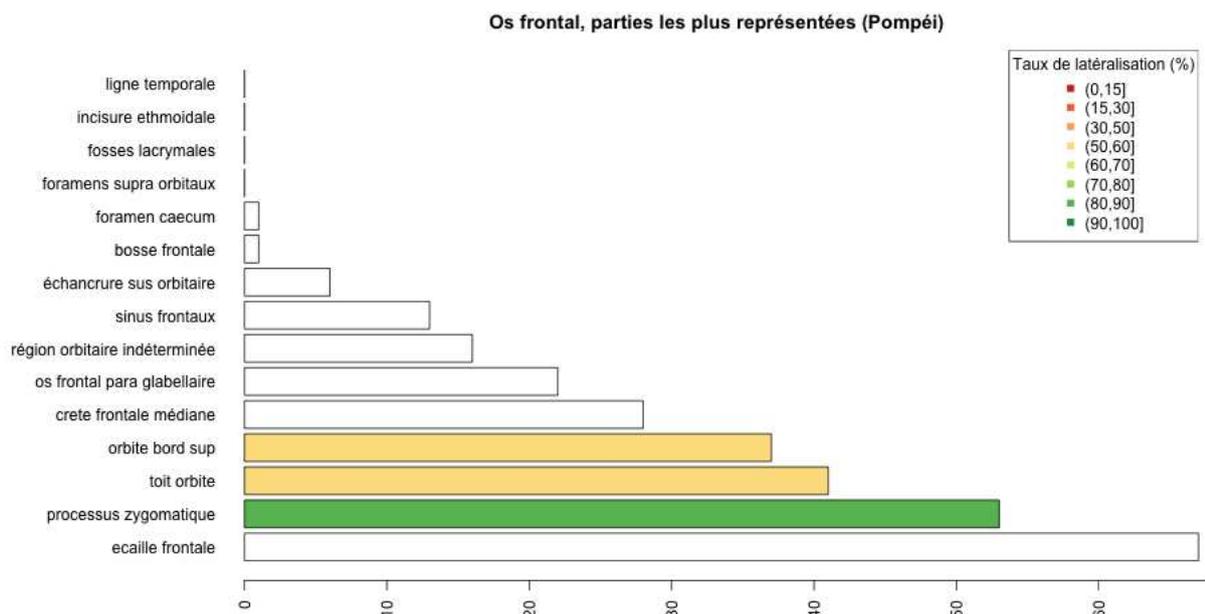


Figure 57 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os frontal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

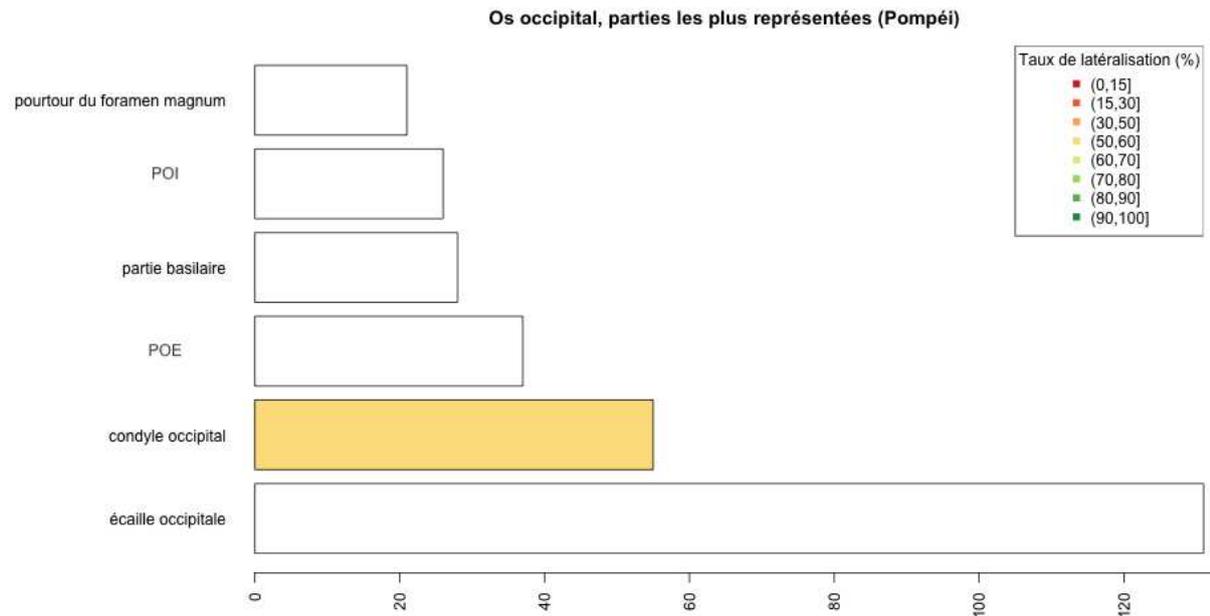
## ➤ L'os occipital (figure 58)

L'os occipital est le troisième os de la voûte crânienne le plus représenté et le plus reconnu.

Les fragments « d'écaïlle occipitale » sans plus de précision, sont les plus nombreux, mais on peut facilement extrapoler que les reliefs osseux caractéristiques de l'écaïlle occipitale ont favorisé leur identification, même s'ils n'apparaissent pas dans les notes.

La seule région anatomique pour laquelle il est possible de calculer un taux de latéralisation est le condyle occipital, avec un résultat assez satisfaisant de 54,5 %.

Toutefois, comme dans le cas de l'os frontal, certaines régions impaires telle que la région basilaire ou le pourtour du foramen magnum présentent un intérêt non négligeable dans la recherche d'exclusions ou de liaisons anatomiques.



**Figure 58 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os occipital. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

### ➤ L'os zygomatique (figure 59)

L'os zygomatique est un os de la face, remarquable à la fois par sa représentativité et son taux global de latéralisation (76,7 %). De façon générale, au sein du bloc crânio-facial, il est l'os qui présente le meilleur taux global de latéralisation. Comme l'os maxillaire, il est très bien reconnu de façon générale, sans plus de précision sur ses régions identifiantes. Il semble malgré tout que l'on puisse dégager certaines régions d'intérêts :

- le processus frontal (taux de latéralisation : 92,2 %),
- le processus temporal (taux de latéralisation : 100 %),
- la région de l'arcade zygomatique (taux de latéralisation : 76,9 %).

### ➤ L'os sphénoïde (figure 60)

L'os sphénoïde est le dernier os du crâne à présenter un effectif de fragment supérieur à 100. Les grandes ailes, le corps et les processus ptérygoïde sont les régions les plus aisément identifiables. Les résultats concernant la latéralisation de la grande aile sont toutefois un peu

décevants avec un score de 58,2 %. Le processus ptérygoïde, en revanche, obtient un taux de latéralisation de 76,5 %. Le score de 100 % de latéralisation pour la petite aile du sphénoïde semble anecdotique compte tenu du faible effectif retrouvé.

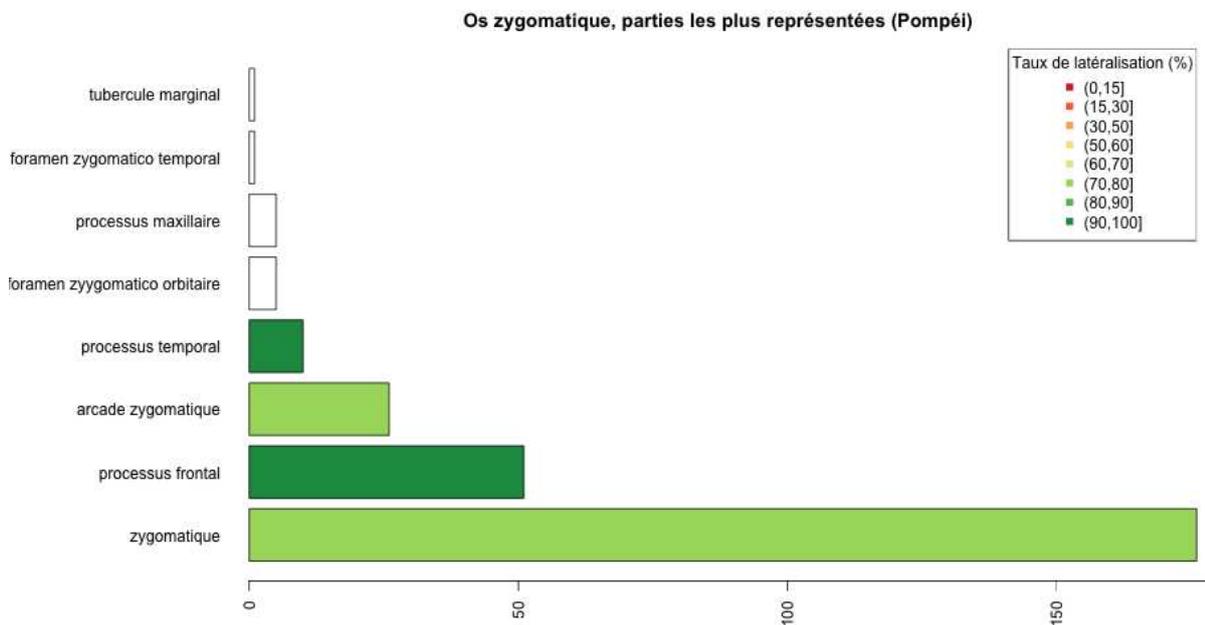


Figure 59 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os zygomatique. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

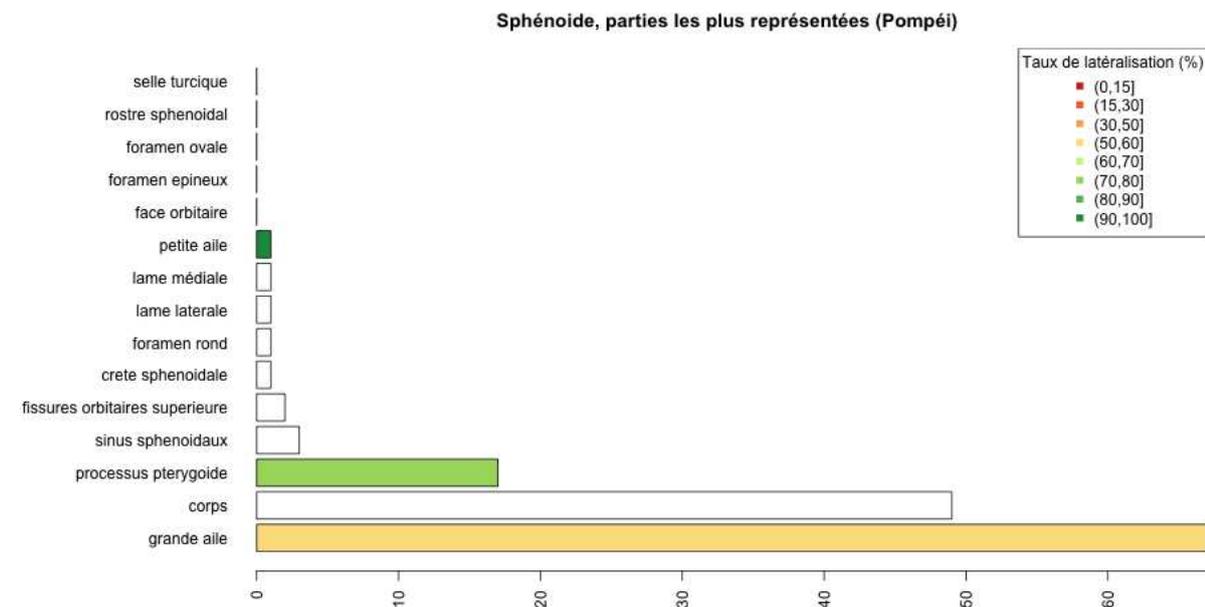


Figure 60 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os sphénoïde. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

## ➤ Et les autres ?

Nous avons détaillé ci-dessus, les résultats obtenus pour les éléments les plus représentés au sein de notre échantillon. Il paraissait opportun de citer un dernier os qui présente le second plus fort taux de latéralisation globale : l'os pariétal avec un score 67,2 % (figure 61). Il est bien reconnu de façon générale, mais il est rarement fait mention de régions anatomiques particulières ayant permis son identification en dehors des empreintes vasculaires à sa face interne ou de la ligne temporale à sa face externe.

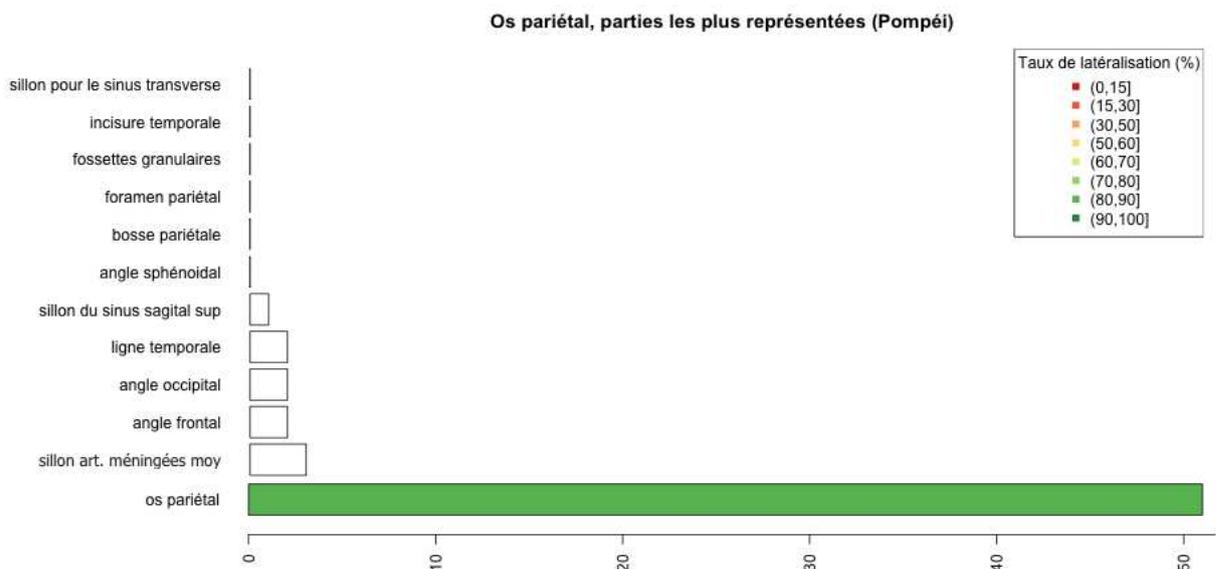


Figure 61 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os pariétal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

## (2) Le squelette infra-crânien

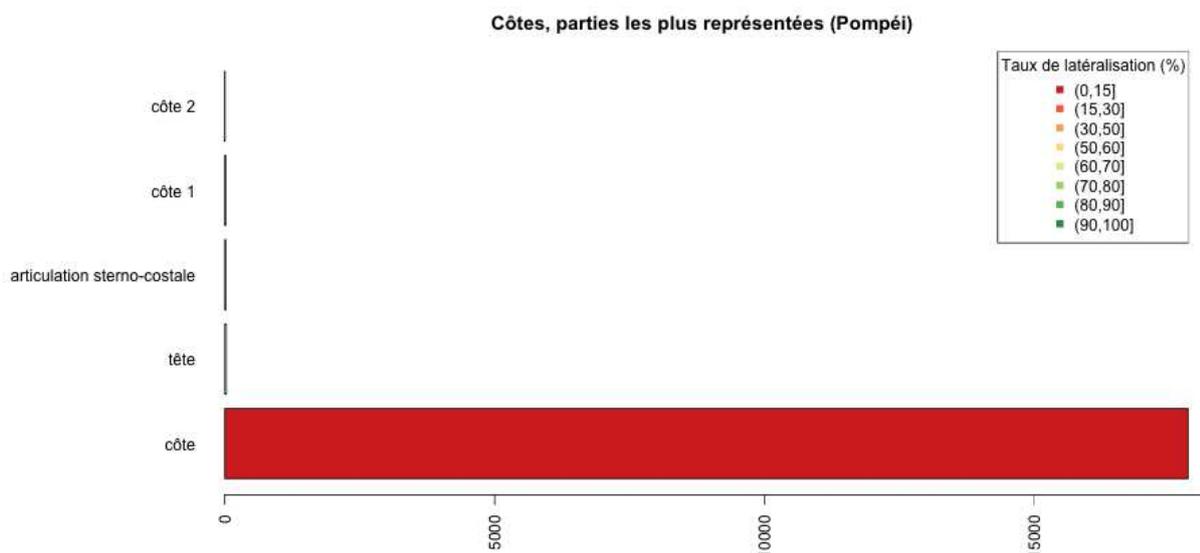
Parmi les fragments issus du squelette infra-crânien, les régions anatomiques les plus représentées sont les côtes, les vertèbres, les grands os longs des membres et l'os coxal. Nous allons donc dans un premier temps observer la tendance de chacune de ces régions anatomiques, puis nous examinerons les autres fragments présentant les taux de latéralisation les plus élevés.

### ➤ Les régions anatomiques les plus représentées

#### Les côtes (figure 62)

Le nombre de fragments identifiés comme « côtes » est considérable. En revanche, l'information portée par l'ensemble de ces fragments est quasiment négligeable. En effet, le taux de latéralisation global obtenu est de 0,1 %.

Deux exceptions sont à prendre en compte : la première et la deuxième côtes, qui, lorsqu'elles sont reconnues, présentent de meilleurs taux de latéralisation (33,3 % et 100 % respectivement). Il faut cependant rester prudent, dans le cas de la deuxième côte, même si ce taux est exceptionnellement élevé, il est à nuancer : la deuxième côte n'a été reconnue qu'à deux reprises sur près de 18000 fragments de côtes identifiés.



**Figure 62 :** effectif total des fragments de côtes. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

### Les grands os longs des membres

Les grands os longs des membres arrivent en troisième position du classement général des fragments les plus représentés avec 8915 fragments identifiés.

Parmi eux, 6808 sont des fragments de diaphyses et présentent des taux de latéralisations médiocres compris entre 1 % et 6 %, à l'exception des deux os de l'avant-bras, le radius et l'ulna qui atteignent respectivement 10,9 et 12,1 %.

Nous avons observé en détail chacun des os longs afin de vérifier si certaines régions anatomiques présentaient de l'intérêt en termes d'identification.

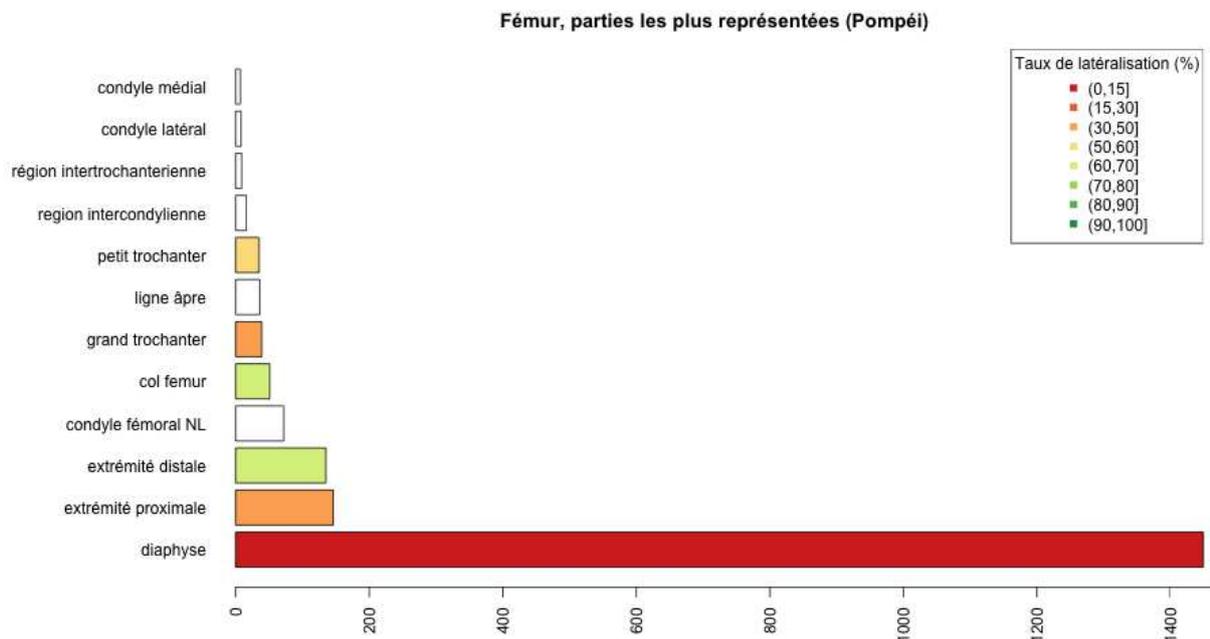
- *Le fémur (figure 63)*

Parmi les fragments identifiés comme « Fémur », les fragments de diaphyses sont largement majoritaires, ils représentent à eux seuls 68 % de l'ensemble des fragments déterminés pour cet os. Néanmoins leur taux de latéralisation est médiocre, calculé à 1,6 %.

Les extrémités proximales et distales, sont plus informatives. Le score calculé pour l'extrémité distale de 61,5 % vs. 47,9 % pour l'extrémité proximale.

On peut également noter deux autres zones d'intérêt au sein des extrémités (scores compris entre 70 % et 30 %) :

- la région du col fémoral,
- les petits et grands trochanters.



**Figure 63 :** effectif total des fragments de fémur. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

○ *Le tibia (figure 64)*

On retrouve pour les fragments de tibia, exactement la même tendance que ceux du fémur :

- une forte représentation de la diaphyse (83,7 %) ;
- un très faible taux de latéralisation (1,2 %) ;
- de meilleurs résultats pour les extrémités proximales et distales (60,6 % et 30,5 % respectivement). Enfin, au sein de l'extrémité proximale, la tubérosité tibiale présente un taux de latéralisation de l'ordre de 40 %.

○ *L'humérus (figure 65)*

Les fragments de l'humérus suivent également la même tendance, mais le pourcentage de latéralisation de la diaphyse est légèrement plus élevé que pour le fémur et le tibia : 5,8 %.

Les extrémités proximales et distales offrent respectivement un score de 37,1 % et 73,3 %, avec des régions d'intérêts à noter au sein de l'extrémité distale :

- la trochlée (taux de latéralisation 50,9 %)
- le capitulum (taux de latéralisation 59,9 %),
- l'épitrôchlée ou épicondyle médial (taux de latéralisation 89,5 %)
- l'épicondyle latéral (taux de latéralisation 100 %).

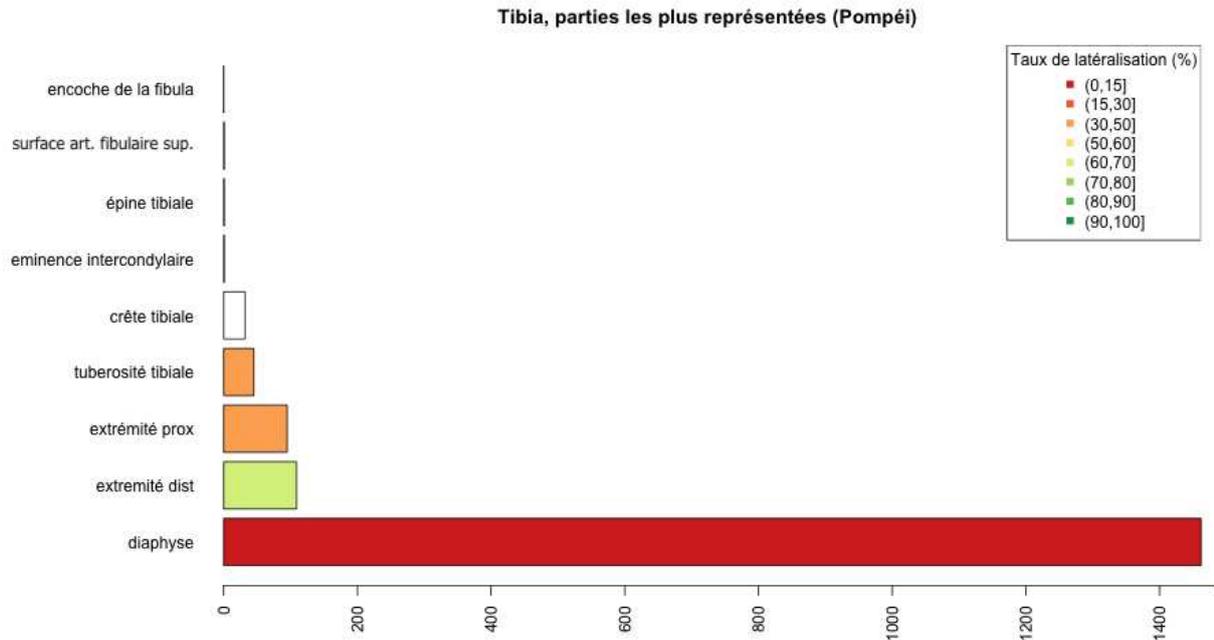


Figure 64 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt du tibia. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

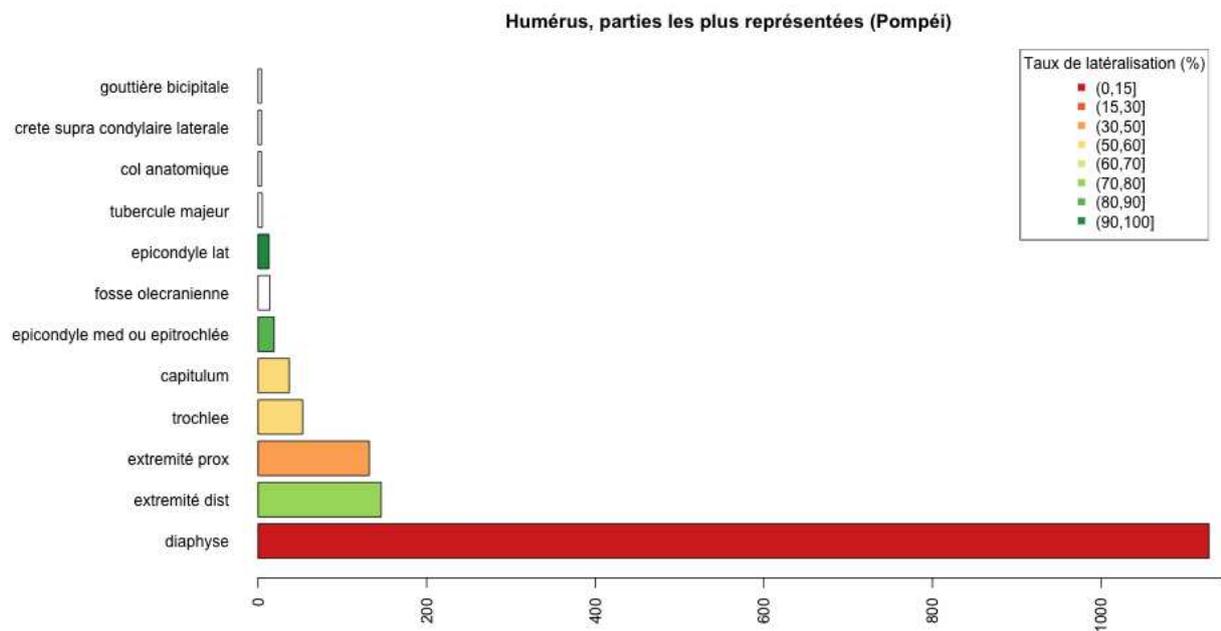
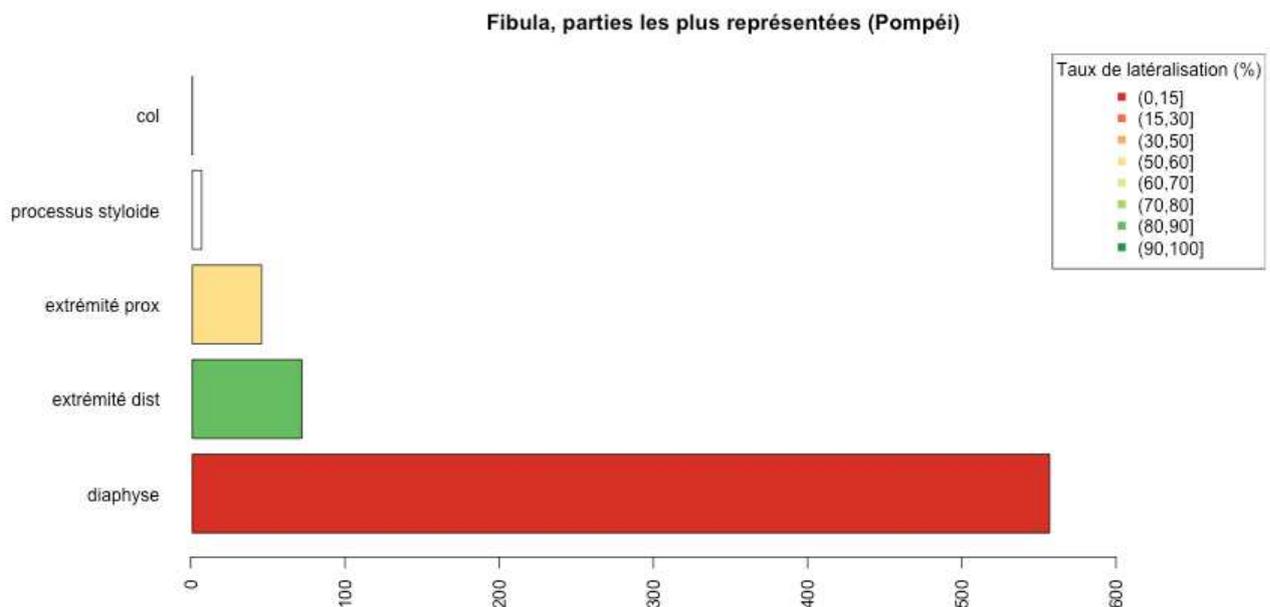


Figure 65 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'humérus. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

○ *La fibula (figure 66)*

La tendance précédente est toujours conservée. Les fragments diaphysaires sont fortement majoritaires (près de 80 %) et leur taux de latéralisation d'environ 2 %. Le score obtenu pour la latéralisation de l'extrémité distale est de 84,5% et celui de l'extrémité proximale 53,3 %.



**Figure 66 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la fibula. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

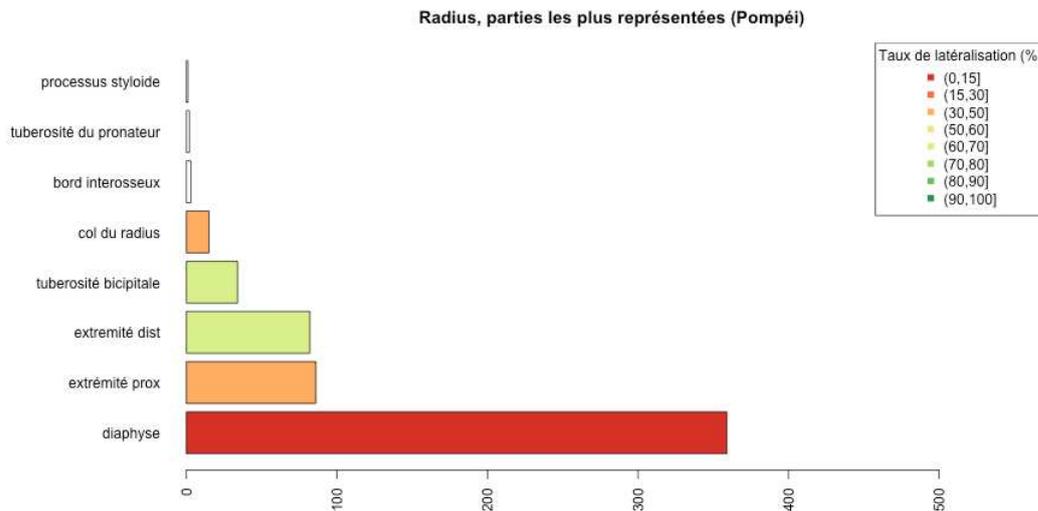
○ *Le radius (figure 67) et l'ulna (figure 68)*

Le radius et l'ulna sont les seuls os longs des membres qui offrent des taux de latéralisation diaphysaires qui dépassent les 10 % (10,9 % et 12,1 % respectivement).

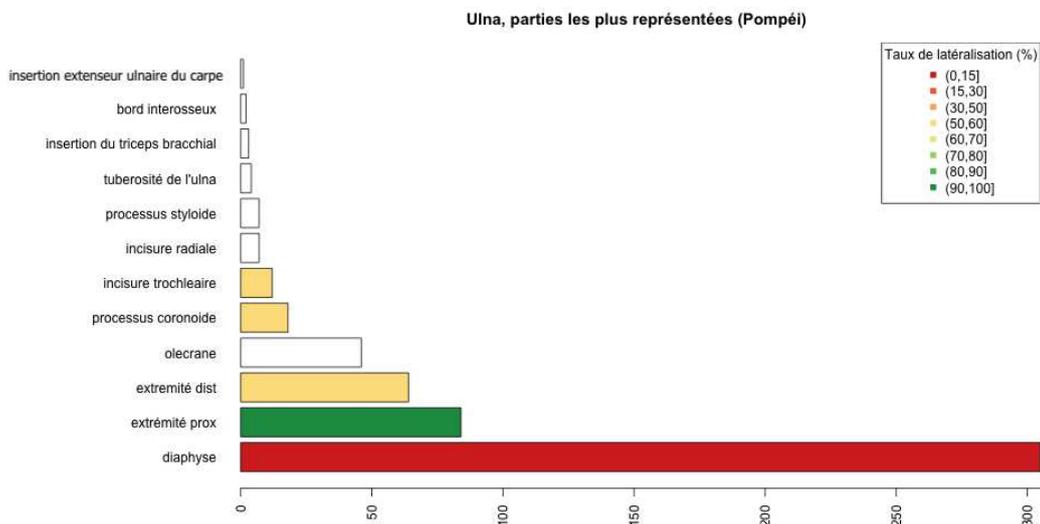
L'ulna, à la différence de tous les autres, présente une extrémité proximale mieux latéralisée que l'extrémité distale (94 % vs 51,6 %).

Les régions anatomiques d'intérêts pour chacun de ces deux os sont :

- la tubérosité bicipitale du radius,
- le col du radius,
- l'olécrane de l'ulna,
- le processus coronoïde de l'ulna,
- l'incisure trochléaire de l'ulna,
- l'incisure radiale de l'ulna.



**Figure 67 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt du radius. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 68 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'ulna. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

## Les vertèbres

Les vertèbres sont globalement très reconnaissables et très bien déterminées en raison de leurs formes et leurs caractéristiques anatomiques.

Elles représentent à elles seules plus de 5800 fragments à Porta Nocera. Néanmoins, pour qu'un fragment vertébral présente un intérêt pour la mise en évidence d'exclusions ou la recherche de liaisons anatomiques, il est indispensable de pouvoir identifier précisément son étage d'origine ainsi que certaines régions anatomiques d'intérêt. Ces dernières sont composées d'éléments uniques reconnaissables (processus épineux de la 7<sup>ème</sup> vertèbre cervicale, processus odontoïde de l'axis) ou latéralisables.

Il est aisément compréhensible que l'intérêt de latéraliser une masse latérale de vertèbre cervicale dont l'étage est inconnu est bien moindre que celui de latéraliser l'une de celles de l'atlas par exemple.

Ainsi, les vertèbres les plus informatives à nos yeux sont sans aucun doute l'atlas et l'axis, en raison de leurs caractéristiques anatomiques singulières.

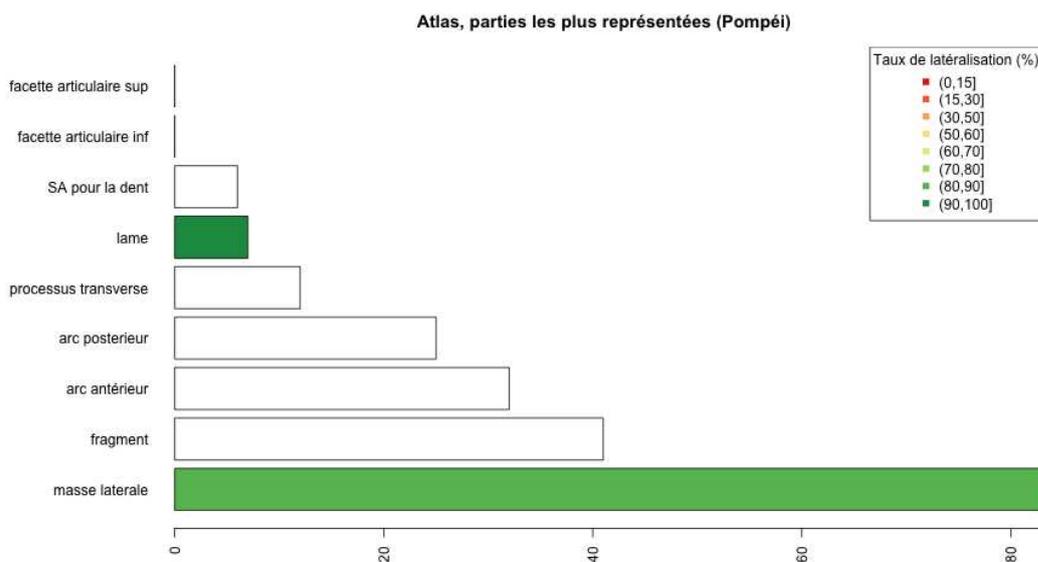
Nous débuterons donc par celles-ci.

○ *L'atlas (figure 69)*

Un total de 187 fragments d'atlas a été identifié.

Un peu plus de 20 % d'entre eux ont été attribué à l'atlas sans autre justification anatomique particulière. Cependant, plusieurs régions anatomiques d'intérêts ont pu être repérées :

- les masses latérales (taux de latéralisation de 85,5 %),
- les arcs antérieurs et postérieurs,
- les processus transverses,
- les lames (taux de latéralisation de 100%),
- la surface articulaire pour la dent de l'axis.



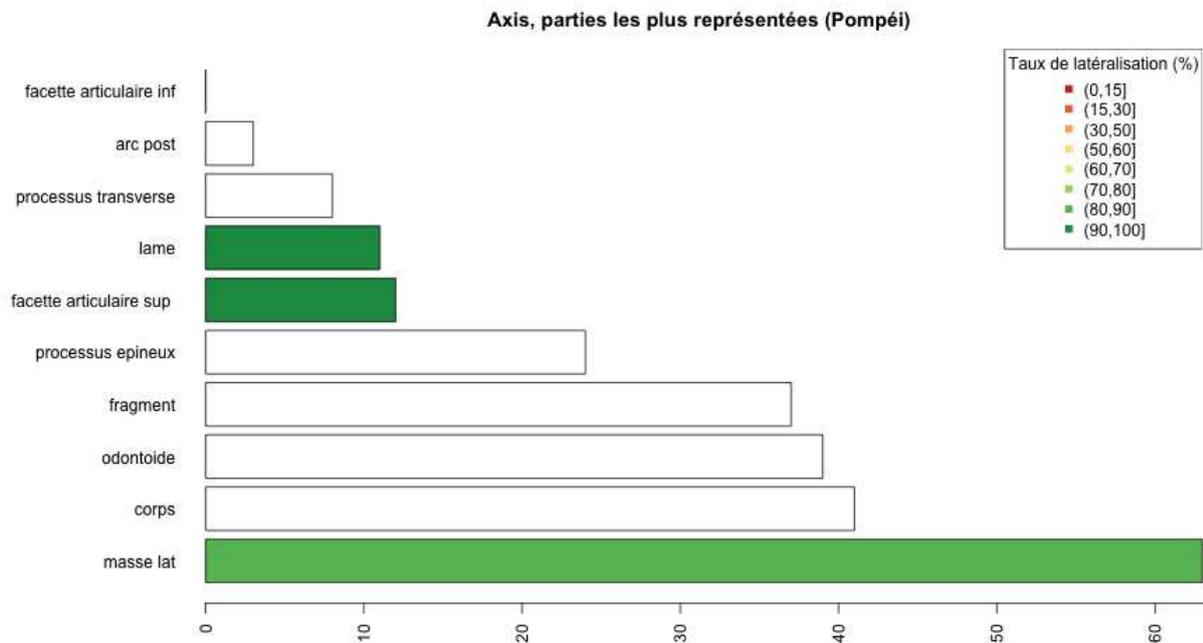
**Figure 69 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'atlas. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

○ *L'axis (figure 70)*

On observe la même tendance que pour l'atlas : 180 fragments ont été identifiés, dont 20,5 % d'entre eux, ont été enregistrés comme « Axis » sans plus de précision. Toutefois, certaines régions anatomiques d'intérêts ont été mises en évidence :

- les masses latérales de l'axis (taux de latéralisation de 85,7 %),
- le corps de l'axis,
- le processus odontoïde,

- le processus épineux,
- les lames (taux de latéralisation de 90,9 %),
- les facettes articulaires supérieures (taux de latéralisation de 91,7 %).



**Figure 70 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'axis. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

○ *Les autres vertèbres (Figures 71, 72 et 73)*

Comme nous l'avons suggéré précédemment, les autres vertèbres cervicales, les vertèbres thoraciques et les vertèbres lombaires présentent un intérêt beaucoup plus limité.

Même si la quantité de fragments identifiés est considérable (n=5442), il en existe très peu qui peuvent nous orienter dans la recherche d'exclusions ou de liaisons anatomiques à quelques exceptions près. Certaines vertèbres sont néanmoins reconnaissables même brûlés et fragmentées :

- la troisième et la septième vertèbre cervicale,
- la première, onzième et douzième vertèbre thoracique,
- la quatrième et la cinquième vertèbre lombaire.

○ *L'os coxal (Figure 74)*

L'os coxal est le cinquième meilleur score en termes d'effectif.

C'est un os particulièrement bien reconnu et le nombre de fragments identifiés est conséquent (n=2657).

La grande majorité des fragments lui ont été attribués sans faire référence à une région anatomique particulière et le taux de latéralisation global n'est pas très élevé (13,6 %).

Cependant, certaines régions anatomiques telles que le pubis ou l'ischium offrent des taux de latéralisations élevés, de l'ordre de 75,5 % pour la région pubienne et de 87,2 % pour l'ischium.

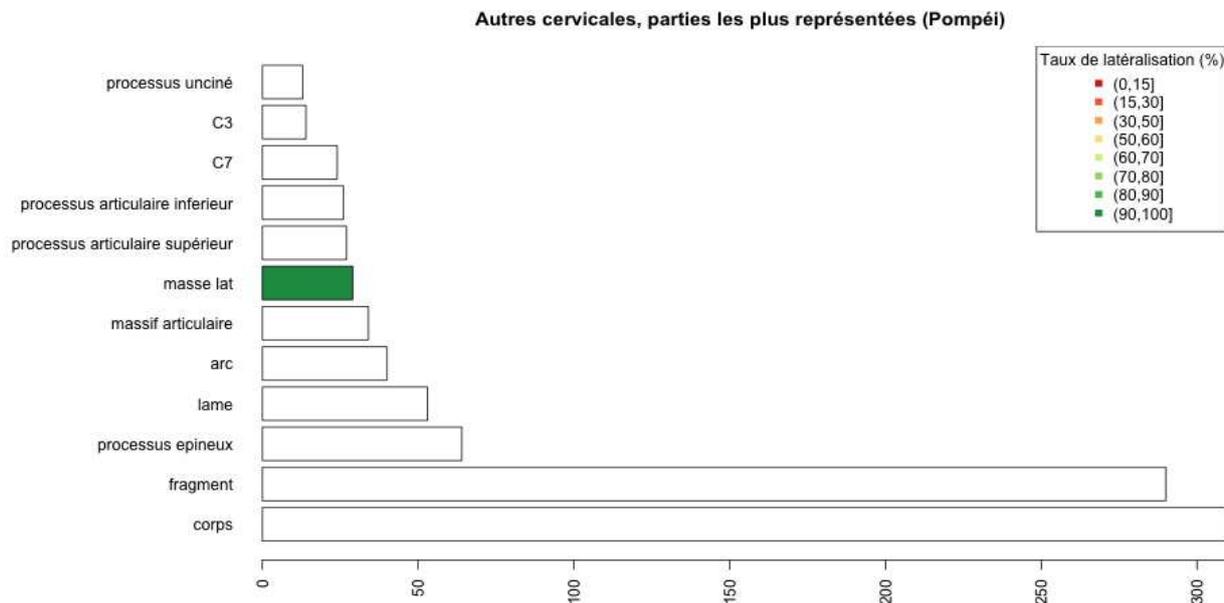


Figure 71 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt des vertèbres cervicales (hors atlas et axis). Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

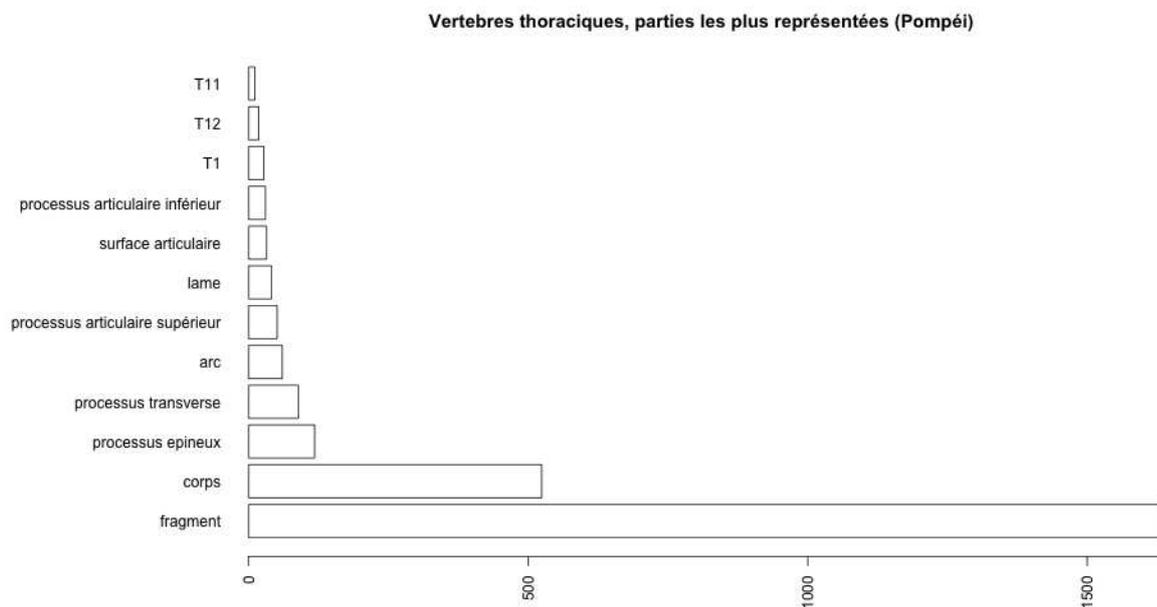


Figure 72 : histogramme représentant l'effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt des vertèbres thoraciques. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

### Vertèbres lombaires, parties les plus représentées (Pompéi)

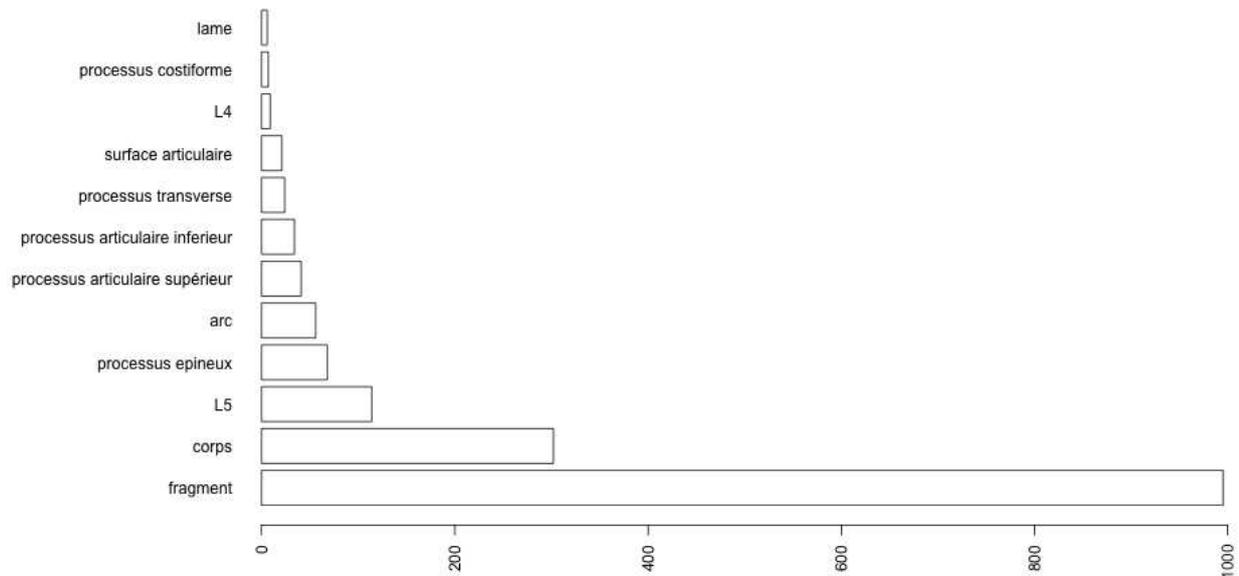


Figure 73 : histogramme représentant l'effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt des vertèbres lombaires. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'historgramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

### Os coxal, parties les plus représentées (Pompéi)

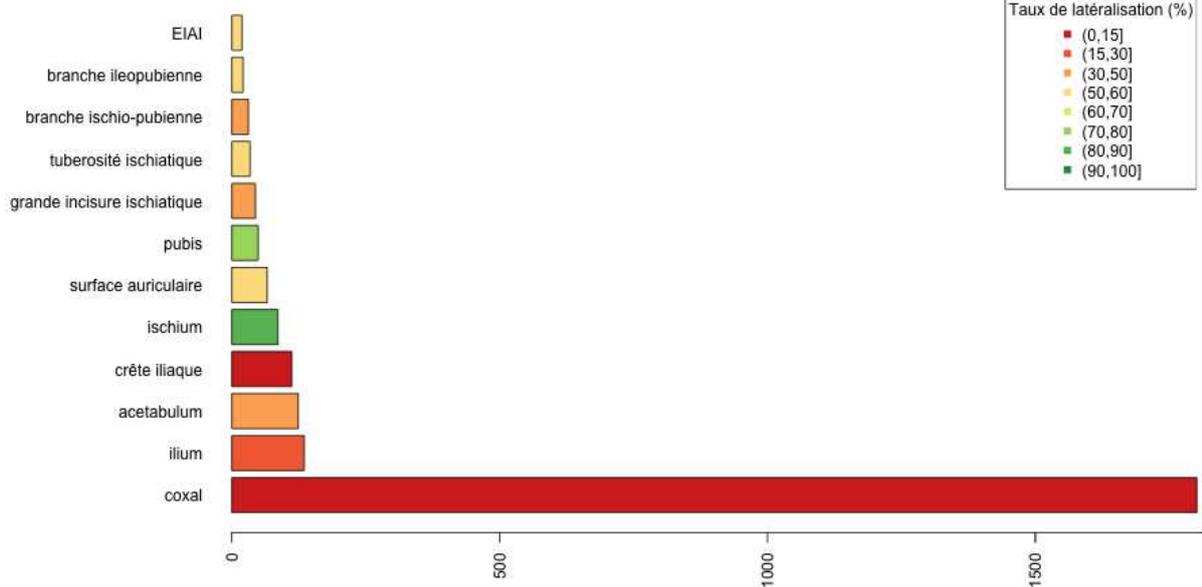


Figure 74 : histogramme représentant l'effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os coxal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'historgramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

## ➤ Régions anatomiques aux scores de latéralisation les plus élevés

Nous venons d'observer les régions anatomiques qui présentaient les plus gros effectifs de fragments. Nous allons maintenant nous intéresser à celles qui présentent les meilleurs scores généraux de latéralisation : les os du carpe (61,6 %), la patella (58,7 %), les os du tarse (52,8 %) et la clavicule (49,5 %).

### Les os du carpe et du tarse

L'ensemble des os du carpe présentent des taux de latéralisation très élevés. Ils sont compris entre 63 % et 84 %. La figure 75 permet de visualiser à la fois le nombre de fragments identifiés du carpe et le nombre de fragments latéralisés.

Le lunatum, l'hamatum et le scaphoïde sont les trois os qui présentent le meilleur potentiel d'identification : ils sont à la fois bien représentés et latéralisables.

La tendance est la même pour les os du tarse (figure 76), cependant les scores de latéralisation sont un peu moins élevés (ils vont de 48 % pour le talus à 84 % pour le cunéiforme latéral).

Les os cunéiformes sont globalement ceux qui présentent les meilleurs scores de latéralisation : cunéiforme latéral (84 %), cunéiforme médial (82 %), et cunéiforme intermédiaire (77,3 %).

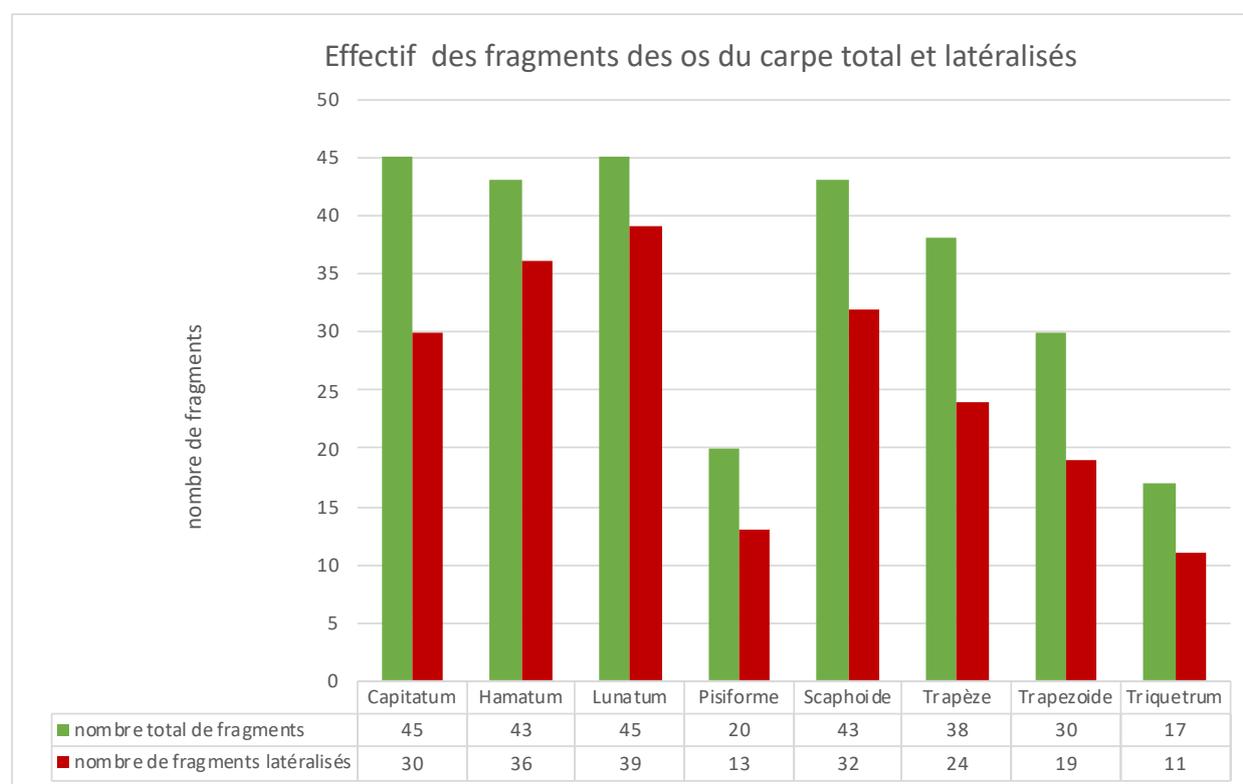


Figure 75 : histogramme comparatif des effectifs des fragments des os du carpe identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge).

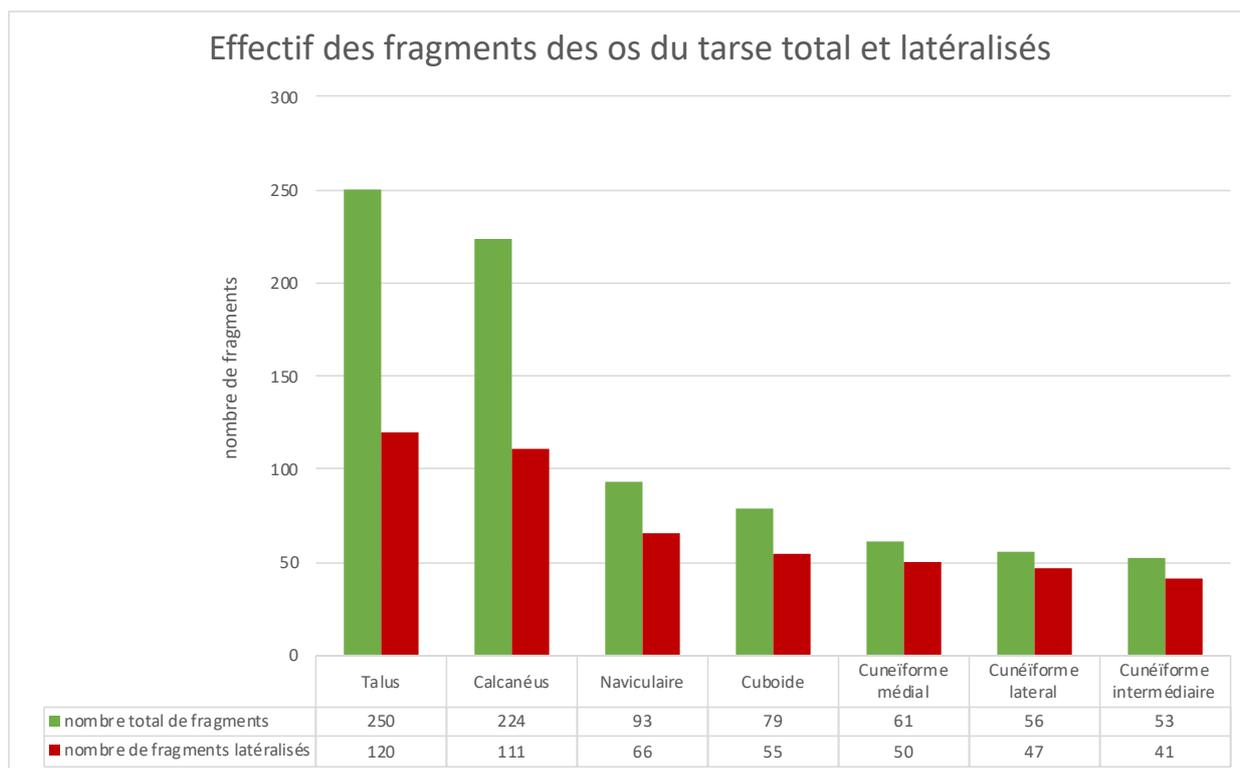


Figure 76 : histogramme comparatif des effectifs des fragments des os du tarse identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge).

## La patella (figure 77)

La patella présente un score général de latéralisation de 58,7 % mais lorsque les régions de l'apex, de la base ou les surfaces articulaires étaient conservées le score de latéralisation atteignait les 100%.

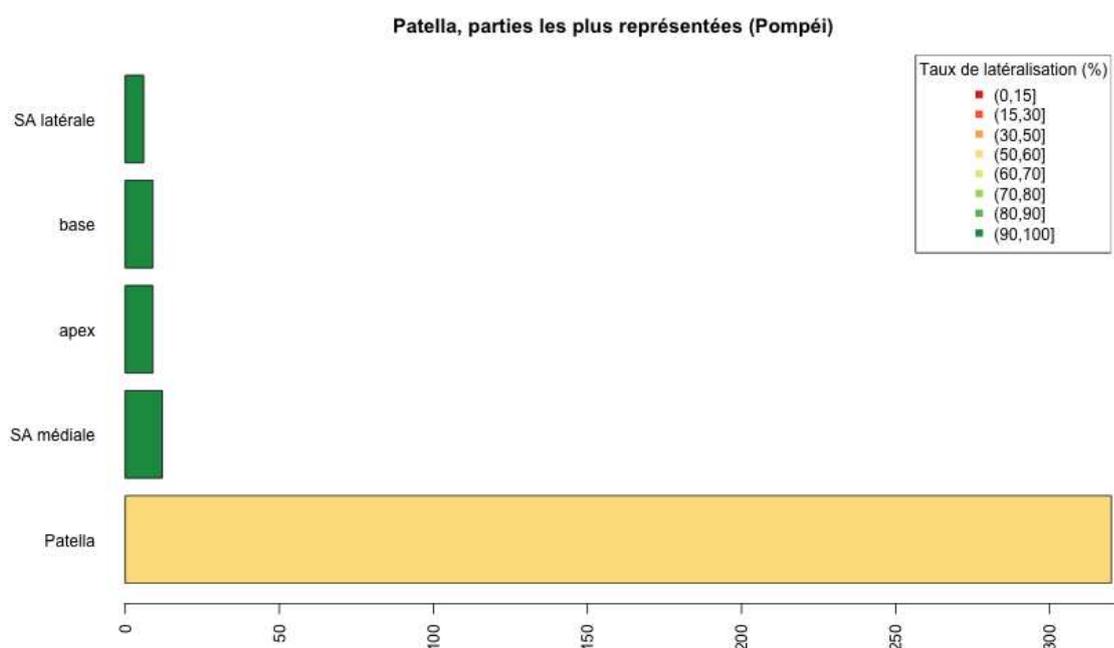
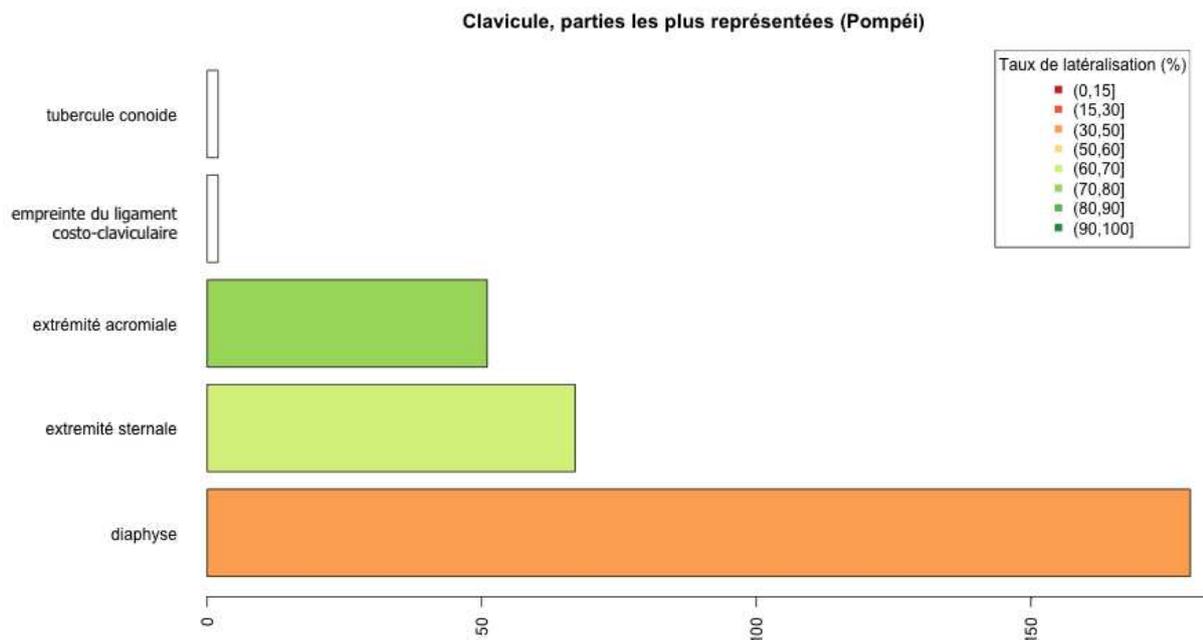


Figure 77 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la patella. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

## La clavicule (figure 78)

En observant les données obtenues pour la clavicule, on retrouve la même tendance que pour les os longs des membres, cependant, la diaphyse claviculaire présente un bien meilleur taux de latéralisation (36,9 %).

Les extrémités sternale et acromiale donnent des scores de 64,2 % et 78,4 % respectivement. Les autres régions anatomiques ou reliefs osseux ne semblent aider ni à l'identification ni à la latéralisation.



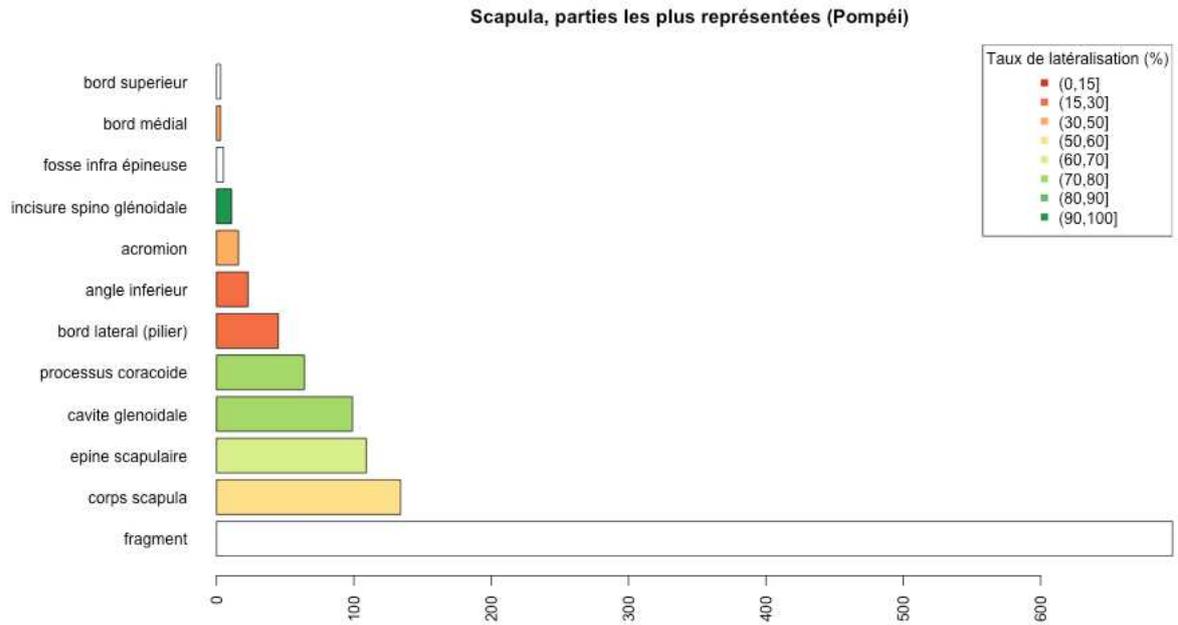
**Figure 78 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la clavicule. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

## La scapula (figure 79)

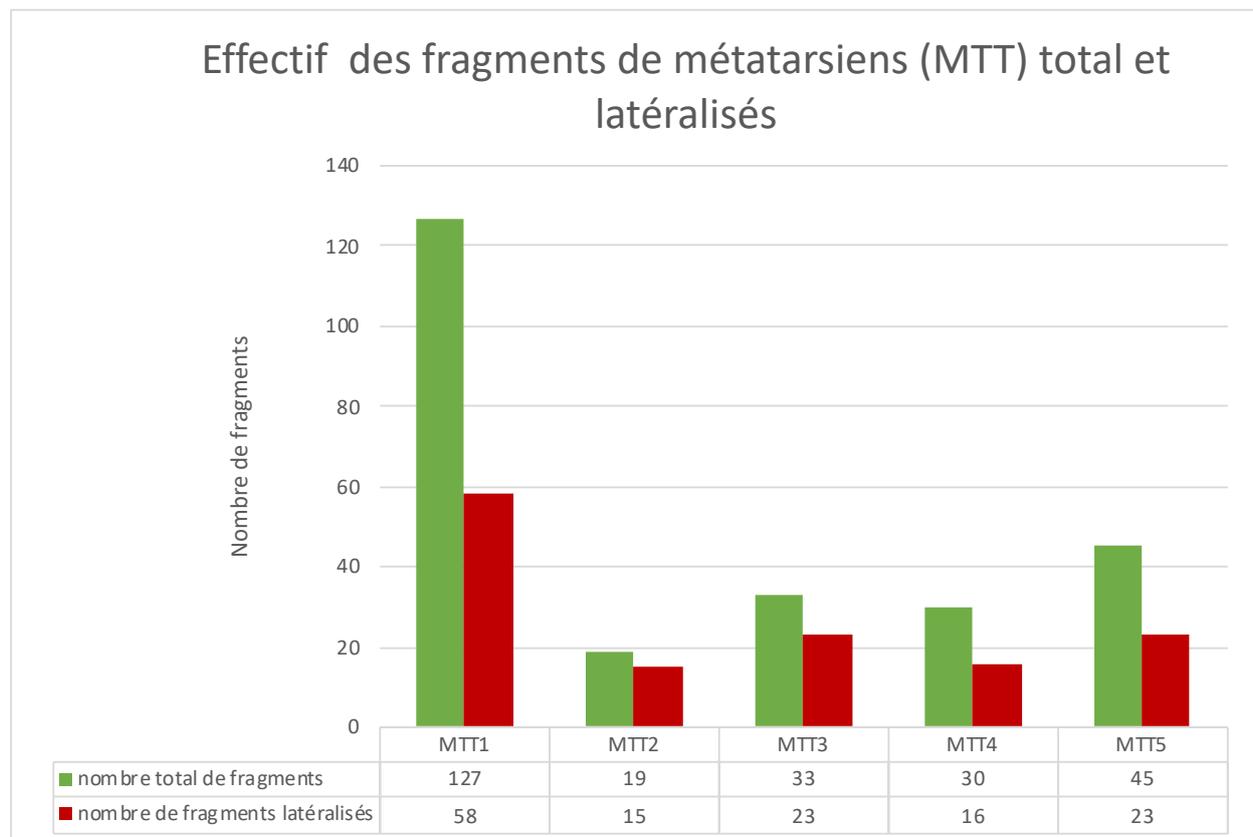
Le taux de latéralisation global de la scapula est peu élevé (25,2 %), cependant elle comporte certaines régions d'intérêts à noter : l'incisure spino-glénoïdale (100 %), la cavité glénoïdale (71,7 %), le processus coracoïde (79,7 %) et l'épine de la scapula (67,9 %).

## Les métatarsiens et les métacarpiens (figure 80 et 81)

Enfin, de très bons résultats de latéralisation ont également été retrouvés chez certains métacarpiens et métatarsiens dont le rayon avait été préalablement déterminés. On peut notamment citer le deuxième métatarsien (78,9 %) et le troisième métatarsien (69,7 %) ainsi que le troisième métacarpien (67,7 %).



**Figure 79 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la scapula. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 80 :** histogramme comparatif des effectifs des fragments de métatarsiens, identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge).

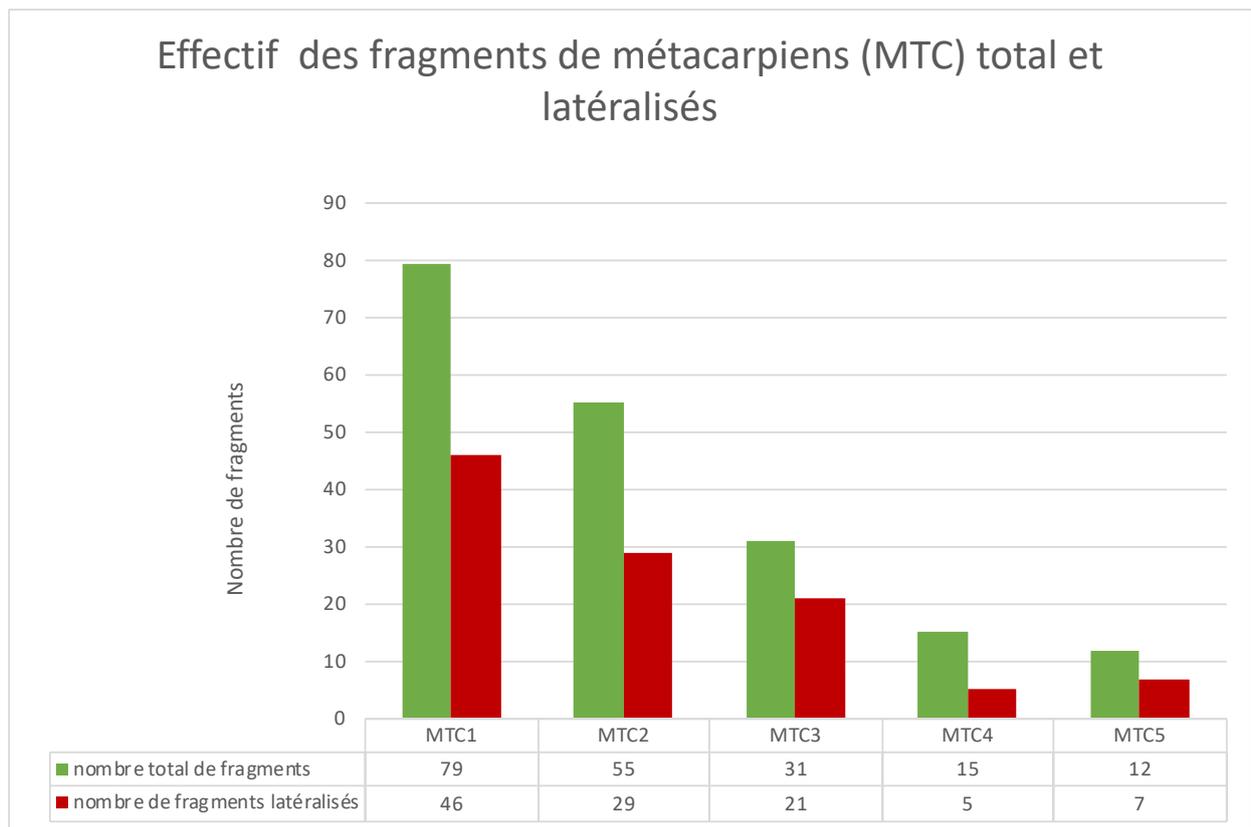


Figure 81 : histogramme comparatif des effectifs des fragments de métacarpiens identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge).

#### e) Bilan global

À l'aide de ces résultats nous avons pu distinguer trois grands groupes de fragments.

##### I. Les fragments osseux les plus nombreux

Nous avons mis en évidence les cinq catégories anatomiques qui présentent les effectifs les plus importants. Parmi ces cinq catégories, trois correspondent à des fragments classés comme « indéterminés » : « os plats », « os courts » et « fragments de diaphyses indéterminées ».

Toutefois, il a été remarqué que même s'ils étaient majoritaires en termes de nombre de fragments, leur masse, elle, ne représentait que 20 % de l'échantillon.

##### II. Les fragments osseux les plus identifiables

Ce sont les fragments déterminés, les plus nombreux. En d'autres termes, il s'agit des fragments les plus facilement reconnus par les observateurs. Les catégories anatomiques représentées sont les côtes, les fragments de crâne, les grands os longs des membres et les vertèbres.

##### III. Les fragments osseux les plus informatifs

Enfin, ce dernier groupe comporte les fragments qui seront porteurs de la plus grande quantité d'informations. Ils seront particulièrement utiles dans la mise en évidence d'exclusions pour établir le nombre minimum d'individus. Il s'agit des fragments les plus latéralisables et/ou de

ceux que nous appellerons « les régions anatomiques d'intérêt » telles que le processus odontoïde de l'axis, le corps de l'os hyoïde ou la symphyse mandibulaire par exemple.

Concernant les trois grands groupes sus-cités, un constat général a pu être réalisé : **les fragments osseux les plus nombreux ne sont pas les plus identifiables et les fragments osseux les plus identifiables ne sont pas les plus informatifs.**

Il semblait donc nécessaire de pouvoir rechercher des éléments qui seraient à la fois suffisamment nombreux, identifiables et informatifs. Ce sont ces fragments là qu'il conviendra à la fois de rechercher, et d'analyser préférentiellement lors de l'étude d'un corps carbonisé.

Afin de visualiser au mieux cette information nous avons réalisé des schémas-récapitulatifs (type schéma de fiche de conservation) sur lesquels, l'ensemble des différentes régions anatomiques est représenté. Nous avons réalisé deux types de dessins :

- Le premier, permet de représenter l'effectif porté par chaque région anatomique. Le nombre de fragments étant figuré par une échelle de couleur. Les fragments les plus facilement identifiables sont colorés en vert et les moins identifiables (ou les plus rarement reconnus), en rouge. Toutes les catégories intermédiaires sont représentées par un dégradé de couleur selon les recommandations graphique de J. Bertin (1967)
- Le second dessin est construit exactement sur le même modèle, en revanche c'est l'information portée par les fragments qui est mise en avant. Les fragments les plus informatifs (fragments les plus latéralisables ou régions anatomiques d'intérêt) sont colorés en vert et les moins informatifs en rouge, selon le même dégradé de couleur que précédemment. Les régions anatomiques d'intérêt sont représentées de la même façon que les régions présentant un taux de latéralisation de 100 %, soit en vert foncé.

Visuellement, les éléments qui apparaissent colorés dans les tons verts à la fois sur le premier et le second dessin représentent les régions anatomiques ayant le plus haut potentiel d'informations pour établir le nombre minimum d'individus ou pour la recherche d'exclusions. Ces deux schémas récapitulatifs sont représentés en figure 82 et 83.

Compte tenu de l'ensemble des critères précédemment cités, nous pouvons résumer les régions anatomiques d'intérêt de la façon suivante :

- **L'os maxillaire** de façon globale. De plus, la région du **processus frontal de l'os maxillaire** est particulièrement informative avec un taux de latéralisation supérieur à 90 %.
- **L'os temporal** de façon globale. De plus, La **région pétreuse** est extrêmement intéressante avec un effectif compris entre 100 et 299 fragments et un taux de latéralisation supérieur à 80 %. De même on retrouve d'excellent taux de latéralisation (tous supérieurs à 70 %) pour **la région du conduit auditif externe**, le **condyle temporal**, le **processus zygomatique** et la **région rétro mastoïdienne**. Le

**processus mastoïde** a également un bon taux de latéralisation de 62,7 % pour un nombre de fragments identifiés non négligeable de 59.

- La **branche mandibulaire** de façon globale est très bien représentée (116 fragments et un taux de latéralisation global de 89,7%). Le **condyle mandibulaire** et le **processus coronoïde** de la mandibule quant à eux présentent des taux de latéralisation de 95,3% et 91,4 % respectivement.
- **L'extrémité distale de l'humérus** de façon globale.
- **L'extrémité proximale de l'ulna** de façon globale.
- **L'épine scapulaire et la cavité glénoïde** de la scapula
- La région de **l'ischium** de l'os coxal.
- **L'extrémité distale du fémur**
- **L'extrémité distale du tibia**
- **Le talus et l'os naviculaire**
- **L'atlas** et dans une moindre mesure **l'axis**.

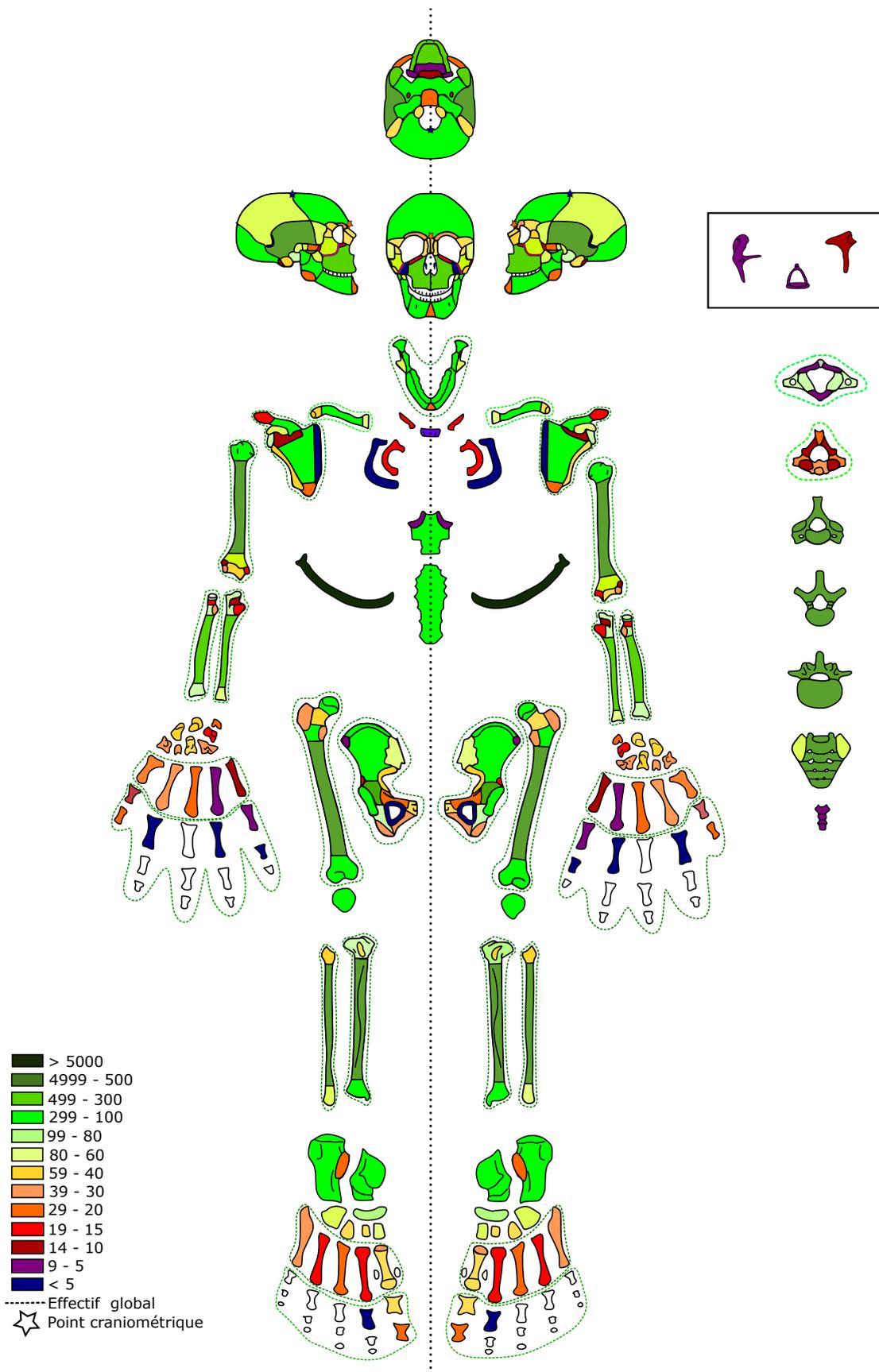


Figure 82 : représentation schématique des effectifs de fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique sur le site de Porta Nocera, Pompéi. Le nombre de fragments est figuré par une échelle colorimétrique.

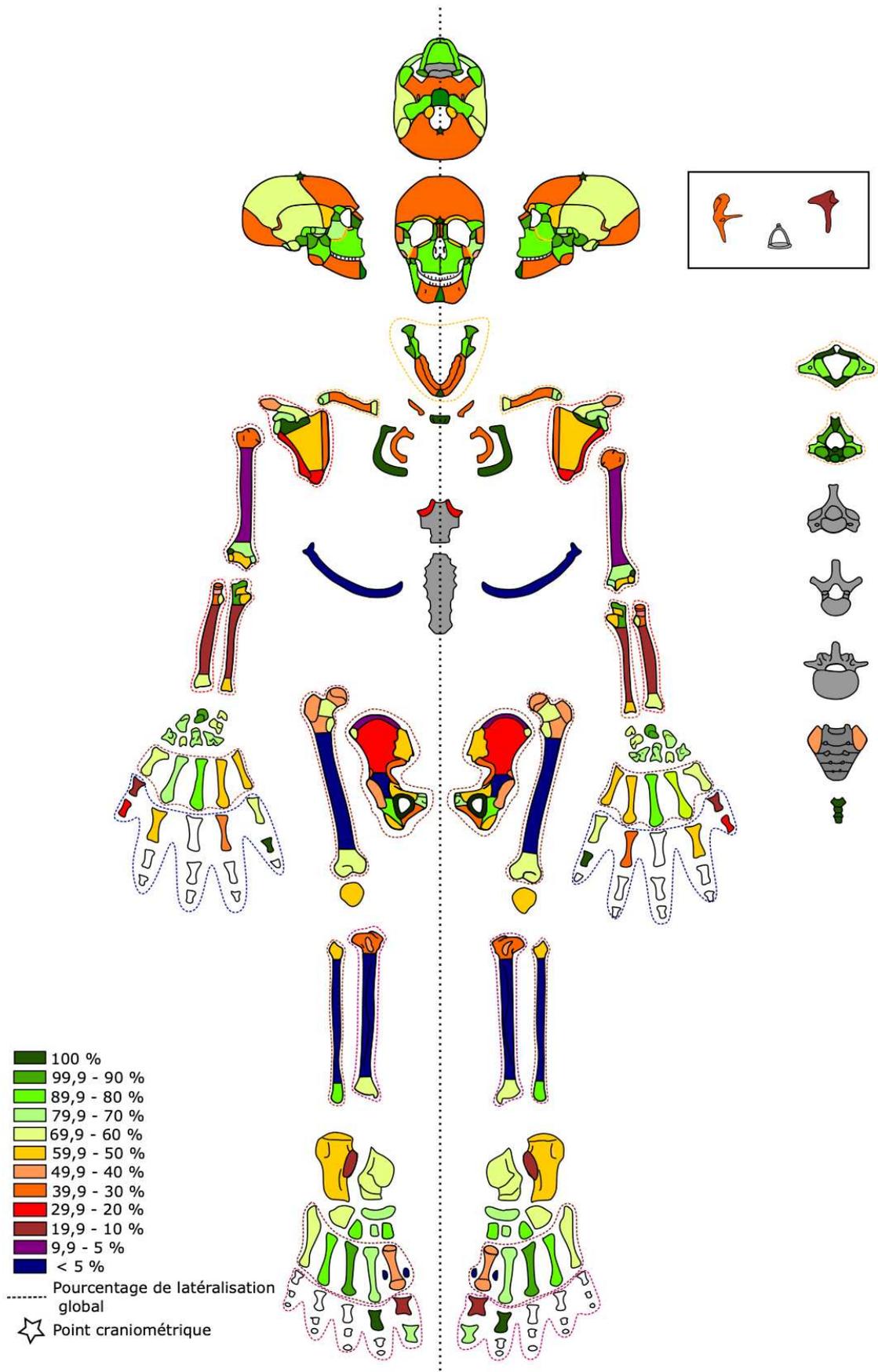


Figure 83 : représentation schématique des pourcentages de latéralisation des fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique sur le site de Porta Nocera. Pompéi. Le pourcentage de latéralisation des fragments est figuré par une échelle colorimétrique.

### 3. Comparaison avec les résultats de Cumes et du Vatican

---

L'ensemble de données concernant ces deux sites ne sera pas détaillé. Les tables et figures correspondantes sont toutefois présentées en annexe 6a pour le site de Porta Mediana à Cumes et en annexe 6b pour le site de Santa rosa au Vatican.

#### a) Pompéi / Cumes

---

##### (1) Observations générales

Le nombre total de fragments (hors fragments dentaires et immatures) est de 37243 pour une masse totale de 83034,1 g.

De même qu'à Pompéi, les cinq catégories de fragments les plus représentées sont :

- Les os plats à hauteur de 18,2 % (n=6792),
- Les côtes à hauteur de 15,5 % (n=5773),
- Les fragments de bloc crânio-facial à hauteur de 15 % (n=5583),
- Les fragments de diaphyses indéterminées pour 8 % (n=2994)
- Les os courts pour 6,8 % (n=2544)

À elles seules, ces cinq catégories sont toujours largement majoritaires et représentent 63,6 % de l'échantillon en termes d'effectifs. En revanche, le pourcentage de fragments considérés comme indéterminés est plus faible qu'à Pompéi (33,1 % vs. 48,4 %).

Après exclusion des fragments indéterminés, il subsiste 26 350 fragments.

Les grandes régions anatomiques les mieux représentées parmi les fragments déterminés sont :

- Les côtes (n=5773 ; 21,9 %)
- Le bloc crânio-facial (n= 5583 ; 21,2 %)
- Les vertèbres (n= 5402 ; 20,5 %)
- Les grands os longs des membres (n=4142 ; 15,7 %)
- L'os coxal (n=1404 ; 5,3 %)

Le pourcentage de vertèbres identifiées est deux fois plus élevé qu'à Pompéi (20,5 % vs. 10 %), alors que celui des côtes est un peu plus faible (21,9 % vs. 30,6 %).

Globalement concernant les autres catégories, les pourcentages observés sont similaires entre les deux sites.

À Cumes, les fragments ayant obtenus les meilleurs taux de latéralisation sont les patella (81,8 %) ; les fragments latéralisables de mandibule (68,5 %) ; la clavicule (65,5 %) ; les os du carpe (60,6 %) et les os du tarse (56,5 %). Nous retrouvons donc les mêmes catégories anatomiques qu'à Pompéi mais avec des scores plus élevés puisqu'ils dépassent tous les 50%.

## (2) Détail du squelette crânien

Le nombre de fragments attribués au crâne avec certitude est très élevé (n=5583). Parmi eux, le nombre de fragments indéterminés est de 4269 soit 76,46 %, donc un taux à peu près équivalent à celui de Pompéi (pour rappel il était de 78,73 %).

En dehors des fragments indéterminés, les catégories de fragments identifiés dont les effectifs sont les plus importants sont les mêmes qu'à Pompéi. On retrouve :

- les fragments latéralisables de mandibule (n=425),
- l'os temporal (n=225),
- l'os frontal (n=157),
- l'os occipital (n=134),
- l'os maxillaire (n=128),
- les fragments latéralisables du sphénoïde (n=101),
- l'os zygomatique (n=77).

Les fragments les plus informatifs, dont le taux de latéralisation est le plus élevé sont :

- l'os temporal (87,3 % soit 20 % de plus que Pompéi),
- l'os maxillaire (80,5 % soit 30 % de plus que Pompéi),
- les fragments latéralisables de la mandibule (68,5 % soit 18 % de plus que Pompéi),
- l'os zygomatique (67,6 % soit 10 % de moins que Pompéi),
- l'os frontal (52,2 % soit plus de 20 % de plus qu'à Pompéi),
- l'os pariétal (49,1 % soit 20 % de moins que Pompéi).

De façon tout à fait anecdotique nous pouvons citer un taux de latéralisation de 100 % des cornets nasaux qui est à nuancer de l'effectif d'un seul fragment. Cette information témoigne toutefois du niveau auquel a pu être poussée la détermination anatomique des fragments à Cumes.

## (3) Détail du squelette infra-crânien :

Concernant les grands os longs des membres, de façon générale, les taux de latéralisation obtenus sont meilleurs qu'à Pompéi, et ce particulièrement pour les trois grands os longs du membre supérieur : le radius, l'ulna et l'humérus qui présentent des taux de latéralisation compris entre 40 % et 55 %, avec un record pour la diaphyse radiale de 37 %.

On retrouve la même tendance pour :

- la clavicule (65,5 % vs. 49,5 % à Pompéi) ;
- la scapula (32,8 % vs. 25,2 % à Pompéi) ;
- l'os coxal (26 % vs. 13,7 % à Pompéi) ;
- la patella (81,9 % vs. 58,7 % à Pompéi) ;
- les métacarpiens (27,6 % vs. 14,1 % à Pompéi) ;

- les métatarsiens (28,7 % vs. 15,7 % à Pompéi) ;

Pour les os du carpe et du tarse en revanche, on retrouve des résultats similaires.

#### (4) Bilan global

Les résultats sont figurés sur les deux schémas des figures 84 et 85.

La première observation d'ordre générale que nous pouvons faire, est qu'il semble globalement exister de meilleurs taux de latéralisation des fragments à Cumes qu'à Pompéi. Les fragments qui se dégagent sont les suivants :

- **l'os maxillaire** de façon générale, avec de très bon taux de latéralisation des **processus frontaux** ;
- **l'os temporal** de façon générale et particulièrement **la région pétreuse** (96,7 %), **la région du conduit auditif externe** (100 %), le **processus zygomatique** (97 %), le **condyle temporal** (87,5 %) et le **processus mastoïde** (81,1 %) ;
- la **branche mandibulaire** de façon générale est très bien représentée avec d'excellents taux de latéralisation : **condyle mandibulaire** (98,3 %) et **processus coronoïde** de la mandibule (97,8%) ;
- les **extrémités distale et proximale du fémur** ;
- **l'extrémité proximale du tibia** ;
- le **calcaneus** ;
- **l'atlas et l'axis** ;
- les **extrémités de la clavicule** ;
- certaines régions scapulaires telles que : **l'épine scapulaire**, **l'acromion**, le **processus coracoïde** de la scapula et la **cavité glénoïdale** ;
- **l'extrémité proximale du radius, de l'ulna et de la fibula** ;
- **l'extrémité distale du radius, du tibia et de la fibula** ;
- les os du tarse (**cuboïde, cunéiformes, naviculaire**) ;
- **les métatarsiens : MTT II, III, IV** ;
- l'ensemble des **os du carpe** hors trapézoïde et triquetrum ;
- les métacarpiens : **MTC I et MTC III**.

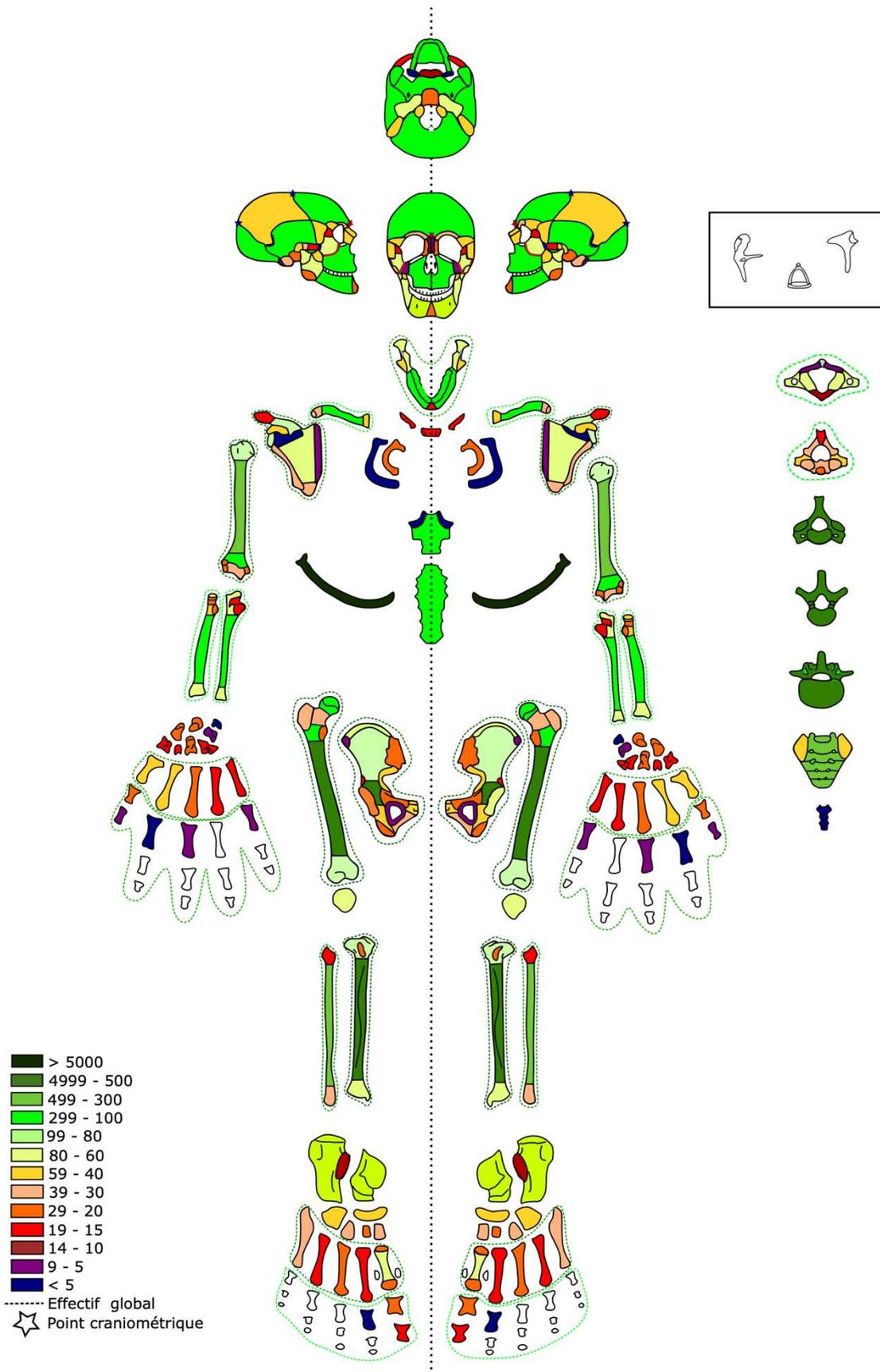


Figure 84 : représentation schématique des effectifs de fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique sur le site de Porta Mediana. Cumes. Le nombre de fragments est figuré par une échelle colorimétrique.

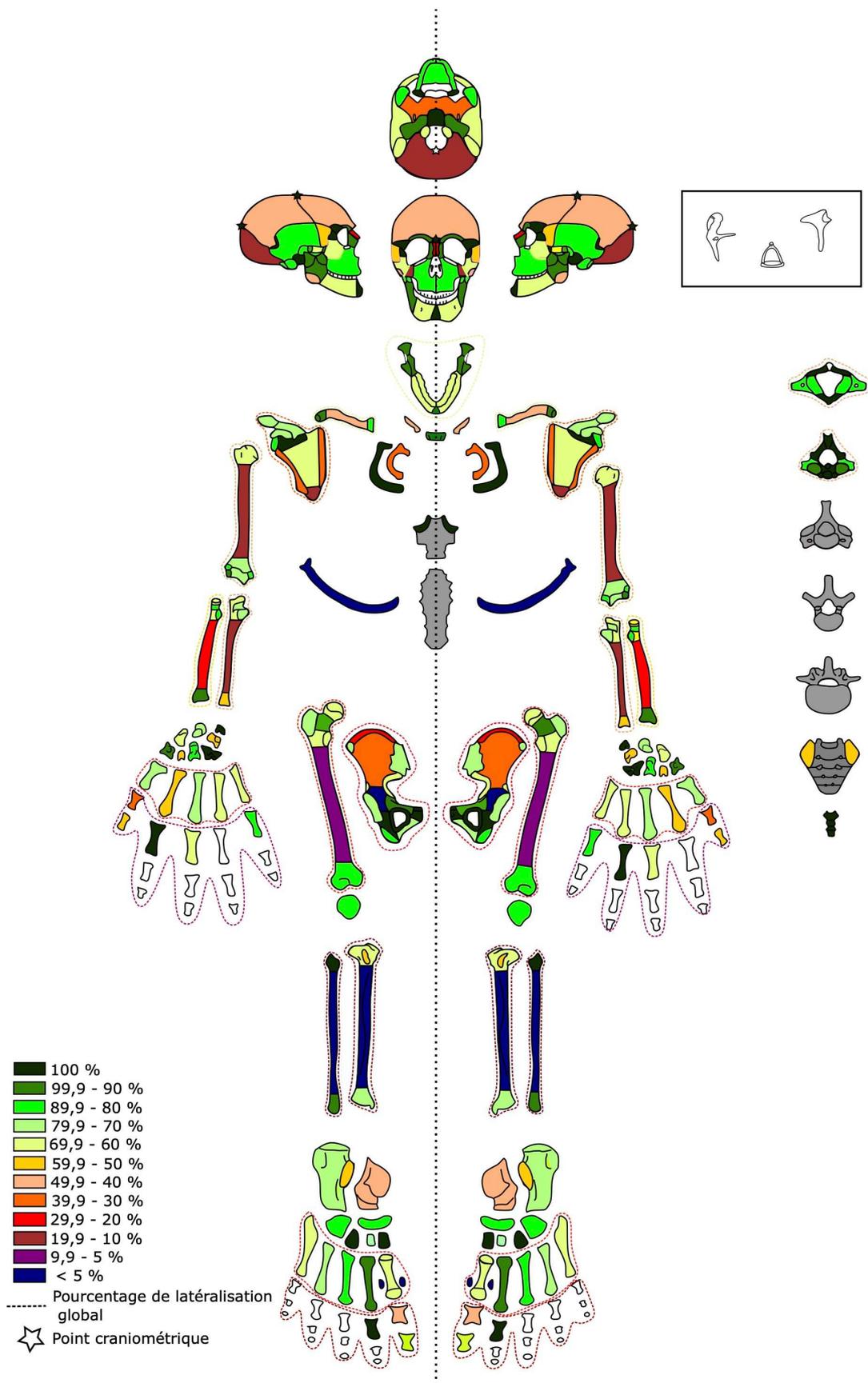


Figure 85 : représentation schématique des pourcentages de latéralisation des fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique sur le site de Porta Mediana. Cumes. Le pourcentage de latéralisation des fragments est figuré par une échelle colorimétrique.

### (1) Observations générales

Le nombre total de fragments appartenant à des individus adultes (hors fragments dentaires) est de 73960 pour un poids de 67101,8 g.

De la même façon qu'à Pompéi et à Cumes, les cinq catégories de fragments les plus représentées sont :

- les os plats (n=23346 soit 31,6 % de l'échantillon) ;
- les os courts (n=9635 soit 13 % de l'échantillon) ;
- le bloc crânio-facial (n=9050 soit 12,2 % de l'échantillon) ;
- les fragments de diaphyses (n=8805 soit 11,9 % de l'échantillon) ;
- les côtes (n=6346 soit 8,6 % de l'échantillon).

Les pourcentages de représentation restent à peu près équivalents à ceux de Pompéi, hormis pour la catégorie « côtes » où l'on observe un pourcentage de seulement 8,6 % au Vatican *versus* 15,6 % à Pompéi.

Considérant l'effectif des fragments indéterminés, ils représentent au Vatican, 56,5 % de l'échantillon soit plus de la moitié. Le poids total des indéterminés est de 19981 g., correspondant à 29,77 % et donc légèrement plus élevé qu'à Pompéi (21,3 %).

Si l'on exclut les fragments d'origine indéterminée, il subsiste 31975 fragments. Parmi eux, les effectifs les plus importants sont les suivants :

- les fragments de crâne (28,3 % ; n=9050) sont les fragments identifiés les plus nombreux ;
- les côtes (19,8 % ; n=6346) ;
- les grands os longs des membres (19,8 % ; n=6323) ;
- les vertèbres (13,7 % ; n=4390) ;
- l'os coxal (4,3 % ; n=1383).

Comparativement à Pompéi, les mêmes catégories anatomiques sont retrouvées. Les fragments de côtes et de bloc crânio-facial semblent légèrement moins bien identifiés mais de meilleurs scores apparaissent pour les grands os longs des membres et les vertèbres. Toutefois cette différence est peu significative et la tendance générale reste la même.

Concernant les taux de latéralisation, on retrouve encore les mêmes catégories qu'à Pompéi. Cependant, les résultats observés sont globalement légèrement en deçà de ceux observés à Pompéi et à Cumes, hormis pour la patella :

- **patella : 67,3 %**,
- carpe : 52,2 %,
- clavicule : 42,3 %,
- régions latéralisables de la mandibule : 40,8 %,

- os du tarse : 29,5 %

## (2) Détail du squelette crânien

Il totalise à lui seul 9478 fragments dont 86,1 % sont des fragments attribués à la catégorie (voûte/face/base). Parmi les fragments déterminés de façon précise, les effectifs les plus importants sont les suivants :

- la mandibule (n=429),
- l'os temporal (n=304),
- l'os maxillaire (n=218),
- l'os frontal (n=155),
- l'os occipital (n=97),
- l'os zygomatique (n=65).

Concernant les taux de latéralisation, les fragments les plus informatifs sont :

- l'os temporal (79,9 %),
- l'os zygomatique (78 %),
- les os maxillaire (60,1 %),
- les os nasaux (60 %),
- l'os frontal (56,7 %),
- l'os pariétal (45,4 %),
- les fragments latéralisables de la mandibule (40,8 %).

En dehors de l'os temporal dont le score est majoré de 15 % par rapport à Pompéi et de la mandibule dont le score est minoré de 10 %, on observe à nouveau une distribution équivalente, avec les mêmes catégories anatomiques et des résultats qui restent dans le même ordre de grandeur.

## (3) Détail du squelette infra-crânien

En comparaison avec les sites de Pompéi et même de Cumes, il existe au Vatican une sur-représentation des fragments indéterminés.

Les taux de latéralisation des grands os longs des membres inférieurs sont très faibles et restent inférieur à 10 % ; pour les grands os longs du membre supérieur, il oscille entre 15 et 25 %.

Enfin, si l'on ne considère que les diaphyses identifiées, les taux de latéralisation sont tous inférieurs à 5 % hormis celui de la diaphyse ulnaire (8,6 %).

Concernant les autres fragments significatifs du squelette infra-crânien, on retrouve des résultats des taux de latéralisation un peu plus faible au Vatican, mais qui restent cependant dans les mêmes ordres de grandeur :

- la clavicule (42,3 % vs. 49,5 % à Pompéi) ;
- la scapula (23,4 % vs. 25,2 % à Pompéi) ;

- l'os coxal (10,4 % vs. 13,7 % à Pompéi) ;
- la patella (67,3 % vs. 58,7 % à Pompéi) ;
- les os du carpe (52,2 vs. 61,3 % à Pompéi) ;
- les métacarpiens (9,1 % vs. 14,1 % à Pompéi) ;
- les métatarsien (9,7 % vs. 15,7 % à Pompéi).

On constate deux exceptions : la patella avec un taux de latéralisation plus élevé (67,3 % vs. 58,7 % à Pompéi) et les os du tarse qui eux présentent un score de latéralisation étonnement bas (29,5 % vs. 52,8 % à Pompéi).

#### (4) Bilan global (Figure 86 et 87)

De façon générale, l'observation des représentations schématiques permet de se rendre compte que les taux de latéralisation au Vatican sont légèrement plus faibles que ceux des deux sites analysés précédemment : Il dépassent plus rarement les 60 %.

Cependant, on retrouve avec une certaine constance dans l'ensemble de notre échantillon certaines régions anatomiques qui présentent à la fois d'excellents scores de latéralisation et des effectifs non négligeables :

- l'**os temporal** de façon générale (taux de latéralisation global 79,9 % et 304 fragments identifiés) et plus particulièrement la **région pétreuse** (96,6 %), la **région du conduit auditif externe** (86,7 %), le **processus mastoïde** (70 %), les **condyles temporaux** (89,1 %) ;
- l'**os maxillaire** avec un taux de 92 % attribué aux **processus frontaux** du maxillaire et 66,6 % pour le **bord inférieur des orbites** ;
- la **branche mandibulaire** (taux de latéralisation global de 84,1 %) et plus précisément les **condyles mandibulaires** (88,3 %) et le **processus coronoïde de la mandibule** (89,1 %) ;
- l'**axis** et l'**atlas** ;
- l'**os zygomatique** de façon générale (78 %) ;
- la **patella** (67,3 %) ;
- les région latéralisables de l'**os frontal** avec tout particulièrement le **processus zygomatique** de l'os frontal (94,7 %) ainsi que le **toit et le bord supérieur des orbites** (83,3 % et 82,1 %) ;
- l'**épine scapulaire** (85 %) ;
- l'**extrémité distale de la fibula** (75 %)
- l'**ischium** (75 %).

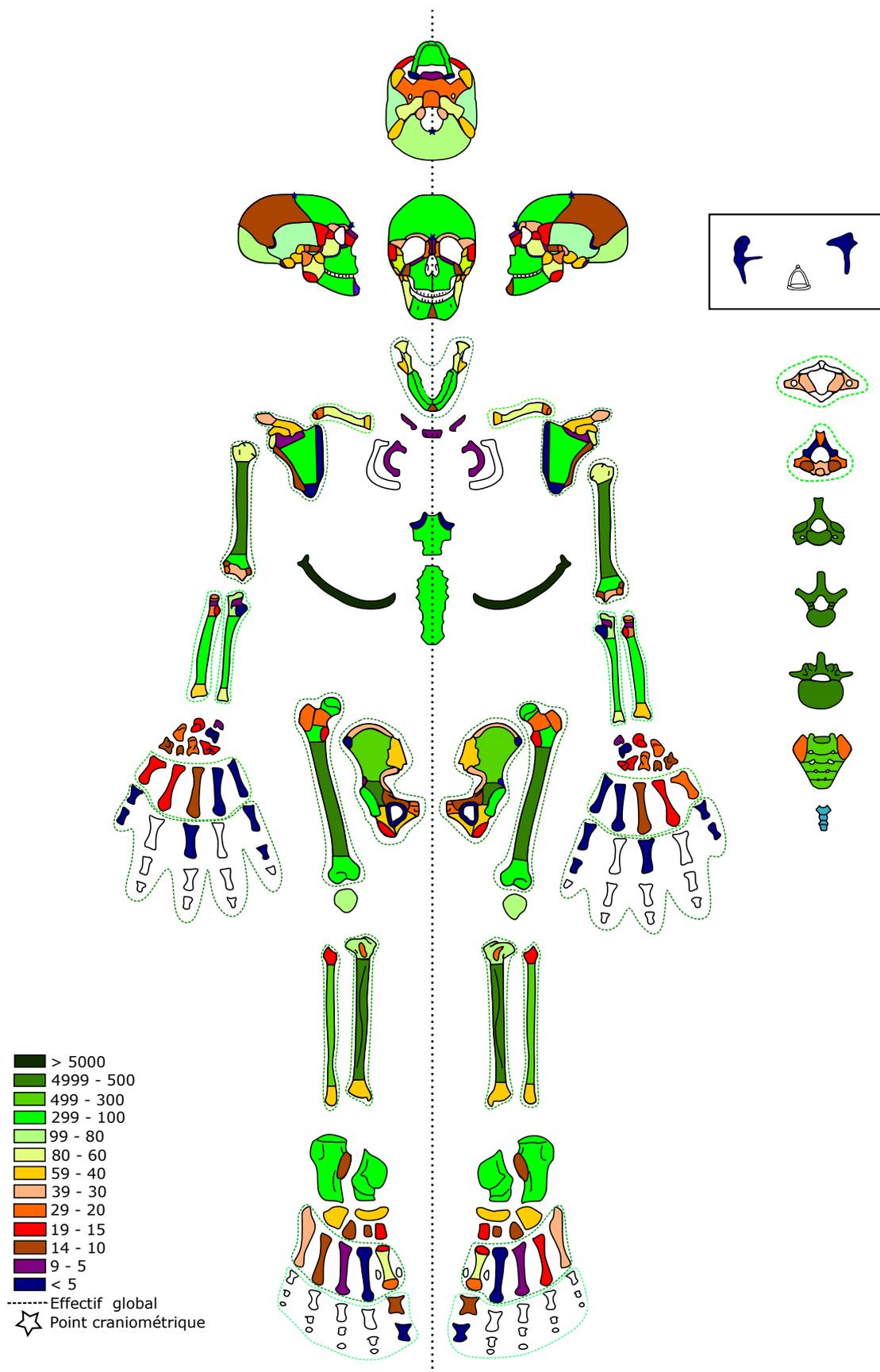


Figure 86 : représentation schématique des effectifs de fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique sur le site de Santa Rosa au Vatican. Le nombre de fragments est figuré par une échelle colorimétrique.

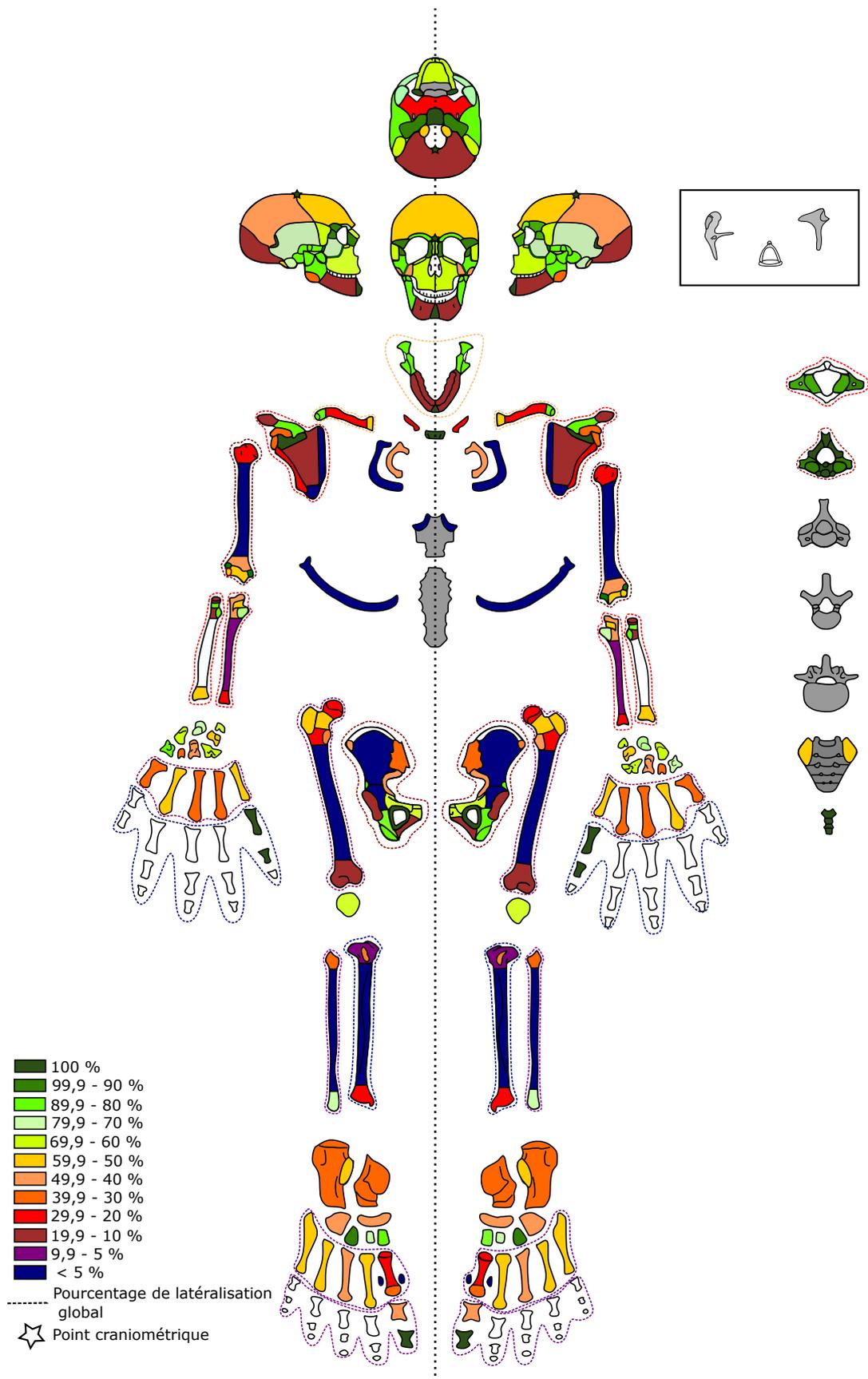


Figure 87 : représentation schématique des pourcentages de latéralisation des fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique sur le site de Santa Rosa au Vatican. Le pourcentage de latéralisation est figuré par une échelle colorimétrique.

#### 4. Les ossements des immatures de Pompéi, Cumes et le Vatican

---

Le nombre total de fragments appartenant à des individus classés parmi les immatures, pour l'ensemble de ces trois sites est de 20897. La masse totale est de 10147,8 g.

Les cinq catégories de fragments les plus représentées sont les mêmes catégories que pour les individus adultes soit :

- le bloc crânio-facial (24,2 % ; n=505) ;
- les côtes (16,4 % ; n=3435) ;
- les os plats (12,5 % ; n=2618) ;
- les fragments de diaphyses indéterminées (9,7 % ; n=2037) ;
- les os courts (8 % ; n=1668).

Elles représentent 70,8 % de l'échantillon. Le pourcentage de fragments indéterminés est de 30,25 %, **il est plus faible que chez l'ensemble des individus adultes.**

Après exclusion des fragments indéterminés, il subsiste 14574 fragments.

Les grandes régions anatomiques les mieux représentées sont :

- le bloc crânio-facial (34,7 % ; n=5050) ;
- les côtes (23,6 % ; n=3435) ;
- les fragments de vertèbres (11,9 % ; n=1736) ;
- les grands os longs des membres (10,8% ; n=1572) ;
- l'os coxal (2,7 % ; n=388).

On observe les **mêmes catégories anatomiques que pour l'ensemble des échantillons adultes** avec la particularité que **les fragments de bloc-crânio-facial sont plus nombreux**, ce qui semble parfaitement concordant avec une représentativité plus élevée de la boîte crânienne chez les immatures.

Nous avons également calculé le taux de latéralisation pour chaque région anatomique.

Les fragments présentant les meilleurs scores sont :

- la patella (60 %) ;
- la scapula (37,2 %) ;
- les fragments latéralisables de sacrum (36,7 %) ;
- les éléments du tarse (33,3 %) ;
- les fragments latéralisables de la mandibule (32,7 %) ;
- les éléments du carpe (32 %) ;
- la clavicule (31,8 %).

Comme chez l'adulte, la patella, offre de bons résultats, les éléments du tarse, du carpe, la mandibule et la clavicule, ont des scores un peu plus faibles et ne dépassent pas les 40 %. En revanche, **deux autres régions s'intègrent dans le classement chez l'enfant : la scapula et le sacrum** qui arrivent en deuxième et troisième position.

## (1) Détail du squelette crânien

Un total de 5050 fragments sont attribués au bloc crânio-facial. Parmi eux, 4505 n'ont pas pu être attribué précisément à une région anatomique du crâne et ont été classés dans la catégorie « voute/face/base ».

En dehors de ces fragments indéterminés, les effectifs les plus importants concernent :

- la mandibule (n=159) ;
- l'os temporal (n=71) ;
- l'os maxillaire (n=48) ;
- l'os sphénoïde (n=44) ;
- l'os occipital (n=40) ;
- l'os frontal (n=31).

Comparativement avec les restes issus de squelette adultes, les mêmes catégories anatomiques sont retrouvées hormis l'os zygomatique.

Le calcul des taux de latéralisation pour chaque catégorie donne les résultats suivants :

- l'os zygomatique (100 %) ;
- l'os temporal (93 %) ;
- l'os maxillaire (70,8 %) ;
- les régions latéralisables de l'os frontal (58,1 %) ;
- **les osselets de l'oreille (41,7 %).**

Comme chez l'adulte, l'os zygomatique, l'os temporal et l'os maxillaire offrent d'excellents taux de latéralisation. La mandibule très informative chez l'adulte, n'entre pas dans le classement chez les immatures puisque son taux de latéralisation est seulement de 32,7 %. En revanche, une entrée intéressante à noter est **la présence des osselets de l'oreille moyenne avec un taux de latéralisation de 41,7 %**

## (2) Détail du squelette infra-crânien

Considérant le squelette infra crânien, nous avons souhaité comme chez l'adulte observer les informations se rapportant aux grands os longs des membres.

De façon générale, ils sont très bien représentés en termes d'effectifs avec des taux de latéralisation bien supérieurs à ceux retrouvés chez l'adulte puisqu'ils varient de 10 % à près de 35 % dans leur globalité et de 8 % à 29 % pour les diaphyses uniquement.

Les meilleurs scores sont obtenus avec les grands os longs des membres supérieurs : humérus 29 %, radius 27,8 % et ulna 21 %.

### (3) Bilan global

Le même type de représentation que pour les adultes a été repris, avec un schéma adapté aux sujets immatures. Les données sont présentées en figure 88 et 89.

Ces représentations permettent de visualiser les régions anatomiques qui présentent à la fois des effectifs importants et des taux de latéralisations élevés.

Les régions qui présentent les meilleurs scores combinés sont les suivantes :

- l'**ischium** ;
- l'os temporal : l'**écaille temporale** offre d'excellents scores puis dans une moindre mesure, la **fosse mandibulaire** et la **région du conduit auditif externe**. La région pétreuse est moins performante que chez l'adulte puisqu'elle n'est latéralisée que dans 37,5% des cas, de même que le processus mastoïde ;
- le **talus** et le **calcanéus** ;
- l'**atlas** et l'**axis** ;
- l'**épiphyse proximale du fémur** ;
- la **diaphyse claviculaire** ;
- l'**os maxillaire** et tout particulièrement le **processus frontal**.

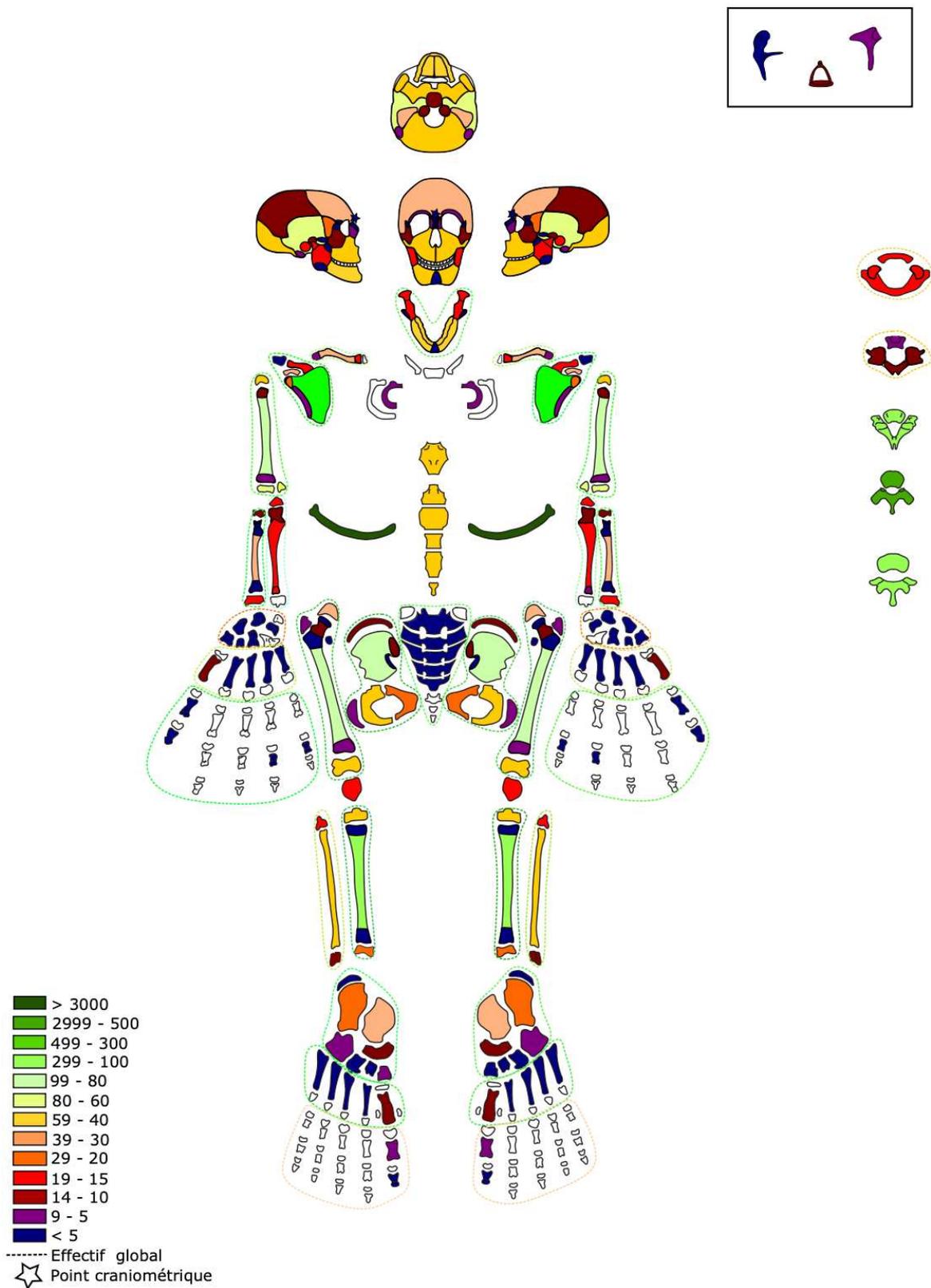


Figure 88 : représentation schématique des effectifs de fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique pour l'ensemble des fragments osseux des individus immatures des sites de Porta Nocera à Pompéi, Porta Mediana à Cumes et Santa Rosa au Vatican. Le nombre de fragments est figuré par une échelle colorimétrique.

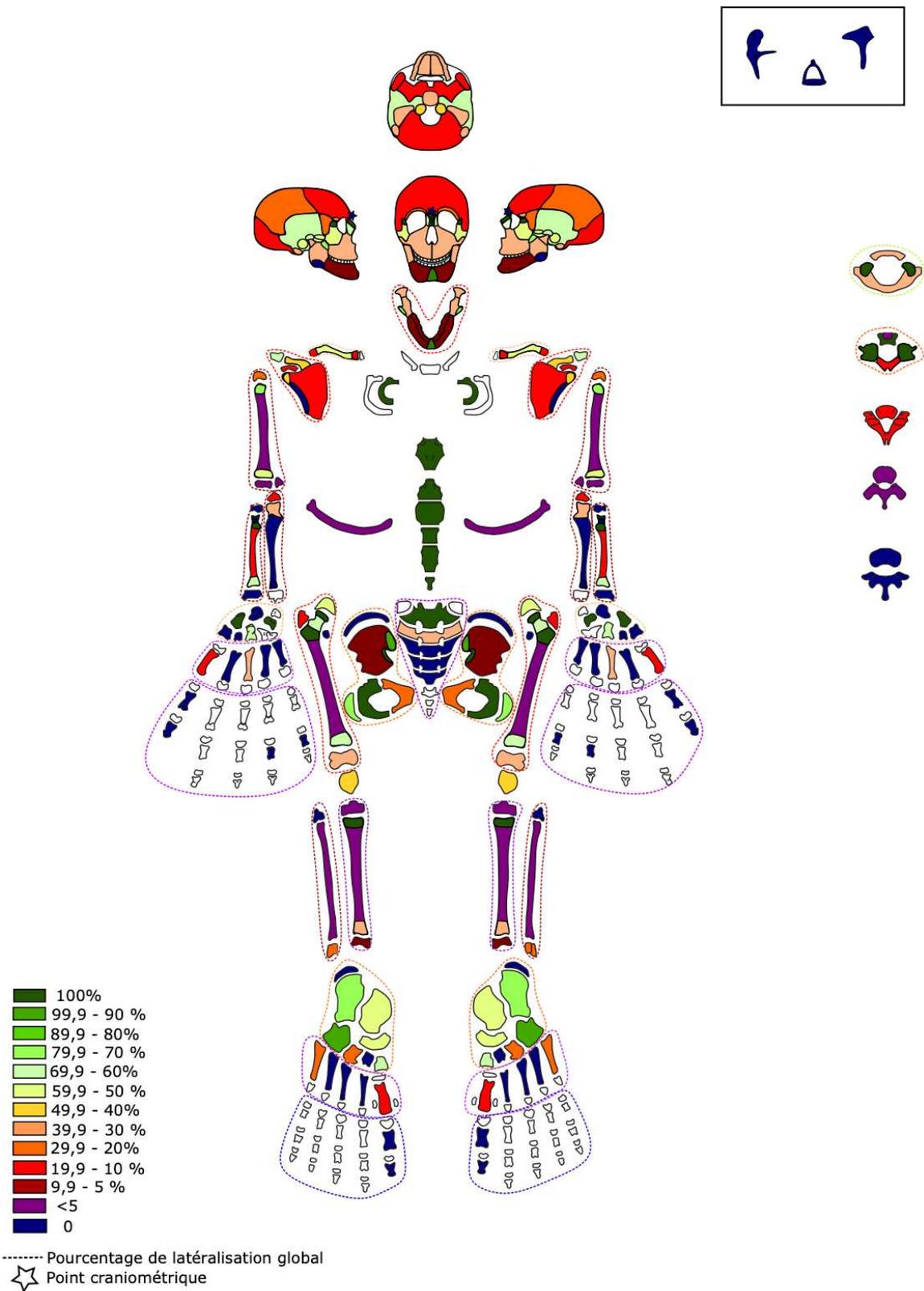


Figure 89 : représentation schématique des pourcentages de latéralisation des fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique pour l'ensemble des fragments osseux des individus immatures des sites de Porta Nocera à Pompéi, Porta Mediana à Cumes et Santa Rosa au Vatican. Le pourcentage de latéralisation des fragments est figuré par une échelle colorimétrique.

## 5. Les individus de la classe des périnataux (données du Tophet de Salammbô à Carthage)

---

Le nombre de fragments pris en compte à Carthage hors fragments dentaires est de 27502.

Le poids total est de 2564,9 g.

Les cinq catégories de fragments les mieux représentées en termes d'effectifs sont :

- les fragments de bloc crânio-facial (n=9966 soit 36,2 %) ;
- les fragments de côtes (n=4673 soit 17 %) ;
- les fragments de vertèbres indéterminés (n= 1819 soit 6,6 %) ;
- les fragments de vertèbres thoracique (n=1595 soit 5,8 %) ;
- les os courts (n=1248 soit 4,5 %).

Nous constatons un excellent taux de détermination puisque les fragments considérés comme indéterminés (os courts, os plats, diaphyses indéterminées) ne représentent que 9,3 % de cet échantillon. La catégorie de fragments issue du bloc crânio-facial est largement supérieure aux autres catégories. En effet, chez les individus périnataux la part relative au crâne est la plus élevée, cela semble tout à fait en accord avec nos résultats.

Après exclusion des fragments indéterminés et simplification des catégories anatomiques, il subsiste 24937 fragments. Comme chez les adultes, les fragments de bloc crânio facial arrivent en première position des fragments déterminés (40 % de l'échantillon), suivis par les fragments de côtes (18,7 %) et de vertèbres (11,8 %). Les grands os longs ne représentent de 6,2 % de l'échantillon. Il est à noter l'apparition d'une cinquième catégorie au sein de ce classement : les phalanges de mains (elles constituent 3,8 % de l'échantillon).

Concernant les taux de latéralisation observés, les meilleurs scores sont :

- la clavicule (63,6 %) ;
- la scapula (59,6 %) ;
- l'os coxal (34,4 %) ;
- Les grands os long des membres (28,8 %) ;
- Les os du carpe (25 %) ;
- la mandibule (24,7%).

À noter toutefois que l'effectif des os du carpe est extrêmement faible (4 fragments identifiés seulement) ce qui est aisément compréhensible compte tenu de l'âge des individus.

**Nous pourrions donc plutôt retenir comme différence avec les adultes les informations importantes portées par les fragments de scapula.**

## (1) Détail du squelette crânien

Le nombre de fragments attribués au crâne est très élevé, mais 82,3 % d'entre eux (n=8200) sont classés dans la catégorie des fragments crâniens indéterminés (voute/face/base).

Parmi les fragments identifiés avec précision, les catégories anatomiques les mieux représentées sont :

- la mandibule (n=239 soit 13,5 %) ;
- l'os temporal (n=210 soit 11,9 %) ;
- l'os occipital (n= 186 soit 10,5 %) ;
- l'os sphénoïde (n=153 soit 8,7 %) ;
- **les osselets de l'oreille moyenne (n=139 soit 7,9 %).**

Ces catégories restent similaires à celles retrouvées chez les adultes, mais de la même façon que pour les immatures de Pompéi, Cumes et du Vatican, l'os zygomatique n'entre pas dans le classement. Par ailleurs, on retrouve à la cinquième place du classement les fragments d'os de l'oreille moyenne, qui sont retrouvés à 139 reprises dans cet échantillon.

Concernant les taux de latéralisation associés aux fragments de crâne, les résultats obtenus sont les suivants :

- l'os nasal (100 %) ;
- l'os frontal (95,6 %) ;
- l'os zygomatique (89,7 %) ;
- l'os temporal (82,9 %) ;
- l'os palatin (66,7 %) ;
- **les osselets de l'oreille (62,6 %).**

Ces résultats sont toutefois à nuancer par le très faible effectif de l'os nasal et de l'os palatin.

Ce qu'il faut retenir en revanche, est l'excellent résultat obtenu pour les osselets de l'oreille moyenne.

Parmi les autres régions anatomiques, l'os zygomatique et l'os temporal obtiennent des résultats similaires à ceux de l'adulte.

On obtient également un excellent taux de latéralisation de l'os frontal à 95,6 %, qui s'explique par la présence d'un os frontal encore en deux parties chez le périnatal.

## (2) Détail du squelette infra crânien

Les grands os longs des membres sont plutôt bien représentés entre 156 et 285 fragments. Leurs taux de latéralisation varient de 13 % à 46 %.

En considérant uniquement les fragments diaphysaires les résultats des taux de latéralisation sont compris entre 15 et 63 %. Par exemple, l'humérus, très bien représenté par ses 285 fragments offre un taux de latéralisation global de 46 % et de 57 % pour ses fragments de diaphyse isolées.

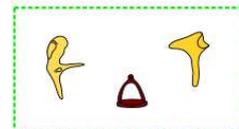
Par ailleurs, on notera de très bons résultats en termes d'effectifs pour les métatarsiens (n=393) et métacarpiens (n=367) mais des taux de latéralisation plus modestes respectivement de 13,2

% et 6,8 %. Cependant, il faut citer deux exceptions le premier métatarsien (taux de latéralisation 82,5 %) et le troisième métacarpien (taux de latéralisation 84,2 %).

### (3) Bilan global

Comme pour les autres catégories (adultes et immatures) nous avons représenté nos données sous forme de schémas, afin de mettre en évidence les fragments les plus informatifs (figures 90 et 91) :

- l'**os temporal** de façon globale et la **région pétreuse** en particulier ;
- la **pars lateralis de l'os occipital** ;
- l'**os frontal** et le **rebord orbitaire** ;
- les **grandes ailes du sphénoïde** ;
- les **osselets de l'oreille moyenne** et tout particulièrement l'**incus et le malleus** ;
- l'**os zygomatique** ;
- la **scapula** de façon globale ;
- l'**ilium** ;
- l'**extrémité distale de la diaphyse humérale** ;
- l'**extrémité proximale de la diaphyse fémorale** ;
- la **clavicule** de façon générale ;
- l'**extrémité proximale et la diaphyse de l'ulna** ;
- le **premier métatarsien** et le **troisième métacarpien**.



VERTEBRES	arc droit	corps	arc gauche
C 1			
C 2			
C 3			
C 4			
C 5			
C 6			
C 7			
rang indéterminé			

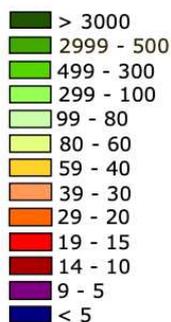
THORACIQUES			
T 1			
T 2			
T 3			
T 4			
T 5			
T 6			
T 7			
T 8			
T 9			
T 10			
T 11			
T 12			
rang indéterminé			

LOMBAIRES			
L 1			
L 2			
L 3			
L 4			
L 5			
rang indéterminé			

SACRÉES	aileron droit	arc droit	corps	arc gauche	aileron gauche
S 1					
S 2					
S 3					
S 4					
S 5					
rang indéterminé					

COTES	droite	gauche
T 1		
T 2		
T 3		
T 4		
T 5		
T 6		
T 7		
T 8		
T 9		
T 10		
T 11		
T 12		
rang indéterminé		
côté indéterminé		

STERNUM	
manubrium	
sternébrés	



----- Effectif global  
 ☆ Point craniométrique

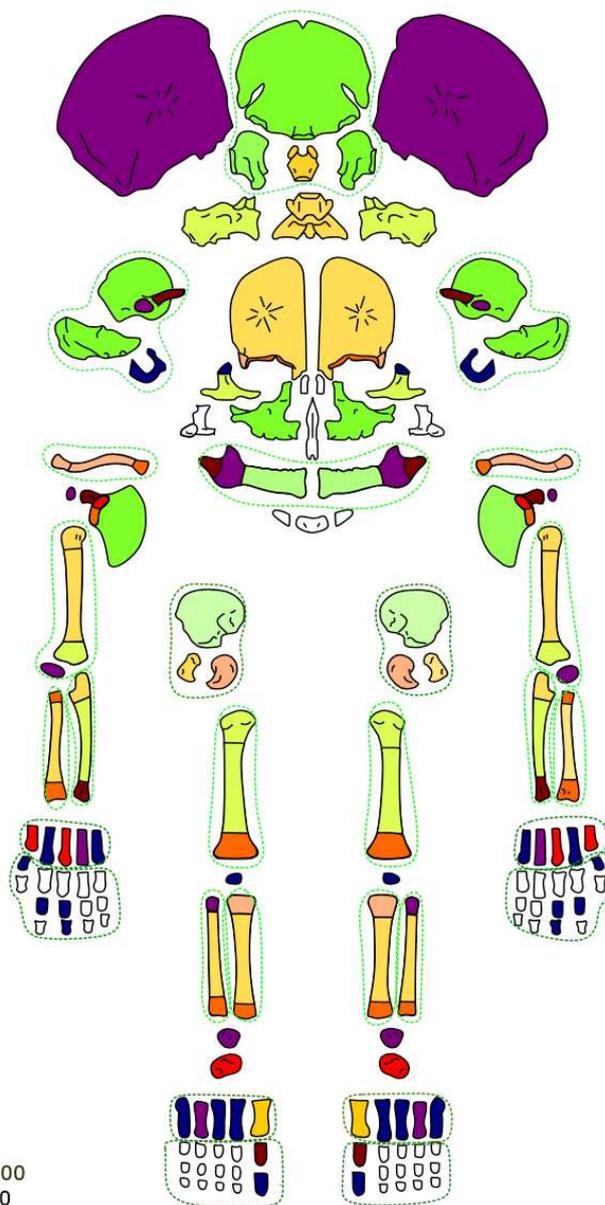


Figure 90 : représentation schématique des effectifs de fragments osseux identifiés pour chaque région anatomique pour l'ensemble des fragments osseux d'individus immatures et périnataux du site du Tophet de Salammbô à Carthage. Le nombre de fragments est figuré par une échelle colorimétrique.

CERVICALES	VERTEBRES			
	arc droit	corps	arc gauche	
	C 1			
	C 2			
	C 3			
	C 4			
	C 5			
	C 6			
C 7				
rang indéterminé				

THORACIQUES	VERTEBRES			
	arc droit	corps	arc gauche	
	T 1			
	T 2			
	T 3			
	T 4			
	T 5			
	T 6			
	T 7			
	T 8			
	T 9			
	T 10			
	T 11			
T 12				
rang indéterminé				

LOMBAIRES	VERTEBRES			
	arc droit	corps	arc gauche	
	L 1			
	L 2			
	L 3			
	L 4			
L 5				
rang indéterminé				

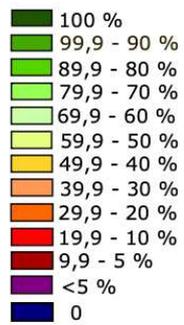
SACREES	aileron droit	arc droit	corps	arc gauche	aileron gauche	
	S 1					
	S 2					
	S 3					
	S 4					
	S 5					
rang indéterminé						

COTES	droite	gauche	
	T 1		
	T 2		
	T 3		
	T 4		
	T 5		
	T 6		
	T 7		
	T 8		
	T 9		
	T 10		
	T 11		
	T 12		
rang indéterminé			
côte indéterminé			

STERNUM	VERTEBRES	
	arc droit	arc gauche
manubrium		
sternabres		



----- Pourcentage de latéralisation global  
 ☆ Point craniométrique

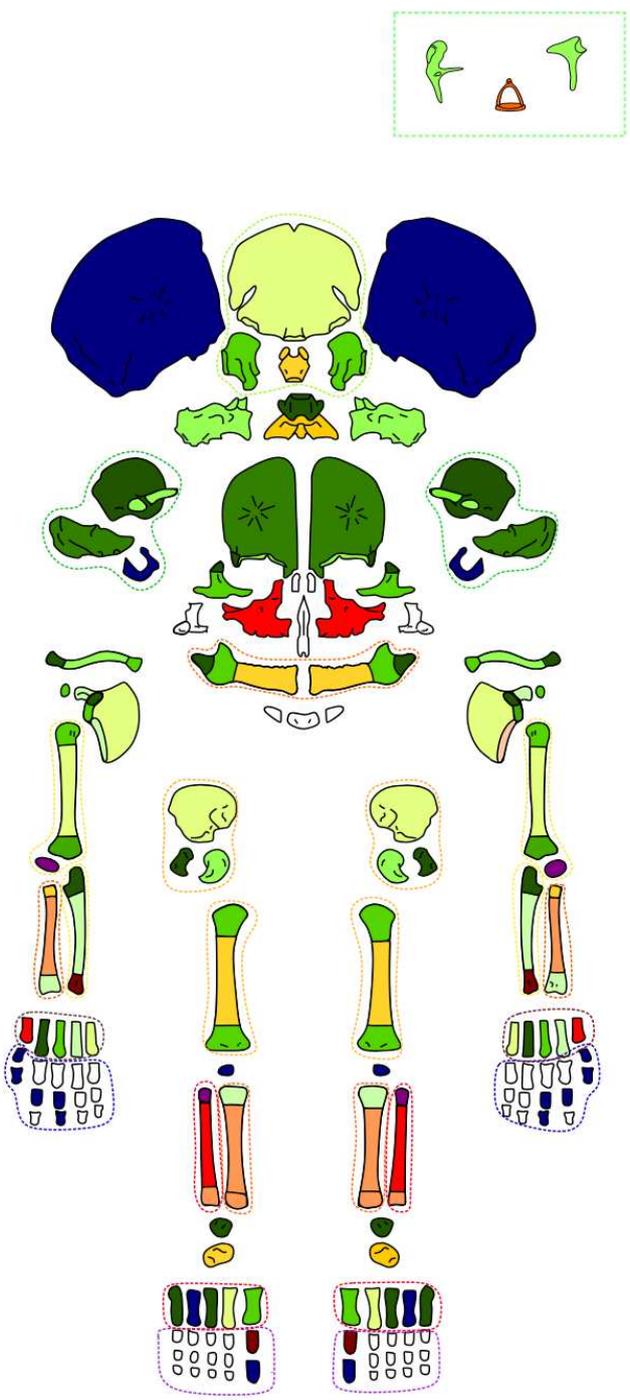


Figure 91 : représentation schématique des pourcentages de latéralisation pour chaque région anatomique pour l'ensemble des fragments osseux d'individus immatures périnataux du site du Tophet de Salammbô à Carthage. Le pourcentage de latéralisation des fragments est figuré par une échelle colorimétrique.

## B. Données biologiques et pondérales

---

Dans la première partie de cette étude nous nous sommes concentrée sur la détermination anatomique, en d'autres termes l'identification du fragment osseux. Dans un contexte de crémation, la chaleur, entraîne des modifications majeures du squelette (déformations, fragmentations). Cette étape est donc capitale pour la suite. En effet, ce n'est qu'à partir de ces fragments « déterminés » qu'il sera possible de mettre en évidence les critères d'identification biologique.

Les deux critères principaux pour l'identification biologique d'un individu sont la détermination du sexe et l'estimation de l'âge au décès. Il existe plusieurs autres critères que nous nommerons « secondaires » et qui pourront également être recherchés, dans le but d'affiner ou de renforcer l'identification.

Nous souhaitons mettre en évidence les différentes structures anatomiques qui malgré la crémation se conservent et fournissent quantitativement et qualitativement des informations relatives au profil biologique de l'individu. Ce sont les éléments qu'il conviendra de rechercher et d'analyser en priorité.

Nous débuterons par l'analyse des données relatives aux deux critères principaux puis nous discuterons les éventuels critères secondaires évaluables sur l'os brûlé.

Dans cette partie, nous avons pris en compte uniquement les données concernant Porta Nocera à Pompéi, Porta Mediana à Cumes et Santa Rosa au Vatican. Les données du Tophet de Salammbô à Carthage ne sont pas encore disponibles à l'heure actuelle, l'analyse biologique des individus est toujours en cours.

Pour les sites inclus, nous avons considéré l'ensemble des structures qui avaient fourni des restes osseux brûlés et fait l'objet d'une analyse anthropologique. Nous souhaitons rappeler que lorsque le dépôt considéré comportait plus d'un individu, nous avons mis en place deux stratégies :

- si la représentation entre les individus n'était pas équilibrée, seul l'individu principal était pris en compte (celui qui était représenté par la plus grande quantité de fragments en nombre et en masse) ;
- si les différents individus étaient bien représentés et de façon équilibrée, ils étaient pris en compte de façon indépendante, dans une sous-structure (par exemple cas de la tombe 15 A et B ou de la tombe 21 A, B et C).

## 1. Les critères principaux

---

### a) L'évaluation du sexe

---

#### (1) Présentation des effectifs

Le nombre total d'individus inclus est de 227. Les effectifs pour chaque catégorie de sexe sont présentés dans le tableau 15. Le sexe des immatures n'ayant pas été recherché sur des critères biologiques : tous les individus immatures sont classés parmi les indéterminés.

	Cumes	Pompéi	Vatican
<b>Féminin</b>	23	19	2
<b>Féminin probable</b>	6	12	4
<b>Indéterminé</b>	12	57	42
<b>Masculin</b>	15	11	3
<b>Masculin probable</b>	4	11	6

Tableau 15 : décompte du nombre d'individus par catégorie de sexe : déterminé, probable ou indéterminé. L'évaluation du sexe a été réalisée uniquement à partir des critères biologiques.

Après exclusion des individus immatures dont la classe d'âge était inférieure à la classe [15 – 19] ans (32 individus), notre effectif total pour les trois sites était de 194 individus : 73 dont le sexe a été déterminé de façon certaine, 43 de façon probable et 78 indéterminé (figure 92). Malgré les stigmates de la crémation, 60 % des individus ont donc pu être sexés de manière certaine ou probable selon des critères biologiques.

Pour l'ensemble des trois sites, les effectifs totaux par catégories de sexe sont les suivants :

- 44 individus de sexe féminin ;
- 22 individus de sexe féminin probable ;
- 29 individus de sexe masculin ;
- 21 individus de sexe masculin probable ;
- 78 individus de sexe indéterminé.

Ils sont représentés graphiquement sur la figure 93.

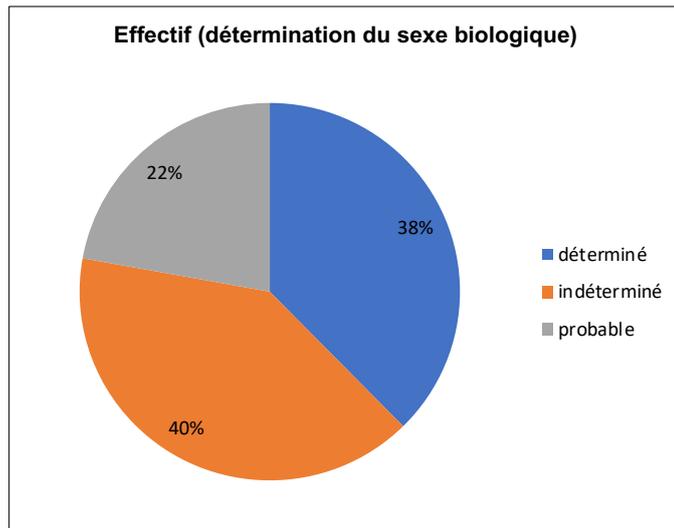


Figure 92 : représentation des effectifs d'individus selon la détermination du sexe. La classe « déterminé » correspond aux individus dont le sexe est déterminé de façon certaine par des arguments biologiques ; la classe « probable » correspond à une orientation concernant l'évaluation du sexe ; le sexe était classé « indéterminé » lorsque les arguments en faveur de l'orientation du sexe étaient insuffisants.

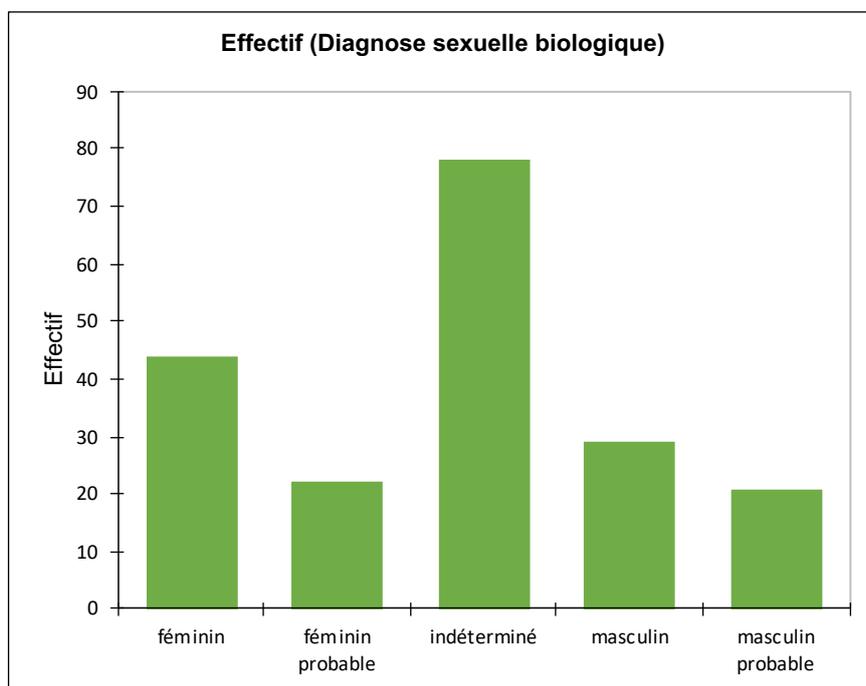


Figure 93 : représentation des effectifs des individus selon l'attribution de leur sexe pour l'ensemble des trois sites.

## (2) Recherche des critères d'évaluation du sexe sur l'os brûlé.

Au cours de l'analyse anthropologique, l'ensemble des fragments osseux a été observé dans l'objectif d'une recherche de marqueurs d'identification biologique. De manière générale, la fragmentation des os consécutive à la crémation, n'autorise pas l'utilisation des méthodes habituelles pour évaluer le sexe des individus, qui nécessite l'observation précise ou les mesures d'une combinaison de critères (Acsadi & Nemeskeri, 1970; Bruzek, 2002; Murail et al., 2005; Steckel et al., 2005).

Nous avons donc recherché parmi les données des analyses anthropologiques quelles étaient les régions anatomiques ou les critères morphologiques qui avaient pu être observés afin d'évaluer le sexe des individus.

Les éléments suivants ont été mis en évidence.

- **Éléments présents sur l'os coxal :**
  - observation de la morphologie générale de la grande incisure ischiatique ;
  - observation morphologique de l'arc composé ;
  - observation de l'angle sous pubien ;
  - observation générale de la forme du pubis ;
  - observation de la région pré-auriculaire et recherche d'un sillon pré-auriculaire ;
  - recherche de la présence ou de l'absence du tubercule de Buisson.
- **Éléments ou critères généraux :**
  - observation des critères de robustesse / gracilité du squelette.
- **Éléments pathologiques :**
  - présence d'une hyperostose frontale interne.

## (3) Nombre de critères observables nécessaires pour l'évaluation du sexe

L'évaluation du sexe a nécessité de manière générale une association de différentes observations.

En moyenne, 2 critères ont été nécessaires pour conclure ou non sur le sexe de chaque individu.

Les statistiques descriptives sont disponibles dans le tableau 16.

Le diagramme de la figure 94 montre que les individus pour lesquels le sexe a pu être évalué de manière certaine ou probable sont ceux pour lesquels le plus grand nombre de critères a pu être observé. Il a été possible d'observer entre 1 et 6 critères pour les individus dont le sexe était déterminé de manière certaine et entre 1 et 5 critères pour ceux dont le sexe a été évalué de manière probable. Le nombre maximum de critères observés chez les individus dont le sexe n'a pas pu être évalué est de 3.

Le diagramme de la figure 95 montre le nombre de critères observables selon le sexe des individus. L'évaluation du sexe masculin semble nécessiter l'observation d'un plus grand nombre de critères.

Une analyse de variance a été réalisée et montre que le nombre de critères observés est statistiquement plus élevé chez les individus de sexe masculin ( $p < 0,0001$ ) (tableau 17 et 18).

Statistique	Nombre de critères
Nb. d'observations	194
Minimum	0,000
Maximum	6,000
1er Quartile	1,000
Médiane	2,000
3ème Quartile	3,000
Moyenne	2,072
Variance (n-1)	2,896
Écart-type (n-1)	1,702

Tableau 16 : résultats des statistiques descriptives concernant le nombre d'observations possibles et réalisées afin d'évaluer le sexe biologique des individus.

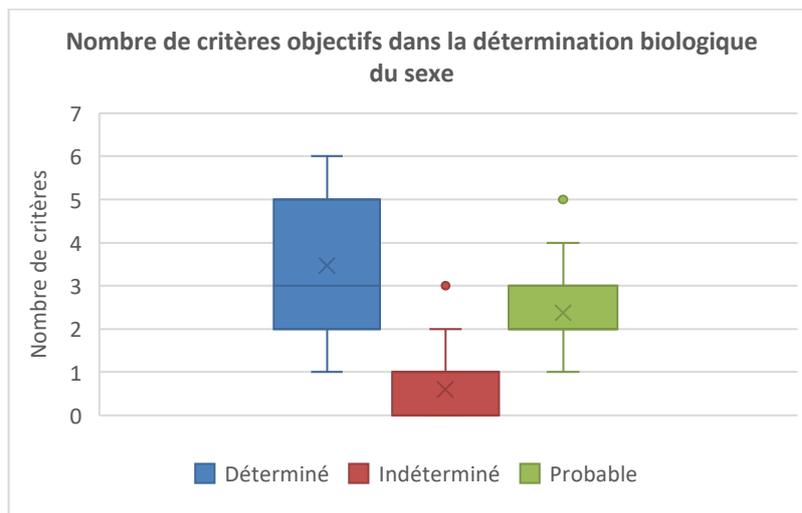


Figure 94 : représentation en *box plot* de la distribution du nombre de critères observés chez chacun des individus analysés, afin d'évaluer le sexe des individus.

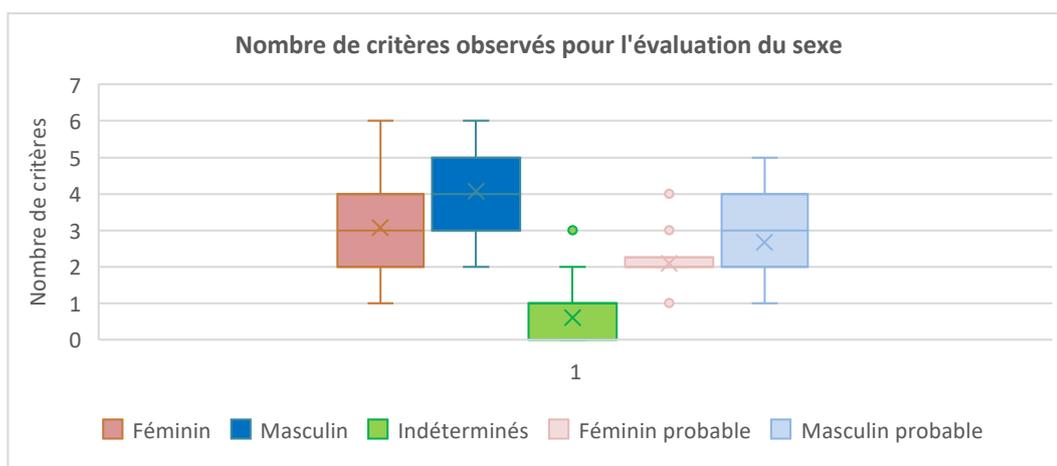


Figure 95 : représentation en *box plot* de la distribution du nombre de critères observés selon le sexe chez chacun des individus analysés.

### Analyse de la variance

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F	Codes de signification des p-valeurs
<b>Modèle</b>	4,000	335,168	83,792	70,756	<b>&lt;0,0001</b>	<b>***</b>
<b>Erreur</b>	189,000	223,822	1,184			
<b>Total corrigé</b>	193,000	558,990				

Calculé contre le modèle  $Y = \text{Moyenne}(Y)$   
Codes de signification :  $0 < *** < 0.001 < ** < 0.01 < * < 0.05 < . < 0.1 < ^\circ < 1$

Tableau 17 : résultats de l'analyse de variance. ©XLSTAT 2023.

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
<b>Féminin</b>	3,068	0,164	2,745	3,392
<b>Féminin probable</b>	2,091	0,232	1,633	2,549
<b>Indéterminé</b>	0,603	0,123	0,360	0,846
<b>Masculin</b>	4,069	0,202	3,670	4,468
<b>Masculin probable</b>	2,667	0,237	2,198	3,135

Tableau 18: moyenne du nombre de critères observés pour le facteur sexe. ©XLSTAT 2023.

#### **(4) Association des critères**

De manière générale, seules les observations réalisées sur l'os coxal ont été considérées comme fiables et ont conduit à une évaluation du sexe.

L'os coxal a pu être examiné ou en partie examiné chez 110 individus. Parmi eux, 91,8 % (n=101) ont obtenu une évaluation probable ou certaine du sexe. On ne comptabilise que 9 individus dont le sexe n'a pas pu être évalué après observation de critères sur l'os coxal, même avec une association de critères.

Nous avons constaté que certains critères semblaient avoir plus de poids que d'autres. En effet, ils semblaient se suffire à eux-mêmes pour l'évaluation du sexe alors que d'autres devaient nécessairement faire partie d'une association. L'évaluation du sexe à partir d'une seule observation a été réalisée chez 8 individus. Pour 4 d'entre eux ces observations concernaient bien l'os coxal : observation d'un sillon pré auriculaire (n=3) et observation d'une morphologie hypersexualisée de la grande incisive ischiatique (n=1). Toutefois un autre critère extérieur à l'os coxal a été retrouvé à plusieurs reprises : l'observation d'une hyperostose frontale interne. Cet élément pathologique a permis à lui seul d'évaluer le sexe de 4 individus.

En revanche tous les autres critères extérieurs à l'os coxal, notamment les critères de gracilité ou de robustesse des reliefs osseux du crâne, de la face ou des os longs des membres n'ont jamais été considérés suffisamment discriminants et n'ont jamais conduit à eux seuls à l'évaluation du sexe des individus.

#### **(5) Impact de la fragmentation**

Nous avons recherché l'impact de fragmentation sur l'évaluation du sexe. La fragmentation a été évaluée à partir du poids moyen (sauf esquille) calculé pour chacun des individus.

Les catégories ont été simplifiées comme suit : lorsque le poids moyen sauf esquille était supérieur ou égal à 2 g., la fragmentation était considérée comme faible, lorsqu'il était compris entre 1 g et 1,99 g., la fragmentation était moyenne, lorsqu'il était strictement inférieur à 1 g., la fragmentation était forte.

Les individus pour lesquels les données pondérales n'étaient pas disponibles sont notés « NC » pour « Non Communiqué ».

Un test du Khi2 a été réalisé pour montrer l'importance de la fragmentation dans l'évaluation du sexe. Il montre un lien significatif entre le taux de fragmentation et l'évaluation du sexe. Statistiquement, le sexe des sujets dont la fragmentation est faible est mieux évalué que celui des sujets dont la fragmentation est forte ( $p < 0,0001$ ) tableau 5. L'histogramme de la figure 96 illustre ces résultats.

Khi <sup>2</sup> (Valeur observée)	45,352
Khi <sup>2</sup> (Valeur critique)	12,592
DDL	6
p-value	<0,0001
alpha	0,05

Tableau 19 : résultats du test du *Khi<sup>2</sup>* entre les données de sexe et de fragmentation. ©XLSTAT 2023.

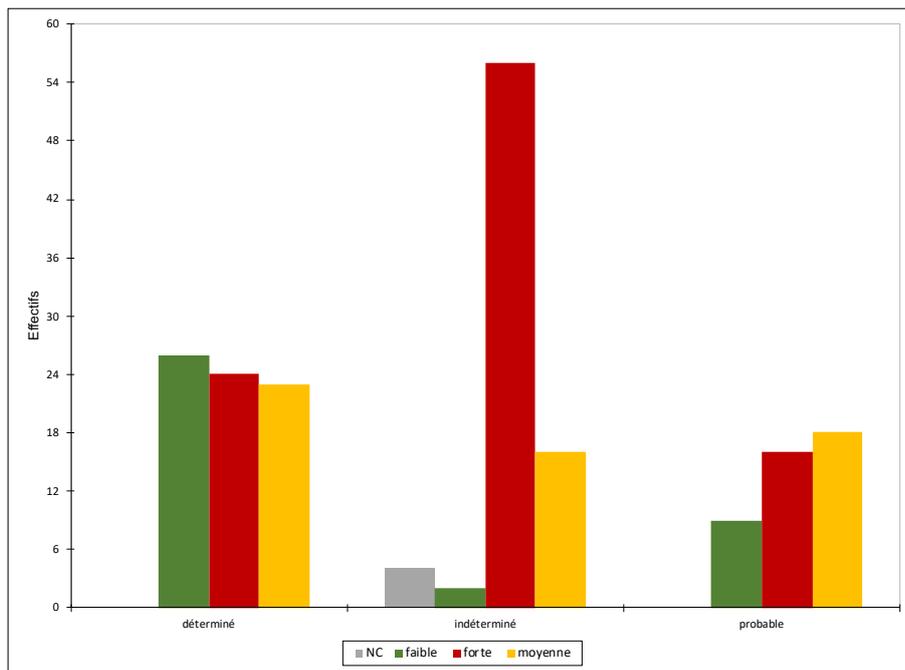


Figure 96 : effectif des individus de sexe « déterminé », « probable » ou « indéterminé » selon que la fragmentation est considérée « faible », « forte » ou « moyenne ». ©XLSTAT 2023.

## (6) Indication du sexe par les données pondérales

Dans la littérature plusieurs références précisent une association entre la masse totale des os brûlés et le sexe des individus (Depierre, 2013; Herrman, 1976; Malinowski, 1969; Malinowski & Porawski, 1969; Rosing, 1977; Van Deest et al., 2011).

Il existerait une différence significative selon le sexe : La masse totale des os brûlés des sujets de sexe féminin serait plus faible que celle des sujets de sexe masculin.

Nous avons souhaité vérifier cette hypothèse pour notre échantillon.

Il était donc nécessaire de ne garder que les tombes dont le NMI était égal à 1. Il n'était pas pertinent de garder les structures multiples, sachant qu'elles peuvent mélanger des hommes et femmes adultes et des individus immatures, certains d'entre eux bien représentés, alors que pour d'autres la représentation restait anecdotique.

Au Vatican, de nombreuses tombes ou dépôts funéraires entraient dans ce cadre et nous nous retrouvons avec un seul individu féminin (ou féminin probable) ce qui rendait ce site totalement inadapté à une comparaison femmes/hommes. Il a donc été exclu.

Nous avons réalisé cette analyse uniquement sur les individus de Cumes et de Pompéi. La figure 97, présente la dispersion du poids total en fonction du sexe et du site.

Les résultats des analyses statistiques représentés sur la figure 97 sont donnés sous format numérique dans le tableau 20.

Deux constats peuvent être réalisés :

- **il existe une différence significative au niveau du poids des restes selon le sexe des individus** (le problème du sexe « certain » ou « probable » ne semble pas jouer un très grand rôle puisque les hommes possèdent toujours une masse totale supérieure à celle des femmes) ;
- **il semble exister une différence entre les sites** où nous retrouvons une masse statistiquement plus élevée à Cumes qu'à Pompéi. Cette différence inter-site pourrait avoir plusieurs causes : taphonomique, pathologique, distribution de l'âge des individus dans l'échantillon... En effet, comme nous avons pu le voir dans notre chapitre de prérequis, des facteurs hormonaux notamment liés à la ménopause influent fortement sur la minéralisation osseuse.

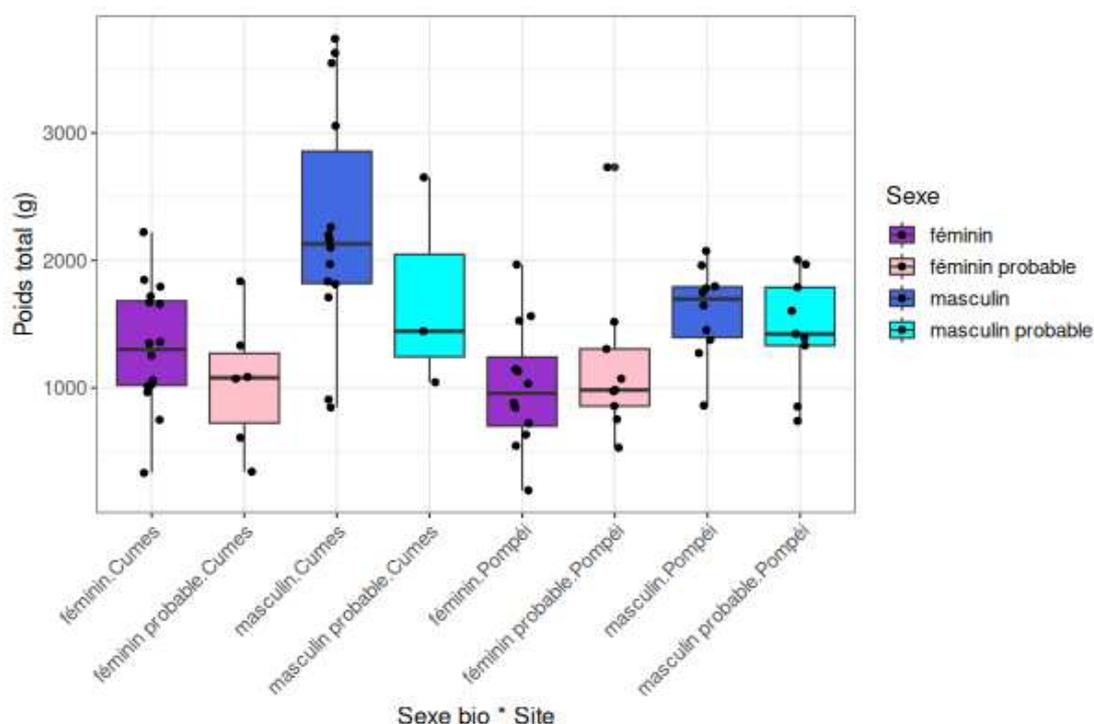


Figure 97 : *box plot* représentant la dispersion du poids total des individus selon les critères d'évaluation biologiques du sexe.

Site	Sexe	Effectif	Moyenne	Min	Max
<b>Cumes</b>	Féminin	16	1317.3	333.8	2220.9
<b>Cumes</b>	Féminin probable	6	1046.6	342.6	1836.8
<b>Cumes</b>	Masculin	14	2269.9	847.3	3739.6
<b>Cumes</b>	Masculin probable	3	1713.2	1044.6	2651.1
<b>Pompéi</b>	Féminin	12	1016.3	196.2	1967.4
<b>Pompéi</b>	Féminin probable	9	1191.9	531.4	2730.9
<b>Pompéi</b>	Masculin	10	1597.4	862.2	2074.1
<b>Pompéi</b>	Masculin probable	9	1456.5	740.3	2005

Tableau 20 : résumé numérique concernant les données du poids total des fragments de chaque individu en fonction du site et du sexe.

Afin d'éviter les biais qui pourraient être engendrés par les individus indéterminés, nous avons testé deux stratégies différentes :

- la première agrège en une seule catégorie « F » les individus féminins diagnostiqués de façon certaine et probable et en une seule catégorie « M » les individus de sexe masculin déterminé de façon certaine et probable ;
- la seconde compare les individus identifiés de façon certaine uniquement.

Les résultats sont présentés dans la figure 98 et on peut remarquer qu'ils sont sensiblement équivalents : le patron global reste inchangé, que ce soit pour le site de Cumes ou le site de Pompéi. Il existe toujours une différence significative entre le poids des individus de sexe masculin et celui des individus de sexe féminin.

Une analyse de variance ANOVA a été réalisée qui montre un très fort effet « Sexe » ( $p < 0,00001$ ) confirmant que les masses totales sont plus élevées dans les tombes masculines. Cependant elle confirme également un léger effet « Site » matérialisant le fait que les masses totales retrouvées sont plus élevées à Cumes qu'à Pompéi, tel que nous l'avons déjà envisagé plus haut, évoquant une cause taphonomique ou pathologique.

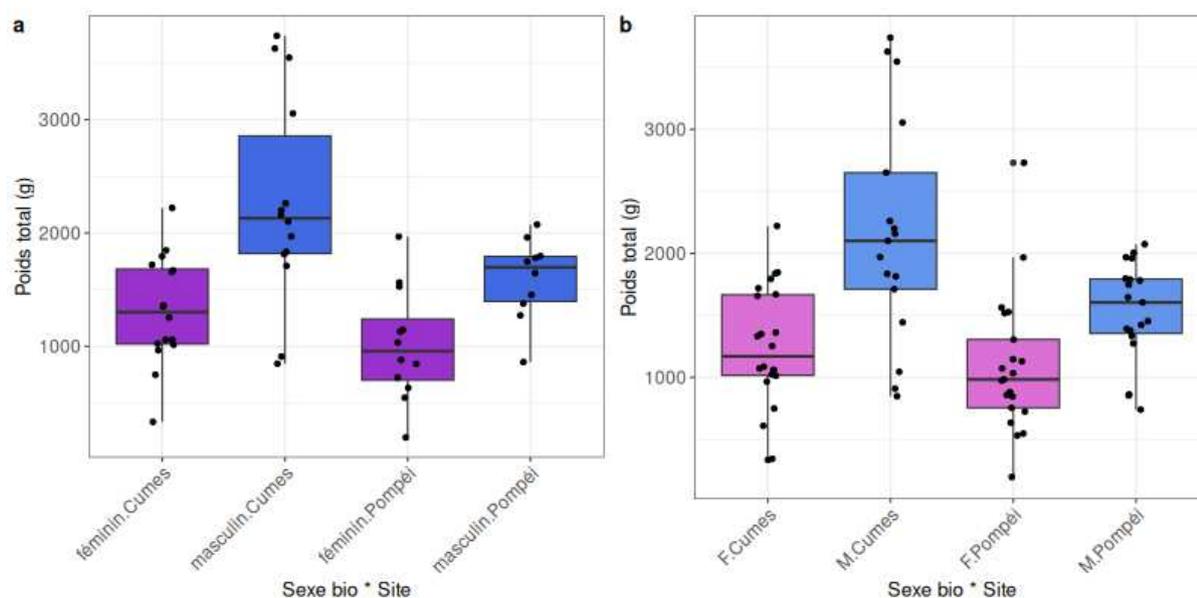


Figure 98 : *box plot* représentant la dispersion du poids total des individus selon les critères d'évaluation biologique du sexe. La figure (a) agrège en une seule catégorie les individus diagnostiqués de manière certaine et probable, la figure (b) compare les individus identifiés de manière certaine uniquement.

## (7) L'apport des données archéologiques : l'exemple de Porta Nocera

Les données archéologiques<sup>18</sup> (figure 99) ont permis de fournir des informations concernant le sexe de 13 femmes et 24 hommes.

Si l'on considère l'apport des données archéologiques par rapport aux indicateurs biologiques, on constate les éléments suivants :

- 18 individus sont concernés par une évolution de l'évaluation de leur sexe,
- 14 individus de sexe « indéterminé » ou « probable » ont obtenu un sexe « certain »
- 4 individus de sexe « indéterminé » ont évolué vers une évaluation du sexe « probable ».

Ces données sont résumées dans le tableau 21.

Cependant, il convient de rester prudent, il peut exister des discordances entre le sexe mentionné sur l'épithaphe et le sexe biologique des individus. Une discordance a été observée à Porta Nocera (cas de la sépulture 1F-3 et tient au fait de la présence des restes de plusieurs individus dans la tombe).

<sup>18</sup> par exemple, une mention sur l'épithaphe ou une stèle « sexuée » par la présence d'un chignon pour les stèles relative à un individu de sexe féminin ou l'absence de chignon sur les stèles relatives à un individu de sexe masculin.

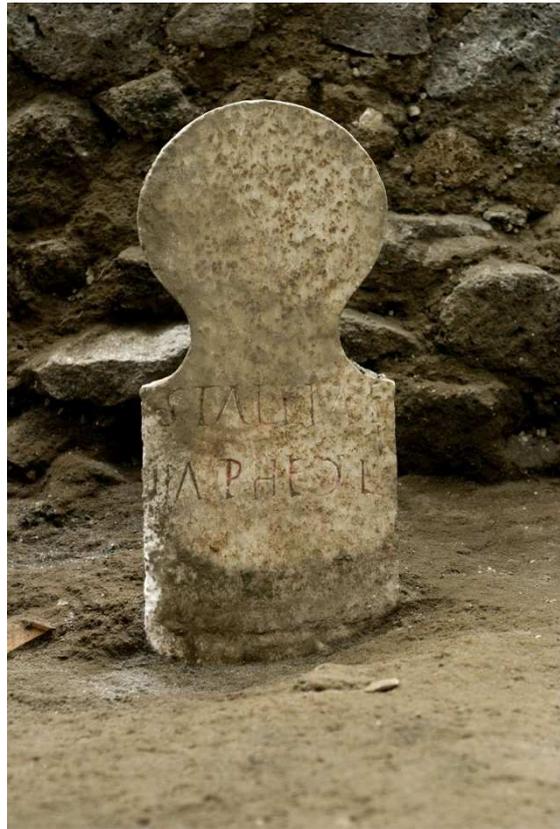


Figure 99 : deux exemples de stèle. La photographie de gauche, enclos 21 - tombe 201 stèle de Bebryx, mentionne « Bebryx a vécu 6 ans » ; la photographie de droite, est la stèle de la tombe 202 de l'enclos 21 « STALLIA HAPHE » correspond à un individu d'âge adulte et de sexe féminin. Clichés H. Duday.

Nbre d'individus concernés	Sexe biologique	Sexe avec données archéologiques
1	Indéterminé	➡ Féminin probable
5	Indéterminé	➡ Féminin
3	Féminin probable	➡ Féminin
5	Indéterminé	➡ Masculin
3	Indéterminé	➡ Masculin probable
1	Masculin probable	➡ Masculin

Tableau 21 : tableau regroupant les évolutions concernant l'évaluation du sexe des individus en prenant en compte les données archéologiques en supplément des données biologiques.

### *b) L'estimation de l'âge au décès*

De même que pour l'évaluation du sexe, pour la question de l'estimation de l'âge au décès lorsque des dépôts comportaient plusieurs individus, nous avons mis en place deux stratégies :

- si la représentation n'était pas équilibrée, seul l'individu principal était pris en compte,
- si les différents individus étaient bien représentés et de façon équilibrée, ils étaient pris en compte de façon indépendante.

Nous avons inclus les données relatives aux sites de Pompéi, Cumes et du Vatican soit 211 individus. Les effectifs répartis selon les différentes catégories d'âges sont présentés dans le tableau 22.

Classes d'âges	Fréquence
[0-1] an	3
[1-4] ans	8
[5-9] ans	15
[10-14] ans	5
[15-19] ans	9
Adultes jeunes	41
Adultes	84
Adultes âgés	46

Tableau 22 : décompte du nombre d'individus par classes d'âges, pour l'ensemble des sites considérés.

Pour chaque classe d'âge, nous avons recherché quels pouvaient être les critères d'identifications qui avaient fait l'objet du plus grand nombre de recherches ou d'observations parmi l'ensemble des individus.

Nous avons vu précédemment, que de façon générale, l'estimation de l'âge au décès était la plus précise chez les individus les plus jeunes. Au fur et à mesure de l'avancée en âge, la précision et la fiabilité, ont tendance à diminuer. Ces constatations sont les mêmes lorsque les os sont brûlés. La carbonisation, par son action de fragmentation, pourrait même avoir tendance à accentuer ce phénomène : la plupart des méthodes les plus fiables habituellement ne seront pas toujours applicables à l'os brûlé.

Les principaux critères d'observation recherchés ont été classés en quatre catégories afin d'estimer l'âge des individus :

- **Les éléments relatifs à la croissance**
  - *Stade de maturation osseuse* : il s'agit d'observer l'ensemble des régions susceptibles de présenter soit une absence de fusion, soit une fusion incomplète, soit une fusion totale. On peut citer par exemple les listels vertébraux, la crête iliaque ou l'épiphyse médiale de la clavicule.
  - *Stade de maturation dentaire* comprenant l'observation des apex dentaires.
  - *Dimensions du squelette infra-crânien.*
- **Les éléments relatifs à la maturité**
  - *Observation des sutures crâniennes.*
  - *Observation de la symphyse pubienne.*
  - *Observation de la surface auriculaire iliaque.*
  - *Observation de la région acétabulaire.*
  - *Observation de l'extrémité sternale des côtes.*
- **Les éléments relatifs à la sénescence**
  - *La présence de calcifications.*
  - *La présence de pathologies dégénératives.*
  - *L'existence d'une hyperostose frontale interne.*

- **Autres éléments**
  - o *L'usure dentaire.*

Le tableau 23 regroupe ces différents critères et le nombre d'observations réalisées, côté « oui » dans la base de données, pour chaque classe d'âge. Étant donné que les effectifs des classes d'âges ne sont pas équilibrés, ces résultats sont également donnés sous forme de pourcentages (tableau 24) afin de mieux les comparer.

	0-1	1-4	5-9	10-14	15-19	Adultes jeunes	Adultes	Adultes âgés	Total
<i>Zones de cartilages de conjugaison</i>	1	8	11	5	9	41	81	45	<b>201</b>
<i>Listels vertébraux</i>	0	1	2	5	9	33	61	37	<b>148</b>
<i>Crête iliaque</i>	0	0	2	4	8	32	50	35	<b>131</b>
<i>Épiphyse médiale de la clavicule</i>	0	0	0	3	8	31	31	20	<b>93</b>
<i>Région des apex dentaires</i>	0	3	6	3	7	17	21	12	69
<i>Stade de maturation dentaire</i>	3	6	14	3	7	11	11	5	60
<i>Dimension du squelette infra-crânien</i>	2	6	10	4	1	1	5	1	30
<i>Sutures crâniennes</i>	0	1	4	2	5	28	34	33	<b>107</b>
<i>Extrémité sternale des côtes</i>	0	0	0	1	3	11	20	16	51
<i>Symphise pubienne</i>	0	0	0	2	5	12	17	9	45
<i>Surface auriculaire</i>	0	0	0	1	0	2	14	6	23
<i>Pathologies dégénératives</i>	0	0	0	0	0	3	32	40	75
<i>Présence de calcifications</i>	0	0	0	0	0	3	13	15	31
<i>HFI</i>	0	0	0	0	0	0	1	<b>13</b>	14
<i>Usure dentaire</i>	0	1	3	1	4	4	3	6	22

**Tableau 23 : critères les plus souvent recherchés et observés (nombre de « Oui » dans la base de données) par classes d'âges. La mention « Oui » dans la base de données correspond à l'objectivation de l'observation ou de la recherche de ce critère dans les données manuscrites relatives à chaque structure funéraire. (HFI = hyperostose frontale interne).**

	0-1	1-4	5-9	10-14	15-19	Adultes jeunes	Adultes	Adultes âgés	Total
<i>Zones de cartilages de conjugaison</i>	33,3	100	73,3	100	100	100	96,4	97,8	95,3
<i>Listels vertébraux</i>	0	12,5	13,3	100	100	80,5	72,6	80,4	70,1
<i>Crête iliaque</i>	0	0	13,3	80	88,9	78	59,5	76,1	62,1
<i>Épiphyse médiale de la clavicule</i>	0	0	0	60	88,9	75,6	36,9	43,5	44,1
<i>Région des apex dentaires</i>	0	37,5	6	60	77,8	41,5	25	26,1	32,7
<i>Stade de maturation dentaire</i>	100	75	93,3	60	77,8	26,9	13,1	10,9	28,4
<i>Dimension du squelette infra-crânien</i>	66,7	75	66,7	80	11,1	2,4	5,9	2,2	14,2
<i>Sutures crâniennes</i>	0	12,5	26,7	40	55,6	68,3	40,4	71,7	50,7
<i>Extrémité sternale des côtes</i>	0	0	0	20	33,3	26,9	23,8	34,8	24,2
<i>Symphise pubienne</i>	0	0	0	40	55,6	29,3	20,2	19,6	21,3
<i>Surface auriculaire</i>	0	0	0	20	0	4,9	16,7	13	10,9
<i>Pathologies dégénératives</i>	0	0	0	0	0	7,3	38,1	86,9	35,5
<i>Présence de calcifications</i>	0	0	0	0	0	7,3	15,5	32,6	14,7
<i>HFI</i>	0	0	0	0	0	0	1,2	28,3	6,6
<i>Usure dentaire</i>	0	12,5	20	20	44,4	9,7	3,6	13	10,4

**Tableau 24 : critères les plus souvent recherchés et observés (pourcentage de « Oui » dans la base de données) par classes d'âges. La mention « Oui » correspond à l'objectivation de l'observation ou de la recherche de ce critère dans les données manuscrites relatives à chaque structure funéraire. (HFI = hyperostose frontale interne).**

Le premier constat d'ordre général est que le nombre de critères observés augmente avec l'âge des individus (figure 100).

Chez les immatures de la classe [1 – 4] ans, on va prioritairement observer les stades de maturation dentaire et la croissance osseuse de manière générale (régions d'intérêts et dimension du squelette infra crânien).

Au fur et à mesure que l'âge augmente, des régions plus particulièrement informatives vont être analysées : les listels des corps vertébraux, les apex dentaires, la crête iliaque, les sutures crâniennes...

Chez les adultes ou les grands adolescents de taille adulte, l'observation de l'épiphyse médiale de la clavicule (dernier stade de maturation observé) va prendre toute son importance.

Ensuite, une multitude d'autres critères apparentés à la sénescence apparaissent. Il est bien entendu qu'ils seront moins fiables que les précédents et qu'il conviendra parfois de les combiner afin d'obtenir une estimation de l'âge.

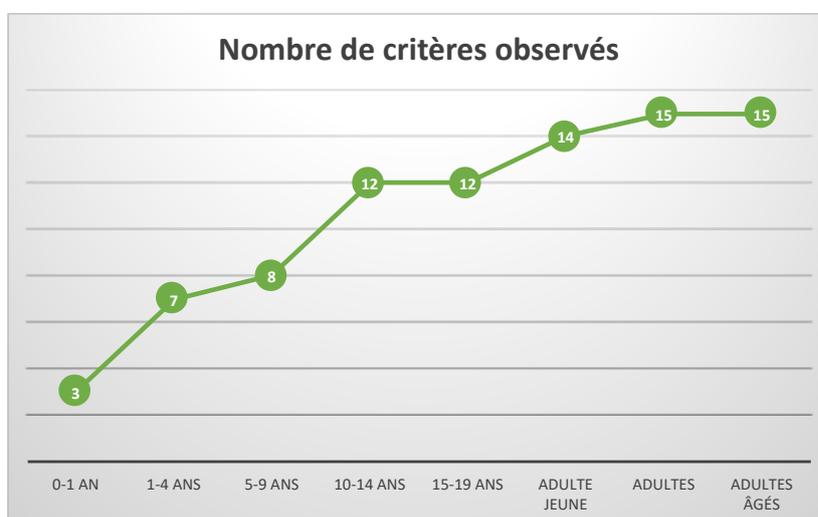


Figure 100 : nombre de critères observés pour l'évaluation de l'âge au décès en fonction des classes d'âges retenues.

## (1) Les éléments relatifs à la croissance

La catégorie que nous avons nommée « zone de cartilage de conjugaison » dans les tableaux 23 et 24, correspond à l'observation générale des régions épiphysaires et des points d'ossifications secondaires. Existe-t-il une absence de fusion ? une fusion incomplète ? une fusion complète avec traces ? une fusion totale ?

Nous avons constaté que ces questions/observations étaient celles qui revenaient le plus souvent.

Pour 95,3 % des individus, on retrouve dans les notes relatives à chaque fragment d'os, des indications sur ces régions de croissance. C'est même la première observation qui permet de distinguer les individus adultes des immatures, avant une analyse plus fine des autres critères de croissance ou de maturité. Les seuls individus pour lesquels ces régions sont peu informatives sont ceux de la classe [0-1] an.

Chez les individus les plus jeunes (classes [0-1] an et [1-4] ans), nous constatons de meilleurs scores pour l'observation des stades de maturations dentaires et les dimensions du squelette infra-crânien. Malgré la fragmentation, certains os, surtout chez les jeunes enfants restent mesurables et fournissent des informations précises quant à l'âge des individus.

À partir de la classe [10-14] ans, on constate que le nombre de critères observés augmente considérablement et que certaines régions sont préférentiellement observées : les listels vertébraux, la crête iliaque et l'extrémité médiale de la clavicule à partir de la classe [15-19] ans.

Concernant les dents (figure 101) : l'observation des stades de maturation dentaire est très fréquente chez les enfants jusqu'à la catégorie [15-19] ans, puis, l'on observe une nette diminution à partir de l'âge adulte. Pour les apex dentaires, il y a un pic d'observation dans la classe [15-19] ans. L'observation de l'usure dentaire suit la même tendance générale avec un pic d'observation entre 15 et 19 ans, mais les scores sont un peu plus faibles.

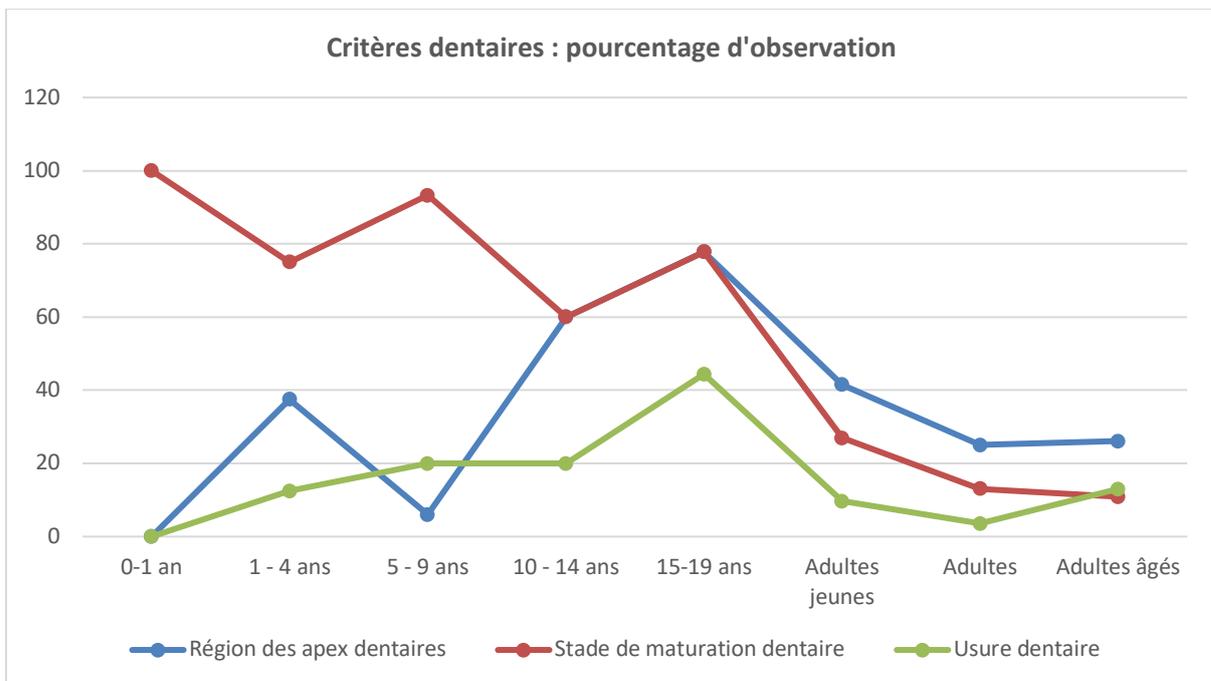


Figure 101 : évolution du pourcentage d'observation des critères dentaires en fonction des classes d'âges.

Enfin, malgré le phénomène de fragmentation, il est parfois encore possible de réaliser des mesures sur certains os ou fragments d'os. Les « dimensions du squelette infra-crânien » permettent d'obtenir des informations jusqu'à la classe d'âges [10-14] ans, au-delà, d'autres méthodes doivent être employées (figure 102).

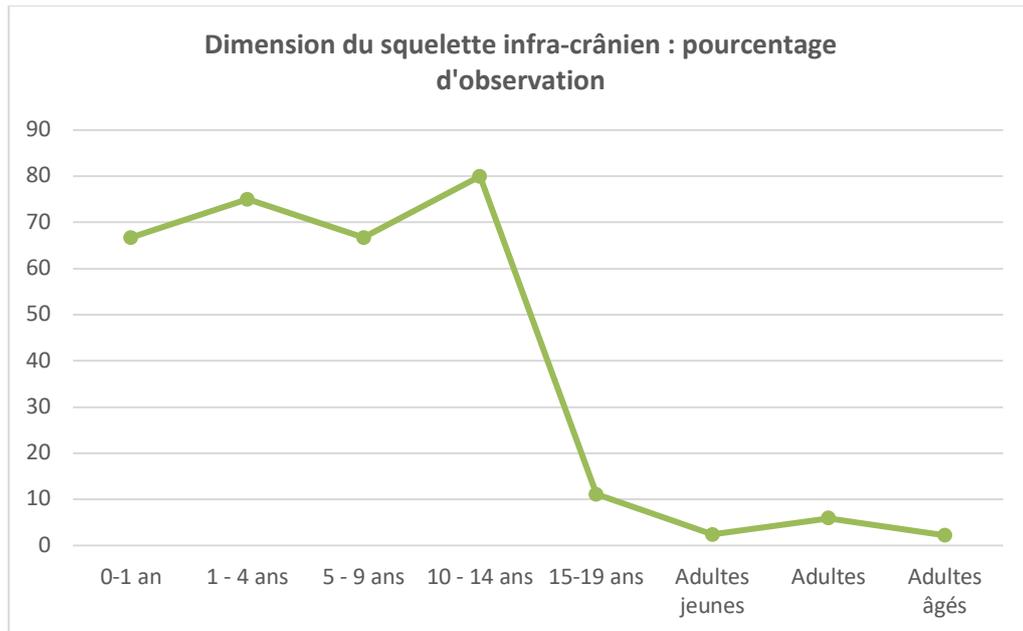


Figure 102 : Évolution du pourcentage d'observation des dimensions du squelette infra-crânien en fonction des différentes classes d'âges.

## (2) Les éléments relatifs à la maturité

Les critères de maturité sont recherchés à partir de la classe [15-19] ans. On a pu constater dans le (tableau 23) que les sutures crâniennes étaient fréquemment observées. L'observation de ce caractère a été mentionnée chez plus de 50 % des individus, alors que l'observation de la surface auriculaire, pourtant considérée en archéo-anthropologie comme un gold standard en termes de fiabilité et de précision, n'a pu être observée que dans 10,9 % des cas.

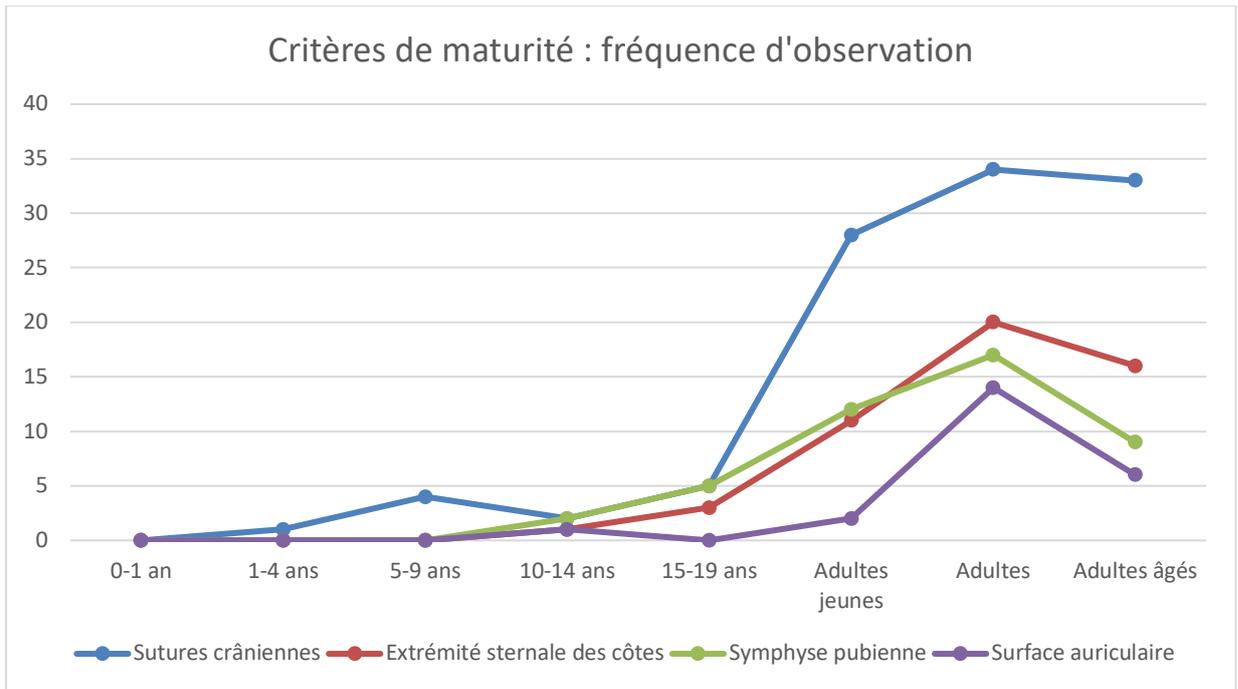
Ces résultats s'expliquent : en termes de conservation et de détermination anatomique, les fragments de crâne sont bien mieux représentés que les os coxaux.

Le constat est le même considérant la symphyse pubienne et l'extrémité sternale des côtes, leur observation est bien moins fréquente que celle des sutures crâniennes (figure 103).

## (3) Les critères de sénescence

L'observation de critères de sénescence ou la découverte d'une symptomatologie dégénérative peuvent également influencer la détermination de l'âge au décès des adultes.

Par exemple, dans le groupe « Adultes âgés » on observe la présence d'au moins une pathologie dégénérative dans 86,9 % des cas. De même, l'hyperostose frontale interne, a pu être diagnostiquée chez 14 individus.



**Figure 103 : évolution de la fréquence d'observation des critères de maturité en fonction des différentes classes d'âges.**

## 2. Les critères secondaires

En dehors des deux critères d'identifications principaux étudiés précédemment, d'autres éléments ou régions anatomiques peuvent fournir des données permettant d'orienter l'identification biologique des individus. Ils pourront être utilisés seuls ou en combinaison avec d'autres critères.

### a) Les critères de robustesse

Même s'ils doivent être utilisés avec précaution, les critères de robustesse et de gracilité ont souvent été associés au sexe des individus. Sur les squelettes non brûlés, la robustesse est basée sur le calcul du périmètre de l'os sur sa longueur maximale. Sur les squelettes incinérés, cette donnée ostéométrique est impossible à obtenir en raison de la fragmentation. La robustesse est donc évaluée visuellement en se basant à la fois sur l'observation des zones d'insertion des muscles ou des ligaments et sur l'épaisseur de l'os cortical. Tous les individus ont été classés comme "gracile", "robustesse moyenne", "robustesse forte" ou "indéterminé". Ils ont été classés comme indéterminés lorsque l'état général des fragments ne permettait pas d'observer suffisamment de zones d'intérêt.

L'observation de ces zones d'intérêts a pu être réalisée chez 146 individus.

Un tableau de contingence regroupe les effectifs dans les différents groupes (tableau 25).

Même si l'évaluation du sexe n'a jamais été réalisée uniquement sur ce critère, il apparaît que les individus de sexe « Féminin » et « Féminin probable » sont beaucoup plus souvent associés à une gracilité des os et que les individus de sexe « Masculin » et « Masculin probable » sont plus souvent associés à une forte robustesse ( $K_{hi}^2 = 89,3$ ,  $p < 0,0001$  ; comme certains effectifs sont inférieurs à 5 il a été réalisé un test G2 de Wilks = 101,8 et  $p < 0,0001$ ) (tableau 26 et 27).

Cependant, il faut noter que l'on retrouve des effectifs importants d'individus de robustesse forte chez les individus « indéterminés ».

Les résultats sont représentés sur le graphique de la figure 104.

Robustesse \ Diagnose sexuelle bio	Féminin	Féminin probable	Indéterminé	Masculin	Masculin probable
Forte	3	1	23	20	16
Gracile	23	23	7	1	0
Moyenne	5	2	14	6	2

Tableau 25: tableau de contingence robustesse / sexe. ©XLSTAT 2023.

Khi <sup>2</sup> (Valeur observée)	89,267
Khi <sup>2</sup> (Valeur critique)	15,507
DDL	8
p-value	<b>&lt;0,0001</b>
alpha	0,05

Tableau 26 : résultats de l'analyse statistique sur le tableau de contingence. Test du *Khi<sup>2</sup>*. ©XLSTAT 2023.

G <sup>2</sup> de Wilks (Valeur observée)	101,818
G <sup>2</sup> de Wilks (Valeur critique)	15,507
DDL	8
p-value	<b>&lt;0,0001</b>
alpha	0,05

Tableau 27 : résultats de l'analyse statistique sur le tableau de contingence. Test du *G<sup>2</sup> de Wilks*. ©XLSTAT 2023.

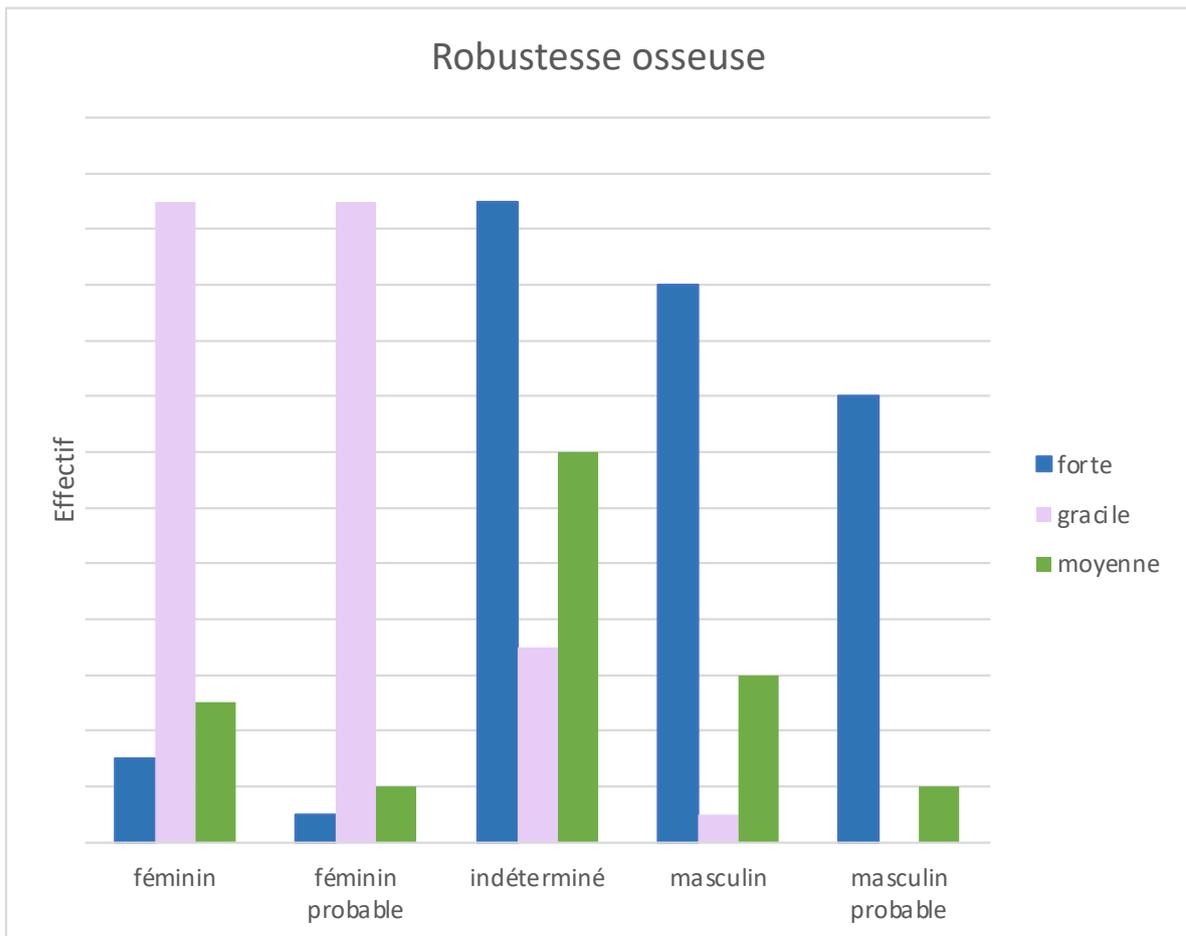


Figure 104 : représentation graphique des effectifs d'individus pour chaque catégorie de robustesse selon le sexe.

## b) *Les éléments pathologiques*

---

Le diagnostic des pathologies sur un squelette soulève un certain nombre de difficultés. Compte tenu de la nature incomplète et dégradée du matériel analysé, l'ensemble de la symptomatologie (signes cliniques et paracliniques) associée à la pathologie ne pourra être observable (Brothwell, 1961; Dutour, 2011).

Dans le cas des crémations, l'action du feu va accentuer cette dégradation et rendre l'œuvre plus difficile encore.

Nous avons vu précédemment que certains éléments pathologiques pouvaient jouer un rôle dans le cadre d'une identification comparative. Lorsque l'identité de l'individu est présumée et que certains éléments du dossier médical sont connus, la recherche de pathologie ou de traumatisme pourra s'avérer très informative.

Nous avons donc cherché quels étaient les différents éléments pathologiques qui pouvaient être mis en évidence lors de l'analyse biologique des fragments osseux et ce malgré un processus de crémation avancée.

Nous avons inclus tous les ensembles ayant livré des restes osseux brûlés à Porta Nocera, Porta Mediana et Santa Rosa, et classé les lésions observées en fonction de leur type d'atteinte et de leur localisation.

L'ensemble de ces données a été regroupé dans le tableau 28.

Les régions anatomiques qui ont le plus souvent été le siège de pathologies identifiables sont : le rachis pour une très grande majorité des lésions, puis la voûte crânienne, les côtes, les régions articulaires (épaule, genou, hanche, cheville, poignet) et certains os long (radius, humérus, tibia, clavicule et fémur).

Nous allons détailler les différentes catégories lésionnelles mises en évidence.

### **(1) Lésions dégénératives**

À la lecture des résultats compilés dans le tableau 28, il apparaît que les lésions de types dégénératives sont les plus fréquentes.

#### **L'arthrose**

L'arthrose est une lésion dégénérative articulaire. D'après la définition de l'OMS, elle résulte d'un déséquilibre entre la synthèse et la dégradation du cartilage et de l'os sous-jacent. L'arthrose débutante est caractérisée par une fissuration puis une érosion du cartilage qui finit par disparaître au fil du temps. Lorsque les cartilages ont totalement disparu on parle d'arthrose terminale, qui va s'accompagner d'une ostéocondensation, de la formation d'excroissances osseuses (ostéophytes) et de la création de cavités (géodes).

Toutes les articulations peuvent potentiellement être touchées par de l'arthrose à des fréquences variables. Les principales atteintes concernent le rachis (figure 105), les articulations des mains, les genoux et les hanches. Les principaux facteurs de risques sont l'âge, le sexe

féminin et les phénomènes d'hyperpression (surcharge pondérale, obésité, sur sollicitation professionnelle ou sportive, traumatismes articulaires), un terrain familial est parfois retrouvé.

	Pathologie osseuse				Pathologie articulaire			
	Type	Sous-type	Localisation	Nombre de sujets	Type	Sous- type	Localisation	Nombre de sujets
Anomalie de l'ostéo-formation	Exostose Spicule		- Humérus - Radius - Os coxal - Patella - Tibia - Calcaneus	8	Ostéophytes/ Syndesmophytes		- Rachis +++ - Calcaneus, naviculaire, cunéiforme - Côtes	105
	Hyperostose poreuse	<i>Cribra orbitalia</i>	- Région orbitaire	8				
		Autres	- Voûte crânienne - Diaphyses os long	12				
	Hyperostose dense localisée	HFI	Os frontal	15				
		Maladie de Paget	- Voûte crânienne	1				
		Hyperostose engageante rachidienne	- Rachis lombaire	4				
	Hyperostose dense diffuse	Autres	- Scapula	1	Enthésopathies		- Rachis +++ - Dents de l'axis - Ligament jaune - Crête iliaque - Tubérosité ischiatique - Patella - Tubérosité bicipitale du radius - Olécrane de l'ulna	84
Fluorose osseuse ?		- Atteinte diffuse	16					
Ostéopétrose		- Atteinte diffuse	2					
Anomalie de l'ostéolyse	Ostéoporose Déméralisation		- Atteinte diffuse	21	Arthrose	Porosité Éburnation	- Rachis +++ - Fémoro-patellaire - Temporo-mandibulaire - Acromio-claviculaire - Cheville (distal fibula) - Pied MTT1/ Sésamoïde - Rizarthrose	154
Anomalie de forme	Déformation	- Canal lombaire étroit - Atteinte avec rétrécissement des trous de conjugaison	- rachis	19	Déformation	Hernie intra spongieuse	- Corps vertébral	14
		- Arachnodactylie	- MTC	5				
		- Dysmorphie congénitale	- Fémur	1		Maladie de Scheuermann Autres ostéochondroses Anomalie transitionnelle	- Plateaux vertébraux - Tête du radius - Corps de la patella	5
		- Anomalie du développement	- Sinus frontal	1				
Infection / inflammation	Atteinte inflammatoire	Hypervascularisation	- Rachis - Clavicule - Patella - Côte	22	Atteinte inflammatoire	Bursopathie	- Tubérosité bicipitale du radius	10
		Ostéonécrose	- Tibia - Autre	2				
		Ostéite / périostite		2				
	Atteinte infectieuse	Granulome	- Dents	3		Capsulopathies	- Scapula (cavité glénoïdale) - Poignet - Atlanto-odontoidienne	11
		Spondylodiscite	- Rachis	4				
		Tuberculose (Mal de Pott)	- Rachis	1	Atteinte infectieuse	Arthrite	- Temporo-mandibulaire	1
Traumatismes	Fracture	Fracture traumatique	- Côtes - Clavicule - MTT1 - Diaphyse indéterminée	25	Fracture	Fracture	- Poignet (fracture de Pouteau Colles) - Cheville	4
		Fracture de fatigue/ tassement vertébral	- Rachis	11	Luxation	Luxation congénitale	- Hanche	2
Atteintes tumorales	Tumeurs osseuses	- Sarcome - Tumeur du sinus frontal - Ostéome - Apposition périostée (tumeur de l'enfant)	- Fémur - Os frontal - Autres	6				
Autres		- Anévrisme aortique	- Rachis thoracique	1				
		- Lésion nummulaire	- Tibia	1				
		- Fissure	- Patella	1				

Tableau 28 : tableau récapitulatif de l'ensemble des lésions pathologiques relevées sur les ossements de Porta Nocera, Porta Mediana et Santa Rosa.

Dans notre échantillon, **les lésions d'arthroses ont pu être identifiées à 154 reprises.**

Elles ont été observées préférentiellement au niveau du rachis, mais d'autres localisations ont été mises en évidence :

- l'articulation temporo-mandibulaire,
- l'articulation acromio claviculaire,
- les articulations du premier rayon de la main notamment l'articulation trapézo-métacarpienne impliquée dans la rizarthrose, plus communément appelée arthrose du pouce,
- l'articulation fémoro-patellaire (figure 106),
- les articulations de la cheville et du pied.

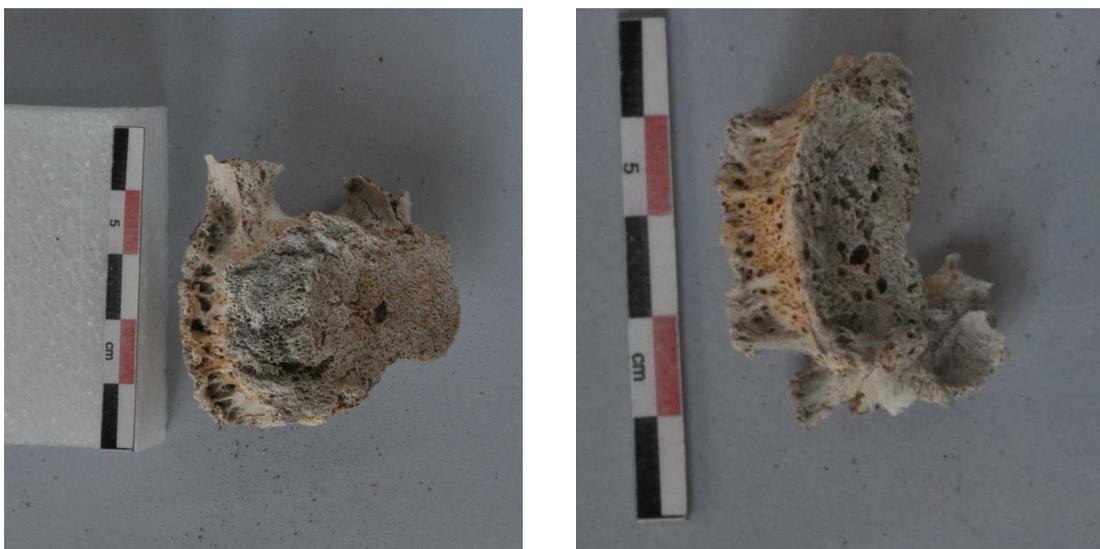


Figure 105 : lésion dégénérative vertébrale, sujet de la tombe 47, Porta Nocera.



Figure 106 : lésion dégénérative de type arthrose (extrémité distale du fémur, tombe 31).

## **Les ostéophytes, syndesmophytes, entésopathies, spicules et exostoses.**

Il s'agit de processus dégénératifs principalement basés sur des anomalies de l'ostéoformation. Ils peuvent toucher l'os (zones d'insertions tendineuses ou ligamentaires) ou les régions articulaires. **Nous les avons identifié à 197 reprises dans notre échantillon.** Ils sont majoritairement retrouvés en région rachidienne, mais d'autres localisations ont été mises en évidence : les côtes, la région plantaire, la crête iliaque, la tubérosité ischiatique, la tubérosité bicipitale du radius, l'olécrâne de l'ulna, la patella, les os longs tels que le tibia, l'humérus et le radius.

Par ailleurs, ces anomalies de l'ostéoformation peuvent générer des lésions susceptibles d'entraîner des conséquences fonctionnelles importantes : canal lombaire étroit, rétrécissement des trous de conjugaison, que nous avons pu mettre en évidence chez 19 individus.

## **L'ostéoporose et les signes de déminéralisation osseuse**

Il existe un important remodelage osseux au cours du vieillissement.

Le pic de masse osseuse est généralement atteint vers la fin de l'adolescence. Il constitue un facteur prépondérant de la minéralisation du squelette, qui est majoritairement influencé par des facteurs génétiques ou environnementaux tels que l'alimentation ou l'exercice physique. Ensuite, la masse osseuse décroît physiologiquement avec l'âge. Ce phénomène peut être accentué chez la femme après la ménopause. Après 50 ans, la femme subit une perte osseuse plus importante que celle de l'homme, l'accélération du remodelage osseux étant fonction de la carence oestrogénique. La raréfaction osseuse s'accélère en particulier au niveau de l'os spongieux, dont le nombre de travées diminue de façon irréversible. De plus, la carence en œstrogènes, induit une augmentation de la fréquence du remodelage avec une résorption plus élevée que ne l'est la formation. Le bilan devient négatif et l'on observe une augmentation de la perte osseuse dans les années qui suivent la ménopause, augmentant les risques d'ostéoporose. (Desoutter et al., 2012).

**Ce phénomène de déminéralisation osseuse a été observé chez 21 individus.**

## **(2) L'hyperostose frontale interne (HFI) (figure 107)**

L'hyperostose frontale interne est une lésion asymptomatique, sans signification clinique particulière mais souvent associée à de grands syndromes endocrinologiques. Les trois syndromes les plus fréquemment décrits sont : le syndrome de Morgagni-Morel (HFI, céphalées, obésité, hypertrichose et virilisme) ; le syndrome de Stewart-Morel (HFI, obésité et symptômes neuro psychiatriques) ; le syndrome de Troell-Junet (HFI, acromégalie, goitre et diabète de type 2) (Mayer, 1962b; Mayer & Martin, 1969; Moore, 1953; Paris et al., 2017).

Elle se caractérise par un épaissement irrégulier de l'os frontal, au dépend de la table interne. L'épaisseur du diploé peut augmenter du simple au triple mais la corticale externe garde toujours son aspect normal. Il peut s'agir d'exostoses lisses, uniques ou multiples, nodulaires ou de petits bourrelets plus ou moins réguliers faisant protrusion dans la cavité crânienne. Leur taille peut varier de quelques millimètres à plusieurs centimètres. De façon générale la ligne médiane est épargnée et en région postérieure, elle ne dépasse pas la limite de l'os frontal en avant de l'artère méningée moyenne (Hershkovitz et al., 1999; Mayer, 1962a).

À ce jour, l'étiologie exacte de l'hyperostose frontale interne n'est pas totalement établie mais l'influence de facteurs hormonaux fait consensus dans la littérature. C'est une pathologie qui est le plus fréquemment observée après la ménopause et presque exclusivement chez la femme (incidence rapportée entre 40 et 60 %), même si une association clinique avec l'hypogonadisme a été mis en évidence chez l'homme (Belcastro et al., 2011; Djonic et al., 2016; May et al., 2011a; Raikos et al., 2011; Western & Bekvalac, 2017).

**Nous avons mis en évidence 15 cas d'hyperostose frontale interne dans notre échantillon.**



Figure 107 : hyperostose frontale interne, tombe 1F-7 (clichés F. Giraud et H. Duday).

### (3) Les autres atteintes hyperostotiques

En dehors des atteintes dégénératives, il a été mis en évidence d'autres atteintes de types hyperostoses. Nous avons distingué les hyperostoses poreuses et les hyperostoses denses.

Les atteintes porotiques étaient principalement situées au niveau de l'extrémité céphalique (*cribra orbitalia* retrouvées chez 8 individus, atteinte de la voûte crânienne) mais plusieurs diaphyses d'os longs en présentaient également les signes.

Les hyperostoses denses quant à elles, pouvaient être localisées ou diffuses. Les atteintes localisées concernaient la voûte crânienne avec une atteinte caractéristique de la maladie de Paget, une hyperostose engainante rachidienne pouvant signifier une maladie de Forestier ou *diffuse idiopathic skeletal hyperostosis* (DISH) chez 4 individus et une atteinte scapulaire. Les atteintes diffuses concernaient 16 individus dont la plupart des cas retrouvés parmi les individus de Cumes qui pourrait faire suspecter une intoxication par le fluor. Deux cas présentant des signes d'ostéopétrose ont par ailleurs été mis en évidence.

### (4) Les atteintes infectieuses et inflammatoires

Plusieurs signes d'atteintes infectieuses et/ou inflammatoires ont été mis en évidence. Ils pouvaient toucher l'os ou les régions articulaires (figure 108).

Les signes d'inflammations les plus fréquemment observés étaient des lésions d'hypervascularisation.

Plusieurs localisations ont été mises en évidence : le rachis, la clavicule, les patellas et les côtes. Un total de 22 individus était concerné.

La tubérosité bicipitale du radius a présenté des signes de bursite dans 10 cas et des signes de capsuloplastie ont été mis en évidence à 11 reprises au niveau de l'épaule, du poignet ou de l'articulation atlanto-odontoïdienne.

Par ailleurs, des signes d'ostéite, de périostite et d'ostéonécrose ont pu être également identifiés.

Sur le plan infectieux il a été mis en évidence une lésion d'arthrite temporo-mandibulaire, trois granulomes probablement consécutifs à des infections dentaires, cinq individus présentaient une spondylodiscite (atteinte inflammatoire ou infectieuse des disques et vertèbres) dont un probablement séquellaire d'un processus infectieux tuberculeux localisé sur plusieurs ensembles disco-vertébraux (mal de Pott).

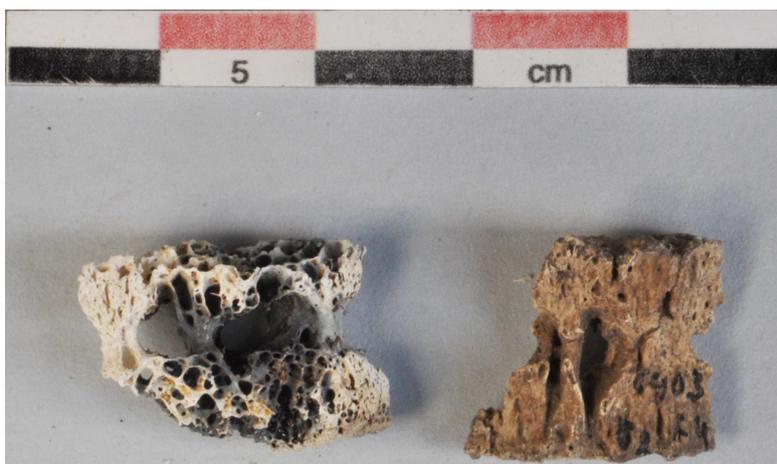


Figure 108 : atteinte vertébrale d'allure infectieuse (tuberculose ?), sujet de la tombe 1F-4 et structure 14, Porta Nocera.

## (5) Les traumatismes

Parmi les signes traumatiques, plusieurs fractures anciennes avec consolidation sous forme de cal osseux ont pu être mises en évidence (figure 109, 110 et 111).

Des fractures extra-articulaires ont été observées sur 25 fragments d'os. Il s'agissait principalement de fractures de côtes, mais il a été mis en évidence également une fracture de la clavicule et du premier métatarsien, les autres ont été observées sur des fragments de diaphyses indéterminées.

Des fractures articulaires ont aussi été observées au niveau du poignet et de la cheville. Deux individus présentaient des signes de luxation congénitale de hanche. Et 11 cas de fractures de fatigue à type de tassements vertébraux ont été détectés.



Figure 109 : Fracture de côte, sujet de la tombe 33, Porta Nocera.



Figure 110 : fracture de l'extrémité distale des deux os de l'avant-bras. Vue antérieure, postérieure et latérale. Tombe 7, Porta Nocera, Pompéi.



Figure 111 : fracture de la clavicule vue supérieure et inférieure. Tombe 32, Porta Nocera.

## (6) Les anomalies de formes

Plusieurs atteintes dysmorphiques ont été observées. Il pouvait s'agir des conséquences d'une atteinte dégénérative ou de pathologies congénitales.

- Un individu présentait une dysmorphie congénitale avec atteinte du fémur (anomalie de l'angle du col fémoral).
- Plusieurs métacarpiens étaient caractérisés par un allongement de type arachnodactylie. L'arachnodactylie est une anomalie congénitale, liée à des mutations du gène de la fibrilline-1 et 2 qui peut se produire sans problème de santé sous-jacent ou qui peut être associée à divers syndromes : le syndrome de Marfan, le syndrome d'Ehlers-Danlos, le syndrome de Loeys-Dietz, le syndrome de Beals et l'homocystinurie (Hayward et al., 1994; Viljoen, 1994).
- Un cas d'anomalie du développement du sinus frontal.
- Plusieurs cas d'ostéochondroses ont été détectés. Il s'agit d'atteintes ni inflammatoires ni infectieuses de différents points d'ossifications qui surviennent généralement pendant la croissance et qui affectent les épiphyses. Leur étiologie est à ce jour inconnue mais plusieurs hypothèses ont été proposées notamment une contrainte mécanique ou une composante familiale (Brewer & Fernandes, 2016; Ryding, 2020). Les ostéochondroses se distinguent par leurs localisations anatomiques : un individu présentait une dystrophie rachidienne caractéristique de la maladie de Scheuermann (atteinte des cartilages de croissances supérieurs et inférieurs des plateaux vertébraux du rachis thoracique

entraînant une hypercyphose dorsale), d'autres cas ont été observés au niveau des articulations du coude et du genou.

- Enfin, il a été mis en évidence 14 cas de déformations de corps vertébraux en lien avec la présence d'hernies intra-spongieuses ou des blocs bi-vertébraux (figure 112).



Figure 112 : fragment de bloc bi-vertébral, sujet de la tombe 206 à Porta Nocera (vue externe et interne).

### (7) Les pathologies d'allure néoplasique

Des atteintes tumorales ont été détectées chez 6 individus. Il a été mis en évidence entre autres un ostéosarcome du fémur, une tumeur non caractérisée du sinus frontal (figure 113) et une apposition périostée typique des tumeurs chez l'enfant.



Figure 113 : tumeur osseuse au dépend du sinus frontal, Porta Nocera.

### (8) Les autres atteintes

Plusieurs autres lésions ont été mises en évidence dont une déformation vertébrale pouvant signifier la présence d'un anévrisme de l'aorte thoracique, une lésion fissuraire de la patella et des lésions nummulaires du tibia présentant un aspect non caractérisé (figure 114).



Figure 114 : lésion nummulaire non caractérisée de la tête et de la diaphyse tibiale. Porta Nocera, sujet de la tombe 46.

## (9) Apports de la pathologie pour l'identification

### ➤ Les pathologies dégénératives comme indicateurs de l'âge dans l'identification reconstructive

Les lésions de types ostéophytes ou la présence d'arthrose sont très souvent causées par une atteinte dégénérative. Elles évoluent avec le temps et sont considérées comme faisant plus ou moins partie des processus normaux du vieillissement. La recherche de ces lésions typiques et assez simple à caractériser peut donc présenter un intérêt dans le cadre d'une identification reconstructive comme indicateur de l'âge des individus.

Nous avons testé le lien entre les lésions de types dégénératives et l'âge des individus.

Les lésions de types ostéophytes/syndesmophytes/enthésopathies/arthroses ont été regroupées. Nous les avons cotées « oui » si au moins une lésion était retrouvée sur au moins une localisation et « non », si aucune lésion n'était retrouvée. L'âge était initialement estimé en tenant compte à la fois les indicateurs biologiques et des données archéologiques.

Le tableau 29 est un tableau de contingence qui montre les effectifs d'individus porteurs ou non de ce type de lésion dans chaque classe d'âges. On observe une très nette augmentation des proportions de « oui » avec l'âge (figure 115).

Le résultat obtenu en réalisant un test du  $\chi^2$  est de 89,9 avec une valeur de  $p < 0,0001$  (tableau 30). Il existe une association significative entre un âge au décès avancé et la présence de ce type de lésions sur le squelette.

Tableau de contingence :								
	0-1	1-4	5-9	10-14	15-19	adulte jeune	adulte	adulte agé
non	3	7	16	5	8	31	37	1
oui	0	0	0	0	1	10	45	45

Tableau 29 : tableau de contingence présentant l'effectif d'individus comportant ou non des lésions dégénératives pour chaque classe d'âge.

Khi <sup>2</sup> (Valeur observée)	89,934
Khi <sup>2</sup> (Valeur critique)	14,067
DDL	7
p-value	<b>&lt;0,0001</b>
alpha	0,05

Tableau 30 : résultats de l'analyse statistique sur le tableau de contingence. Test du  $\chi^2$ . ©XLSTAT 2023.

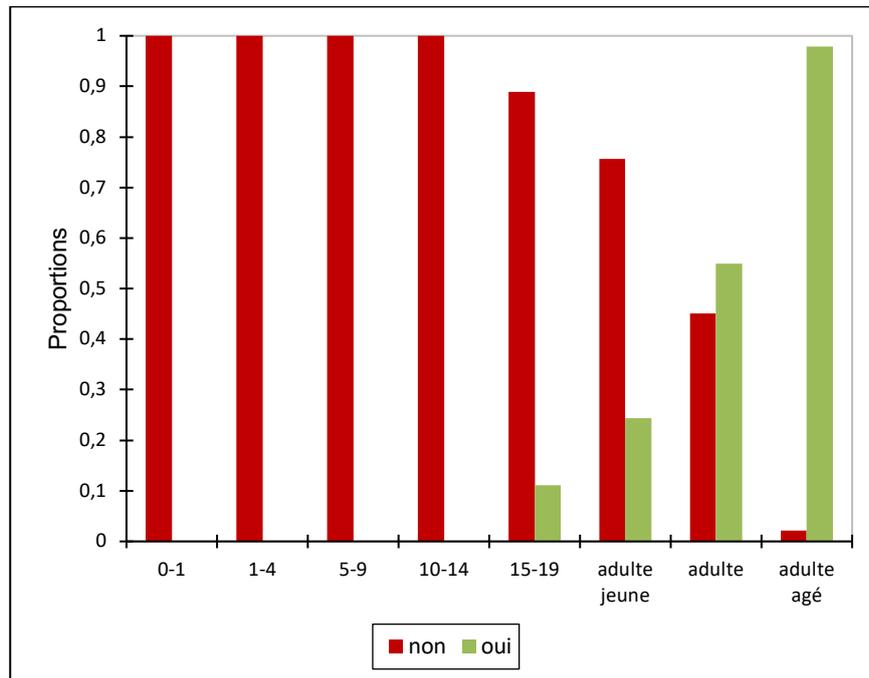


Figure 115 : représentation graphique des proportions d'individus présentant ou non des pathologies dégénératives par classes d'âges.

➤ **Le cas particulier de l'hyperostose frontale interne comme indicateur d'âge et de sexe**

Nous avons pu démontrer dans une étude réalisée avec les données de Porta Nocera que la recherche systématique de l'hyperostose frontale interne même sur des os ayant subi l'action du feu était capable de fortement majorer la détermination du sexe. Nous présentons cet article en annexe 7.

➤ **Utilisation des données de la pathologie dans l'identification comparative.**

Nous avons vu précédemment que les lésions les plus fréquemment observées étaient les lésions de types ostéophytes, syndesmophytes, enthésopathies et arthroses. D'un point de vue comparatif, ce type de lésions est rarement pathognomonique d'une atteinte particulière et peu mentionné dans le dossier médical des patients.

Il existe toutefois certains cas particuliers, tel que la spondylarthrite ankylosante (maladie rhumatismale inflammatoire chronique dont le substratum anatomique est une enthésopathie inflammatoire), qui se manifeste par la présence de syndesmophytes typiques au niveau du rachis qui peuvent être connus et rapportés au médecin en charge de l'identification (Ball, 1971). Cependant, il semblerait que les lésions de types enthésopathies puissent jouer un rôle non négligeable dans l'identification. Il a été montré par plusieurs auteurs qu'elles pourraient être utilisées comme marqueurs d'activités ou de comportements. Leurs étiologies sont variées : activités musculaires intenses, postures, traumatismes, comportements sanitaires ou alimentaires (Dutour, 1986; Kennedy, 1989; Niepel & Sit'aj, 1979; Villotte, 2006). Dans le cadre d'une identification comparative la recherche de ces marqueurs comportementaux pourrait s'insérer dans un faisceau d'arguments en faveur ou en défaveur d'une identité présumée.

D'autres lésions sont en revanche plus informatives sur le plan comparatif, même si elles sont moins fréquemment retrouvées, il conviendra d'être très attentif à la recherche de traumatismes anciens (fractures ou cal osseux articulaires ou extra articulaires ; traces de luxations anciennes), de signes infectieux, de signes de pathologies systémiques ou tumorales.

Par ailleurs, le dossier dentaire fournira des informations précieuses. Il est possible de mettre en évidence malgré la crémation des traces de pertes dentaires *ante-mortem*, de signes infectieux ou d'autres types de pathologies dentaires.

## C. NMI, Analyse spatiale : les liaisons et les exclusions ostéologiques

---

Nous avons largement évoqué précédemment, les difficultés inhérentes à l'analyse des restes humains brûlés. Cependant, nous avons montré dans les deux premiers chapitres de nos résultats, qu'il était possible d'obtenir des informations à partir de ces fragments d'os brûlés, fragmentés et déformés.

De nombreux fragments sont reconnaissables et précisément identifiables. Certains sont également latéralisables et d'autres encore sont porteurs d'indicateurs permettant de nous orienter pour établir le profil biologique des individus (estimation de l'âge au décès, détermination du sexe, estimation de la robustesse, pathologies, signes traumatiques...). Cependant, l'analyse d'un assemblage d'os brûlés, qu'il s'agisse d'une crémation archéologique, moderne ou d'un cas médico-légal accidentel ou criminel, va se heurter à deux types de problématiques majeures :

- l'identification de restes appartenant à un individu surnuméraire au sein d'un assemblage
- la mise en évidence d'un lien entre différents fragments d'assemblages osseux séparés physiquement.

La recherche systématique des liaisons ostéologiques ou des exclusions permet de générer un ensemble de données capitales afin de mieux comprendre la dynamique de constitution d'un assemblage.

La mise en évidence de « collages » entre différents éléments a toujours fait partie des méthodes habituelles de l'archéologie (céramologie, lithique...), afin de mieux évaluer la répartition spatiale des restes, leurs interrelations ou leurs distributions. En médecine légale et particulièrement en contexte criminel où des tentatives de dissimulations peuvent exister, ce type de données est d'une importance majeure.

Dans ce dernier chapitre de résultats, nous allons nous intéresser à la mise en évidence de ces deux critères : les liaisons ostéologiques et les exclusions.

La liaison consiste en la reconnaissance d'un lien associant deux fragments, à la différence de l'exclusion qui sera l'affirmation que toutes liaisons entre deux fragments est impossible.

Qu'il s'agisse de liaison ou d'exclusion ces données doivent être objectives et nécessitent un degré de certitude satisfaisant.

Nous avons souhaité rechercher quelles étaient les régions anatomiques les plus couramment impliquées dans la recherche de liaison ou d'exclusion.

Nous avons donc relevé l'origine de chaque fragment et dans quel type de liaison ou d'exclusion ils étaient impliqués, afin de repérer s'il existait des régions plus favorables à ce type d'analyse.

L'objectif étant la mise en relief de certains fragments qui nécessiteraient une observation, une mémorisation, ou une prise de notes accrue lors de l'analyse d'un dépôt de crémation ou l'étude d'un corps carbonisé.

Pour ces analyses, nous avons travaillé sur les données de Pompéi et du Vatican. Nous allons débiter par les résultats obtenus à Pompéi.

## 1. Analyse des liaisons et des exclusions à Porta Nocera

Sur le site de Porta Nocera, nous avons pris en compte 117 structures différentes : tombes, aires de crémations, tombes-bûchers, fosses, aires de circulation ou amas osseux individualisés.

Sur les 117 structures il y avait 99 tombes, 7 bûchers ou tombes-bûchers, 5 fosses, 3 aires de crémations, 1 niveau de circulation et 2 amas osseux.

Nous avons exclu trois tombes : deux tombes dont la fouille n'avait pas été réalisée et une tombe qui n'a pas livré de restes osseux. Les inhumations n'ont pas été prises en compte.

Au total, les données concernant les fragments osseux de 114 assemblages différents ont été inclus.

### a) Les critères d'exclusions

Il a été mis en évidence un critère d'exclusion au moins dans les ensembles osseux de 51 structures soit 44,7 % d'entre elles.

Parmi ces critères d'exclusion, un doublet (ou triplet, quadruplet *etc.*) a été observé dans 26 structures et des incompatibilités dans 50 structures.

Les incompatibilités les plus représentées étaient les incompatibilités d'âges, elles représentaient à elles seules 70,6 % de l'ensemble des exclusions détectées et 72 % des incompatibilités (Figure 116).

Les autres types d'incompatibilités sont classés comme suit (Figure 116) :

- robustesse (50 %) ;
- critères de crémation (32 %) ;
- dissymétrie (30 %) ;
- critères pathologiques (24 %) ;
- différences de texture (16 %) ;
- le critère sexe n'a permis aucune exclusion.

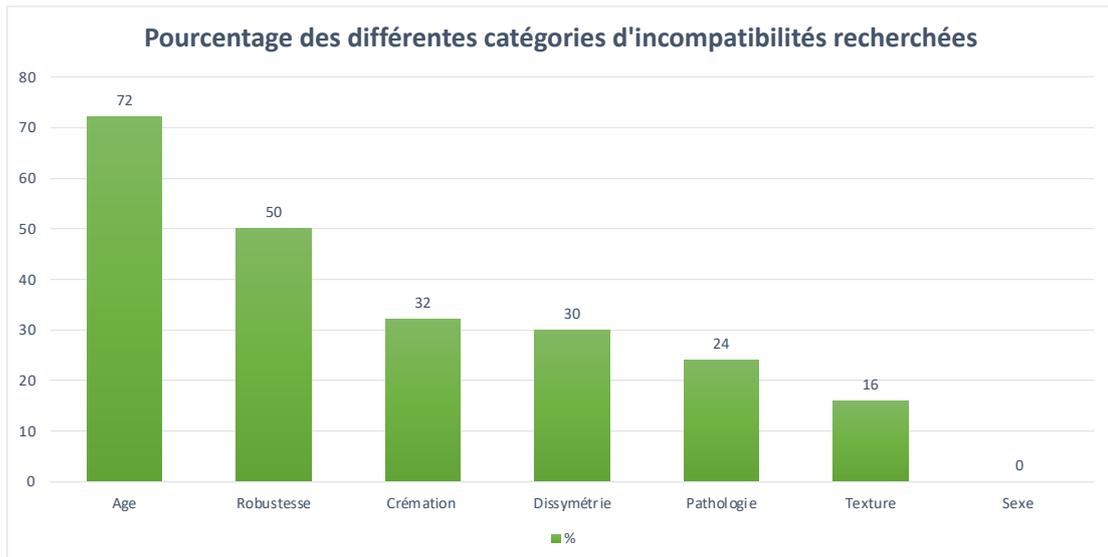


Figure 116 : représentation graphique des pourcentages des différentes catégories d'incompatibilités recherchées parmi les fragments osseux de Porta Nocera, Pompéi.

### b) Les critères de liaisons

Des liaisons ont pu être établies à partir de 78 structures.

Parmi elles, des collages (liaisons vraies, les plus fiables) ont été établis à partir de 50 structures soit 64,1 % de l'ensemble des structures où des liaisons ont pu être mises en évidence ou fortement suspectées.

Des liaisons par symétrie ont été réalisées à partir de 27 structures (34,6 %) et 61 structures ont permis d'établir des concordances (78,2 %).

Parmi les critères de concordances observés, les critères anatomiques sont les plus représentés (74,4 %), les critères taphonomiques et de crémation sont beaucoup plus anecdotiques puisqu'ils permettent d'établir des liaisons à partir de 8 structures seulement (5,1 % chacun).

Par ailleurs, il est important de noter le gain d'informations qu'apporte la recherche de symétrie et de concordance comparé à une simple recherche de collage :

- la recherche de symétries permet de mettre en évidence des relations entre 6 ensembles supplémentaires ;
- la recherche de concordance retrouve un lien entre 25 structures supplémentaires ;

Au total un lien est détecté entre 28 ensembles supplémentaires soit un gain de 24,6 %.

c) *Mise en évidence des fragments d'intérêts dans la recherche de liaisons ou d'exclusions.*

**(1) Résultats généraux concernant les exclusions (figure 117)**

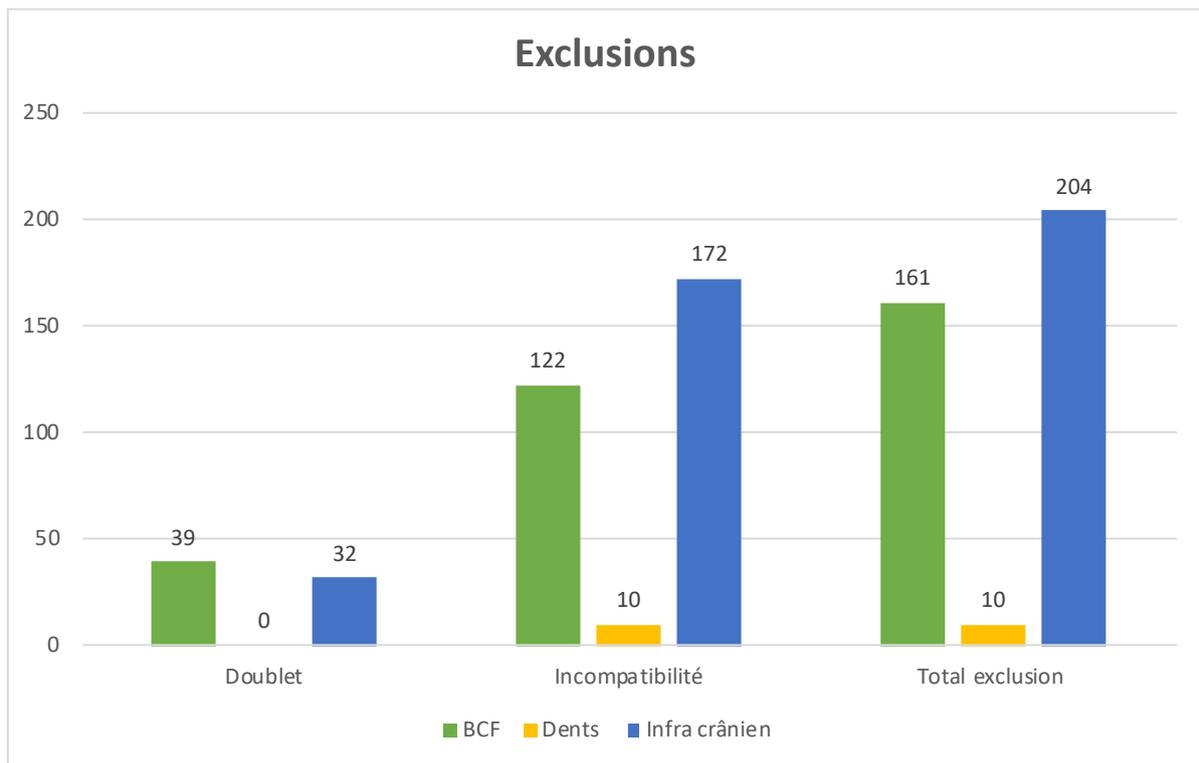
Nous avons pris en compte l'ensemble des fragments ayant été impliqués dans la mise en évidence d'exclusions soit 376 fragments :

- 54,4 % appartenait au squelette infra-crânien,
- 42,8 % étaient des fragments de l'extrémité céphalique
- 2,7 % seulement étaient des dents.

Les incompatibilités sont majoritairement représentées (81,1 %).

Aucun fragment dentaire n'a permis d'établir un doublet.

Nous allons maintenant observer plus en détail les fragments impliqués au sein de chaque grade région anatomique : l'extrémité céphalique, le squelette infra-crânien et les dents.



**Figure 117 : histogramme représentant les effectifs de fragments impliqués dans la mise en évidence d'exclusion : doublets et incompatibilités (BCF= bloc crânio-facial).**

## ➤ Les fragments du bloc crânio-facial

### Les fragments impliqués dans un doublet (figure 118 et 119)

Trois régions du crâne ont majoritairement permis la mise en évidence de doublets :

- l'os temporal (n=16),
- l'os frontal (n=10),
- l'os occipital (n=9).

Plus précisément, certaines zones ont été plus informatives :

- la protubérance interne de l'os occipital (n=6),
- la région pétreuse de l'os temporal (n=5),
- la région du conduit auditif externe de l'os temporal (n=4),
- le processus zygomatique de l'os frontal (n=3),
- la région orbitaire de l'os frontal (n=3),
- la région basilaire de l'os occipital (n=3).

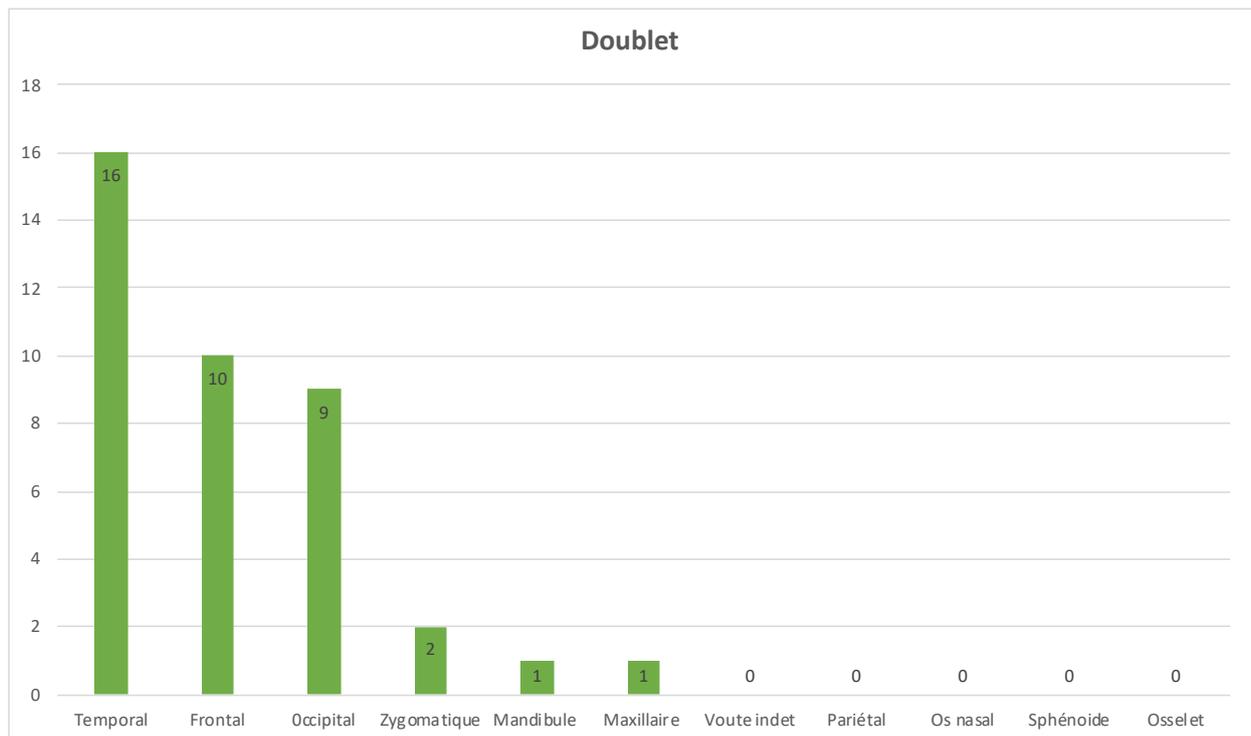
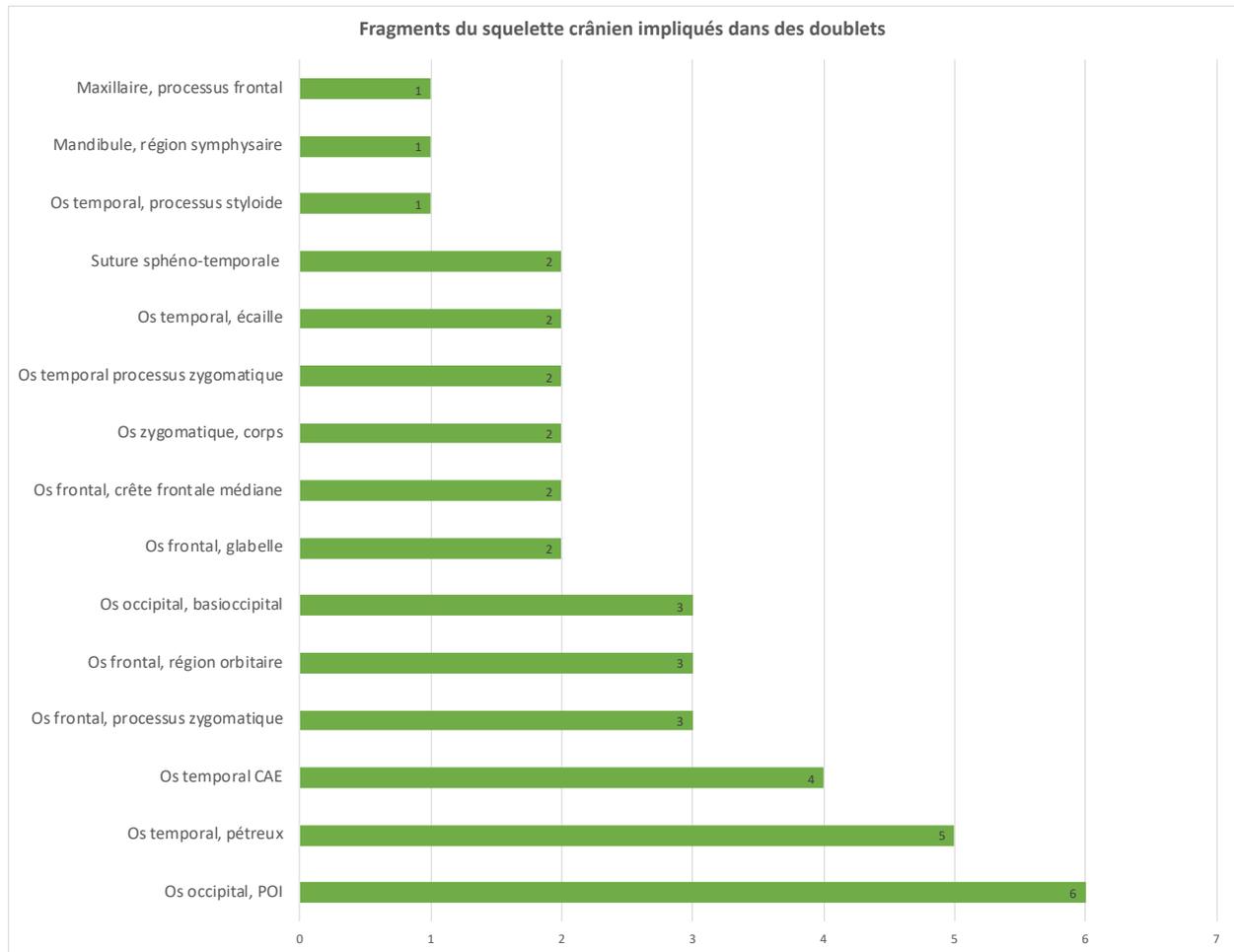


Figure 118 : histogramme mettant en évidence les effectifs de fragments de crâne impliqués dans la constitution de doublets.



**Figure 119 :** histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions du crâne impliquées dans un doublet.

### Les fragments impliqués dans une incompatibilité (figures 120 et 121)

Au sein du crâne, l'os temporal, la mandibule et l'os frontal sont les os qui ont permis la mise en évidence du plus grand nombre d'incompatibilités : respectivement 36,1 % (n=44), 25,6 % (n=30) et 22,1 % (n=27).

Certaines régions plus précisément ont été plus impliquées :

- la région pétreuse (n=28) et la région du conduit auditif externe (n=9) de l'os temporal,
- le condyle mandibulaire (n=11), la région symphysaire (n=6) et le corps de la mandibule (n=6)
- le processus zygomatique de l'os frontal (n=8), la crête frontale médiane (n=8) et l'écaille frontale (n=6).

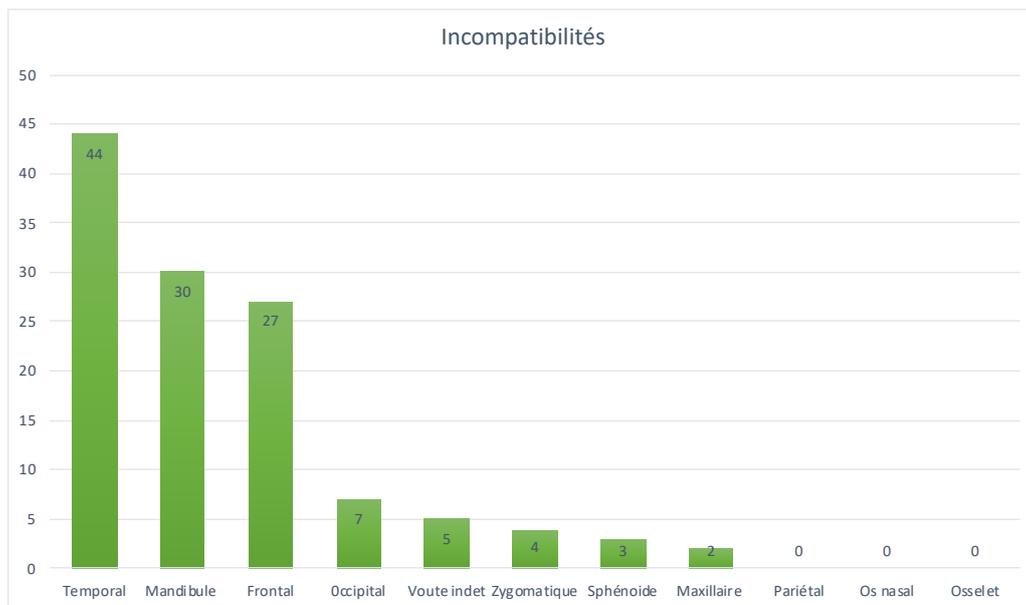


Figure 120 : histogramme mettant en évidence les effectifs de fragments de crâne impliqués dans la mise en évidence d'une incompatibilité.

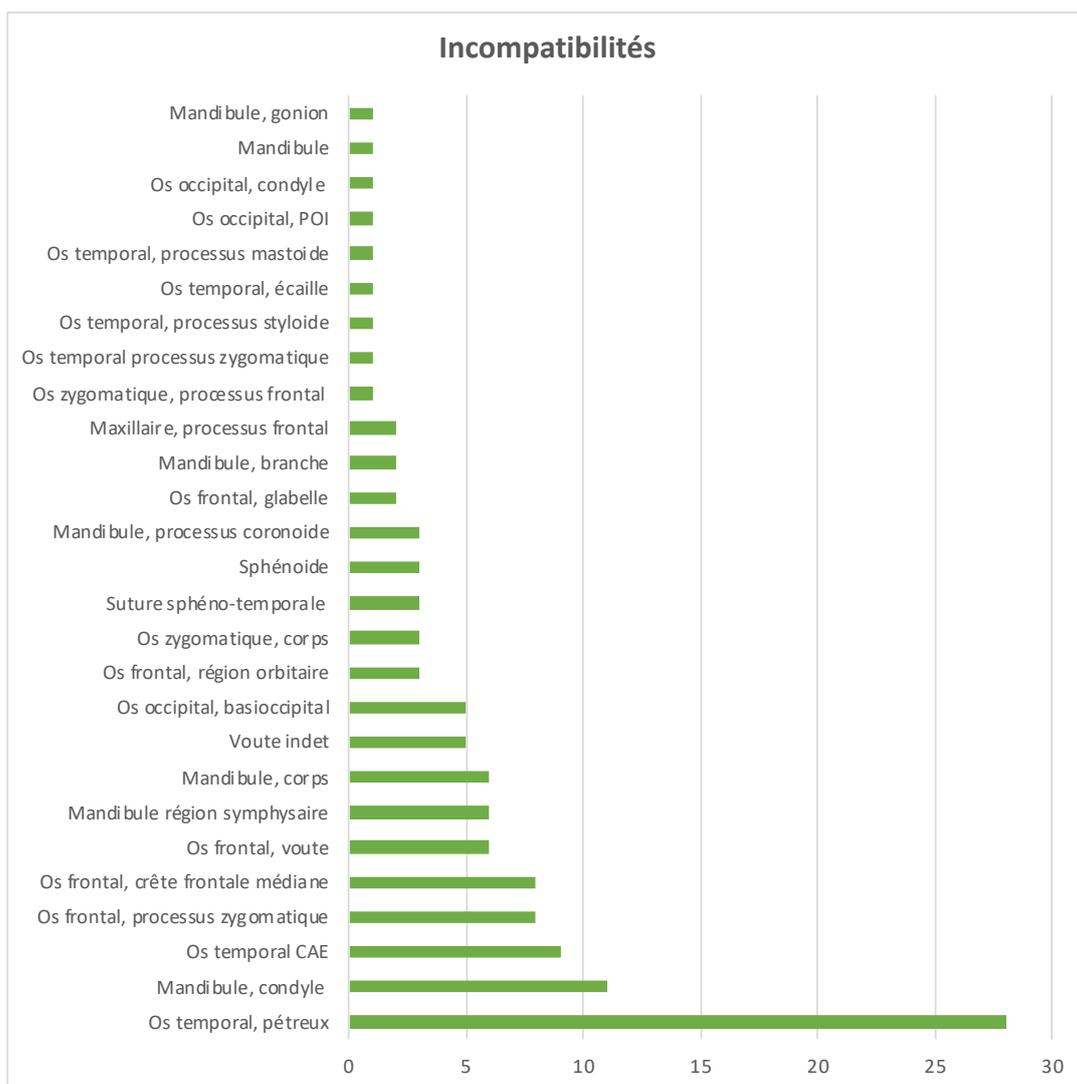


Figure 121 : histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions anatomiques du bloc-crânio-facial impliqués dans la mise en évidence d'une incompatibilité.

## ➤ Mise en évidence d'exclusions à partir de fragments dentaires

Seulement 10 dents ou fragments dentaires ont été impliqués dans des exclusions.

Aucune n'a permis d'établir d'exclusion par doublets, toutes étaient impliquées dans des incompatibilités.

## ➤ Les fragments du squelette infra-crânien (figure 122)

Un total de 205 exclusions a pu être réalisé à partir de fragments issus du squelette infra-crânien et 84,4 % d'entre elles ont été mises en évidence par des incompatibilités (n=173 vs. n=32 pour les doublets).

Les régions anatomiques majoritairement impliquées dans les exclusions sont les suivantes :

- les éléments du rachis (32,7 % ; n=67),
- les os du tarse (7,8 % ; n=16),
- les phalanges des mains (7,3 % ; n=15),
- l'humérus (6,8 % ; n=14),
- l'os coxal (5,8 % ; n=12),
- le tibia (5,4 % ; n=11)
- la scapula (4,8 % ; n=10).

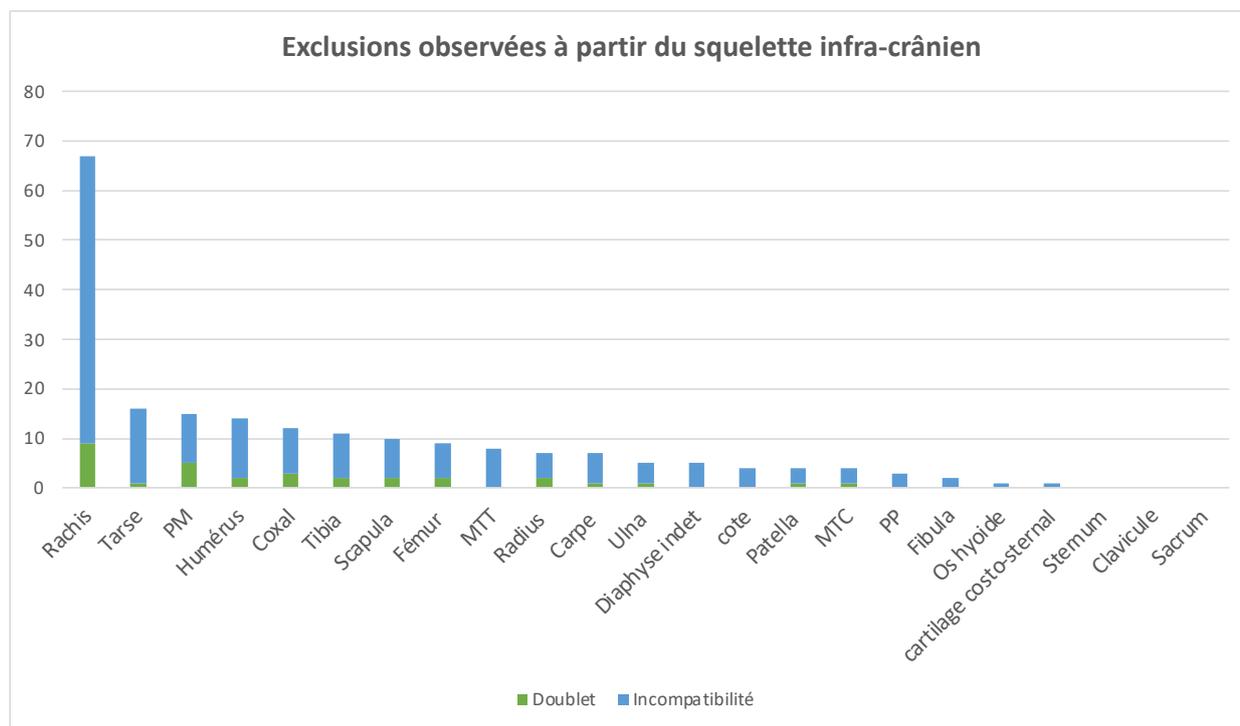


Figure 122 : effectif total de l'ensemble des exclusions mises en évidence par régions anatomiques du squelette infra-crânien.

## Les fragments impliqués dans un doublet (figure 123)

En ce qui concerne précisément les doublets, les fragments impliqués le plus souvent sont :

- le corps de l'axis (n=7),
- les phalanges de mains (n=5),
- l'extrémité proximale du fémur (n=4),
- l'extrémité proximale du radius (n=4),
- la scapula (n=4),
- l'épine iliaque antéro-inférieure de l'os coxal (n=4),
- la diaphyse du fémur (n=4).

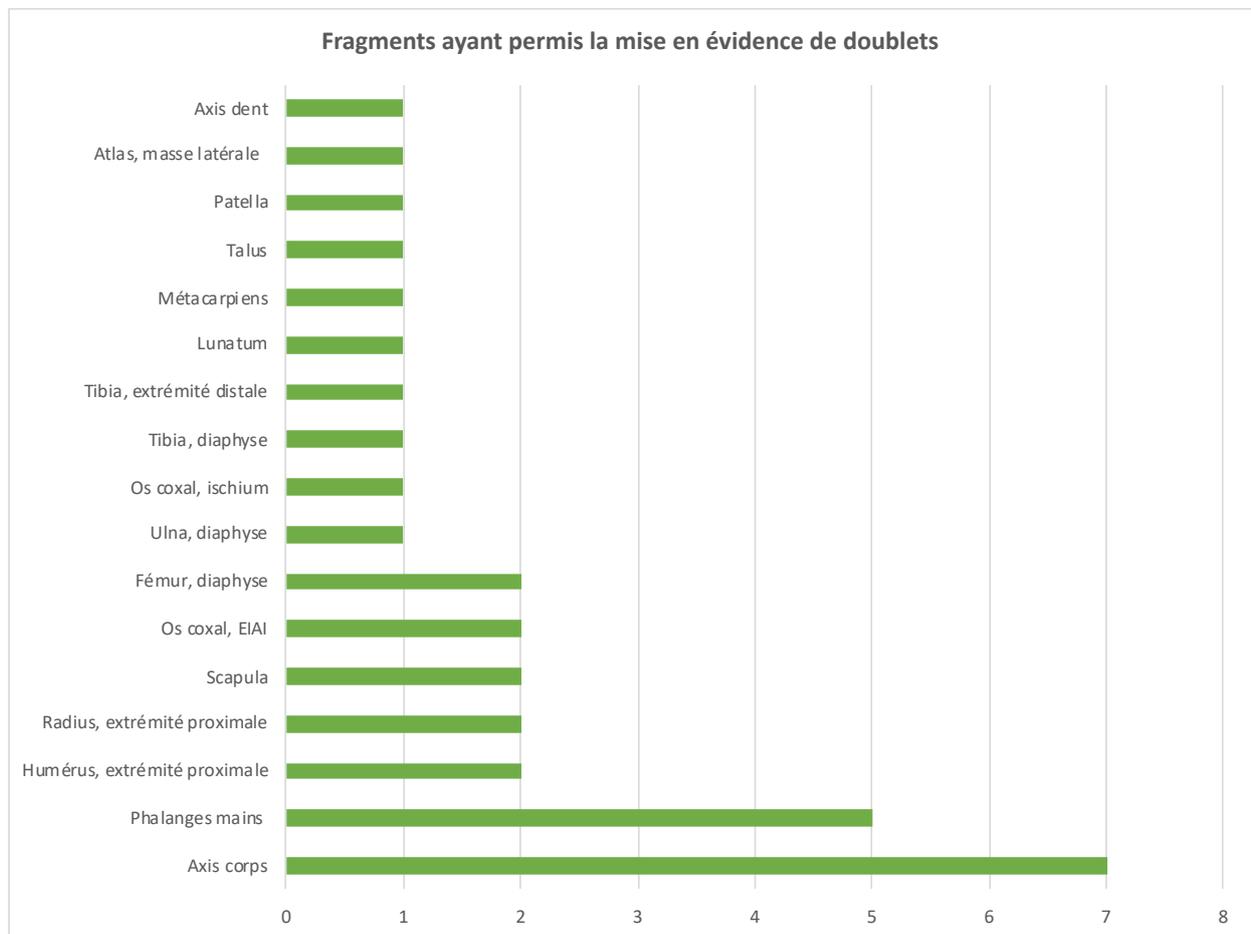


Figure 123 : effectif total des exclusions par doublets établies à partir des régions anatomiques du squelette infra-crânien.

## Les fragments impliqués dans une incompatibilité (figure 124)

Pour les incompatibilités, on retrouve préférentiellement les régions suivantes :

- l'atlas (n= 21) dont 10 fragments sont issus des masses latérales,
- l'axis (n=15) parmi lesquels le processus odontoïde est cité à 9 reprises,
- les vertèbres thoraciques (n=9),
- l'extrémité distale de l'humérus (n=8),

- les métatarsiens (n=8).

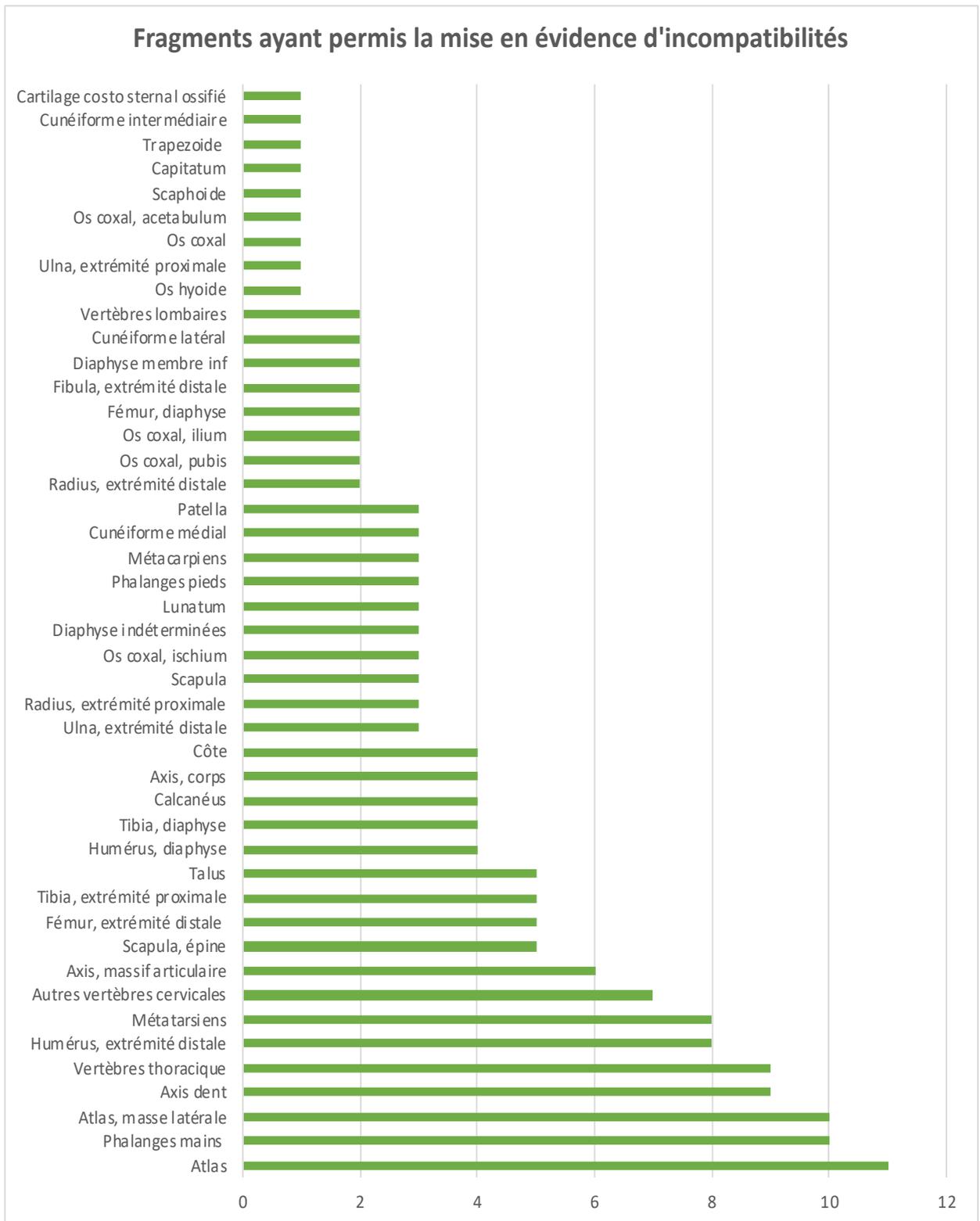


Figure 124 : Effectif total des exclusions par incompatibilités établies selon les régions anatomiques du squelette infra-crânien.

## (2) Résultats généraux concernant la recherche des liaisons (figure 125)

Les liaisons inclus concernaient l'ensemble des liaisons réalisées entre deux assemblages osseux physiquement séparés : il s'agissait soit de structures différentes soit d'unités stratigraphiques différentes. Les liaisons réalisées au sein d'un même ensemble n'ont pas été comptabilisées. Selon ce modèle, le nombre total de fragments osseux impliqués était de 547.

Les différents types de liaisons qui ont été analysés sont les suivants :

- Les liaisons par collage (n=256), ce sont les liaisons les plus fiables, elles sont majoritairement établies à partir du bloc crânio-facial (57,4 %) ;
- les liaisons par symétrie (n=158), on observe un effectif quasiment équivalent entre les fragments issus du bloc crânio-facial et du squelette infra-crânien ;
- les liaisons par concordance anatomique (n=133), les fragments du squelette infra-crânien sont majoritairement représentés ;
- les liaisons par contiguïtés sont les moins nombreuses, seulement 13 fragments sont impliqués, dont 3 sont des dents.

Les dents restent toujours largement minoritaires. Elles ne représentent que 0,78 % des collages, 6,3 % des symétries, 23 % des contiguïtés et 4,2 % des concordances anatomiques.

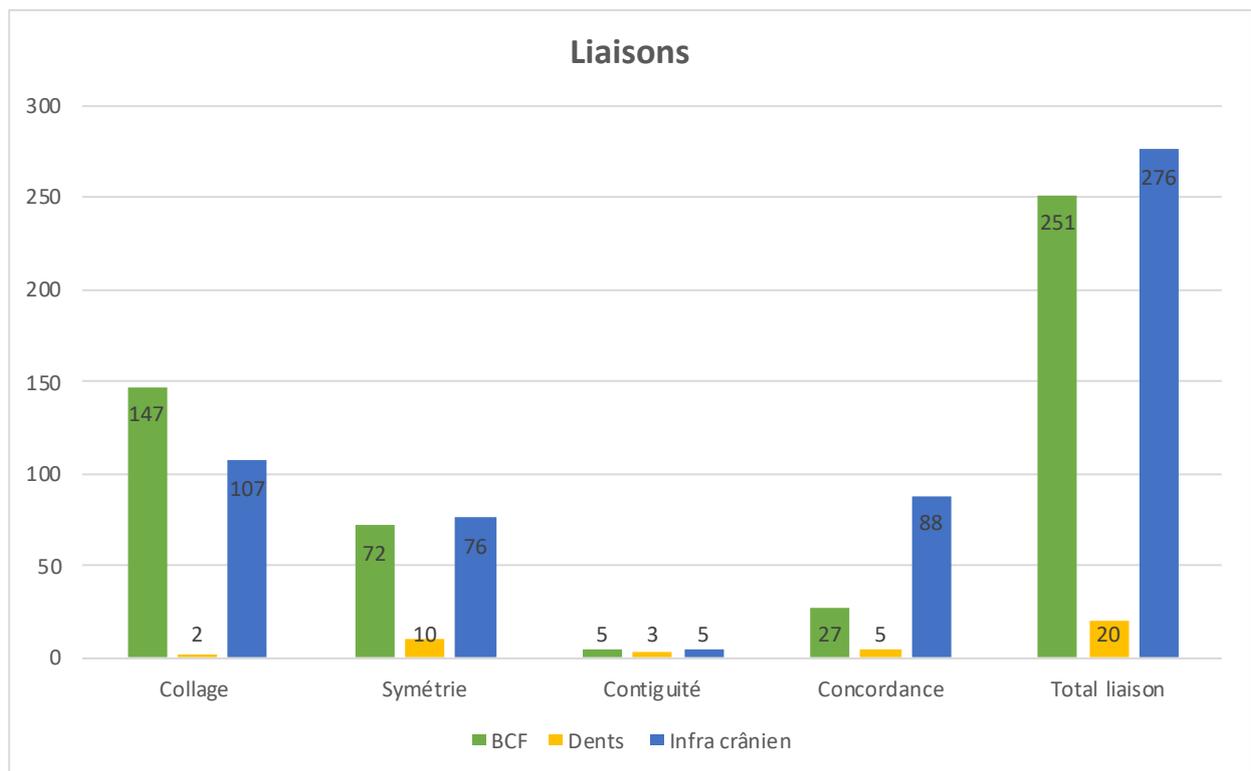


Figure 125 : histogramme représentant les effectifs de fragments impliqués dans la mise en évidence de liaisons par collage, symétrie, contiguïté et concordance. (BCF= bloc crânio-facial).

## ➤ Les fragments du bloc crânio-facial

### Les fragments impliqués dans un collage

Au sein du bloc crânio-facial, les fragments majoritairement impliqués dans les collages sont issus des os suivants (figure 126) :

- la mandibule (29,2 %),
- l'os frontal et l'os pariétal (26 fragments chacun soit 17,7 %),
- l'os maxillaire (14,3 %),
- l'os occipital (9,5 %)
- l'os zygomatique (8,8 %).

Par ailleurs, étant donné que la fragmentation lors de la crémation ne suit pas toujours une logique anatomique, nous avons remarqué que la région zygomatique qui intéresse à la fois l'os zygomatique, l'os frontal et l'os temporal était souvent impliquée dans l'établissement de collages à partir de fragments crâniens (28 fragments) soit le second score après la mandibule.

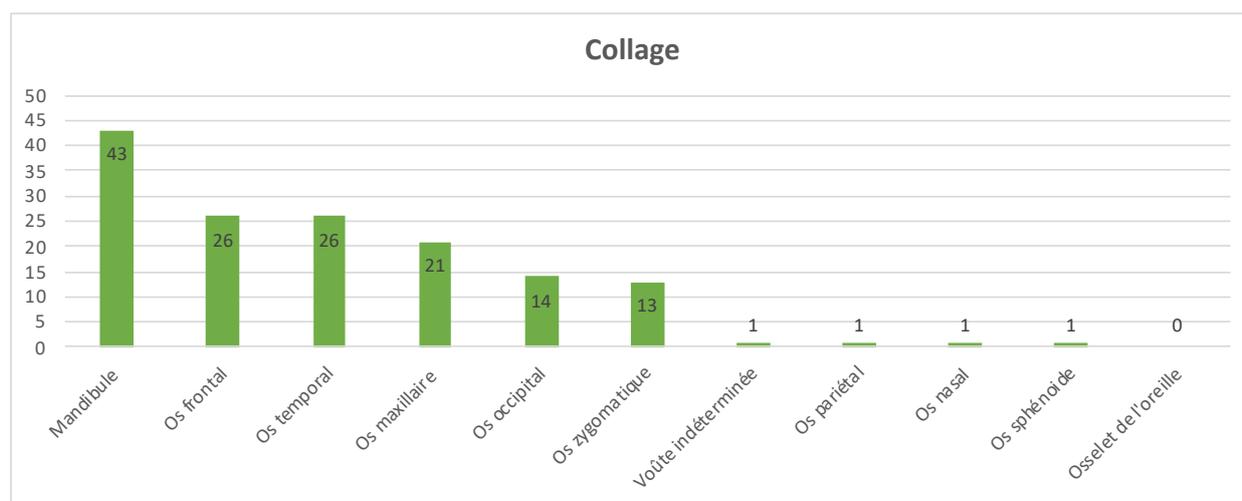
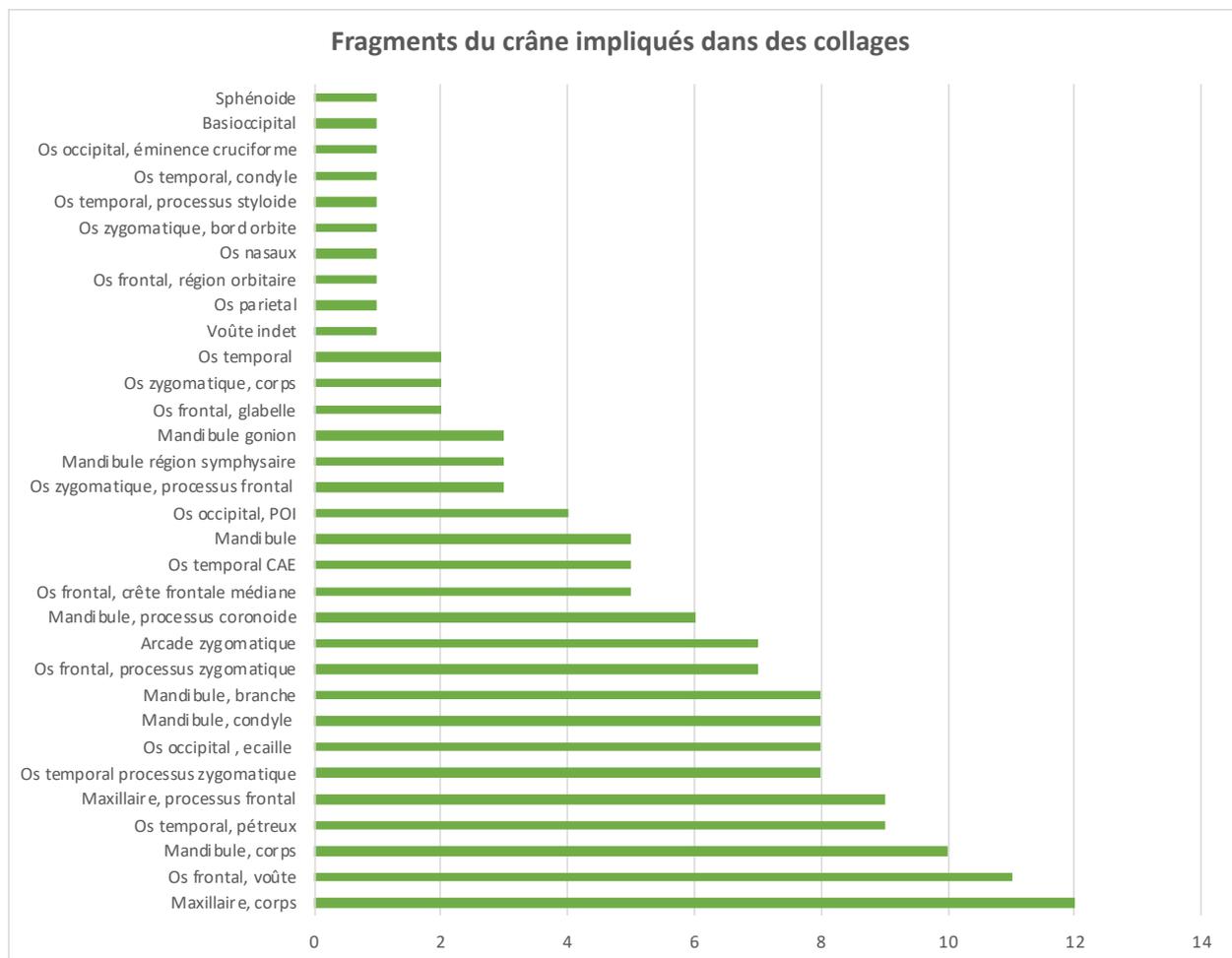


Figure 126 : histogramme mettant en évidence les effectifs de fragments de bloc crânio-facial impliqués dans un collage.

Parmi ces régions anatomiques les mieux représentées (mandibule, os frontal, os temporal, os maxillaire, os occipital et os zygomatique), il existe des fragments qui ont permis d'établir plus de collages (figure 127) :

- le corps de l'os maxillaire (n=12),
- les fragments d'écaillés frontales (n=11),
- le corps de la mandibule (n=10),
- la région pétreuse de l'os temporal (n=9),
- le processus frontal de l'os maxillaire (n=9),
- le processus zygomatique de l'os temporal (n=8),
- l'écaillé occipitale (n=8),
- le condyle mandibulaire (n=8),

- la branche mandibulaire (n=8),
- le processus zygomatique de l'os frontal (n=7),
- l'arcade zygomatique (n=7).



**Figure 127 : histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions du bloc crânio-facial impliqués dans un collage.**

### Les fragments impliqués dans une relation de symétrie (figure 128)

Parmi les fragments du bloc crânio-facial, le meilleur score de symétrie est observé pour l'os temporal et particulièrement la région pétreuse, qui est impliquée à elle seule dans un quart des symétries réalisées.

De bons résultats sont également observés pour le condyle mandibulaire (n=8), le processus zygomatique de l'os frontal (n=7) et le processus zygomatique de l'os temporal (n=6).

À noter également l'implication de 4 incus.

Par ailleurs, si l'on compare les résultats observés pour les collages et pour les symétries, on observe une discordance dans les fragments impliqués : la mandibule est plus impliquée dans les collages et l'os temporal obtient de meilleurs résultats pour les symétries (figure 129).

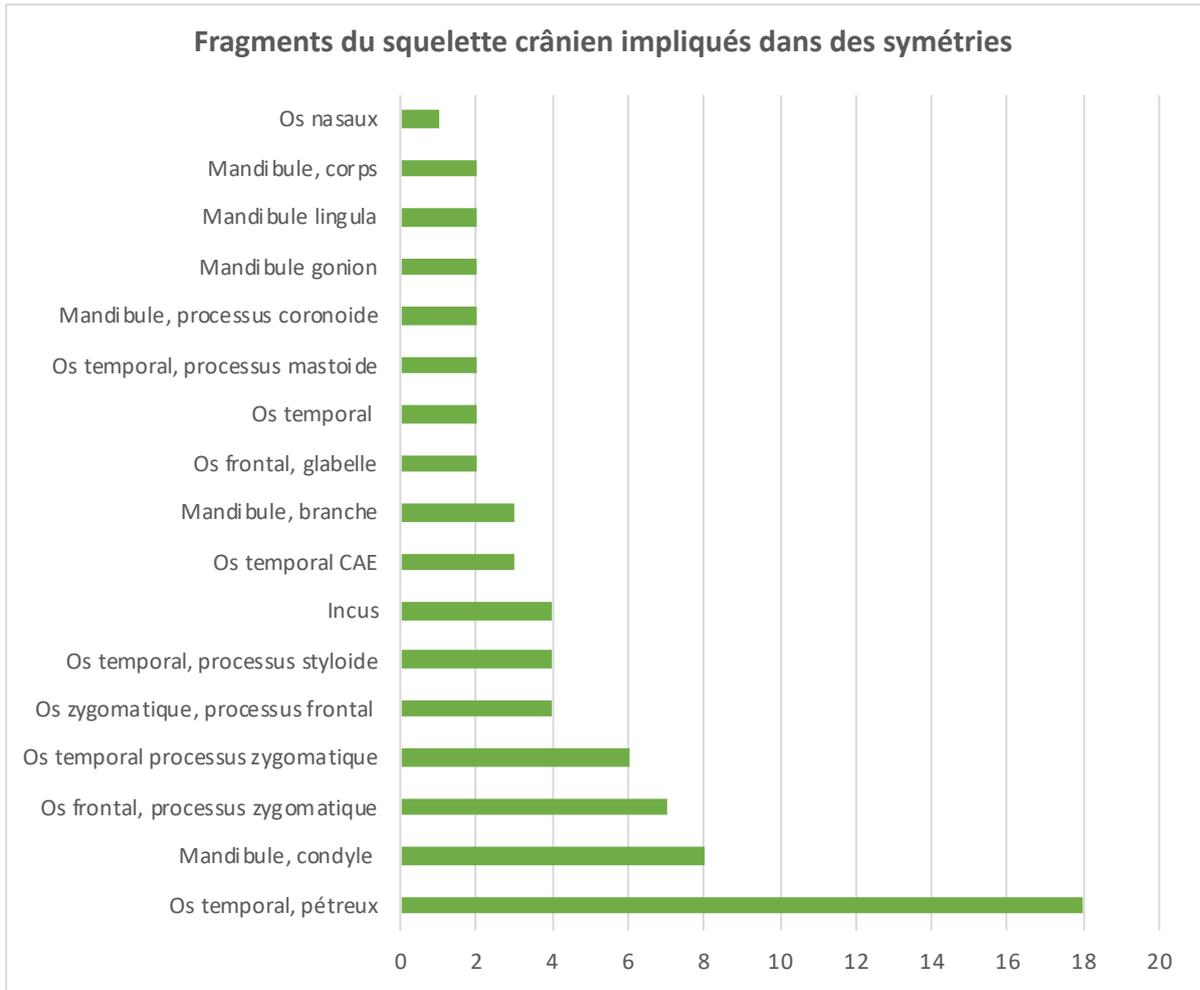


Figure 128 : histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions du bloc crânio-facial impliquées dans une liaison par symétrie.

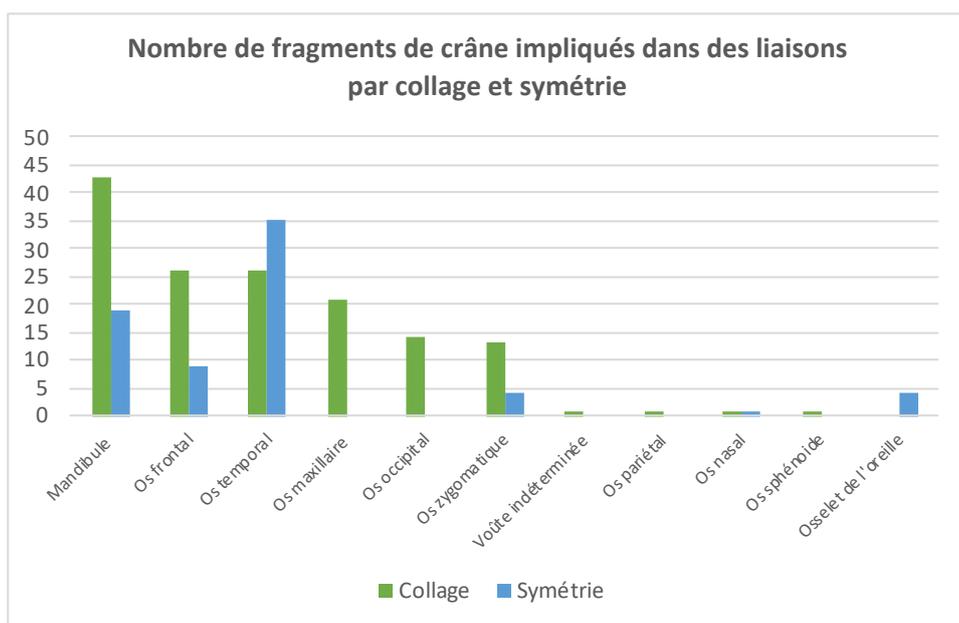


Figure 129 : histogramme comparant les effectifs des collages et des symétries pour les fragments de crâne.

### Les fragments impliqués dans des liaisons de concordance et contiguïté.

Les fragments de crâne sont largement minoritaires pour l'établissement de liaisons par concordances ou contiguïtés.

- Concernant les contiguïtés, seulement deux fragments d'os zygomatique, deux fragments d'os frontal et un fragment d'os nasal ont permis d'établir de telles liaisons.
- Concernant les concordances anatomiques : on peut toutefois citer l'os frontal (10 relations de concordances), la mandibule (6 relations de concordances) et l'os temporal (5 relations de concordances) (figure 130).

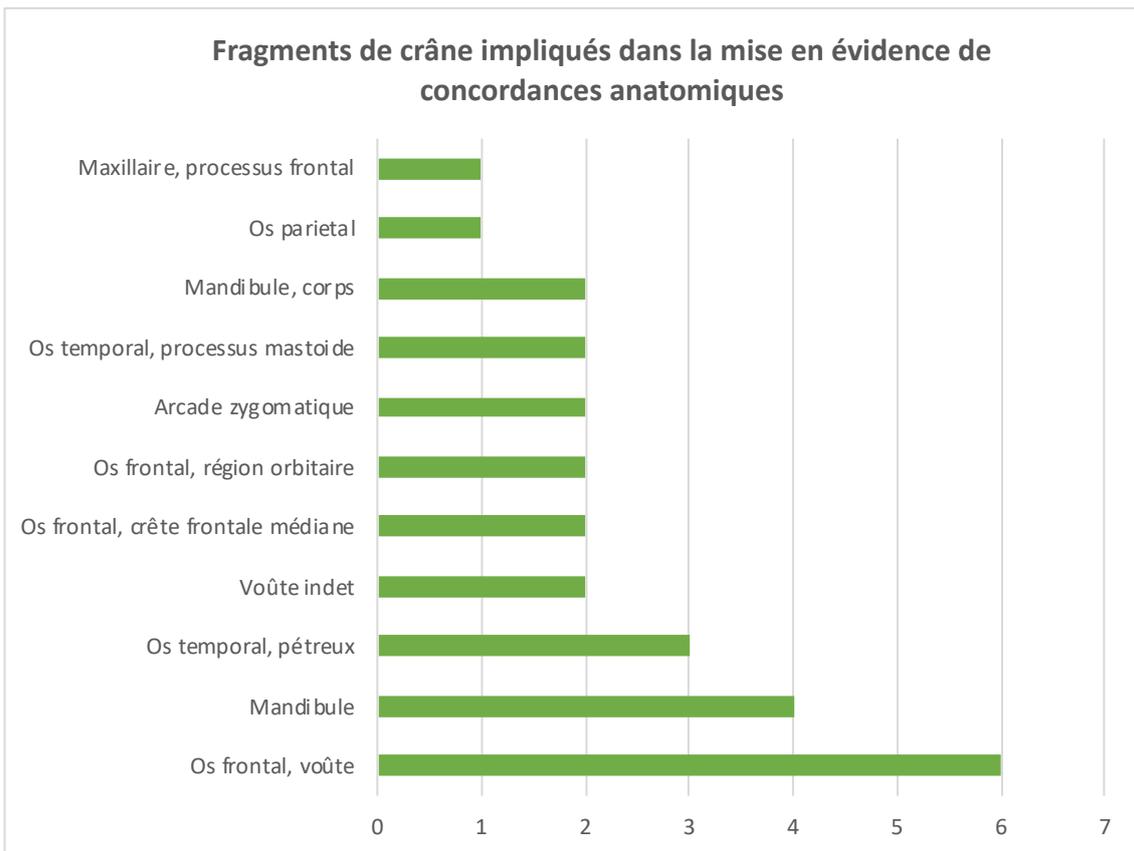


Figure 130 : histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions du bloc crânio-facial impliqués dans une liaison par concordance anatomique.

### ➤ Les fragments dentaires

Seulement 20 dents ou fragments dentaires ont été impliqués dans des liaisons. Parmi elles, 50 % ont permis d'établir des liaisons de symétrie, 7 fragments ont permis d'établir des relations de concordances et de contiguïtés et seulement deux collages ont été trouvés.

## ➤ Les fragments du squelette infra-crânien (figure 131)

Les éléments du squelette infra-crânien ont permis de mettre en évidence 276 liaisons : 38,8 % d'entre elles (n=107) correspondaient à des liaisons par collages, 27,5 % des liaisons par symétrie et 33,7 % des liaisons de concordances et contigüités articulaires (1,8 % pour la contigüité seule). Plusieurs régions anatomiques se distinguent :

- **concernant les collages**, les fragments de tibia sont largement représentés (n=27), suivis par les fragments de rachis (n=16), le fémur (n=11), l'os coxal (n=10), l'humérus (n=9) et l'ulna (n=6) ;
- **concernant les relations de symétries**, les fragments les plus représentés sont les os du carpe (n=14), l'humérus (n=13), l'ulna et le rachis (n=10) ;
- **concernant les relations de contigüités articulaires**, trois liaisons ont pu être établies avec des fragments du sternum et des éléments du carpe ;
- **concernant les relations de concordances**, on retrouve de façon majoritaire les éléments du rachis (n=27), puis les phalanges des mains (n=10), les métatarsiens (n=8), les éléments du tarse (n=7) et l'humérus (n=7).

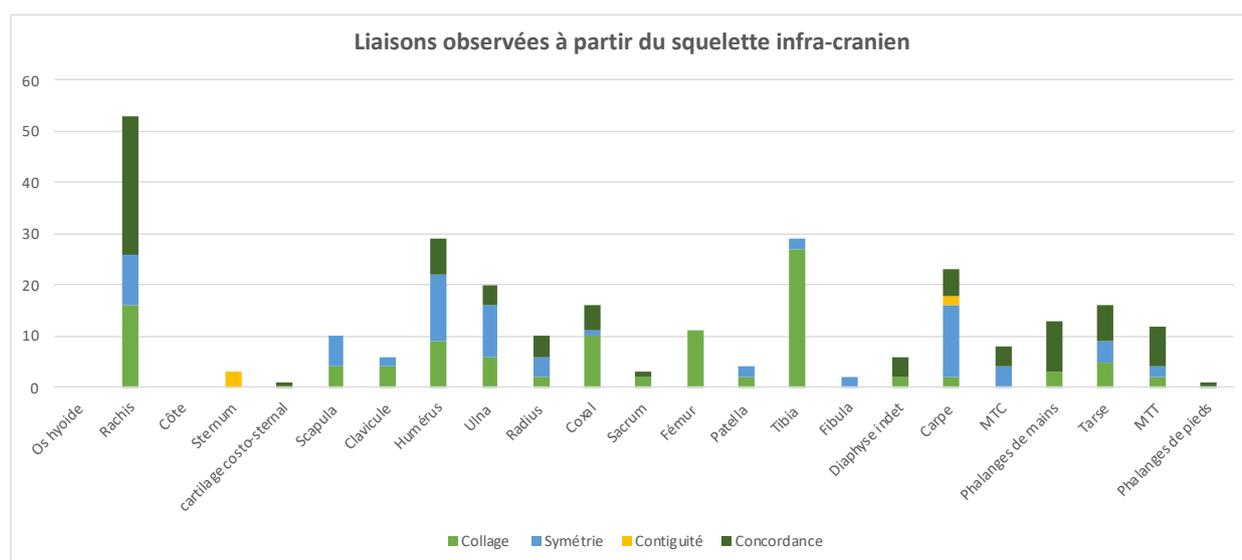


Figure 131 : effectif total de l'ensemble des liaisons mises en évidence par régions anatomiques du squelette infra-crânien.

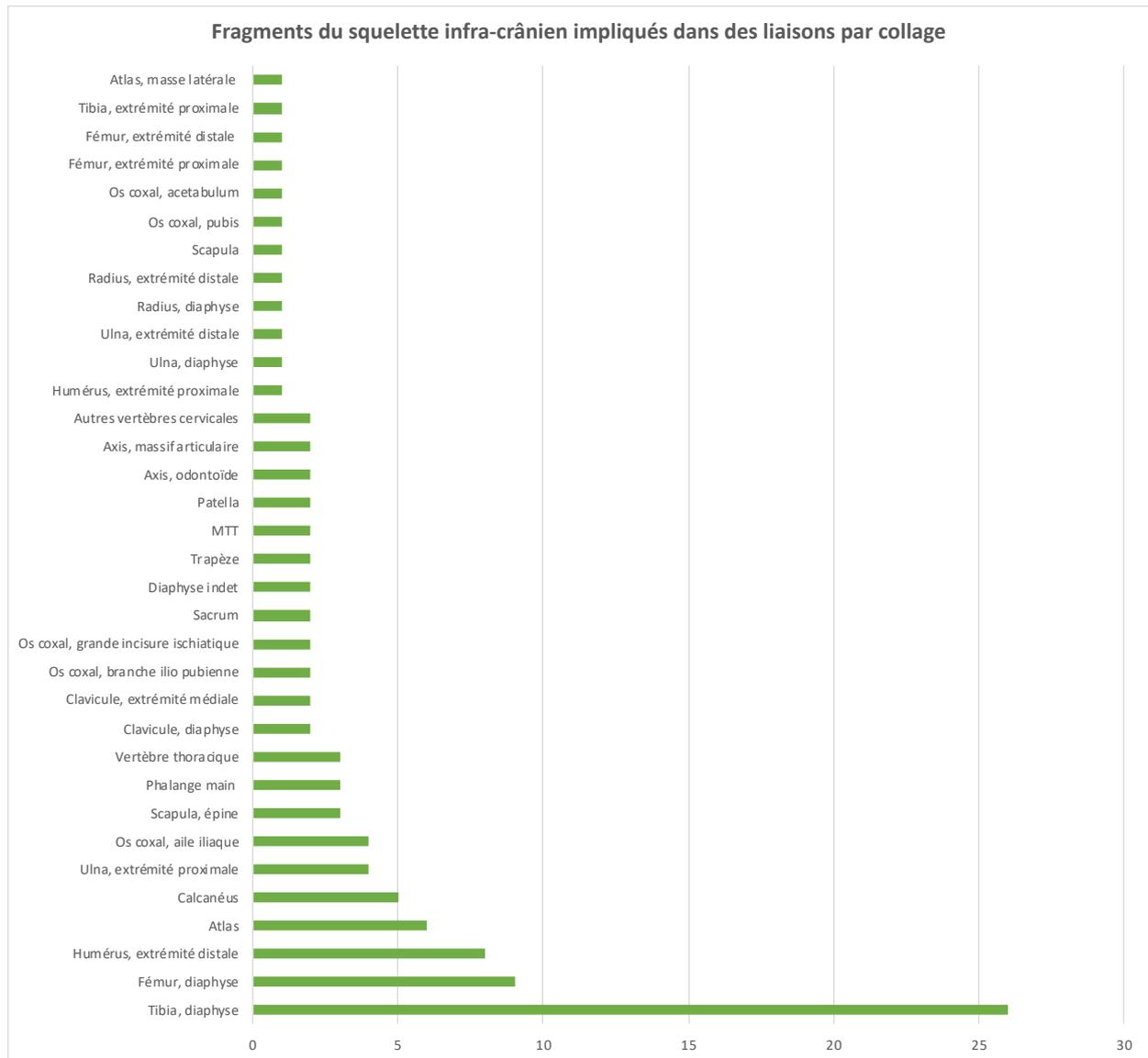
Nous allons maintenant établir de façon plus précise quelles sont les structures anatomiques qui sont impliquées dans chaque type de liaisons.

### Les fragments impliqués dans un collage (figure 132)

Parmi les fragments impliqués dans les collages, les fragments de diaphyses tibiales sont largement majoritaires (n=26). On peut noter ensuite plusieurs autres régions anatomiques intéressantes :

- la diaphyse fémorale (n=9),
- l'extrémité distale de l'humérus (n=8),
- l'atlas (n=6),

- le calcanéus (n=5),
- l'extrémité proximale de l'ulna (n=4)
- l'aile iliaque de l'os coxal (n=4).



**Figure 132 :** histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions du squelette infra-crânien impliqués dans une liaison par collage.

### Les fragments impliqués dans une relation de symétrie (figure 133)

Les meilleurs scores sont retrouvés pour le trapèze (n=8), la diaphyse humérale et l'extrémité distale de l'ulna (n=6). On peut citer également l'extrémité proximale de l'ulna, les massifs articulaires de l'axis et les métacarpiens.

## Les fragments impliqués dans une relation contiguïté ou concordance

Nous avons noté précédemment que les liaisons par contiguïté articulaire étaient très peu représentées (5 fragments au total), en revanche, le nombre de fragments ayant permis d'établir des liaisons de concordances anatomiques était plus important. Les régions d'intérêt sont : les phalanges de mains (n=10), les fragments de métatarsiens (n=8), les fragments de vertèbres cervicales (n=6), les vertèbres thoraciques (n=5) et la diaphyse humérale (n=5) (Figure 134).

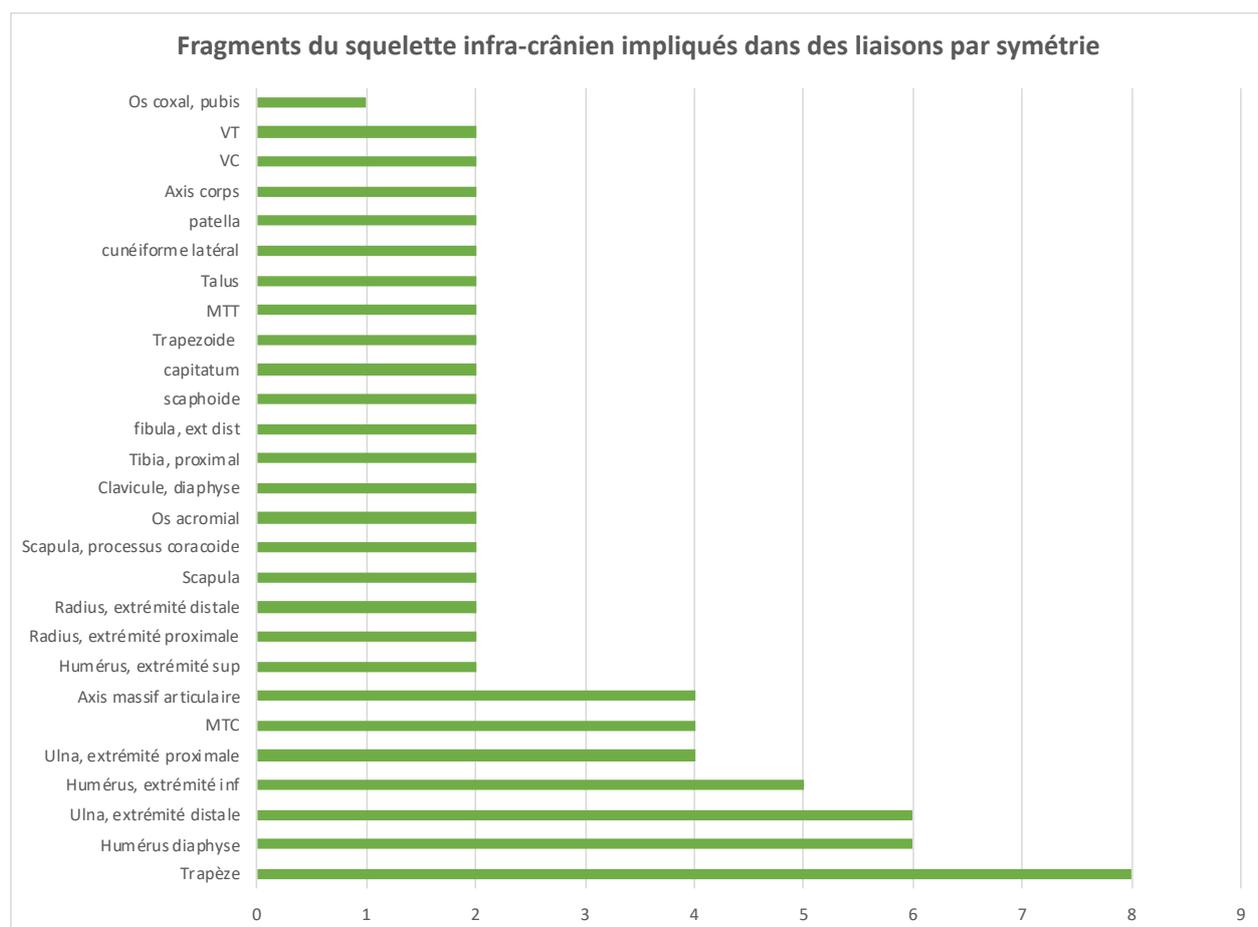
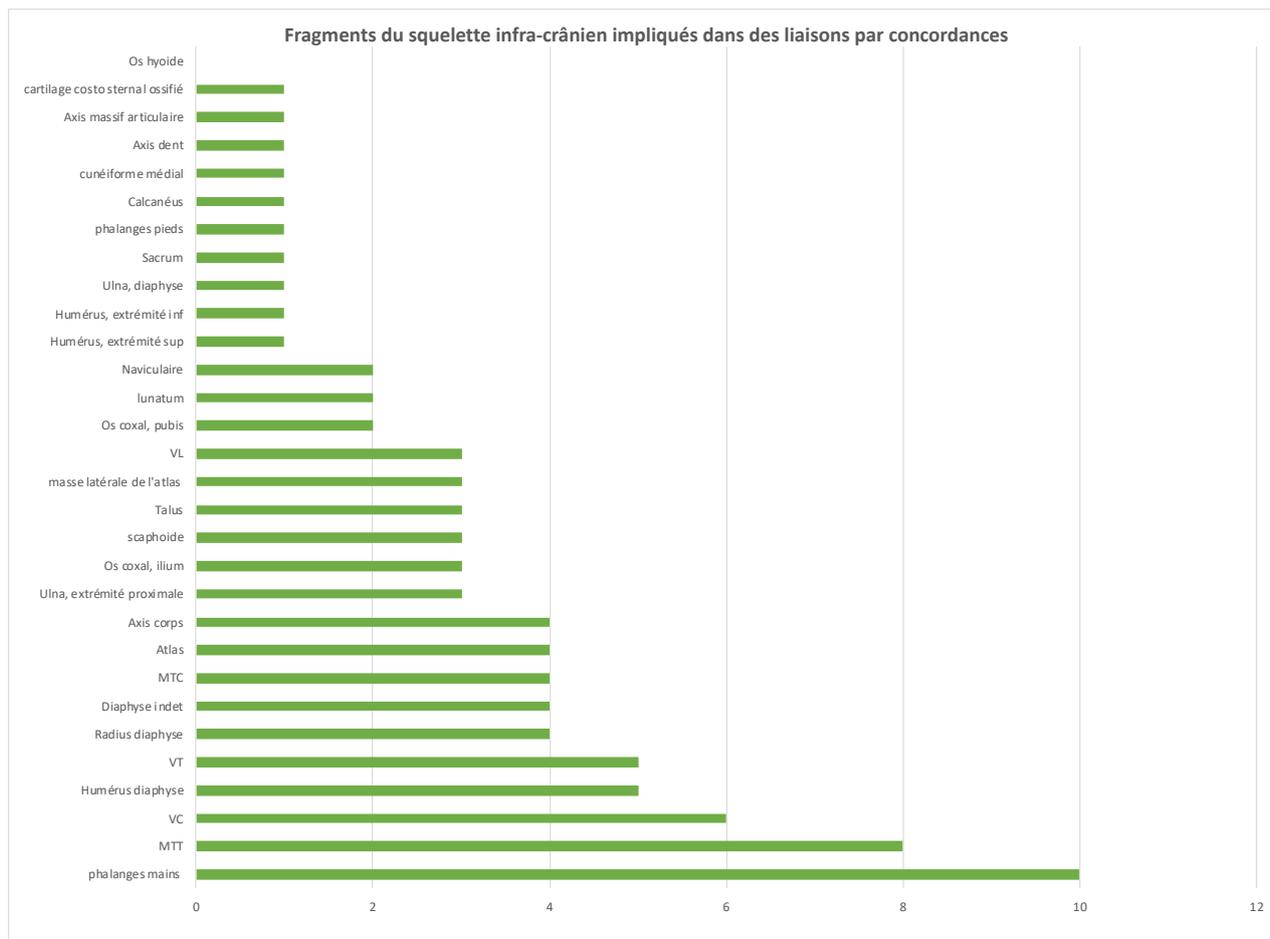


Figure 133 : histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions du squelette infra-crânien impliqués dans une liaison par symétrie.



**Figure 134: histogramme mettant en évidence les effectifs des fragments des différentes régions du squelette infra-crânien impliqués dans une liaison par concordances.**

## 2. Analyse des liaisons et des exclusions à Santa Rosa

---

Les relations de liaisons et d'exclusions sur le site de Santa Rosa ont été étudiées selon le même modèle que celles de Porta Nocera.

Nous avons pris en compte 49 ensembles osseux. Il s'agissait principalement d'urnes funéraires découvertes à l'intérieur des mausolées.

Nous avons cherché à mettre en évidence :

- la présence ou l'absence de critères d'exclusions ;
- la présence de liaisons entre un fragment de l'ensemble étudié et une autre structure ou une autre unité stratigraphique ;
- les fragments osseux les plus fréquemment impliqués dans les relations de liaisons ou la mise en évidence d'exclusions.

### a) Mise en évidence des critères d'exclusions

---

Il a été mis en évidence au moins un critère d'exclusion dans 65,3 % des ensembles funéraires analysés (n=32) :

- 36,7 % d'entre eux comportaient au moins un doublet ;
- 63,3 % comportaient au moins une incompatibilité.

Les incompatibilités étaient à elles seules à l'origine de 96,9 % des exclusions réalisées.

De la même manière qu'à Pompéi, les incompatibilités les plus nombreuses étaient les incompatibilités d'âges (n=25 ; 80,6 % des incompatibilités et 78,1 % des exclusions totales).

Les autres types d'incompatibilités étaient classés comme suit (Figure 135) :

- robustesse (61,3 %) ;
- dissymétrie (41,9 %) ;
- pathologie (35,5 %) ;
- critères de crémations (19,3 %) ;
- texture (12,9 %) ;
- sexe (3,2 %).

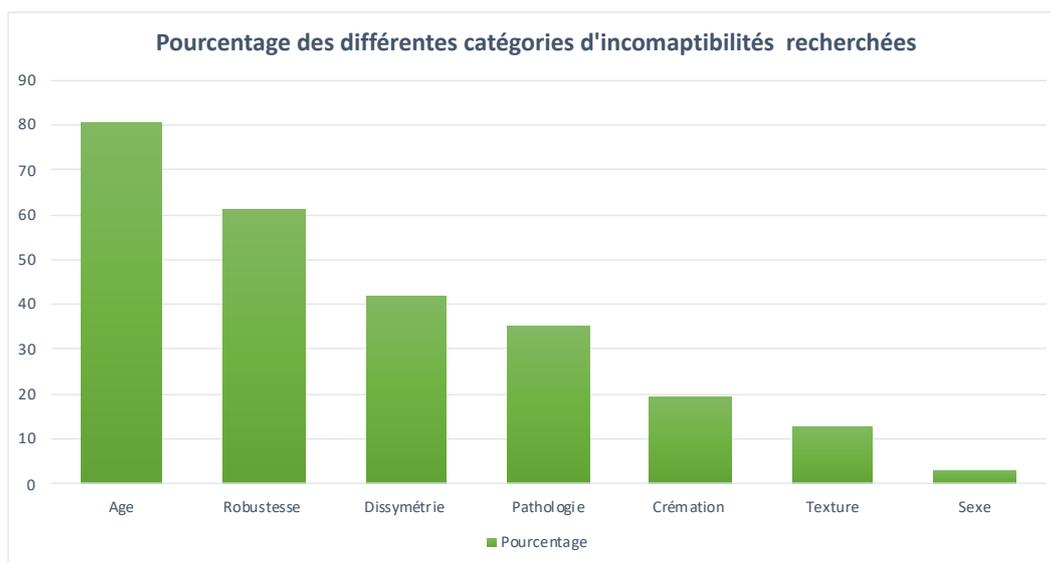


Figure 135 : représentation graphique des pourcentages des différentes catégories d'incompatibilités recherchées au Vatican.

### b) Mise en évidence des critères de liaison

---

Des liaisons ont été établies à partir de 44,9 % des ensembles funéraires étudiés. Les collages représentaient 40,8 % d'entre elles, les symétries 14,3 %, les liaisons par concordances anatomiques, 25,6 % et les autres cas de concordances (par stigmates de crémation ou concordances taphonomiques, 6,1 % et 2 % respectivement).

Les liaisons par symétrie n'ont pas apporté d'informations supplémentaires par rapport aux collages, mais on peut noter par exemple que les informations concernant des liaisons

impliquant les structures XXXV5-SI et XXXI-1 ont été apportées par le constat d'une concordance anatomique.

*c) Mise en évidence des fragments d'intérêts dans la recherche de liaisons ou d'exclusions*

---

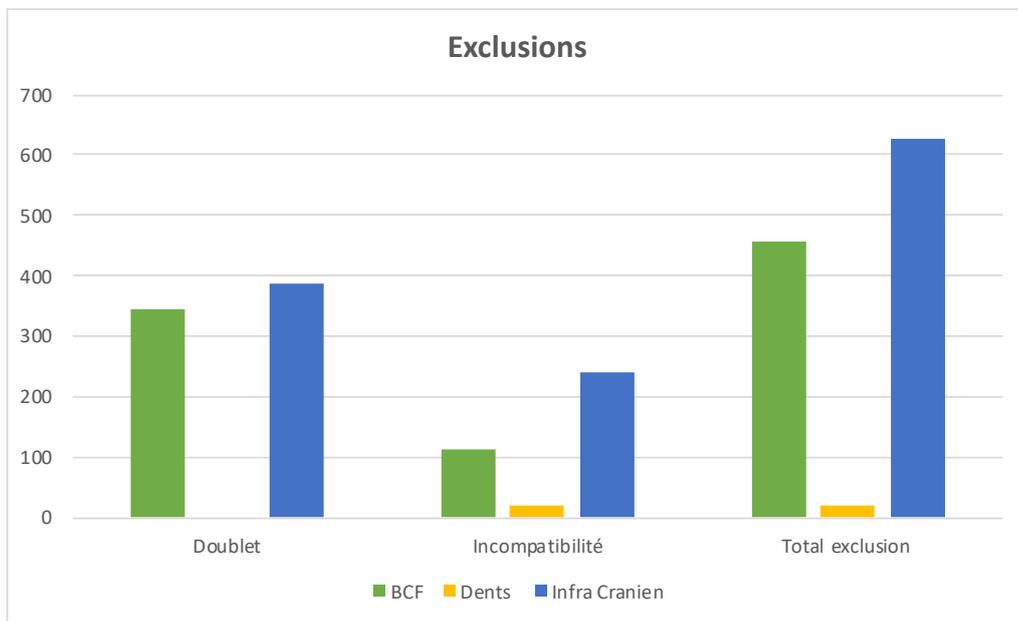
**(1) Résultats généraux concernant les exclusions**

Parmi les ensembles étudiés pour le site de Santa Rosa, 1106 fragments osseux étaient impliqués dans la mise en évidence d'une exclusion : 734 fragments étaient impliqués dans des doublets et 372 dans des incompatibilités.

Contrairement à Porta Nocera la mise en évidence de doublets a été majoritaire, ils représentent 66,4 % des exclusions.

Concernant la répartition des fragments (figure 136), 41,3 % sont des fragments de bloc crânio-facial (mandibule incluse), 1,9 % sont des fragments dentaires et 56,8 % sont des fragments du squelette infra-crânien.

De même qu'à Pompéi, aucun doublet n'est retrouvé parmi les fragments dentaires.



**Figure 136 : répartition anatomique du nombre de fragments impliqués dans la mise en évidence d'une exclusion au sein des ensembles étudiés au Vatican.**

## ➤ Mise en évidence d'exclusions à partir de fragments du bloc crânio-facial

### Les fragments impliqués dans un doublet (figure 137)

Plusieurs régions du crâne ont été à l'origine de doublets :

- l'os temporal (n=121),
- la mandibule (n=76),
- l'os occipital (n=41),
- l'os frontal (n=36),
- l'os maxillaire (n=25),
- l'os zygomatique (n= 23),
- l'os lacrymal (n=13).

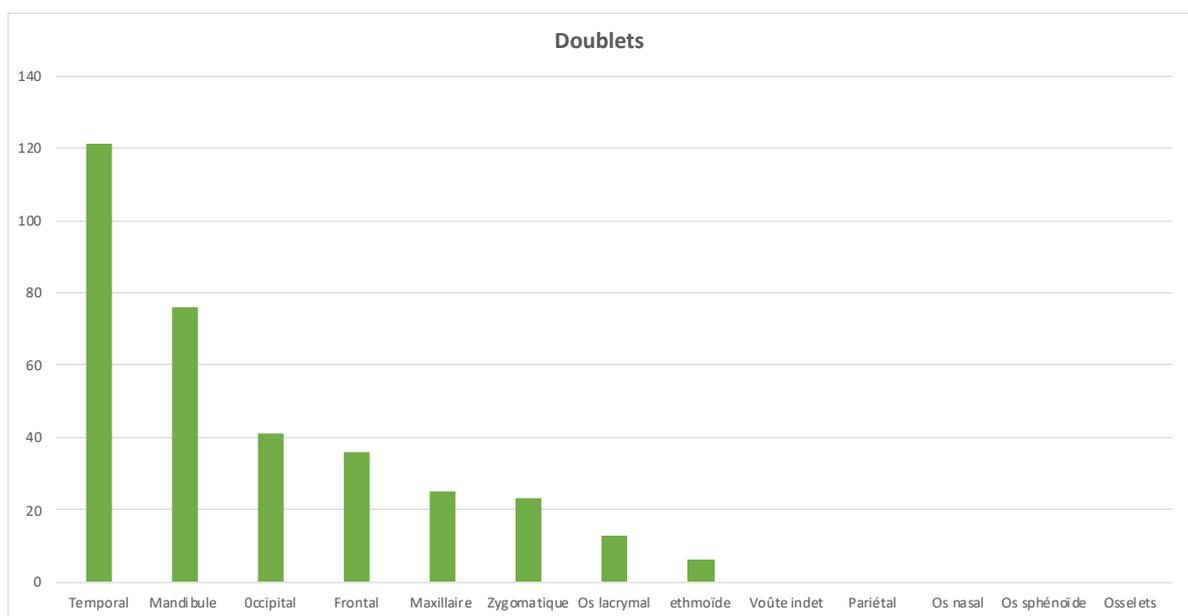
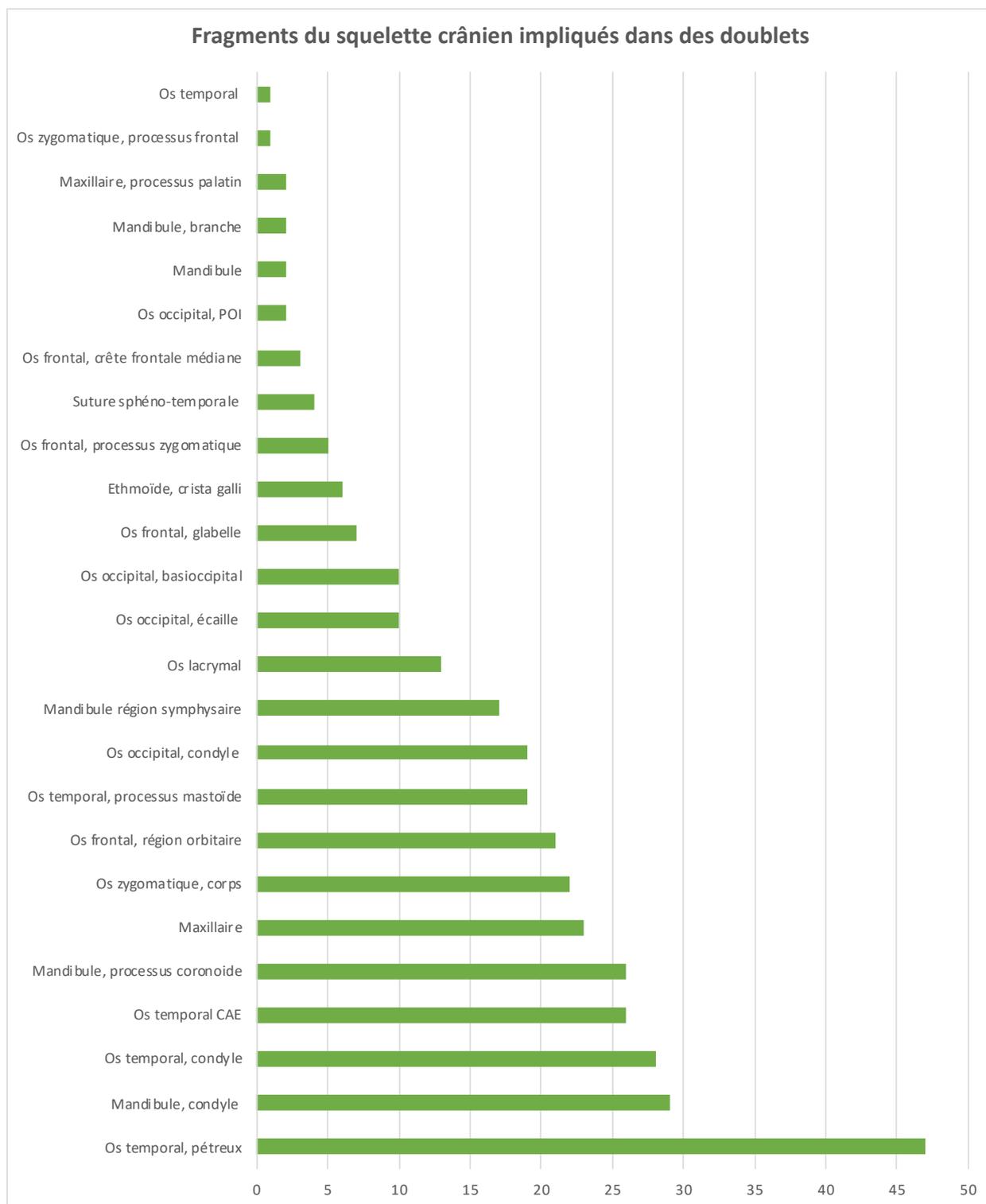


Figure 137 : répartition du nombre de fragments issus des différents os du bloc crânio-facial impliqués dans la mise en évidence de doublets.

De façon plus précise, les meilleurs scores sont obtenus pour les régions suivantes (figure 138) :

- la partie pétreuse de l'os temporal (13,6 %),
- les condyles mandibulaires (8,4 %) et temporaux (8,1 %),
- le conduit auditif externe de l'os temporal (7,5 %),
- le processus coronoïde de la mandibule (7,5 %),
- l'os maxillaire de façon générale (6,7 %),
- le corps de l'os zygomatique (6,4 %),
- la région orbitaire de l'os frontal (6,1 %),
- le processus mastoïde de l'os temporal (5,5 %)
- le condyle occipital (5,5 %),
- la région symphysaire de la mandibule (4,9 %),
- l'os lacrymal (3,8 %)
- l'écaïlle et la région basilaire de l'os occipital, (2,9 % chacun).



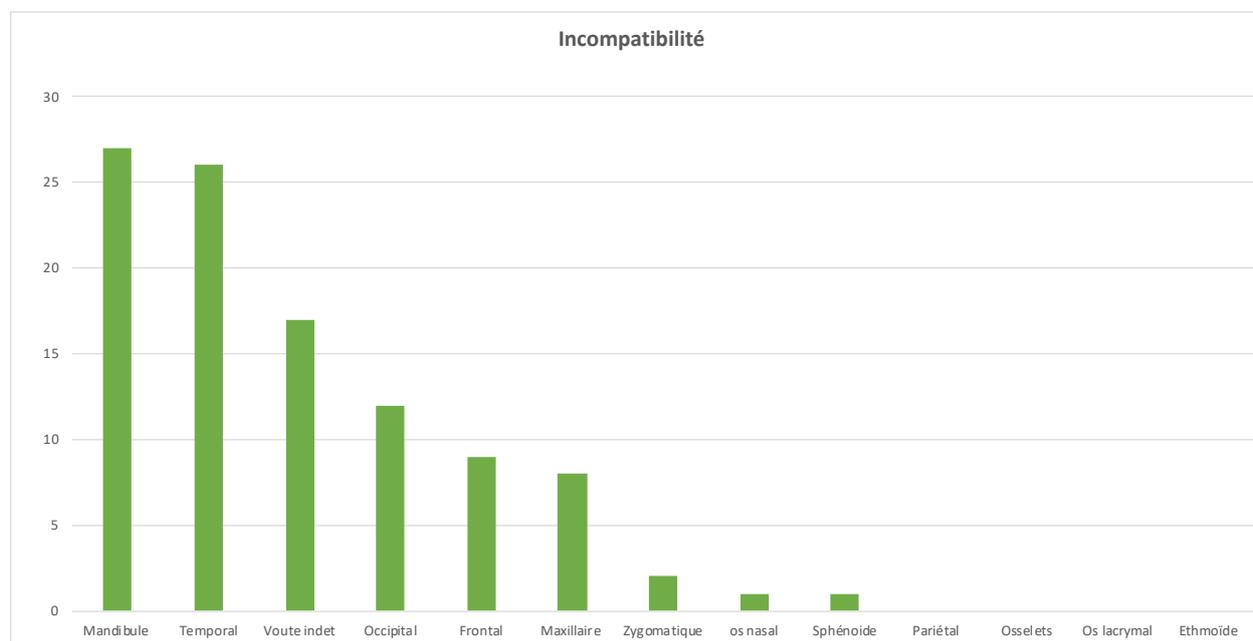
**Figure 138 : répartition du nombre de fragments selon les régions anatomiques d'intérêts impliquées dans la mise en évidence de doublets au sein du bloc crânio-facial.**

## Les fragments impliqués dans une incompatibilité (figure 139)

Les éléments au sein du crâne qui ont été à l'origine de la mise en évidence du plus grand nombre d'incompatibilités sont :

- la mandibule (n=27),
- l'os temporal (n=26),
- l'os occipital (n=12).

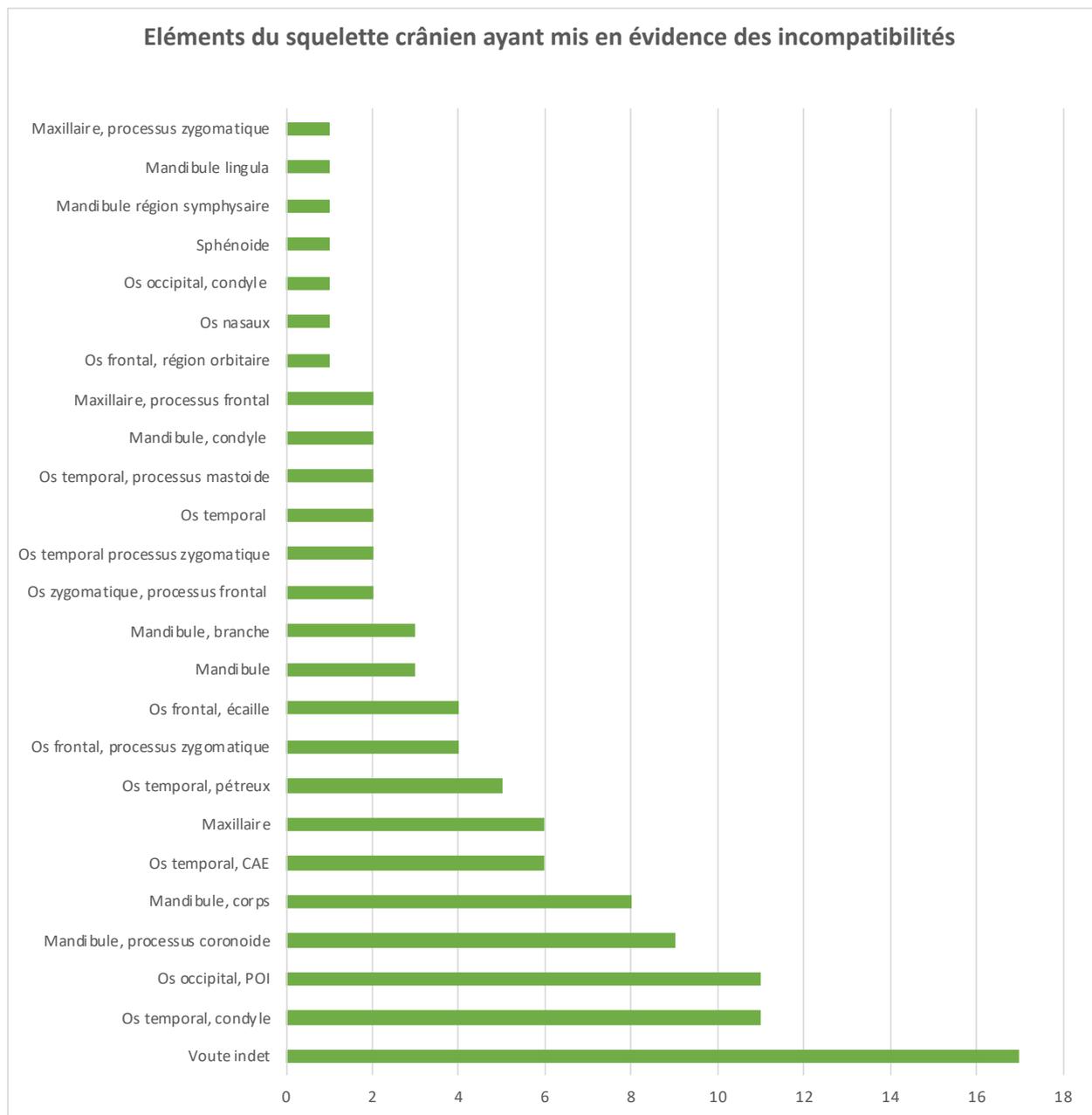
Il est important de noter également que l'examen de 17 fragments de voûte crânienne (sans plus de précisions concernant leurs origines exactes), a également permis de fournir des éléments en faveur d'une incompatibilité (pathologique, aspects ou texture, critères de crémation...) et permettre une exclusion.



**Figure 139 : répartition du nombre de fragments issus des différents os du bloc crânio-facial, impliqués dans la mise en évidence d'une incompatibilité.**

Plus précisément, parmi les différentes régions citées ci-dessus, les fragments qui ont livré les meilleurs scores, en dehors des fragments de voûte indéterminés sont (figure 140) :

- les condyles temporaux (n=11),
- la région de la protubérance occipitale interne (n=11),
- les processus coronoïdes (n=9) et le corps de la mandibule (n=8),
- la région du conduit auditif externe de l'os temporal (n=6),
- l'os maxillaire (n=6).



**Figure 140 : répartition du nombre de fragments selon les régions anatomiques d'intérêts, impliqués dans la mise en évidence d'une incompatibilité au sein du bloc crânio-facial.**

### ➤ Mise en évidence d'exclusions à partir de fragments dentaires

Seules 21 dents ou fragments dentaires ont permis de réaliser des exclusions.

Aucun doublet n'a pu être mis en évidence.

De même qu'à Porta Nocera, toutes les exclusions réalisées à partir de fragments dentaires sont des incompatibilités.

## ➤ Mise en évidence d'exclusions à partir de fragments du squelette infra-crânien (figure 141)

Un total de 628 exclusions a été réalisé à partir du squelette infra-crânien.

Les doublets sont les plus nombreux (n= 389 vs. n= 239 pour les incompatibilités). Les éléments du squelette qui ont permis la mise en évidence du plus grand nombre d'exclusions sont :

- les fragments du rachis (n=122),
- les os du tarse (n=80),
- la scapula (n=61),
- l'os coxal (n=55),
- l'humérus (n=45)
- la clavicule et le fémur (n=44).

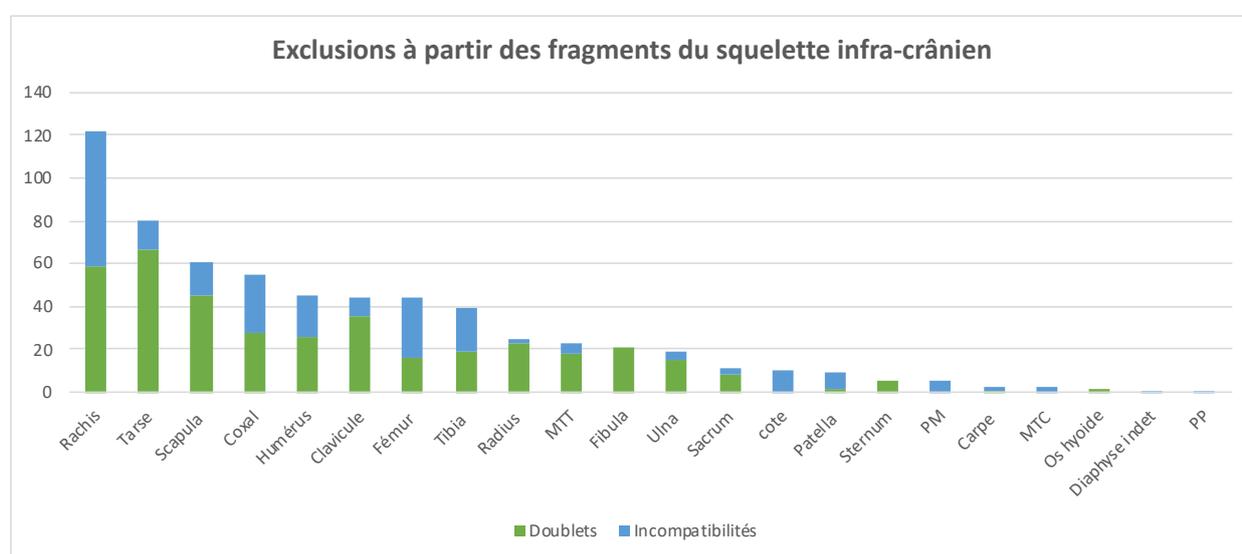


Figure 141: histogramme mettant en évidence les effectifs cumulés des fragments ayant mis en évidence des exclusions.

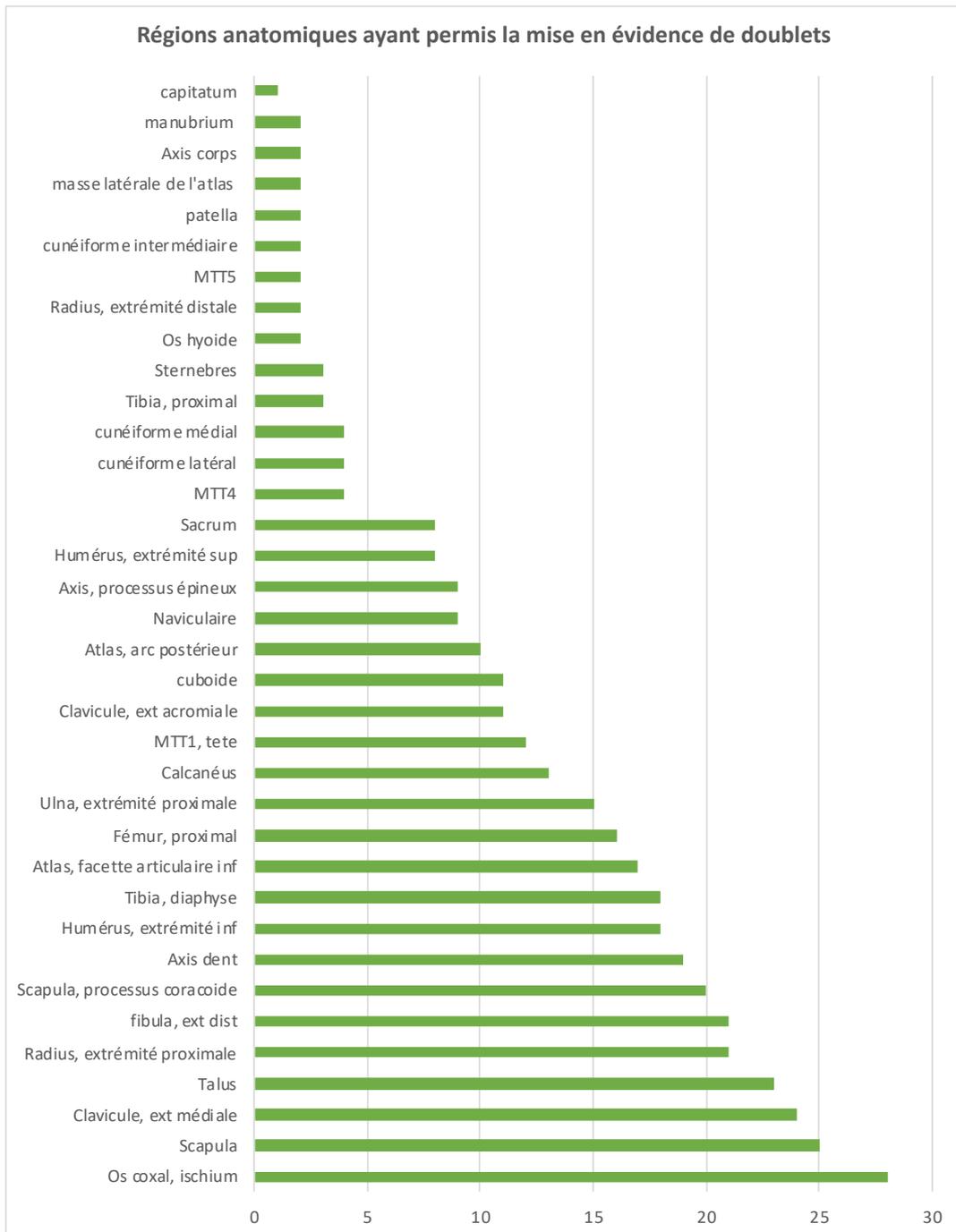
### Les fragments impliqués dans un doublet

Plusieurs régions sont impliquées dans la réalisation de doublets. Les fragments qui ont donné les meilleurs résultats sont :

- les éléments du tarse (n=66),
- les éléments du rachis (n=59),
- les fragments de scapula (n=45),
- la clavicule (n=35),
- l'os coxal (n=28),
- l'humérus (n=26)

Parmi eux certaines régions anatomiques ont fourni un nombre plus important de doublets (figure 142). Il est possible de citer :

- l'ischium (n=28),
- les fragments issus de la scapula de manière générale (n=25),
- l'extrémité médiale de la clavicule (n=24),
- le talus (n=23),
- l'extrémité proximale du radius (n=21),
- l'extrémité distale de la fibula (n=21),
- le processus coracoïde de la scapula (n=20),
- la dent de l'axis (n=19).



**Figure 142 : répartition du nombre de fragments selon les régions anatomiques d'intérêts impliqués dans la réalisation de doublets, parmi les fragments issus du squelette infra-crânien.**

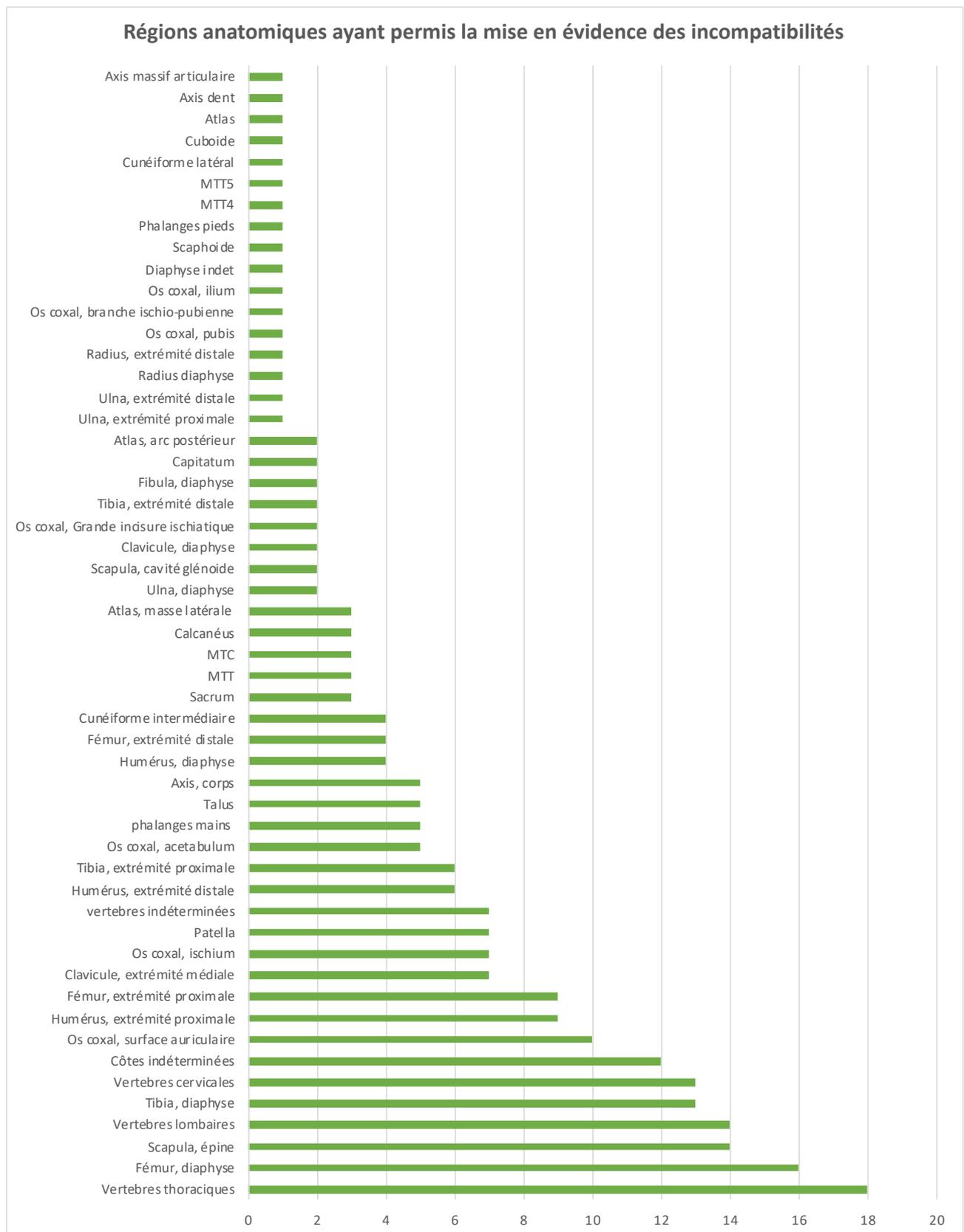
### **Les fragments impliqués dans la mise en évidence d'une incompatibilité (figure 143)**

Les régions anatomiques ayant permis d'établir le plus grand nombre d'exclusions par incompatibilités sont les suivantes :

- les éléments du rachis (n=66),
- le fémur (n=28),
- l'os coxal (n=27),
- le tibia (n=20),
- l'humérus (n=19),
- la scapula (n=16).

Parmi elles, on retrouve plus précisément les éléments suivants :

- les vertèbres thoraciques (n=18), lombaires (n=14) et cervicales (n=13) ;
- les diaphyses du fémur (n=16) et du tibia (n=13) ;
- l'épine de la scapula (n=14) ;
- les fragments de côtes (n=12) ;
- la surface auriculaire de l'os coxal (n=10).



**Figure 143 : répartition du nombre de fragments selon les régions anatomiques d'intérêts impliqués dans la mise en évidence d'une exclusion par incompatibilité, parmi les fragments issus du squelette infra-crânien.**

## (2) Résultats généraux concernant les liaisons

De la même façon que pour l'analyse des restes de Porta Nocera à Pompéi, nous avons uniquement considéré les liaisons réalisées entre des fragments d'ensembles différents ou d'unités stratigraphiques différentes. Nous avons pu comptabiliser 283 relations de type « liaison » : 179 concernaient des collages vrais, 57 étaient des relations de symétries, 44 correspondaient à des relations de concordances, enfin, les liaisons par contiguités articulaires étaient les plus rares (n=3).

Parmi les liaisons par collages, les fragments du squelette infra-crânien étaient les plus nombreux (70,4 %), concernant les symétries, on retrouvait quasiment autant de fragments crâniens que de fragments infra-crâniens (52,6 % vs. 43,8 %), pour les concordances le crâne était très peu représenté, les éléments du squelette infra-crânien (61,4%) et les dents (34%), étaient majoritaires.

Dans les autres catégories de liaisons, la part des dents était beaucoup plus faible : 5 % des collages, 3,5 % des symétries, et 0 % pour les contiguités articulaires (Figure 144).

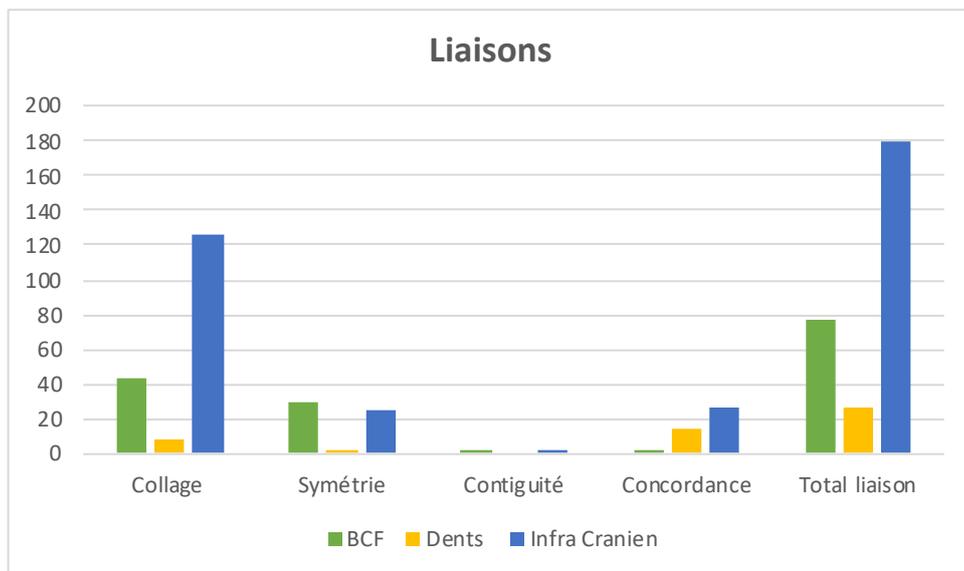


Figure 144 : Répartition anatomique du nombre de fragments impliqués dans la mise en évidence d'une liaison, au sein des ensembles étudiés au Vatican.

### ➤ Mise en évidence de liaisons à partir des fragments du bloc crânio-facial

#### Les fragments impliqués dans une liaison par collage (figure 145)

Au sein du bloc crânio-facial l'élément qui présente les meilleurs résultats en termes de collages est la mandibule, dont 16 fragments ont permis d'établir des liaisons.

On peut citer également :

- l'os maxillaire (n=9),
- l'os frontal (n=7),
- l'os temporal (n=5).

De façon plus précise, les régions anatomiques impliquées étaient :

- le corps mandibulaire (9 collages) ;
- les branches mandibulaires ont permis de réaliser 4 collages (les condyles, les processus coronoïdes et la lingula ont permis d'établir chacun un collage) ;
- l'os maxillaire est impliqué dans deux collages dont un concerne le processus frontal ;
- l'écaille frontale, la glabelle et la crête frontale médiane ;
- Le processus zygomatique et le processus mastoïde de l'os temporal ;
- plusieurs fragments de voûte indéterminés.

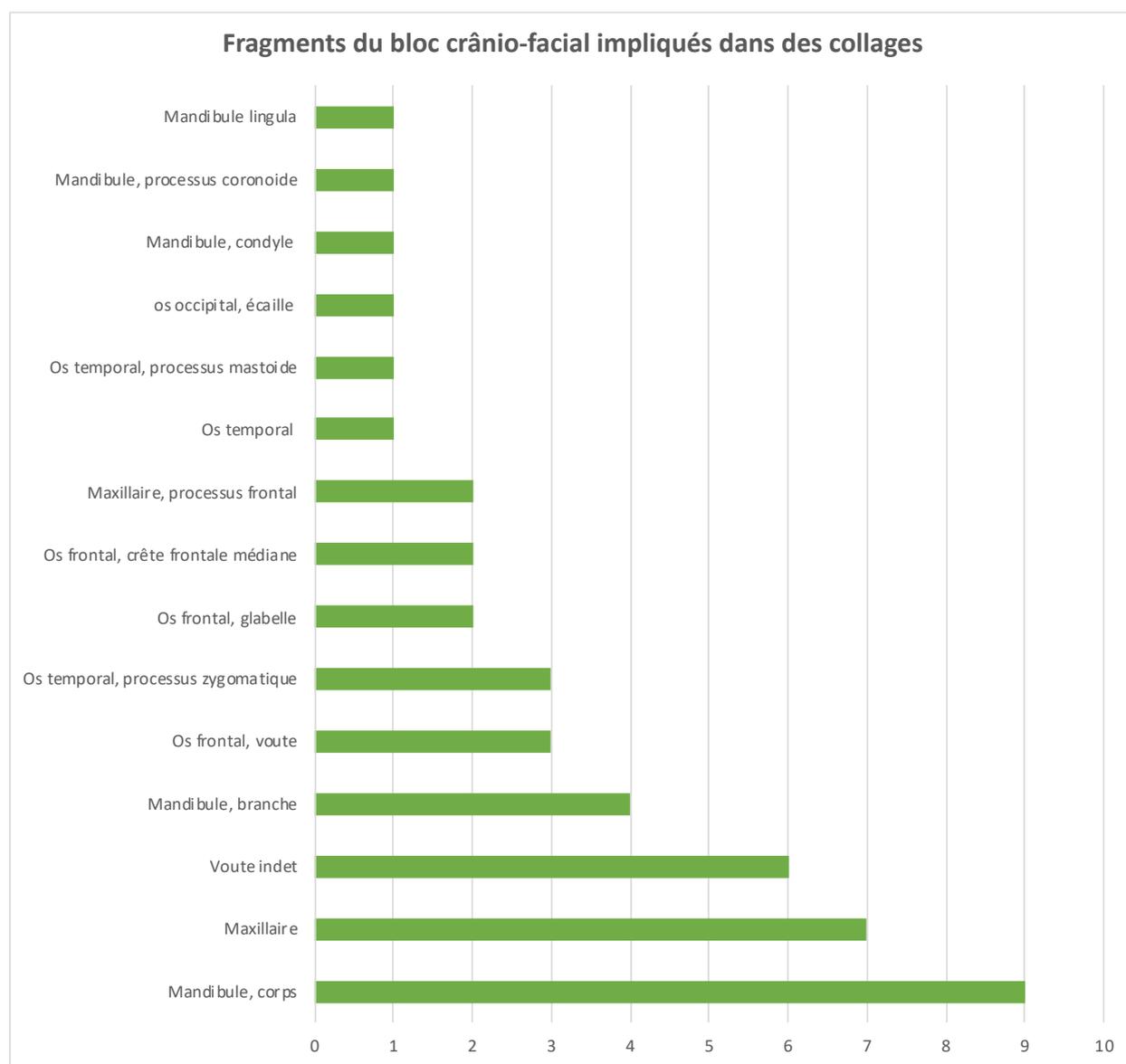


Figure 145 : histogramme représentant les effectifs des fragments du bloc crânio-facial ayant mis en évidence des liaisons par collage.

## Les fragments impliqués dans une relation de symétrie (figure 146)

Les symétries retrouvées au niveau du squelette crânien concernent uniquement quatre types d'os :

- la mandibule (n=12),
- l'os temporal (n=10),
- l'os sphénoïde (n=4),
- l'os maxillaire (n=4).

La partie pétreuse de l'os temporal et les branches mandibulaires sont les éléments les plus représentés dans les liaisons de symétries.

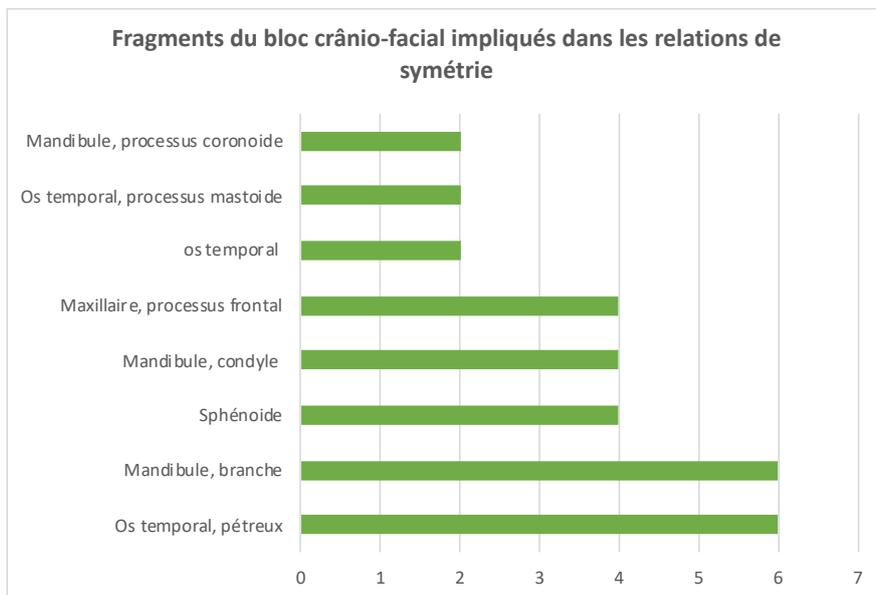


Figure 146 : histogramme représentant les effectifs des fragments du bloc crânio-facial, ayant mis en évidence des liaisons par symétrie.

## Les fragments impliqués dans une relation de concordances et contiguïtés articulaires.

Il y a seulement un fragment de voûte crânienne impliqué dans une liaison par contiguïté.

Il n'a été établi aucune liaison par concordances à partir des fragments de crâne.

### ➤ Mise en évidence de liaisons à partir de fragments dentaires

Seules 26 dents ou fragments dentaires ont permis d'établir des liaisons.

Parmi elles, plus de la moitié (57,7% ; n=15) correspondaient à des liaisons par concordances, 34,6 % (n=9) intervenaient dans des collages vrais, et seulement 7,7 % (n=2) dans des liaisons par symétrie.

Il n'est mis en évidence aucune liaison par contiguïté pour des fragments dentaires.

## ➤ Mise en évidence de liaisons à partir de fragments du squelette infra-crânien

Les éléments du squelette infra-crânien ont généré 180 liaisons dont 70 % d'entre elles étaient des collages vrais ; 13,9 % correspondaient à des liaisons par symétrie ; 1,1 % des liaisons par contigüités et 15 % par concordances.

Plusieurs éléments squelettiques d'intérêts ont pu être mis en relief (figure 147) :

- les éléments du rachis ont réalisé 42 % des collages et 65 % des liaisons par concordances ;
- la fibula était à l'origine de 19 % des collages ;
- le tibia a permis de générer 14 % des collages.

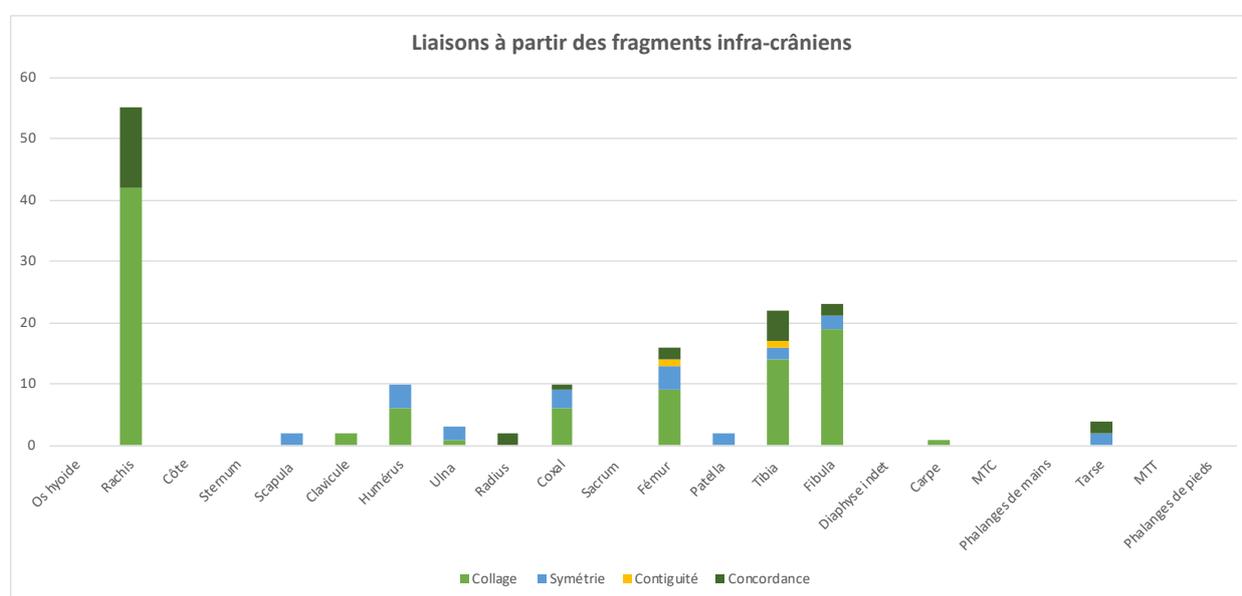


Figure 147 : histogramme représentant les effectifs cumulés des fragments du squelette infra-crânien ayant mis en évidence des liaisons.

### Les fragments impliqués dans une liaison par collage

Les régions anatomiques qui ont permis d'établir des liaisons par collage sont représentées sur l'histogramme de la figure 148. Certains fragments ont fourni des effectifs plus élevés, il s'agissait de :

- la fibula (diaphyse n=23 ; extrémité distale n=5) ;
- l'atlas (corps n=15 ; masses latérales n=7 ; arc postérieur n=3) ;
- l'axis (processus épineux n=10 ; corps n=3) ;
- le fémur (extrémité proximale n=9 ; diaphyse n=4) ;
- le tibia (diaphyse n=8 ; extrémité proximale n=4) ;
- les autres vertèbres cervicales (n=8).

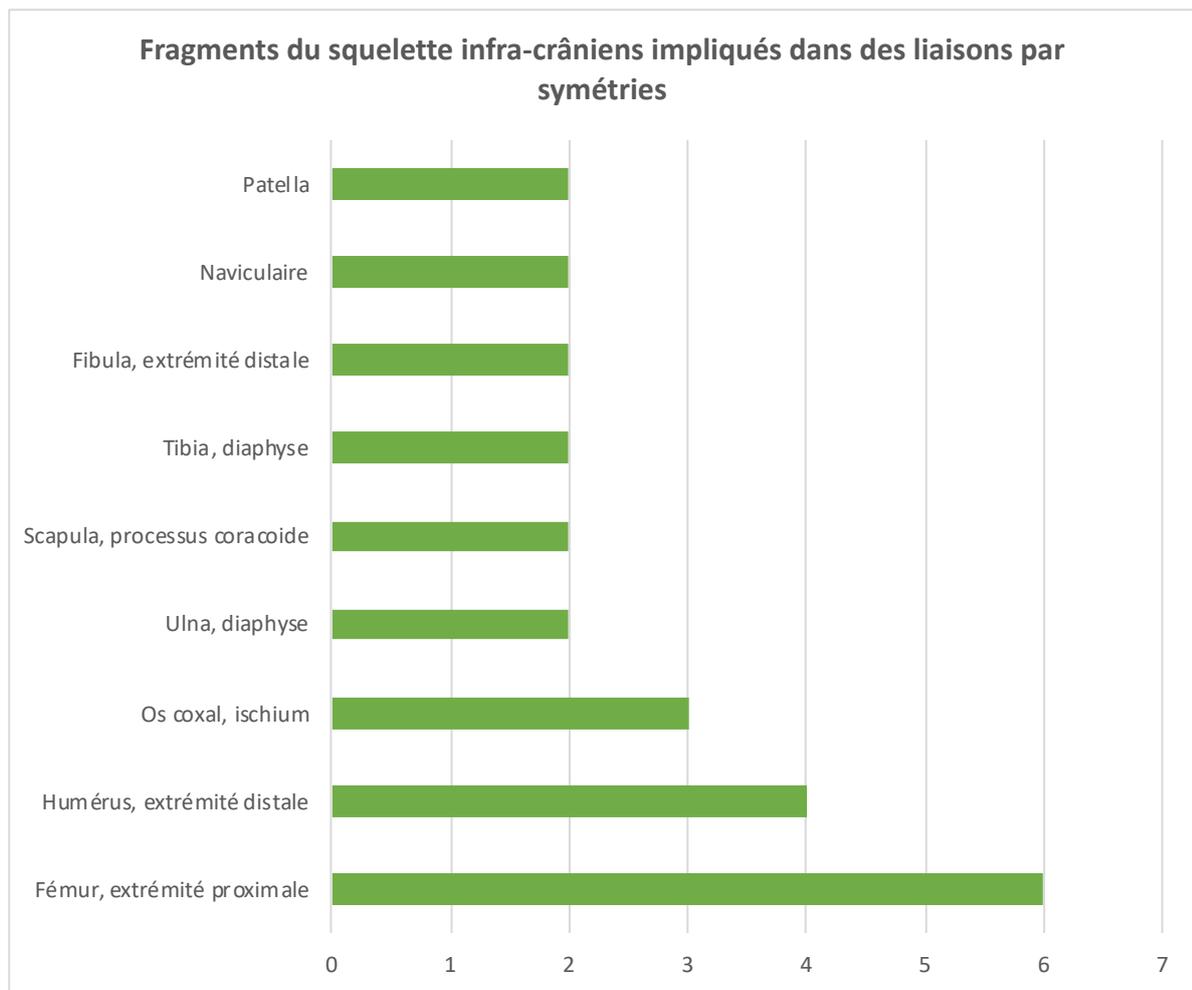


**Figure 148 :** histogramme représentant les effectifs des fragments du squelette infra-crânien ayant mis en évidence des liaisons par collages.

### Les fragments impliqués dans une relation de symétrie

Peu de fragments du squelette infra-crânien sont impliqués dans des relations de symétries. Les seules liaisons par symétries retrouvées concernent (figure 149) :

- l'extrémité proximale du fémur ;
- l'extrémité distale de l'humérus et de la fibula ;
- la région de l'ischium de l'os coxal ;
- les diaphyses de l'ulna et de la fibula ;
- le processus coracoïde de la scapula ;
- l'os naviculaire ;
- la patella.



**Figure 149 :** histogramme représentant les effectifs des fragments du squelette infra-crânien ayant mis en évidence des liaisons par symétries.

### **Les fragments impliqués dans une relation par contiguïté ou concordance**

Il existait une seule liaison par contiguïté articulaire à Santa Rosa, elle impliquait l'articulation fémoro-tibiale.

Concernant les concordances, seuls les éléments du rachis (n=13) et la diaphyse tibiale (n=5) offraient des résultats significatifs, les autres régions ont généré seulement une ou deux liaisons.

Il est possible de citer parmi ces régions :

- la grande incisure ischiatique de l'os coxal,
- la diaphyse du radius,
- l'extrémité proximale du fémur,
- l'extrémité distale de la fibula,
- le calcaneus.

---

## *Discussion*

---

## A. La valeur d'un fragment d'os brûlé

---

Les altérations induites par la chaleur ne suffisent pas à faire disparaître totalement un corps (Bass, 1984; Brickley et al., 2007; Eckert et al., 1988; Fairgrieve, 2008b; Zana et al., 2017). Il subsistera toujours des fragments osseux et dentaires, de tailles variables, aux caractéristiques anatomiques plus ou moins reconnaissables et porteurs d'une certaine quantité d'informations.

L'identification des restes humains brûlés est considérée comme le domaine le plus difficile de la détermination osseuse (Herrmann, 1976). Elle nécessite de prendre en compte des déformations, des phénomènes de rétraction et un mode de fragmentation différent de celui habituellement observé sur les os secs. Des éléments structurels tels que l'aspect de la corticale externe ou la structure interne de l'os (aspect et organisation), généralement négligés sur l'os non brûlés deviennent contributifs.

Pour Gejvall (1963), seul un entraînement et des manipulations régulières permettraient de progresser dans la détermination des fragments d'os brûlés.

Cependant, la détermination anatomique, en d'autres termes, l'attribution de chaque fragment à une structure anatomique, joue un rôle fondamental dans l'interprétation d'un assemblage osseux (dénombrement, mise en évidence de manipulation pendant ou après la combustion). C'est également un prérequis essentiel à l'identification des caractéristiques biologiques de l'individu ou des individus qui le composent. Elle en sera le fondement.

Avant de se lancer dans une telle analyse, il est nécessaire de connaître les principales clés de la détermination anatomique sur l'os brûlé et de savoir répondre à différentes questions : quels sont les fragments qui se conservent le mieux ? Quels sont les fragments qui sont le plus susceptibles d'être retrouvés ? Quels sont ceux qui sont les plus faciles à identifier ? Quels sont ceux qui apportent le plus d'informations ? Quels sont les principaux biais à prendre en compte ?

À partir de nos résultats et des données déjà publiées dans la littérature, nous allons aborder divers points pour tenter de répondre à ces questions.

## 1. La conservation différentielle

---

### a) Qu'est-ce que la conservation différentielle ?

---

La conservation différentielle des os humains est un sujet qui a souvent été abordé dans la littérature. En 1904, Rivière, à l'occasion des procès-verbaux de la société préhistorique de France, discutait déjà de l'impact des différents modes de sépultures sur la conservation des os humains (Rivière, 1904).

Elle peut être appréhendée selon deux niveaux différents : individuel et populationnel.

Au niveau individuel, lors de l'analyse anthropologique d'un assemblage osseux, on peut parfois observer une différence entre la proportion théorique osseuse attendue et la proportion retrouvée. Cette différence peut avoir deux origines possibles. Il peut s'agir d'une problématique de conservation *stricto-sensu* ou bien d'un mode de traitement particulier du cadavre qui influe sur la conservation.

Au sein d'un même squelette, il existe des différences structurelles qui peuvent impacter la résistance de l'os et sa préservation aux processus post-dépositionnels : dégradations physiques, altérations chimiques, dégradations d'origines animales ou végétales (Behrensmeyer, 1975; Binford & Bertram, 1977; Marean, 1991). Par ailleurs, des gestes funéraires (Boulestin et al., 1996; Duday, 1987a, 1987b; Duday & Sellier, 1990; Gnoli & Vernant, 1982) ou en contexte médico-légal des manipulations du corps telles que des tentatives de dissimulation par destruction (décharnement, découpe, carbonisation, traitement chimique...) ou par dissémination (déplacement de tout ou partie du corps) peuvent aussi impacter le profil de représentation osseuse au sein d'un assemblage. Enfin, un dernier facteur non négligeable concerne le mode de découverte. En effet, qu'ils s'agissent des archéologues ou des enquêteurs en contexte médico-légal, ils peuvent malheureusement constituer eux-mêmes des agents destructeurs de manière involontaire (Bello, 2001).

Au niveau plus large de la population, il faut être conscient que les restes osseux d'une collection ostéologique ne constituent pas le reflet exact de la population vivante d'origine. Il peut exister au sein d'un ensemble funéraire des exclusions sociales, sexuelles ou par classes d'âges des individus (Dedet et al., 1991; Masset, 1987; Tillier & Duday, 1990). De plus, il peut exister des processus de conservation différentielle en fonction de l'âge des individus qui pourraient entraîner une sous-représentation d'une certaine partie de la population, en particulier les sujets jeunes (Bello et al., 2002a).

### *b) Les profils théoriques de survie pour les os non brûlés (Bello et al., 2002b)*

---

Bello et al. (2002b) se sont attachés à rechercher les profils de représentation osseuse afin de tenter d'établir un profil commun de conservation des restes humains dans divers contextes archéologiques (différences chronologiques, environnementales, sédimentologiques et climatiques). L'idée était de pouvoir prédire quels éléments osseux étaient susceptibles de mieux survivre aux processus taphonomiques naturels. Un des objectifs secondaires de cette étude était de pouvoir mettre en évidence des manipulations ou une intervention sur le dépôt. En effet si le profil de survie retrouvé est différent du profil théorique attendu, la différence observée peut être liée à une intervention non naturelle, telle qu'une intervention humaine par exemple.

Ils ont donc construit un « *profil théorique de survie osseuse la plus probable* ». Ce modèle a été établi en calculant un Indice de Représentation Osseuse (ou IRO), afin d'étudier la représentabilité de chaque pièce osseuse au sein de six collections ostéologiques issues de nécropoles chrétiennes, d'époques médiévale et moderne.

L'IRO correspondait au rapport entre la somme des éléments osseux récupérés pendant les opérations de fouille et le nombre théorique des os qui auraient dû être présents dans l'effectif paléodémographique total. Ce nombre théorique était obtenu à partir du nombre d'individus retrouvés en connexion anatomique.

Un IRO de 100 % correspondait à une pièce osseuse toujours présente dans l'assemblage et un IRO de 0%, une pièce jamais présente.

À partir de ces données, des profils de survie ont été obtenus pour chacune des nécropoles étudiées.

Le profil théorique, correspondait aux valeurs moyennes des profils de survie obtenus pour chacune des nécropoles.

Il a permis de révéler que les os les mieux représentés étaient le crâne, les dents, les vertèbres, les côtes, l'humérus et le fémur. Une partie de l'étude, plus détaillée, a également montré qu'il pouvait exister des disparités au sein d'une même catégorie. Dans le cas du crâne par exemple, les os de la face se révélaient en moyenne les moins bien représentés en raison de leur fragilité, réduisant fortement la probabilité de les retrouver intacts. Les os pariétaux, eux, affichaient les meilleurs scores de représentation, même s'ils étaient très souvent fragmentaires.

### *c) La conservation différentielle des os brûlés*

---

La question de la conservation différentielle dans le cadre de corps humains soumis à un processus de combustion est plus complexe.

L'étape préalable afin d'être capable d'affirmer que certaines régions anatomiques se conservent mieux que d'autres, est la nécessité d'identifier de façon précise l'ensemble des fragments osseux, au risque d'engendrer un biais dans l'interprétation des données.

Ensuite, l'outil utilisé la plupart du temps pour évaluer la conservation différentielle est le référentiel pondéral.

Des données de référence, concernant la masse relative de tous les grands segments anatomiques (non brûlés) : extrémité céphalique, tronc, membres supérieurs et membres inférieurs ont été proposés par divers auteurs (Baker & Newman, 1957; Lowrance & Latimer, 1967; Pelletier, 1900; Silva et al., 2009; Trotter & Hixon, 1974b; Vallois, 1957). Lowrance & Latimer (1957) ont notamment établi un référentiel complet à partir d'os secs (squelettes de références originaires d'Asie), offrant une image du pourcentage de représentation théorique de chaque région.

Concernant l'os brûlé, une expérience a été réalisée par Mitchell et al., (1945) sur le corps d'un homme indo-européen de 35 ans mesurant 183 cm et pesant 70,55 Kg. Après dissection du cadavre, il a été pesé : 12,11 kg d'os frais et 58,44 kg de tissus mous. Le poids total du squelette représentait donc 14,8 % du poids total du corps et contenait 30,1 % de matières inorganiques, 19,5 % de graisses et 18,6 % de protéines. Après le processus de crémation, le squelette brûlé ne représentait plus que 3,4 kg d'os soit seulement 28 % du squelette frais. Par la suite, plusieurs auteurs ont établi des profils de représentation des données pondérales selon l'âge ou le sexe (Depierre, 2013; Herrmann, 1976; McKinley, 1993; Sonek, 1992; Warren & Maples, 1997).

Les données fondamentales présentées par Depierre, (2013) sont particulièrement riches. Elle a réalisé une étude expérimentale dans un crématorium moderne et présente ses résultats concernant plus d'une centaine de crémations (55 hommes et 48 femmes) : masses totales et indices pondéraux par segments anatomiques (tronc, crâne et membres).

Les résultats de cette étude montrent de légères discordances avec les pourcentages de références de Lowrance & Latimer (1957). On peut citer par exemple les résultats de l'extrémité céphalique, Depierre (2013) retrouve un indice pondéral de 12,1% vs. 19,4 % pour Lowrance & Latimer. Plusieurs facteurs pourraient expliquer cette différence, tels que la prise en compte des fragments indéterminés ou la fragmentation extrême. Dans notre échantillon, les données concernant l'extrémité céphalique sont plus proches de celles de Lowrance et Latimer (1957), puisqu'elles ont été calculées à 19,6 % pour Pompéi, 18,3 % pour Cumes et 20,1 % pour le Vatican. Ce constat avait déjà été fait par Duday, (2019) concernant le profil des individus de la première phase d'étude de Porta Nocera. Dans cet article, il avançait l'hypothèse que la différence observée pourrait venir du fait que sur un bûcher traditionnel, la température s'élève progressivement alors que dans un crématorium le corps est introduit dans une chambre préalablement portée à haute température, entraînant un mode de fracturation plus intense des os du crâne.

Cette réflexion nous a conduit à envisager un deuxième élément essentiel dans l'analyse des fragments osseux : la question de la fragmentation différentielle.

## 2. La question de la fragmentation différentielle

---

### a) *Fragmentation différentielle : définition*

---

Au cours d'un processus de combustion, la fragmentation est indéniablement un des principaux facteurs limitant l'identification. Elle conditionne en partie l'étape de la détermination anatomique des restes osseux. Bien qu'il existe des exceptions, un os « entier » même déformé, est souvent plus simple à identifier qu'un fragment millimétrique.

Chaque os possède une structure qui lui est propre et va réagir de façon différente à la chaleur. Les os courts ou les extrémités d'os longs, majoritairement composés d'os spongieux recouverts d'une fine couche d'os compact ne vont pas se comporter de la même manière qu'une diaphyse essentiellement constituée d'os compact. De même, un fragment de voûte crânienne ou de massif facial ne présenteront pas les mêmes modes de fracturations (Depierre, 2013; Duday et al., 2000; Lisowski, 1968)

La fragmentation est la résultante des deux principales contraintes subies par l'os lors de l'élévation de la température : la rétraction et la déformation (Depierre, 2013).

Le rétrécissement induit par la combustion a été observé dans de nombreuses études expérimentales (Dokládál, 1969, 1971, 1999; Herrmann, 1976, 1977b; Malinowski & Porawski, 1969; Piontek, 1975).

Les travaux de Dokládál (1969, 1971, 1999) réalisés à partir de « demi-cadavres » brûlés dans un crématorium, à des températures variant de 600 à 900 degrés, ont établi une comparaison morphologique et ostéométrique entre d'une part les os brûlés et d'autre part les os non brûlés (disséqués et nettoyés).

Trois groupes ont pu être ainsi déterminés selon la façon dont les os ont réagi à la chaleur.

Le premier groupe était constitué des os non modifiés par l'action de la chaleur :

- certains fragments de la voûte crânienne ;
- les fragments de la base du crâne (selle turcique, foramen magnum, protubérance occipitale externe, pyramide pétreuse et processus mastoïde de l'os temporal) ;
- certaines régions de la face (région orbitaire, ouverture piriforme) ;
- la mandibule (condyle, région goniale et protubérance mentonnière) ;
- le processus odontoïde de l'axis ;
- la symphyse pubienne et le foramen obturé de l'os coxal ;
- la patella ;
- les os du tarse.

Le deuxième groupe était constitué des régions anatomiques qui présentaient un rétrécissement moyen :

- l'os frontal (arcade sourcillière et région de la glabella) ;
- les fragments de voûte crânienne comportant une courbure ;

- l'arc dentaire mandibulaire ;
- les vertèbres ;
- les épiphyses des os longs.

Les os du troisième groupe étaient ceux qui présentaient les déformations les plus importantes et sur lesquels des mesures étaient impossibles :

- les os longs ;
- les os du bassin.

Herrmann (1970, 1976, 1977b) à travers diverses études expérimentales, a pu conclure que la rétraction dépendait de plusieurs critères : la structure de l'os (compacte ou lamellaire), la température d'exposition et les composants minéraux de l'os. Il suggérait également une influence du sexe.

Byers (2005) confirme l'influence de la température et constate un taux de rétraction réduit pour des températures inférieures à 800°C (1 à 2 %), qui augmentent considérablement au-delà de 800°C (10 à 15%).

Au-delà de 800°C, les auteurs s'accordent sur le fait que la rétraction doit être prise en compte lors de l'application de méthodes morphologiques et surtout métriques d'identification (Bradt Miller & Buikstra, 1984; Buikstra & Swegle, 1989; Grupe & Herrmann, 1983; Holland, 1989; Hummel & Schutkowski, 1986; Nelson, 1992; Van Vark, 1970).

Thompson (2005) et Gonçalves et al. (2011b) démontrent également une influence de la durée d'exposition mais Gonçalves et al. précisent que cette relation entre rétraction et durée d'exposition n'est pas linéaire.

La déformation est le second facteur pouvant conduire à la fragmentation. Elle intéresse plus spécifiquement les diaphyses des grands os longs et peut parfois être spectaculaire (Lisowski, 1968).

Certains auteurs affirment qu'elle résulte elle-même des contraintes de la rétraction, conduisant ainsi à la fracture lorsque l'élasticité du tissu osseux est dépassée (Gonçalves et al., 2011b; Johnson, 1985; Kühn, 1986; Mayne Correia, 1997).

Plusieurs facteurs semblent jouer un rôle dans la résistance à la déformation dont la composition minérale de l'os<sup>19</sup>. Trotter & Peterson (1955) ont montré que la composition minérale était variable d'un os à l'autre. La mandibule, le crâne et les grands os longs des membres présenteraient une quantité de matière minérale plus importante que les os plats et irréguliers. Il existerait également des variations inter-individuelles, avec une influence du sexe des individus (Herrmann 1976, 1977), et de l'âge (Huxley & Kósa, 1999). La proportion plus élevée de collagène chez les immatures pourrait expliquer ce phénomène (Bradt Miller & Buikstra, 1984; Harsányi, 1993; Herrmann, 1977a; Holland, 1989; Muller et al., 1952).

Concernant les dents, Wells (1960) affirme qu'elles sont rarement conservées et que les racines seraient préférentiellement retrouvées, avec des couronnes fracturées. Dans l'os, la partie

---

<sup>19</sup> L'os est composé de matière organique qui disparaît complètement vers 600 à 800°C (phase de calcination), elle est contenue dans les réseaux de canaux ou canalicules ou liée aux cristaux d'hydroxyapatite qui constituent l'élément majeur de la partie minérale de l'os (Depierre, 2013).

organique détruite par l'action du feu est presque aussi importante que la matière minérale. En revanche, elle est beaucoup plus faible dans la dentine et extrêmement basse dans l'émail. C'est cette partie organique qui donne à l'os son élasticité (donc sa capacité à se déformer et/ou se rétracter). Dans l'émail dentaire, cette faible quantité explique une plus grande fragilité (Susini, 1988).

C'est l'ensemble de ces facteurs qui permet d'expliquer que certaines régions anatomiques, chez certains individus, seront plus susceptibles que d'autres de se fragmenter sous la contrainte de la chaleur.

### *b) Les fragments les plus fréquemment retrouvés après un processus de combustion*

---

Plusieurs études, la plupart réalisées dans les années 1960, discutent des régions anatomiques qui « résistent » le mieux à l'action du feu (Dokládál, 1971; Lisowski, 1968; Spence, 1968; Wells, 1960). Spence (1968), a mis en évidence les principales régions anatomiques et leurs représentations au sein de 22 urnes sélectionnées à partir de 66 sites de l'âge du Bronze distribués à travers l'Angleterre, l'Ecosse et le Pays de Galle. Il a pu ainsi donner une estimation du pourcentage de représentation de chaque région anatomique. Il a montré que certaines d'entre elles étaient plus fréquemment retrouvées que d'autres au sein des assemblages osseux. Une sélection de crânes, dents, rachis et côtes étaient présents dans toutes les crémations. Les fragments de voûtes crâniennes étaient les mieux représentés (retrouvés dans près de 100 % des assemblages) alors que le taux de représentation des os de la base du crâne n'était que de 55 % (majoritairement représenté par l'os pétreux). Concernant la face, il constatait également des disparités : le taux de représentation de l'os maxillaire était de 50 % alors que celui du zygomatique n'était que de 15 %. Parmi les fragments les mieux représentés, il retrouvait également les phalanges des mains et des pieds et les fragments de fémur et d'humérus. Au contraire, les vertèbres sacrées et coccygiennes, les os du carpe, la fibula et la clavicule étaient les moins représentés.

Dans notre échantillon, nous avons recherché les catégories anatomiques qui étaient les mieux représentées en termes d'effectifs après la crémation.

Chez les individus adultes, pour les sites de Pompéi, de Cumes et du Vatican, les cinq catégories osseuses qui ont fourni le plus grand nombre de fragments étaient : « os plats », « côtes », « bloc crânio-facial », « diaphyses indéterminées » et « os courts ».

Même si leurs proportions varient légèrement d'un site à l'autre (les chiffres sont rappelés dans le tableau 31), les catégories anatomiques sont strictement identiques pour les trois sites, chez les adultes et les immatures (hors périnataux).

On observe parmi elles, trois classes de fragments d'origine indéterminée : os plats, os courts et fragments de diaphyses indéterminées. Ce résultat n'est pas aberrant, puisque par définition la fracturation d'une pièce osseuse va engendrer une multitude de fragments de plus petite taille et donc potentiellement plus difficiles à identifier.

	Pompéi (%)	Cumes (%)	Vatican (%)	Immature total (hors PN) (%)
Os plats	23,4	18,2	31,6	24,2
Os courts	12,4	6,8	13	16,4
Diaphyses indéterminées	12,6	8	11,9	12,5
BCF (hors mandibule)	12,9	15	12,2	8,7
Côtes	15,6	15,5	8,6	8

Tableau 31 : pourcentage de représentation des fragments dans les cinq catégories les plus représentés à Pompéi, Cumes et au Vatican, chez les sujets adultes et les sujets immatures (hors périnataux).

Cette réflexion nous a donc conduit à rechercher quels étaient les fragments les plus fréquemment identifiés dans notre échantillon.

### *c) Les fragments les plus fréquemment identifiés après un processus de combustion*

Les fragments osseux considérés comme les plus identifiables sont ceux qui ont été **retrouvés en plus grand nombre (condition de fréquence)** et qui ont été susceptibles d'être **reconnus sans erreur et sans difficulté (condition de détermination)**. Les fragments indéterminés de types « os courts », « os plats » et « diaphyses indéterminées », même s'ils peuvent déjà nous orienter vers l'une ou l'autre des régions anatomiques<sup>20</sup> ont été exclus de ce classement.

Parmi les fragments qui ont été « identifiés », les cinq régions anatomiques les mieux représentées appartiennent aux catégories « bloc crânio-facial », « côtes », « grands os long des membres », « vertèbres » et « os coxal ». Elles sont retrouvées pour l'ensemble des individus (matures et immatures) et pour tous les sites, à l'exception de Carthage, où une légère différence intervient chez les périnataux : les phalanges (indifférenciées mains et pieds) apparaissent en cinquième position, à la place des fragments d'os coxaux (les chiffres sont rappelés dans le tableau 32).

<sup>20</sup> Les fragments de diaphyses indéterminées par exemple nous orientent vers l'appartenance aux membres.

	Pompéi (%)	Cumes (%)	Vatican (%)	Immature total (hors PN) (%)
<b>Bloc crânio-facial</b>	25,7	21,2	28,3	34,7
<b>Côtes</b>	30,6	21,9	19,8	23,6
<b>Grands os longs des membres</b>	14,5	15,7	19,8	10,8
<b>Vertèbres</b>	10	20,5	13,7	11,9
<b>Os coxaux</b>	4,6	5,3	4,3	2,7

Tableau 32 : pourcentage de représentation des fragments les mieux identifiés à Pompéi, Cumes et au Vatican, chez les sujets adultes et les sujets immatures (hors périnataux).

### 3. Interprétation et éléments de reconnaissance générale

Compte tenu des éléments que nous avons détaillés plus haut, nous pouvons suggérer trois paramètres susceptibles d'influencer la détermination anatomique des fragments d'os brûlés : les phénomènes de conservation différentielle, la fragmentation différentielle et la capacité à reconnaître et identifier les fragments osseux.

- **La conservation et la fragmentation différentielle** sont deux facteurs sur lesquels nous ne pouvons avoir que très peu d'impact, si ce n'est de prendre de plus grandes précautions lors du prélèvement (fouille ou levée de squelette), du transport et de la conservation des assemblages osseux avant leur analyse.

Le sexe, l'âge des individus, la présence de tissus mous protecteurs, la composition, la structure interne et la densité du tissu osseux, la présence de reliefs d'insertions ligamentaires ou tendineuses, de régions suturaires ou le réseau vasculaire sont autant de facteurs qui peuvent influencer sur la façon dont les os vont réagir à la chaleur, se déformer et se fragmenter (Depierre, 1995, 2013; Willey et al., 1997). De ce fait, le mode de fragmentation observé pour les os brûlés ne sera pas identique à la fragmentation d'origine taphonomique, habituellement rencontrée lors de l'étude d'un squelette, inhumé ou non et auxquels les anthropologues sont habitués.

- **La capacité de reconnaissance et d'identification des fragments**, en revanche est un facteur « chercheur-dépendant », sur lequel il est possible d'influer par l'expérience. En effet, certains fragments sont très facilement reconnaissables d'emblée, alors que d'autres nécessitent plus de réflexion, de temps, d'apprentissage et de travail.

Toutefois, ces trois paramètres sont souvent intriqués. Par exemple, la façon dont les os vont se fragmenter sous l'effet de la chaleur peut mettre en évidence des structures anatomiques facilement repérables.

De même, la mise à nu des structures internes, rarement observées pour les os non brûlés, constitue souvent une des clés majeures de la détermination anatomique après combustion. Il s'agit notamment d'une des raisons pour laquelle certains fragments, malgré leurs petites tailles, peuvent être identifiés de façon certaine, parfois d'un simple coup d'œil.

Nous allons prendre l'exemple des six régions anatomiques citées ci-dessus afin de comprendre les raisons d'une telle représentation et d'établir des éléments clés de détermination osseuse, dans un but purement pratique.

### *a) Les côtes*

---

Les côtes comptent parmi les fragments les mieux représentés. Chez les adultes, considérant le nombre total de fragments identifiés, les fragments de côtes arrivent en première position à Pompéi et à Cumès et en deuxième position au Vatican. On les retrouve également chez les sujets immatures et périnataux. Elles atteignent 20 à 30 % de l'ensemble des fragments osseux. Pourtant, selon les tables de référence de Lowrance et Latimer (1957), la masse des côtes, représente seulement 6,4 % du poids du corps. Cette discordance entre le nombre élevé de fragments identifiés et une faible masse totale, indique une fragmentation importante et un os parfaitement identifié malgré la fragmentation.

Le tissu spongieux qui caractérise le corps d'une côte est constitué d'alvéoles de forme allongées. Il est parfaitement reconnaissable, même sur de petits fragments infra centimétriques.

En revanche, la fragmentation constitue un obstacle à l'identification précise de l'étage ou la latéralisation de la côte. Seule la première, comporte des caractéristiques anatomiques reconnaissables telles que sa taille, sa courbure, l'épaisseur de son corps et la forme de sa tête. Depierre (2013) a d'ailleurs montré que cette forme lui assurait une meilleure résistance aux phénomènes de combustion que les autres éléments du gril costal. L'identification de ce fragment reste tout de même assez rare. Sur les 38 091 fragments de côtes identifiés dans notre échantillon, seuls 58 fragments ont pu être associés à une première côte et 6 fragments à une deuxième côte.

### *b) Le bloc crânio-facial*

---

Contrairement aux côtes, la masse totale des fragments du bloc crânio-facial est loin d'être négligeable. Selon la table de références de Lowrance et Latimer (1957), ils représentent 20,4 % de la masse totale du squelette. Nous avons précisé plus haut que des résultats similaires avaient été retrouvés pour les individus adultes de notre échantillon.

Concernant les effectifs, toujours pour les individus adultes, le nombre total de fragments attribués au bloc crânio-facial avec certitude est de 30 070, ce qui est considérable. En revanche, 82,4 % d'entre eux n'ont pas pu être attribués à une région particulière. Ils ont été classés dans la catégorie générique « voûte/face/base ».

Les fragments de voûte sont des os plats très bien reconnus de façon générale. Ils sont constitués de deux lames d'os compact séparées par de l'os spongieux ou diploé, avec une organisation caractéristique de ses alvéoles et de ses trabécules. On peut observer un aspect « bulleux » très facilement reconnaissable avec un peu de pratique.

En outre, sous l'effet de l'augmentation de la température, le diploé constitue une zone de fragilité qui entraîne un clivage entre la table externe et la table interne, le mettant totalement à nu. Ce mode de fracturation a pu être observé dans la plupart de nos assemblages.

Concernant les os de la face ou de la base du crâne, leur aspect et la présence de reliefs anatomiques complexes en font des fragments qu'il est également facile d'associer au bloc crânio-facial de façon générale.

Les fragments de crâne sont donc globalement très bien reconnus. Comme pour les côtes, la difficulté qui demeure est de pouvoir distinguer l'origine exacte de chacun d'eux. Il conviendra pour cela de s'attacher à regarder précisément toutes les structures anatomiques potentiellement identifiables : reliefs particuliers, empreintes des sillons vasculaires, sutures, présence de sinus...

### *c) Les os longs des membres*

---

À Pompéi, pour les sujets adultes, les fragments des os longs des membres supérieurs représentent en moyenne 11,4 % de la masse totale et ceux des membres inférieurs 31,9 % de la masse totale. Au Vatican, les pourcentages sont un peu plus faibles (respectivement 9,9 % et 28,9 %) et à Cumes les membres inférieurs sont mieux représentés (11,3 % et 38,4 %).

Les données de références de Lowrance et Latimer (1957) donnent pour les membres supérieurs 17,6 % et pour les membres inférieurs 45 %.

Il est possible que la différence observée soit due à la présence de fragments indéterminés en particulier les « diaphyses indéterminées » qui n'entrent pas dans ce calcul.

Les fragments de diaphyses des os longs des membres, de la même manière que les fragments de côtes ou de bloc crânio-facial affichent des caractéristiques générales propres, facilement reconnaissables : épaisseur de la corticale, forme et section de la diaphyse et forme de la cavité médullaire. Il sera aisé d'associer un fragment à une section de diaphyse, en revanche, il sera beaucoup plus complexe de distinguer son origine exacte et encore plus de le latéraliser.

Concernant les épiphyses, le tissu spongieux comporte lui aussi des particularités dans son organisation qui permettent de ne pas le confondre avec d'autres os courts ou complexes par exemples.

#### *d) Les vertèbres*

---

Les fragments du rachis, de même que les côtes ne sont pas les éléments qui montrent les plus forts taux de représentation au sein du squelette (10,1 % selon les références) pourtant, ils sont situés à la 4<sup>ème</sup> place des effectifs globaux des fragments identifiés après la combustion. Ils sont donc parfaitement bien reconnus et ce même pour des fragments de petites tailles.

Les corps vertébraux ont la particularité de présenter un tissu spongieux organisé en trabécules perpendiculaires entre elles et qui s'entrecroisent. Cet aspect très caractéristique permet d'un simple coup d'œil d'identifier des fragments de petite taille et de faible masse.

De plus, en dehors de cet aspect structurel caractéristique, les vertèbres sont des os complexes aux reliefs reconnaissables.

Nous avons constaté que la distinction du type de vertèbre (cervicale, thoracique, lombaire, sacrée ou coccygienne) était assez aisée, en revanche, il était beaucoup plus difficile de déterminer l'étage précis auquel elle appartenait.

On peut néanmoins citer quelques exceptions : l'atlas et l'axis, et dans une moindre mesure, la 7<sup>ème</sup> vertèbre cervicale, les 10<sup>ème</sup> et 12<sup>ème</sup> vertèbres thoraciques et la 5<sup>ème</sup> vertèbre lombaire.

#### *e) L'os coxal*

---

L'os coxal est la cinquième région anatomique la plus identifiée. Il est l'os plat le plus volumineux du squelette, ce qui le rend assez facilement reconnaissable.

À Pompéi 2657 fragments ont été identifiés comme appartenant à l'os coxal. Parmi eux, 67,8 % ne l'étaient pas sur un critère anatomique précis, mais sur une appréciation globale (morphologie et texture).

L'os coxal comporte toutefois plusieurs régions d'intérêt permettant de le reconnaître avec plus ou moins de facilité. Les fragments de crête iliaque sont souvent retrouvés isolés et sont bien identifiables, de même que la région acétabulaire, la surface auriculaire, la symphyse pubienne et la tubérosité ischiatique. De plus, l'os coxal présente de multiples zones d'insertions musculaires et tendineuses caractéristiques.

Concernant sa structure, l'aspect externe de l'os cortical, l'organisation de l'os spongieux de l'aille iliaque (très dense sous la surface auriculaire) et l'organisation spécifique des trabécules de la crête iliaque sont bien reconnaissables.

Malgré cela, plusieurs difficultés sont à noter : en regard de l'acétabulum l'os spongieux est assez proche de celui des vertèbres et sa conformation d'os plat fait qu'il pourrait être confondu avec le sternum. Cependant, sa structure interne ne possède pas d'organisation spécifique et l'os compact en termes d'épaisseur des trabécules est différent (Depierre, 2013).

## f) *Les phalanges*

---

Les phalanges ont été retrouvées en très grande quantité chez les individus de Carthage. En effet 1362 phalanges ou fragments de phalanges ont été identifiés : 957 phalanges de mains et 405 phalanges des pieds.

Les phalanges sont des os qui s'identifient correctement. Le premier rayon ne comporte que deux phalanges alors que les rayons 2 à 5 comportent une phalange proximale, une phalange moyenne et une phalange distale. Plusieurs éléments permettent de distinguer les phalanges des mains et des pieds : les phalanges 2 à 5 des mains sont plus grandes que celles des pieds et les deux phalanges du premier rayon du pied sont plus grosses que toutes les phalanges des doigts.

Pour les phalanges des mains on peut observer les critères suivants :

- le corps est semi-cylindrique, la corticale est épaisse entourant un canal médullaire réduit ;
- la base et la tête permettent de distinguer les phalanges proximales intermédiaires ou distales ;
- la phalange distale est caractéristique avec une large tête comportant une surface rugueuse, saillante à sa face palmaire.

Pour les phalanges de pieds :

- la section du corps est arrondie ;
- la phalange moyenne est plus petite que la phalange proximale (son corps est quasiment inexistant) ;
- Les phalanges distales sont plus informes, (Quatrehomme et al., 2015) dans la section d'aide à la détermination anatomique de son traité d'anthropologie, décrit « une tubérosité de la phalange distale ».

Après un processus de combustion, les phalanges sont rarement entières. Il est néanmoins possible de discriminer certains fragments de phalanges des métatarsiens ou métacarpiens à partir des sections de diaphyses ou de la morphologie des extrémités. Par exemple, on peut distinguer la tête d'une phalange en forme de trochlée, de la tête d'un métacarpien plus arrondie.

Chez les individus immatures les plus jeunes, tels que ceux qui sont étudiés à Carthage, les phalanges sont moins fragmentées, plus souvent retrouvées intactes et sont donc bien identifiées. Cela pourrait expliquer leur forte représentation. On ne peut toutefois pas éliminer l'existence d'un biais dans la collecte ou la sélection des fragments. Nous aborderons ce sujet un peu plus loin dans notre développement.

## 4. Les régions anatomiques d'intérêts

---

Nous avons évoqué ci-dessus les principaux éléments d'identifications des fragments les mieux représentés au sein de notre échantillon. Ceux pour lesquels, avec un peu d'entraînement, un seul « coup d'œil » permet de les classer dans une région anatomique générale. Ils couvrent quasiment à eux seuls l'ensemble du squelette : bloc crânio-facial, rachis et thorax, bassin et membres.

Ce premier « grand tri » permet une primo-évaluation assez rapide de l'intégralité du dépôt. Néanmoins, il sera insuffisant pour obtenir des informations précises concernant l'assemblage étudié : combien d'individus sont présents ? Si plusieurs individus sont mis en évidence, quelle est la représentation de chacun des individus ? Qu'est-ce que cela implique en termes de gestes, de manipulation ? Est-il possible d'obtenir des informations quant aux caractéristiques biologiques des différents individus : âge, sexe, pathologies ?

Afin de répondre à ces interrogations diverses, il est nécessaire de pouvoir examiner plus précisément certains fragments afin d'en retirer le maximum d'informations possibles. Nous allons préciser ici quels sont les fragments d'intérêts à étudier en priorité pour chacune des étapes de l'analyse anthropologique.

### *a) Les fragments contributifs pour le dénombrement*

---

Au sein d'un assemblage de fragments osseux brûlés pour lequel il semble difficile de mettre en évidence une organisation (connexions anatomiques absentes ou rares), la question du dénombrement des individus peut se poser.

Il est essentiel d'être capable de repérer les fragments osseux contributifs pour l'estimation du nombre minimum d'individus.

Il existe deux catégories de fragments qui possèdent cette qualité : les fragments latéralisables et les fragments impairs et uniques.

#### **(1) Les fragments latéralisables**

Certains fragments identifiés présentaient des taux de latéralisations élevés. Dans la catégorie des adultes, on observe pour chacun des sites, les cinq mêmes catégories anatomiques :

- la mandibule,
- la clavicule,
- la patella,
- les os du carpe,
- les os du tarse.

À ces régions anatomiques d'intérêts, on peut ajouter la scapula et les éléments latéralisables du sacrum pour les individus immatures, ainsi que les grands os longs des membres pour les sujets périnataux.

On peut déjà noter ici qu'il existe une discordance, entre les catégories anatomiques de fragments décrits plus haut comme « les plus identifiables » et ces fragments latéralisables, donc porteurs d'une information supplémentaire.

Nous avons exposé précédemment qu'il suffisait parfois d'observer une simple caractéristique anatomique ou structurale pour classer un fragment dans une région anatomique.

On peut citer comme exemple l'organisation du tissu spongieux pour les côtes ou les vertèbres, la section de la diaphyse pour les os longs et l'aspect du diploé ou simplement la forme du fragment pour le bloc crânio-facial.

Cependant, identifier l'origine anatomique précise d'un fragment et déterminer sa latéralité afin de dénombrer les individus, rechercher des informations quant à l'identification biologique ou réaliser une analyse spatiale, demande beaucoup plus de temps, de travail, d'expérience et une parfaite connaissance de l'ostéologie.

Afin d'optimiser cette étape indispensable qu'est la détermination anatomique, nous avons cherché à mettre en évidence les régions d'intérêt.

Dans cette optique, nous avons calculé un taux de latéralisation pour l'ensemble des régions anatomiques qui présentaient la caractéristique d'être paire et symétrique.

Nous avons pu établir un premier constat : il existe pour chacun des sites étudiés plusieurs régions anatomiques qui présentent un taux de latéralisation de 100 %. Cela signifie que chaque fragment identifié est obligatoirement latéralisé. On peut citer quelques exemples à Pompéi :

- l'extrémité proximale de la fibula ;
- l'épicondyle latéral de l'humérus ;
- l'incisure spino-glénoïdienne de la scapula ;
- le processus temporal de l'os zygomatique ;
- les lames de l'atlas ;
- la crête supra mastoïdienne de l'os temporal ;
- le pourtour du foramen obturé et l'épine iliaque postéro-supérieure de l'os coxal ;
- le col de la mandibule ;
- la deuxième côte ;
- la petite aile du sphénoïde.

Il serait extrêmement tentant de s'arrêter là et de considérer ces fragments présentant les taux de latéralisation maximaux, comme les fragments les plus informatifs pour le dénombrement, mais ce serait une erreur.

Il existe une seconde information à ne pas négliger, qui est le taux de représentation des fragments. En effet, réussir à latéraliser parfaitement un fragment que l'on ne retrouve qu'exceptionnellement n'aura qu'un intérêt très limité dans l'estimation du nombre minimal d'individus. C'est le cas par exemple de la deuxième côte, qui bien qu'arborant un taux de latéralisation de 100 %, n'a été identifiée qu'à 6 reprises dans un échantillon de plus de 38000 fragments de côtes.

Nous avons donc recherché pour tous les sites, quelles étaient les régions qui combinaient les meilleurs taux de latéralisation et les effectifs les plus élevés.

Nous avons simplement distingué les individus adultes, immatures et périnataux. Il n'a pas été réalisé de distinction en fonction du sexe. En effet, la détermination du sexe demande une expertise généralement réalisée après l'étape de la détermination anatomique, alors que la simple distinction entre sujets de tailles adultes et immatures peut être rapidement réalisée lors du premier tri des fragments. L'estimation plus précise de l'âge au décès interviendra bien entendu dans un second temps lors de l'analyse biologique des fragments. Les résultats sont regroupés dans les deux encadrés suivants.

### FRAGMENTS D'INTERÊT CHEZ LES INDIVIDUS DE TAILLE ADULTE

Le cumul des données de Pompéi, Cumes et du Vatican a permis de mettre en évidence les fragments d'intérêts suivants :

- ⇒ **Fragments les plus pertinents** (communs aux trois sites) :
  - pour l'os temporal : la région pétreuse, la région du conduit auditif externe, le processus mastoïde et les condyles temporaux ;
  - l'os maxillaire globalement et plus particulièrement les processus frontaux ;
  - la branche mandibulaire : processus coronoïdes et condyles ;
  - l'épine scapulaire ;
- ⇒ **Fragments importants à rechercher** (retrouvés dans la liste des fragments les plus pertinents pour deux sites sur trois) :
  - pour l'os temporal : le processus zygomatique et la région rétro-mastoïdienne ;
  - le bord inférieur des orbites (os maxillaire) ;
  - la cavité glénoïde de la scapula ;
  - l'ischium ;
  - les extrémités distales du fémur et de l'humérus ;
  - l'extrémité distale de la fibula.
- ⇒ **Fragments à ne pas négliger** (retrouvés dans la liste des fragments les plus pertinents pour au moins un des trois sites) :
  - l'os zygomatique ;
  - les extrémités de la clavicule ;
  - les extrémités proximales des os longs des membres ;
  - la patella ;
  - les régions latéralisables de l'os frontal comportant le processus zygomatique, le toit et le bord supérieur des orbites ;
  - au niveau du tarse : le calcanéus, le cuboïde et les os cunéiformes ;
  - tous les os du carpe hormis le trapézoïde et le triquétrum.

## FRAGMENTS D'INTERÊT CHEZ LES IMMATURES

Le bilan global des individus immatures des trois sites de Pompéi, Cumes et du Vatican a permis de mettre en relief les régions suivantes :

- l'os temporal (écaïlle temporale, fosse mandibulaire et région du conduit auditif externe) ;
- l'os maxillaire et particulièrement le processus frontal ;
- la diaphyse claviculaire ;
- l'ischium ;
- l'épiphyse proximale du fémur ;
- le talus et le calcaneus.

On peut remarquer que chez les sujets immatures, la région pétreuse et le processus mastoïde de l'os temporal qui comptent parmi les régions les plus performantes chez l'adulte fonctionnent un peu moins bien (taux de latéralisation de la région pétreuse de seulement 37,5%).

Le bilan global des individus de la classe des périnataux de Carthage retrouve les fragments suivants :

- l'os temporal de manière générale mais surtout la région pétreuse ;
- la *pars lateralis* de l'os occipital ;
- les os frontaux et plus particulièrement le rebord orbitaire ;
- les grandes ailes de l'os sphénoïde ;
- les osselets de l'oreille moyenne *incus* et *malleus* ;
- l'os zygomatique ;
- les fragments scapulaires globalement ;
- l'ilium ;
- l'extrémité distale de la diaphyse humérale,
- l'extrémité proximale de la diaphyse fémorale ;
- la clavicule ;
- l'extrémité proximale et la diaphyse de l'ulna
- les MTC3 et MTT1.

À propos de ces résultats concernant les sujets périnataux, plusieurs remarques peuvent d'ores et déjà être effectuées.

- L'existence de fragments latéralisables uniquement pour cette classe d'âge, en lien avec les processus de croissance et de développement, tel que la non-fermeture des sutures crâniennes, qui peut expliquer une latéralisation de l'écaïlle frontale.
- La région pétreuse réintègre le classement avec les meilleurs taux de latéralisation. Ce résultat suggère qu'il existe un biais concernant les autres individus immatures. Il semble en effet peu probable que cette pièce osseuse soit parfaitement latéralisable chez les

adultes et les très jeunes individus et qu'elle ne le soit pas davantage pour les classes d'âges intermédiaires.

- La présence dans le classement des osselets de l'oreille moyenne. Dans les urnes de Carthage, les osselets de l'oreille moyenne ont été retrouvés en très grande quantité et ont été contributifs dans la mise en évidence d'exclusions pour le dénombrement des individus. Nous avons identifié deux facteurs importants à noter.
- Le premier concerne l'os en lui-même, il s'agit d'un critère de croissance et de développement. L'étrier ou *stapès* est le premier des trois osselets à apparaître, au stade embryonnaire. Il atteint sa taille adulte et est entièrement ossifié au sixième mois de vie fœtale ; L'enclume ou *incus* est le deuxième osselet à apparaître, mais le premier à s'ossifier dès le quatrième mois de vie fœtale. Au sixième mois, il a lui aussi atteint sa taille adulte. Cependant, contrairement à l'étrier dont l'architecture est définitivement fixée au stade fœtal, il existe pour l'incus, des processus de résorptions et formations osseuses qui se poursuivent tout au long de la vie. Le marteau ou *malleus* est le dernier des osselets à apparaître. Il présente une double ossification : membraneuse et enchondrale. Le premier point d'ossification apparaît au début du deuxième mois formant l'apophyse antérieure où grêle du marteau. Le reste s'ossifie au début du cinquième mois à partir de l'ébauche cartilagineuse. À 6 mois lui aussi est complètement ossifié, à l'exception du disque cartilagineux prolongeant l'extrémité de son manche qui peut persister à l'âge adulte (Huy & Teissier, 2011)
  - Le second critère est un critère archéologique et concerne les manipulations post-mortem et les pratiques funéraires. Une des caractéristiques identifiées à Carthage est la présence de mélange de résidus cendreaux au sein des assemblages qui indique probablement un curage de l'aire de crémation et non d'un simple ramassage des fragments.

## (2) Les fragments impairs et uniques

La seconde catégorie de fragments d'intérêt est composée par des os non latéralisables mais dont la seule présence en doublet permet de réaliser une exclusion.

Dans nos représentations schématiques récapitulatives, ces fragments ont été considérés au même titre que ceux qui présentaient un taux de latéralisation de 100 %. Il s'agissait des régions anatomiques suivantes :

## FRAGMENTS IMPAIRS ET UNIQUES À CONSIDÉRER

Le cumul des données de Pompéi, Cumes et du Vatican a permis de mettre en évidence les fragments d'intérêts suivants :

- l'atlas dans sa globalité ;
- l'axis (processus odontoïde et corps de l'axis) ;
- la région basilaire de l'os occipital ;
- la symphyse mandibulaire ;
- la région de la glabelle ;
- l'os vomer ;
- le corps de l'os hyoïde.

On peut également citer dans une moindre mesure les fragments suivants :

- la surface articulaire pour la dent de l'atlas ;
- le processus *crista galli* de l'ethmoïde ;
- le coccyx.

Cependant, ils sont moins bien représentés en termes d'effectifs.

Toutes ces régions anatomiques correspondent aux fragments les plus pertinents pour évaluer le nombre d'individus qui compose un assemblage.

Il semble intéressant de réaliser un premier dénombrement des individus, le plus précis possible, avant de se lancer dans l'analyse des critères d'identifications. Seule une détermination anatomique poussée avec latéralisation des fragments le permettra.

Le nombre minimum d'individus pourra ensuite être affiné au cours de l'analyse biologique, en tenant compte de nouveaux critères d'exclusions par le sexe, le degré de maturation, ou la pathologie.

Les fragments contributifs pour l'analyse biologique ne sont pas forcément les mêmes, il convient donc de les détailler également.

### *b) Les fragments impliqués dans l'identification biologique*

De façon générale, pour chacun des individus des sites de Porta Nocera, Porta Mediana et Santa Rosa, nous avons recherché quelles étaient les régions anatomiques impliquées dans l'identification biologique des individus. L'étude des individus du Tophet de Salammbô n'étant pas encore terminée à ce jour, ils n'ont pas été pris en compte.

Nous nous sommes focalisés ici sur les fragments impliqués dans l'analyse des deux critères principaux qui sont l'évaluation de l'âge au décès et la détermination du sexe. Comme précisé

précédemment, le sexe des immatures n'a pas été évalué pour des raisons méthodologiques évidentes. En effet, même si les caractères sexuels secondaires apparaissent dès la puberté, le squelette lui n'a pas encore atteint son aspect mature et les régions d'intérêts ne se soudent qu'à partir de l'âge de 13 ans en moyenne (Scheuer & Black, 2000).

## **(1) L'évaluation du sexe des individus**

En anthropologie médico-légale, l'évaluation du sexe est une donnée capitale puisqu'elle trie d'emblée 50 % de la population. De plus, les autres critères d'identification sont dépendant du sexe. Commettre une erreur sur l'évaluation du sexe est susceptible de conduire à une impasse judiciaire (Quatrehomme, 2015).

La combustion altère le squelette en le déformant et en le fragmentant. Ces modifications vont donc avoir un impact négatif sur la manière dont les os vont pouvoir être perçus et analysés. Il ne sera pas possible d'appliquer le panel technique habituel afin d'évaluer le sexe des individus. Les indicateurs les plus fiables de la diagnose sexuelle devront souvent être combinés. Plus le nombre de critères observés sera important et les résultats congruents, plus fiable sera l'estimation.

Nous avons relevé au sein de notre échantillon, trois grandes régions anatomiques fréquemment utilisées pour l'évaluation du sexe des individus adultes : l'os coxal, le crâne et les grands os longs. Nous allons détailler pour chacune d'entre elles, les fragments utilisés plus précisément et les raisons pour lesquelles ces fragments ont été analysés.

### **➤ L'os coxal**

L'os coxal est souvent considéré comme le « gold standard » de l'évaluation du sexe. Il est réputé être la pièce la plus discriminante du squelette (Bruzek, 1996, 2002; Bruzek & Murail, 2006; Kurihara et al., 1996; Masset, 1987; Murail et al., 2005; Phenice, 1969). Pour Masset (1987), il serait la seule partie du squelette réellement sexuée, car conditionnée par la grossesse et l'accouchement. Beauchier (2008) le qualifie de « pièce la plus précieuse » pour l'évaluation du sexe en contexte médico-légal.

Dans la littérature certains auteurs ne se réfèrent qu'à un seul caractère. Pour Washburn (1948), l'indice ischio-pubien peut à lui seul permettre de distinguer le sexe des squelettes avec plus de précision que tous les autres indices, mesures ou observations réunies. Hrdlička & Stewart (1952) écrivent à propos de la valeur de l'observation de la grande incisure ischiatique, qu'aucun autre déterminant sexuel squelettique ne le dépasse et qu'elle doit être systématiquement observée en premier dans les cas douteux. Pour Cave (1937) c'est le pubis qu'il considère comme le seul critère sexuel sûr.

Nous avons mis en évidence pour les os brûlés plusieurs régions anatomiques d'intérêt, qui ont été observées de façon privilégiée afin de conclure (ou non) sur l'évaluation du sexe à partir de critères morphologiques. Les critères morphométriques étant difficilement applicable en raison

des déformations induites par la chaleur. Nous allons exposer les caractéristiques anatomiques des régions d'intérêts mises en évidence dans notre étude selon les critères généraux de Phenice (1969) repris par Quatrehomme (2015) :

### **Le pubis, lame quadrilatère**

- La forme de la symphyse pubienne est différente selon le sexe, plus haute chez l'homme et plus basse chez la femme.
- La lame quadrilatère est rectangulaire et large chez la femme et plus étroite chez l'homme.
- L'arcade pubienne est étroite chez la femme, assez triangulaire alors qu'elle est arrondie chez l'homme.
- L'arc ventral est une ligne osseuse surélevée observée à la face antérieure du pubis. Elle s'étend de la crête pubienne vers le ramus pubien. Il est absent chez l'homme et en principe présent chez la femme. Toutefois il faut rester prudent, il peut exister chez l'homme une ligne sur la surface antérieure qui peut apporter de la confusion, cette ligne est souvent parallèle à la surface symphysaire alors que l'arc ventral féminin est habituellement non parallèle et plutôt bien défini.

### **L'angle sous pubien**

La branche descendante du pubis est plutôt rectiligne ou convexe vers le bas chez l'homme alors qu'elle sera plutôt concave chez la femme. La présence d'une concavité profonde sous la symphyse pubienne au niveau du ramus serait un caractère nettement féminin.

L'angle sous pubien est grand et ouvert chez la femme ( $\pm 110^\circ$ ) et plus petit et aigu chez l'homme ( $\pm 70^\circ$ ). L'aspect de cet angle est plutôt en U assez arrondi chez la femme et en V chez l'homme.

### **La grande incisure ischiatique**

La grande incisure ischiatique est beaucoup plus ouverte chez la femme (forme de U) et son bord supérieur est moins concave que chez l'homme (forme de V). Selon Walsh-Haney et al. (1999) l'angle de l'ouverture (tangente aux deux bords de la grande incisure ischiatique) fait moins de  $68^\circ$  chez l'homme et plus de  $68^\circ$  chez la femme. Si l'angle est inférieur à  $30^\circ$  il s'agit presque toujours d'un sujet masculin. Selon Novotný (1983) la forme de la grande incisure ischiatique étudiée isolément permettrait d'estimer correctement le sexe dans 70 % des cas.

### **La surface auriculaire**

La surface auriculaire est plus grande et plate chez l'homme alors qu'elle serait plus petite et surélevée chez la femme.

## **La région pré-auriculaire**

Chez la femme, il existe une dépression entre la grande incisure ischiatique et l'articulation sacro-iliaque appelé sillon ou sulcus pré-auriculaire. Il est généralement absent chez l'homme alors qu'il est bien marqué chez la femme. L'observation du sillon pré-auriculaire permettrait d'estimer correctement le sexe dans 80 % des cas (Novotný, 1983, 1986).

## **Le sillon ou sulcus post auriculaire**

Il est beaucoup plus fréquent chez la femme que chez l'homme et les bords de la surface auriculaire sont plus tranchant.

## **Le tubercule pyramidal (tubercule dit de Buisson ou de Bouisson)**

Il donne l'insertion du muscle piriforme. Il serait présent dans plus de 95% des cas chez les individus de sexe masculin. Il est en moyenne beaucoup plus net chez les hommes que chez les femmes. La présence d'un tubercule fortement marqué est très intéressante pour le diagnostic du sexe masculin.

## **L'arc composé**

Il est formé du bord latéral de la surface auriculaire d'une part et de la ligne arquée d'autre part. Lorsque l'on suit ces deux lignes chez la femme on obtient un arc double ou arc composé, chez l'homme on suit à peu près la même ligne.

Pour pouvoir analyser l'arc composé il est nécessaire que le fragment d'os ait conservé intact à la fois la région auriculaire et la grande incisure ischiatique.

Selon Novotny (1983,1986), pris isolément il permettrait d'estimer correctement le sexe dans 60% des cas

## **➤ Le bloc crânio-facial**

### **Les éléments morphologiques**

Les méthodes fondées sur les données morphologiques du bloc crânio-facial sont utilisées principalement en ce qui concerne les données de robustesse (Holck, 1986; Martin & Saller, 1957; Wells, 1960) De manière générale une robustesse forte est souvent attribuée au sexe masculin alors que la gracilité est attribuée au sexe féminin (Dastugue & Torre, 1966; Durić et al., 2005).

Les principaux paramètres observés au niveau du crâne sont les suivants :

- le processus mastoïde, plus volumineux et épais chez l'homme et plus petit et fin chez la femme ;

- La protubérance occipitale externe, fortement développée chez l'homme et faiblement développée chez la femme ;
- La glabellle et les reliefs supra orbitaux proéminents chez l'homme et plus petits et plats chez la femme ;
- Les bords supra-orbitaires, arrondis chez l'homme et tranchants chez la femme ;
- L'arcade zygomatique, épaisse et de section triangulaire chez l'homme alors qu'elle est fine avec une section de forme concave chez la femme.

### **Les éléments pathologiques : l'os frontal**

La présence d'une hyperostose frontale interne qui se manifeste par un épaissement à la surface interne de l'os frontal est une pathologie sous influence hormonale associée au sexe féminin (Hershkovitz et al., 1999; May et al., 2011b; Nikolić et al., 2010). Sa prévalence est élevée dans la population générale (13 à 37 %) qu'il s'agisse de population actuelle ou ancienne (Du Fayet de la Tour, 2020; Hershkovitz et al., 1999; Lazer, 1996, 2009; Mulhern et al., 2006) et il a été démontré qu'elle était d'un intérêt dans l'estimation du sexe chez les individus brûlés (Du Fayet de la Tour et al., 2023).

#### ➤ **Les os du squelette appendiculaire**

De même que pour les fragments crâniens, ce sont des critères morphologiques de robustesse qui sont recherchés au niveau des fragments des os des membres. De façon générale on peut observer l'os et sa structure. Il est possible d'analyser des critères de densité osseuse, l'épaisseur de l'os compact, le développement des zones d'insertions musculaires ou le diamètre des extrémités (trochlée humérale ou tête fémorale par exemple).

Le principal problème de ces critères est leur caractère subjectif, c'est la raison pour laquelle certains auteurs ont proposé l'utilisation de données métriques pour valider la robustesse ou la gracilité des sujets étudiés. Gejvall (1981) propose l'utilisation du diamètre des têtes humérales et fémorales ainsi que l'épaisseur de l'os compact.

İşcan & Miller-Shaivitz (1984), Schaefer (1958) et Thieme (1970) ont proposé l'utilisation de l'épaisseur corticale ou du diamètre des os longs. En contexte de crémation il faut rester prudent en raison des phénomènes de déformations et de rétractions que nous avons évoqués plus haut.

## **(2) L'évaluation de l'âge au décès des individus**

L'ontogénèse décrit le développement progressif d'un organisme depuis sa conception jusqu'à sa forme mature, voire jusqu'à sa mort. Il existe une évolution du corps qui s'étend de la vie embryonnaire au décès et qui peut être découpée en trois phases successives (Cutler, 1975) : la phase de croissance ou de développement, la période reproductive ou âge de la maturité et la sénescence ou le vieillissement du corps. Lors de l'analyse d'un assemblage osseux brûlé, l'état

de fragmentation et le niveau d'altération du squelette ne permettent pas immédiatement de pouvoir préjuger de l'âge ou même de la phase dans laquelle se trouvait l'individu au moment du décès. C'est l'examen attentif de certains fragments qui va permettre de s'orienter.

➤ **Fragments fréquemment observés lorsqu'on s'oriente vers un individu en phase de croissance**

- Éléments dentaires : observation du stade de formation dentaire, des racines et notamment des apex racinaires.
- Observation des zones synostoses des points d'ossifications primaires et secondaires. Les plus fréquemment observées étaient les épiphyses des os longs dont la clavicule, la fusion de la crête iliaque, de la tubérosité ischiatique et des listels vertébraux. Un schéma réalisé par Brothwell (1981) repris par Depierre (2013), offre une vision simplifiée de ces zones (Figure 150).
- Chez les sujets les plus jeunes, il existe la possibilité de tenter de réaliser des mesures de longueurs diaphysaires, si l'état de conservation (fragmentation, déformation) le permet.

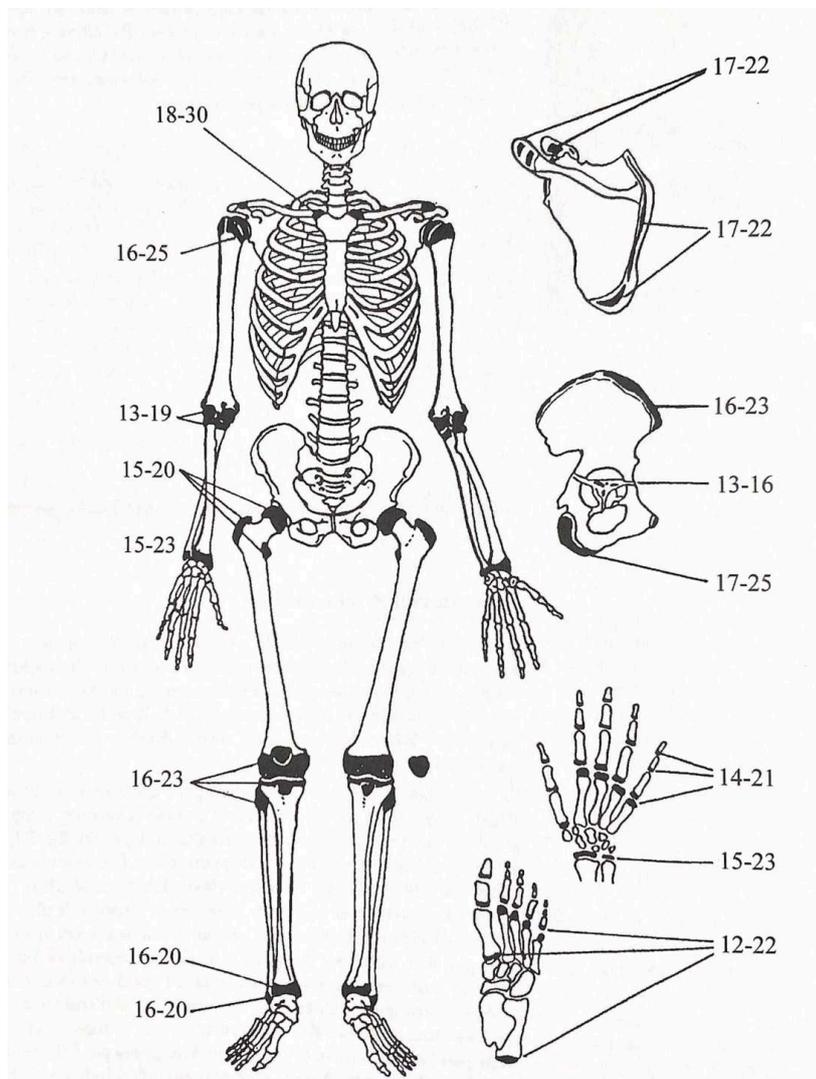


Figure 150 : schéma simplifié montrant les intervalles de synostoses en années des épiphyses et des points d'ossifications secondaires (Depierre 2013, p. 192, d'après Brothwell 1981).

## **Fragments fréquemment observés lorsqu'il est établi que la phase de croissance est dépassée**

- Les fragments de la voûte crânienne se conservent très bien malgré la combustion. Bien souvent, ce sont les seuls fragments suffisamment préservés (Duday et al. 2000). Bien que la méthode d'estimation de l'âge au décès par l'observation des segments suturaires soit déconseillée, elle peut servir d'orientation. Il convient toutefois de rester prudent en appliquant cette méthode sur l'os brûlé, en effet, les lignes de sutures représentent des zones de fragilité et il peut arriver que des déformations ou des fractures constituent une source d'erreurs d'interprétation (fausses images de sutures libres) (Depierre 2013).
- Les fragments d'os coxal :
  - La symphyse pubienne  
Elle est au cœur de plusieurs méthodes pour estimer l'âge au décès des individus. La méthode de Brooks & Suchey (1990), la plus couramment utilisée, qui a fait l'objet d'une réévaluation par Schmitt (2008) qui propose une cotation simple afin d'estimer l'âge au décès sous la forme d'un intervalle chronologique fiable. Les lésions dégénératives de la symphyse pubienne étant peu corrélées à l'âge, l'étude se base sur des processus de maturation afin de discriminer les adultes jeunes de ceux décédés après 40 ans.
  - La surface sacro-pelvienne iliaque  
La méthode proposée par Schmitt (2005) consiste à observer les modifications de la surface auriculaire : organisation transverse, modification de la surface, modification de son apex et modification de la tubérosité iliaque. Cette méthode, si elle est applicable pour des raisons de conservation présente l'avantage de pouvoir identifier les individus de plus de 60 ans.
  - La région acétabulaire  
Rougé-Maillart et al. (2004, 2007) ont montré que la fosse acétabulaire, la surface semi lunaire, le bord acétabulaire et l'apex de la surface semi lunaire pouvaient présenter des paramètres utilisables de façon satisfaisante afin de classer les individus adultes en différents groupes d'âges (3, 4 ou 5 groupes selon les critères).
- Les côtes  
Elles font partie des fragments les plus facilement identifiables et sont retrouvées en grandes quantités à l'issue d'un processus de combustion, mais sont la plupart du temps très fragmentées. De plus, les fragments sont souvent de tailles réduites, de sorte que la détermination anatomique précise de l'étage costal est quasiment impossible, de même que l'identification des surfaces articulaires.

L'extrémité sternale des côtes peut constituer un critère supplémentaire d'évaluation de l'âge, mais il a rarement pu être observé dans notre échantillon.

### **Fragments orientant vers des critères de sénescence**

- La présence de calcifications a été observée à plusieurs reprises sur des fragments de cartilages costaux ou de cartilages laryngés et a été associée à des signes de sénescence. Le larynx est composé d'un ensemble de cartilages qui peuvent commencer à s'ossifier dès l'adolescence. La calcification complète du cartilage thyroïde intervient autour de l'âge de 70 ans (Jauseau, 2018). De même, il a été montré que l'apparition de calcifications des cartilages costo-sternaux étaient liés à l'âge (King, 1939; Riebel, 1929; Rist et al., 1928; Thouvenin et al., 2009).
- Des éléments relatifs à une atteinte arthrosique, la présence d'entésopathies, d'ostéophytes ou de syndesmophytes sont principalement retrouvés sur les fragments suivants :
  - vertèbres ;
  - crête iliaque, tubérosité ischiatique ;
  - patella ;
  - tubérosité bicipitale du radius ;
  - olécrane de l'ulna ;
  - éléments des articulations suivantes : fémoro-patellaire, temporo-mandibulaire, acromio-claviculaire, pouce, cheville.
- L'os frontal : hyperostose frontale interne

Comme nous l'avons déjà évoqué précédemment l'hyperostose frontale interne peut être utilisée non seulement comme un critère d'évaluation du sexe mais également comme un indicateur d'un âge adulte supérieur à 50 ans (Belcastro et al., 2006; Cvetković et al., 2019; Devriendt et al., 2005; Du Fayet de la Tour, 2020; Du Fayet de la Tour et al., 2023; Hershkovitz et al., 1999; May et al., 2011b; Moore, 1955; Ortner, 2003; Western & Bekvalac, 2017).

### **(3) Évaluation des éléments pathologiques**

La recherche d'anomalies ou d'éléments pathologiques sur le squelette peut être d'une grande importance en médecine légale, en vue d'une identification comparative. En effet, le dossier médical d'une personne disparue peut être saisi par le magistrat ou les enquêteurs et transmis au médecin légiste. Il est alors possible d'établir des comparaisons à partir d'un bilan d'imagerie, de rechercher des pathologies affectant les os ou les dents ou identifier des traumatismes anciens concordants. La recherche de matériel d'ostéosynthèse est également une étape essentielle.

Les fragments les plus souvent impliqués dans un processus pathologique ou traumatique au sein de notre échantillon sont précisés en suivant.

## **Bloc crânio-facial**

- L'os frontal : écaille et région orbitaire ;
- les autres fragments de la voûte crânienne ;
- le condyle temporal ;
- le condyle mandibulaire ;
- les fragments dentaires.

## **Squelette infra-crânien**

- Les éléments du rachis en grande quantité ;
- les côtes ;
- la diaphyse humérale ;
- la tubérosité bicipitale et l'extrémité distale du radius ;
- l'olécrane et la diaphyse ulnaire ;
- l'os scaphoïde ;
- les métacarpiens ;
- l'os coxal : crête iliaque et acetabulum ;
- la diaphyse et l'extrémité distale du fémur ;
- la diaphyse tibiale ;
- la diaphyse et l'extrémité distale de la fibula ;
- la patella ;
- l'acromion et la cavité glénoïdale de la scapula ;
- le calcanéus, le naviculaire et les os cunéiformes ;
- le premier métatarsien.

### *c) Les fragments impliqués dans les liaisons ou des exclusions anatomiques*

---

Enfin nous avons recherché quels étaient les fragments d'intérêt dans la recherche des liaisons et des exclusions anatomiques. On peut considérer qu'une partie des fragments impliqués dans les exclusions a déjà été abordée précédemment puisqu'il s'agissait des éléments les plus latéralisables extrêmement informatifs pour le dénombrement des individus.

Si on tient compte de l'ensemble des exclusions (incompatibilités + doublets), les fragments d'intérêt sont les suivants :

## **Bloc crânio-facial**

- La région pétreuse, la région du conduit auditif externe et le condyle de l'os temporal ;
- le condyle et le processus coronoïde mandibulaire, la région symphysaire et le corps de la mandibule ;

- le processus zygomatique de l'os frontal, la crête frontale médiane, l'écaille frontale et la région orbitaire de l'os frontal ;
- la région basilaire et la protubérance occipitale interne de l'os occipital ;
- l'os maxillaire.

### **Squelette infra crânien**

- L'atlas et l'axis ;
- les autres vertèbres cervicales et les vertèbres thoraciques ;
- l'extrémité médiale de la clavicule ;
- l'épine scapulaire ;
- l'extrémité distale de l'humérus ;
- l'ischium ;
- les extrémités proximales du fémur et du radius ;
- les diaphyses du fémur et du tibia ;
- l'extrémité distale de la fibula ;
- les métatarsiens ;
- le talus et le calcaneus.

S'agissant des liaisons anatomiques, les fragments d'intérêt sont les suivants

### **Bloc crânio-facial**

- L'os temporal : région pétreuse, processus zygomatique, processus mastoïde et styloïde ;
- la mandibule : corps, condyle et processus coronoïde ;
- l'os maxillaire dont le processus frontal en particulier ;
- l'os frontal : l'écaille, le processus zygomatique, la glabella et la crête frontale médiane ;
- l'écaille occipitale.

### **Squelette infra-crânien**

- La diaphyse tibiale et l'extrémité proximale ;
- les phalanges des mains ;
- les vertèbres thoraciques et cervicales ;
- les métatarsiens et les métacarpiens ;
- la diaphyse fémorale et l'extrémité proximale du fémur ;
- l'extrémité distale et la diaphyse de l'humérus ;
- la diaphyse et l'extrémité distale de la fibula ;
- l'atlas et l'axis ;
- les extrémités de l'ulna ;
- le calcaneus ;
- la patella ;
- le processus coracoïde de la scapula.

## 5. Tableau résumé des fragments d'intérêts

---

Les fragments cités dans ce chapitre présentent à la fois la particularité d'être identifiables, bien représentés et très informatifs. Ils fournissent des indications pour le dénombrement des individus, l'évaluation des critères d'identifications biologiques ou l'analyse spatiale de l'assemblage osseux.

Les caractéristiques anatomiques clés pour la détermination de chacun de ces fragments ne sera pas reprise ici. Elles sont remarquablement bien détaillées dans le mémoire universitaire puis l'ouvrage de Depierre « Crémation et archéologie » (Depierre, 1995, 2013).

En revanche nous proposons un tableau récapitulatif de l'ensemble des fragments d'intérêts à rechercher, pour chaque étape de l'étude d'un assemblage d'os brûlés, classés par ordre d'importance.

Ce tableau pour plus de lisibilité est présenté en deux parties ci-dessous. La première partie concerne l'extrémité céphalique (tableau 33), la seconde concerne le squelette infra-crânien (tableau 34).

		Dénombrement	Identification biologique			Liaisons	Exclusions	
			Sexe	Âge	Robustesse, pathologie et traumatismes			
<b>Bloc crânio-facial</b>	<b>Voûte indéterminée</b>				- fragments de voûte			
	<b>Os temporal</b>	- région pétreuse - région du conduit auditif externe - processus mastoïde - condyles temporaux - processus zygomatique et région rétro-mastoïdienne - écaïlle temporale - fosse mandibulaire	- processus mastoïde			- fragments de voûte	- région pétreuse - processus zygomatique - processus mastoïde - processus styloïde	- région pétreuse - région du conduit auditif externe
	<b>Os frontal</b>	- processus zygomatique - toit et bord supérieur des orbites - glabelle	- glabelle - toit des orbites - bords supra-orbitaires - écaïlle frontale	- écaïlle frontale		- fragments de voûte	- crête frontale médiane - processus zygomatique - écaïlle frontale - glabelle	- écaïlle - processus zygomatique - région orbitaire - crête frontale médiane
	<b>Os pariétal</b>					- fragments de voûte		
	<b>Os zygomatique</b>	- os zygomatique globalement - arcade zygomatique	- arcade zygomatique					
	<b>Os sphénoïde</b>	- grandes ailes						
	<b>Os ethmoïde</b>	- processus crista galli						
	<b>Os occipital</b>	- région basilaire - pars lateralis	- Protubérance occipitale externe			- fragments de voûte	- écaïlle	- région basilaire - protubérance occipitale interne
	<b>Os vomer</b>	- os vomer						
	<b>Maxillaire</b>	- os maxillaire de façon globale - processus frontaux - bord inférieur des orbites					- processus frontal	- os maxillaire de façon globale
	<b>Mandibule</b>	- branche mandibulaire : - processus coronoïde et condyle - symphyse					- branche : condyle et processus coronoïde - corps	- corps - condyle - processus coronoïde - région symphysaire
	<b>Osselet de l'oreille moyenne</b>	- Incus et malleus						
	<b>Dents</b>			- couronnes - apex racinaires				

Tableau 33 : tableau récapitulatif des fragments osseux d'intérêt pour l'extrémité céphalique : en gras les fragments les plus pertinents, retrouvés pour tous les sites de notre échantillon ; en noir ceux retrouvés pour au moins deux sites ; en gris ceux retrouvés sur un seul site ; en bleu les fragments les plus pertinents chez les immatures et en rose chez les périnataux.

	Dénombrement	Identification biologique			Liaisons	Exclusions	
		Sexe	Âge	Robustesse, pathologie et traumatismes			
Squelette infra-crânien	Os hyoïde	- corps					
	Cartilages laryngés		Cartilages laryngés				
	Rachis	- axis : processus odontoïde et corps de l'axis - atlas : global + surface pour la dent de l'axis - coccyx		- ensemble de rachis	- ensemble de rachis	- atlas et axis - vertèbres cervicales - vertèbres thoraciques	- atlas et axis - vertèbres cervicales - vertèbres thoraciques
	Côtes		- extrémité sternale - cartilage costo-sternaux	- ensemble des côtes			
	Scapula	- épine - cavité glénoïdale - scapula globale			- acromion - cavité glénoïdale	- processus coracoïde	- épine
	Clavicule	- extrémités médiale et latérale - diaphyse		- extrémité sternale			- extrémité sternale
	Humérus	- extrémité distale et proximale - extrémité distale de la diaphyse	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- extrémités - diaphyse	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- diaphyse - extrémité distale	- extrémité distale
	Radius	- extrémité proximale	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- extrémités - diaphyse	- diaphyse, tubérosité bicipitale - extrémité proximale - extrémité distale		- extrémité proximale
	Ulna	- extrémité proximale - diaphyses	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- extrémités - diaphyse	- diaphyse - extrémité proximale, olécrane - extrémité distale	- extrémité proximale - extrémité distale	
	Carpe	- tous les os sauf trapézoïde et triquetrum			- os scaphoïde		
	Métacarpe	- MTC 3			- métacarpiens	- métacarpiens	
	Phalanges des mains					- phalanges des mains	
	Os coxal	- ischium	- pubis / lame quadrilatère - branche ischio pubienne - grande incisure ischiatique - surface auriculaire - région pré-auriculaire - sulcus post auriculaire - tubercule pyramidal - ligne arquée pour recherche de l'arc composé	- crête iliaque - symphyse pubienne - surface sacro-pelvienne iliaque - région acétabulaire	- crête iliaque - acétabulum		- ischium
	Fémur	- extrémités distale et proximale - épiphyse proximale - extrémité proximale de la diaphyse	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- extrémités - diaphyse	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- extrémité proximale - diaphyse	- extrémité proximale - diaphyse
	Patella	- patella			- patella	- patella	
	Tibia	- extrémité proximale	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- extrémités - diaphyse	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- diaphyse - extrémité proximale	- diaphyse
	Fibula	- extrémités distale et proximale	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- extrémités - diaphyse	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- diaphyse - extrémité distale	- extrémité distale
	Tarse	- calcanéus - cuboïde - os cunéiformes			- calcanéus - naviculaire - os cunéiforme	- calcanéus	- talus - calcanéus
	Métatarse	- MTT 1			- MTT1	- métatarsiens	- métatarsiens

Tableau 34 : tableau récapitulatif des fragments osseux d'intérêt pour l'extrémité céphalique : en gras les fragments les plus pertinents, retrouvés pour tous les sites de notre échantillon ; en noir ceux retrouvés pour au moins deux sites ; en gris ceux retrouvés sur un seul site ; en bleu les fragments les plus pertinents chez les immatures et en rose chez les périnataux.

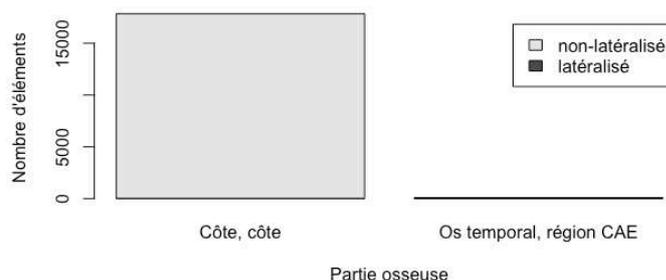
La première observation que nous pouvons faire est que ce tableau contiennent des régions anatomiques très diverses qui couvrent quasiment tout le squelette. Hormis quelques exceptions, on retrouve des éléments du crâne et de la face, de la mandibule, du thorax et du rachis ainsi que des membres supérieurs et inférieurs, extrémités comprises.

Il n'a pas été mis en évidence de « sélection » particulière pour l'analyse des fragments les plus volumineux, ou de ceux qui apparaissent plus « nobles » tels que les fragments de crâne ou les os longs.

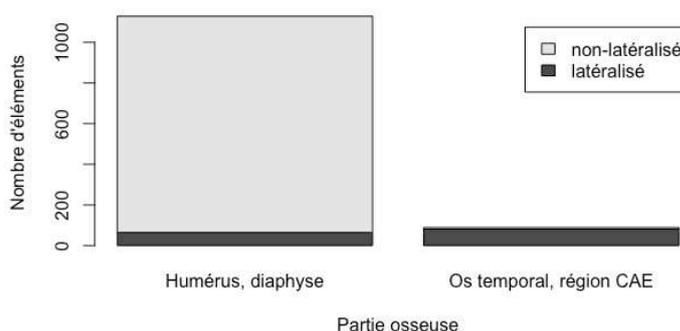
Les difficultés engendrées par les stigmates de la combustion conduisent à la nécessité de réaliser une analyse la plus complète possible de l'ensemble des fragments osseux prélevés. Chacun d'eux est susceptible d'être porteur d'une information, sans aucune distinction de taille. Par exemple, nous avons pu mettre en évidence que certains fragments de très petites tailles, tels que les osselets de l'oreille interne, le conduit auditif externe de l'os temporal ou le processus odontoïde de l'axis pouvaient s'avérer très contributifs à la fois dans le dénombrement ou la recherche de liaisons anatomiques. Par ailleurs, de grands fragments de diaphyses ou de voûtes crâniennes, souvent, n'apportent que peu d'informations. Nous avons pu objectiver ces observations en comparant les proportions de latéralisation entre différentes catégories de fragments. Il existe une différence significative entre les informations portées par les fragments de diaphyses d'os long et de petits fragments tel que la région du conduit auditif externe de l'os temporal. Quelques exemples sont présentés figure 151.

Un prélèvement exhaustif des fragments osseux, même ceux de petites tailles et une détermination la plus soignée et approfondie possible, constituent véritablement les fondations d'une analyse fiable de l'assemblage osseux, dans un contexte de carbonisation. Toutefois, ce travail d'identification précise des fragments est long, fastidieux et présente un certain nombre de limites ou de biais.

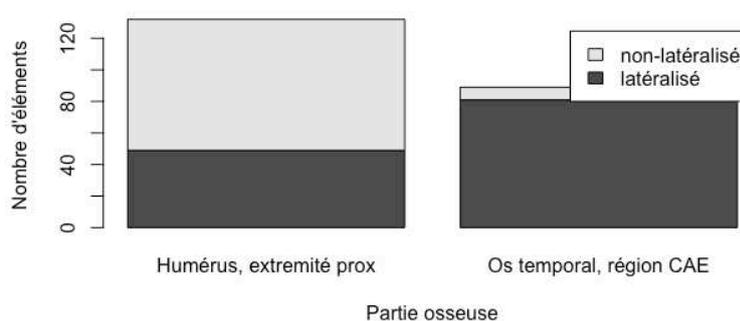
Comparaison de proportions de latéralisation (Pompéi).  $p < 0.0001$ .



Comparaison de proportions de latéralisation (Pompéi).  $p < 0.0001$ .



Comparaison de proportions de latéralisation (Pompéi).  $p < 0.0001$ .



Comparaison de proportions de latéralisation (Pompéi).  $p = 0.3436$ .

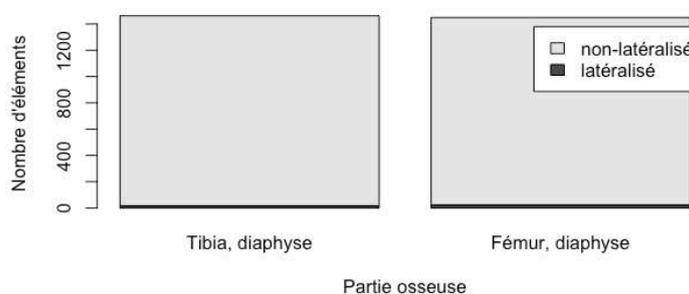


Figure 151 : exemple de comparaison des proportions de latéralisation entre divers types de fragments à Pompéi. On observe une différence significative entre les fragments les plus nombreux et identifiables tels que les côtes ou les fragments de diaphyses d'os longs des membres et certains petits fragments particulièrement bien latéralisables tels que les fragments du conduit auditif externe de l'os temporal par exemple. La région du conduit auditif externe montre également un pouvoir de latéralisation significativement plus élevé que certaines extrémités d'os longs. Il n'y a pas de différence significative entre proportions de latéralisation des diaphyses des différents os longs. Ces exemples concernent Pompéi, la même tendance est retrouvée pour les autres sites.

## 6. Biais possibles et facteurs limitants

---

### a) *Existence de disparité au sein des résultats*

---

À propos de la détermination anatomique, nous avons observé une grande homogénéité de nos résultats entre les différents sites étudiés, concernant les fragments les plus nombreux, les plus fréquemment identifiés ou les plus latéralisables.

Le taux global de détermination pour chacun des sites, incluant tous les assemblages osseux est supérieur à 70 % ce qui est déjà considérable. Nous avons toutefois pu observer de légères différences entre les échantillons.

Le meilleur taux de détermination est observé à Cumes : il est de 86,6 %. À Porta Nocera, le taux de détermination global est de 76,4%, à Carthage il est de 75,1 % et à Santa Rosa au Vatican de 70,9 %.

Considérant uniquement les sujets immatures, les taux de détermination sont toujours excellents avec de légères disparités : à Cumes 85,6 %, à Pompéi 80,3 %, au Vatican 77,2 % et à Carthage 75,1 %.

Globalement les taux de détermination semblent toujours meilleurs à Cumes et légèrement plus faibles au Vatican. Nous avons envisagé plusieurs explications à ce phénomène.

### b) *Un biais lié à la qualité du matériel analysé : la fragmentation*

---

Comme nous l'avons déjà évoqué à plusieurs reprises, la détermination anatomique des fragments est conditionnée par l'état du matériel analysé et particulièrement à son état de fragmentation. Les altérations induites par la chaleur influent sur notre capacité à identifier les fragments et elles ne sont pas les seules. Il ne faut pas négliger les phénomènes de fragmentation secondaire. On peut citer par exemple le refroidissement brutal des os à la suite d'un incendie pris en charge par les pompiers, l'effondrement d'une structure dans un bâtiment incendié, l'effet blast dans une explosion ou simplement la re-fragmentation induite par la mobilisation des fragments lors du prélèvement ou du transport des restes osseux.

#### **(1) Rappel concernant le calcul du taux de détermination**

Le taux global de détermination est calculé à partir de la masse des fragments et non pas de leur effectif (rapport entre la masse des fragments « déterminés » et la masse totale des fragments). Un rapide calcul pour le site de Pompéi nous permet de constater l'existence d'une grande différence entre les deux : taux global de détermination calculé à partir de la masse des fragments 76,4 % ; calculé à partir du nombre de fragments 51,6 % !

En effet, cette différence vient du fait que le calcul à partir de la masse permet de s'affranchir d'une partie des effets de la fragmentation. Les fragments indéterminés : os plats, os courts et diaphyses indéterminées, à quelques exceptions près sont souvent des fragments de très petites tailles (infracentimétriques). Ils représentent donc un nombre important de fragments, mais ils sont souvent négligeables en termes de masse. Par exemple, des microfragments de corticales diaphysaires sont facilement classables dans la catégorie « diaphyses indéterminées » sans pouvoir être associés à un os long en particulier, ni même à une localisation générale de type « membre supérieur » ou « membre inférieur ». Le même problème existe pour les petits fragments d'os spongieux isolés, dont la structure n'est pas discriminante et qui seront classés dans les « os courts » sans plus de précision. Ces petits fragments sont souvent très légers, de telle sorte que même s'ils sont nombreux, leur présence n'affecte quasiment pas le taux global de détermination.

## (2) Évaluation du biais lié à la fragmentation

L'existence de différences entre les sites pourrait être imputable à une fragmentation plus importante sur le site du Vatican qu'à Pompéi ou Cumes par exemple. Pour objectiver cette affirmation il est nécessaire de montrer l'existence d'une corrélation entre fragmentation et taux de détermination.

Le critère d'évaluation de la fragmentation le plus approprié est le poids moyen des fragments sauf esquilles. À Pompéi, pour la totalité des assemblages évalués, il est de 0,88 g, vs. 2,39 g à Cumes et 0,69 g au Vatican.

Le calcul du coefficient de corrélation de Pearson donne un résultat positif de 0,97 (arrondi à 2 décimales), montrant une forte corrélation entre la fragmentation et le taux de détermination (tableau 35). Ce résultat était logiquement attendu.

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
<b>Taux de détermination</b>	3	0	3	70,9	86,6	77,967	7,966
<b>Poids moyen</b>	3	0	3	0,69	2,39	1,32	0,932

Matrice de corrélation (Pearson) :

Variables	Taux de détermination	Poids moyen
Taux de détermination	<b>1</b>	0,969
Poids moyen	0,969	<b>1</b>

*Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0.05*

Tableau 35 : résultats du test de corrélation entre la fragmentation et le taux de détermination anatomique.

D'autres facteurs ont pu influencer ces résultats. En effet, après exclusion des fragments indéterminés on observe globalement de meilleurs taux de latéralisation à Cumes qu'à Pompéi et des taux un peu plus faibles au Vatican.

### **(1) Les biais liés à l'observateur : connaissances et expériences**

Pour le site de Porta Mediana à Cumes, les données utilisées dans le cadre de cette étude proviennent des notes rédigées personnellement par Henri Duday. Il n'a pas été mis en évidence de participation ou de collaboration particulière d'un autre chercheur ou d'étudiants.

À Porta Nocera à Pompéi, les notes étaient majoritairement celles d'Henri Duday mais à plusieurs reprises nous avons travaillé sur des dossiers pour lesquels l'analyse avait pu être réalisée soit par des collaborateurs, soit par des étudiants dans le cadre de stages d'apprentissage à l'étude des os brûlés. Pour chacun de ces cas, un travail de relecture et de correction était réalisé par Henri Duday. Dans deux cas, l'étude avait dû être totalement reprise. Pour le site de Santa Rosa au Vatican, une grande partie de la documentation sur laquelle nous avons travaillé était rédigée en italien, il semble donc évident qu'elle impliquait la collaboration d'autres chercheurs. Il nous a été précisé par Henri Duday que même dans le cas de collaboration, les identifications étaient réalisées selon le même procédé qu'à Pompéi, avec une phase de relecture des déterminations. Cependant, les notes étaient souvent moins précises et détaillées que celles de Cumes. En effet, pour le Vatican, les déterminations anatomiques étaient un peu plus généralistes que pour Cumes, pour laquelle, les régions anatomiques identifiantes étaient détaillées pour quasiment chacun des fragments déterminés.

Ces constatations nous ont conduit à réfléchir sur l'existence d'un biais lié à l'observateur.

De solides connaissances en ostéologie sont un prérequis indispensable pour débiter une telle analyse. Les altérations induites par le feu vont compliquer l'exercice de détermination. Les références visuelles habituelles pour la détermination de fragments d'os non brûlés ne pourront pas être utilisées : la combustion entraîne souvent des conformations très inhabituelles qui devront être reconnues. Par ailleurs, le facteur « déformation » devra être intégré dans la démarche intellectuelle qui conduira à la détermination. Les aspects structurels, internes, de l'os, qui occupent une place importante dans le processus d'identification devront aussi être pris en compte.

Parfois, les connaissances en anatomie et en ostéologie ne seront pas suffisantes. L'emploi de collections de références afin de vérifier ses hypothèses de détermination, peut fournir une aide considérable.

Il convient également de parfaitement maîtriser les signes du développement et de la croissance osseuse, en raison de la possibilité de devoir analyser un assemblage comportant plusieurs individus, d'âges variés.

L'expérience est le second facteur « observateur-dépendant » qui peut jouer un rôle clé dans la qualité de la détermination. Bien qu'une parfaite connaissance de l'ostéologie soit indispensable, elle n'est pas suffisante. L'expérience de l'observateur lui permet de mettre en place des automatismes dans la reconnaissance de certaines régions anatomiques. Au cours du temps, elles seront reconnues avec de plus en plus de facilité.

Dans le cadre de ce travail, nous avons eu la chance de participer à plusieurs stages dédiés à l'apprentissage de l'identification des os brûlés. Nous avons pu remarquer que lors des exercices de détermination, certaines régions anatomiques pouvaient parfois être totalement occultées. De plus, nous avons pu noter qu'il s'agissait d'un biais complètement observateur-dépendant. Pour certains il s'agit d'une région du crâne, à laquelle ils ne pensent pas, pour d'autres cela pourrait être le sacrum, ou le sternum... Ce « blocage cognitif » est susceptible d'entraîner des erreurs systématiques dans la représentation de l'échantillon. Un contrôle strict de la détermination est nécessaire pendant la phase d'apprentissage.

De plus nous avons constaté au cours de ce travail et des différentes sessions sur le terrain l'importance au départ de travailler avec un référent, à qui pouvoir soumettre les fragments qui posent des difficultés. De même, il est stimulant lors de « blocages » sur la détermination d'un fragment difficile de pouvoir échanger avec un collègue et souvent conduire à envisager de nouvelles hypothèses. Il est essentiel de ne pas s'enfermer dans la difficulté et parfois, les seuls livres d'ostéologie ne suffisent pas. Un regard nouveau permet la plupart du temps de lever des obstacles et gagner du temps.

## **(2) Le temps : un facteur limitant possible**

Une autre hypothèse concernant les moindres précisions des données du Vatican est la contrainte de temps.

Un temps moindre imparti à l'étude peut avoir pour conséquence une prise de note moins détaillée.

La contrainte de temps est un élément majeur à prendre en considération dans un cadre médico-légal. L'identification de la victime est un préalable indispensable à toutes enquêtes judiciaires. Dans le cas de la découverte de restes osseux brûlés et fragmentés, sans identité présumée, une identification reconstructive doit être tentée mais il faudra pouvoir travailler dans un laps de temps assez court. Par ailleurs, même s'il existe une identité présumée, l'analyse comparative doit pouvoir être réalisée dans les plus brefs délais afin de restituer au plus vites les restes de la victime à sa famille.

Les études anthropologiques sur lesquelles se basent nos résultats sont intégrées dans plusieurs programmes archéologiques ayant comme objectif un développement méthodologique. Elles comportent une fouille fine et une étude la plus exhaustive possible. Par exemple, l'étude du site de Porta Nocera à Pompéi a déjà fait l'objet de deux programmes. Le premier 2003-2007 a

donné lieu à une publication en deux volumes (Van Andringa et al., 2013), le second programme est toujours en cours à l'heure actuelle.

Dans un contexte judiciaire, il est nécessaire de trouver un juste équilibre entre l'exhaustivité de l'analyse et les contraintes de temps imposées. Il faudra savoir prendre du temps pour une détermination la plus complète possible mais également savoir s'arrêter afin de ne pas perdre plusieurs heures précieuses en cherchant à identifier un fragment millimétrique porteur d'une caractéristique anatomique « que l'on pense pouvoir reconnaître ».

### **(3) L'auto-évaluation un *feed-back* nécessaire pour une évolution de la méthode**

Le dernier facteur qui a pu influencer le taux de détermination est une auto-évaluation dans la méthodologie employée et une évolution de cette dernière en rapport avec le retour d'expérience. En effet, au fur et à mesure de l'étude de chaque assemblage osseux, les objectifs ont évolué et la méthode a été ajustée.

Les notes concernant les premières tombes de Porta Nocera étaient assez lacunaires et ne comprenaient que très peu d'informations relatives à la description des fragments osseux.

C'est avec l'objectif de réaliser une analyse spatiale avec un important travail sur les liaisons ostéologiques qui a engendré la nécessité de consigner par écrit un maximum d'informations sur les fragments osseux afin d'être en mesure de pouvoir retrouver les fragments d'intérêts à posteriori.

La détermination anatomique des fragments osseux brûlés est un exercice complexe qui nécessite à la fois du temps, de la concentration, de la méthode et de solides connaissances en ostéologie. Cette étape est cruciale puisqu'en découlera l'ensemble de l'analyse.

Tous les fragments n'ont pas la même valeur et même s'il est établi que la fragmentation influe sur le taux de détermination, à l'échelle de la pièce osseuse, la valeur du fragment provient plus de ses caractéristiques anatomiques et structurelles que de sa taille.

## B. Les indicateurs biologiques appliqués à l'os brûlé

---

Lors de l'analyse d'un assemblage osseux brûlés plusieurs étapes sont nécessaires. Après avoir examiné l'ensemble des fragments, mis de côté ceux dont l'origine humaine était douteuse et effectué un premier dénombrement des individus, l'objectif sera leur identification biologique. La restitution de l'identité est une étape cruciale. Elle permet aux proches de débiter un travail de deuil et apporte souvent un apaisement. Certaines familles ont besoin selon leur croyance ou leur religion, de récupérer le corps du défunt et lui établir une sépulture.

Sur un plan strictement juridique, l'identification exacte est indispensable pour la rédaction du certificat de décès. En son absence, sauf cas exceptionnels (art 88 et art 112 du code civil)<sup>21</sup>, il n'y aura pas d'ouverture de droits civils (Henry et al., 2022).

Enfin, dans un contexte judiciaire, l'identification est le point de départ des investigations futures. Elle fournit aux enquêteurs un début de piste, qui permettra de retracer la série d'évènements ayant conduit à la mort puis à la découverte du cadavre (Georget et al., 2001).

### 1. Dans l'idéal, une identification exacte de l'individu

---

L'identification biologique d'un individu consiste à lui attribuer une identité à l'aide de ses caractéristiques physiques propres, visibles ou invisibles (Jalby, 2017).

La procédure la plus couramment utilisée n'est pas scientifique : il s'agit de l'identification visuelle, par confrontation. Elle est effectuée par la famille ou les proches et reste soumise au respect de l'intégrité corporelle du cadavre. Dans de nombreux cas (accidents, catastrophes de masse, noyade, putréfaction), elle est impossible et d'autres méthodes doivent alors être utilisées. L'identification des individus carbonisés entre dans ce cadre.

---

<sup>21</sup> Article 88 du code civil « Peut être judiciairement déclaré, à la requête du procureur de la République ou des parties intéressées, le décès de tout français disparu en France ou hors de France, dans des circonstances de nature à mettre sa vie en danger, lorsque son corps n'a pu être retrouvé. » ; Article 112 du code civil « Lorsqu'une personne a cessé de paraître au lieu de son domicile ou de sa résidence sans que l'on en ait eu de nouvelles, le juge des tutelles peut, à la demande des parties intéressées ou du ministère public, constater qu'il y a présomption d'absence. »

## a) *Les principales méthodes d'identification exacte*

---

Depuis les méthodes anthropométriques de Bertillon au XIX<sup>ème</sup> siècle (Bertillon, 1881), les moyens d'obtenir l'identification précise d'un individu ont fortement évolué. La dactyloscopie largement employée de nos jours, présente l'avantage d'être facile à enregistrer et à conserver. Elle offre un degré d'unicité accepté par les tribunaux depuis plus d'un siècle. Cependant, c'est l'analyse directe de l'ADN qui est désormais considérée comme le « gold standard » de l'identification médico-légale. D'autres méthodes existent telles que l'odontologie ou l'imagerie comparative. Elles permettent de comparer des données morphométriques ou pathologiques au dossier médical ou dentaire lorsque l'identité de l'individu est présumée.

Toutes ces méthodes offrent l'avantage de fournir l'identité exacte de l'individu recherché. Elles n'impliquent aucune analyse supplémentaire. Malheureusement, elles présentent au moins deux inconvénients majeurs : la nécessité d'un élément de comparaison et la conservation de certains tissus intacts. Ces deux éléments peuvent rapidement devenir limitants dans l'analyse d'un corps carbonisé.

L'identification par dactyloscopie implique que l'individu soit répertorié dans un fichier de référence. Il existe des bases de données régionales, nationales ou internationales, qui peuvent regrouper deux types de classements d'empreintes digitales : décadactylaires (informations simultanées portant sur les 10 doigts) ou monodactylaire (informations séparées sur un seul doigt) (Interpol, 2020).

Actuellement, en France des relevés d'empreintes sont réalisés chez toutes les personnes gardées à vue (délinquants et criminels), les personnes portées disparues et certains patients souffrants d'atteintes neurologiques de type amnésie.

Indifféremment, les deux méthodes, identifient une ou plusieurs fiches susceptibles de correspondre à l'individu recherché. L'identité est ensuite confirmée ou exclue après recherche d'un nombre minimal de correspondances. Dans certains pays, il n'existe pas de nombre requis mais la méthode tient compte de la valeur plus probante de certaines caractéristiques des empreintes en fonction de leurs raretés.

L'identification d'un cadavre inconnu fait le plus souvent appel au classement monodactylaire. En effet, les empreintes des dix doigts sont rarement disponibles du fait des altérations du corps. Cette méthode présente toutefois l'inconvénient d'être un peu moins rapide<sup>22</sup>.

Malgré toutes ces améliorations techniques, l'utilisation de la dactyloscopie est conditionnée par la conservation des tissus mous (au moins au niveau des doigts) et la présence des empreintes de l'individu à identifier dans les fichiers.

---

<sup>22</sup> Le délai d'obtention de résultats est de plusieurs heures à plusieurs jours pour la méthode monodactylaire alors qu'il n'est généralement que d'une dizaine de minutes pour la méthode décadactylaire.

L'identification génétique à l'inverse, offre l'avantage non négligeable de pouvoir à la fois être comparé à un fichier de type « base de données » (fichier FNAEG<sup>23</sup>) et/ou à un profil génétique connu, dans le cas où l'identité de la victime est présumée. Il peut s'agir d'un prélèvement effectué sur des objets ayant appartenu à la victime (brosse à dent, brosse à cheveux...) ou le matériel génétique d'un proche parent, ascendant ou descendant (Robson Brown & Roberts, 2007).

Les deux autres méthodes évoquées plus haut, relatives à l'imagerie et à l'odontologie sont également des méthodes fiables et objectives. Cependant, elles impliquent de connaître l'identité présumée de la victime et d'obtenir l'accès à son dossier médical ou dentaire. Leurs limites principales résident dans l'existence et la disponibilité des données ante mortem (Knell & Bussmann, 1999).

### *b) Impact de la combustion du corps sur l'identification exacte*

---

Le feu est un moyen très efficace pour détruire les spécimens biologiques sur lesquels reposent les méthodes traditionnelles d'identification.

Le comportement du corps exposé à une forte chaleur a été décrit par plusieurs auteurs (Depierre, 2013; Eckert et al., 1988; Glassman & Crow, 1996; Grevin, 2004, 2011; Mayne Correia, 1997; Quatrehomme et al., 2015; Symes et al., 2015; Thompson et al., 2017; Thompson, 2004, 2005). D'après Quatrehomme et al., (2015), selon Grevin (2011), le repliement des avant-bras (attitude pugilistique) intervient dans un intervalle de temps de 15 à 30 minutes. Il s'accompagne d'une flexion des doigts et d'une chute progressive des phalanges au niveau des articulations interphalangiennes (environ deux minutes après le repliement des avant bras).

Dans ce contexte, l'utilisation de la dactyloscopie à des fins d'identifications des individus en état de carbonisation avancée est d'emblée exclue.

Concernant l'identification génétique, certaines études ont montré qu'il était possible d'extraire l'ADN des restes brûlés, mais seulement jusqu'à des températures de 300°C à 600°C, avant que la composante organique ne soit totalement oxydée (Brown et al., 1995; Cattaneo et al., 1994; Duffy et al., 1991; Harbeck et al., 2011; McKinley, 2017; Mckinnon et al., 2021; Walker et al., 2008; Williams et al., 2004). Lorsque les os sont exposés à des températures plus élevées ou si le temps d'exposition est plus long, l'ADN est altéré (Nelson & Melton, 2007; Rees & Cox, 2010; Von Wurmb-Schwark et al., 2004).

Dans une étude réalisée en 1999, Cattaneo et al. ont testé la conservation de l'ADN mitochondrial dans des conditions de crémations (Cattaneo et al., 1999). Les os ont été brûlés à

---

<sup>23</sup> Le fichier FNAEG (fichier national automatisé d'empreintes génétiques) au départ ne concernait que les criminels sexuels condamnés. Aujourd'hui plus largement utilisé. Les empreintes génétiques sont conservées pendant 40 ans pour les personnes définitivement condamnées, les personnes décédées, les personnes disparues et les traces ; elles sont conservées 25 ans pour les personnes mises en cause, sauf dans le cas d'irresponsabilité pénale.

des températures de 800°C à 1200°C, afin de recréer des températures similaires aux incendies de voitures ou d'habitation. Il s'agissait d'os long d'adultes des deux sexes. La séquence d'ADN analysée était un fragment de 120 pb de la région V de l'ADN mitochondrial, choisi en raison de sa survie dans les os anciens. Les résultats ont montré qu'après crémation, l'ADN mitochondrial n'était plus du tout détectable. Nelson & Melton (2007), ont réalisé 116 extractions d'ADN mitochondrial à partir d'os et de dents soumis à des analyses de routine. Après amplification PCR et séquençage, un profil d'ADN mitochondrial avait été obtenu pour 83,6 % des cas (profil complet 59,5 % et profil partiel 24,1 %). L'extraction d'ADN sur les restes incinérés a échoué pour tous les individus.

Dans les cas de carbonisations sévères, qui sont précisément le sujet de notre étude, l'ADN est souvent altéré. Un prélèvement pourra tout à fait être tenté, mais il conviendra de le réaliser à distance des zones les plus atteintes par la chaleur, sur les parties osseuses les mieux préservées (absence de modification colorimétrique, de déformation ou de fracturation thermique).

Par ailleurs, en contexte actuel, il est important de prendre en compte de possibles infiltrations de produits chimiques de types : essence, plastique fondu, textile etc., qui peuvent s'infiltrer dans l'os lors de l'incinération, altérer ou contaminer les séquences d'ADN, en particulier lorsque la surface de l'os est poreuse, fragile et ce même pour des températures inférieures à 600°C.

La dactyloscopie et l'identification génétique sont donc fortement compromises par l'action des hautes températures. Des méthodes d'identifications alternatives peuvent cependant être envisagées. Pour les cas où l'identité est présumée, l'odontologie est souvent informative. Les dents sont considérées comme des éléments d'identifications majeurs et peu coûteux (Knell & Bussmann, 1999). Il existe différentes méthodes qui peuvent conduire à une identification positive à partir des dents : radiographies, photographies, études rugoscopiques, chéïloscopiques ou méthodes moléculaires (McFadden & Oxenham, 2018; Ubelaker & De La Paz, 2012). Malheureusement, la chaleur qui dégrade l'os, impacte aussi les dents. Les modifications thermiques sont d'ailleurs assez similaires entre les deux tissus.

De plus, les dents étant constituées de plusieurs tissus de différents teneurs en minéraux, elles ne se modifient pas uniformément. Plusieurs auteurs ont décrit précisément les effets de la chaleur sur les dents (Harsanyi, 1975; Sandholzer, 2015; Sandholzer et al., 2013, 2014; Shipman et al., 1984). Sur le plan anatomique, l'ensemble de la denture n'est pas affecté de la même manière : les dents antérieures ont tendance à tomber assez précocement et sont moins touchées que les dents postérieures. Cependant, si elles restent en place, l'émail des dents antérieures est plus affecté par l'exposition à la chaleur que celui des molaires en raison de la protection par les tissus mous oro-faciaux (Delattre, 2000; Sakoda et al., 2000).

Sur le plan structurel, il en ressort les éléments suivants.

- **Une modification des couleurs**

Dans les racines les couleurs varient du jaune pâle au blanc-rosé en passant par le brun, le noir, le gris-bleu, le gris clair et le blanc crayeux (Beach et al., 2008; Fairgrieve, 2008b; Sandholzer, 2015; Schmidt, 2015) La partie de la racine présente à l'intérieur de l'alvéole

pendant l'exposition à la chaleur est la mieux protégée et sa couleur sera souvent différente de celle de la partie exposée de la racine (Schmidt, 2015).

- **L'apparition de phénomènes de rétraction.** Selon Shipman et al. (1984) et (Buikstra & Swegle, 1989), il y aurait une perte de volume, de l'ordre de 10 à 15 %. La dentine présenterait les rétrécissements les plus importants en raison de sa plus grande teneur en matière organique.
- **Une fracturation.** L'émail se craquelle dès 150°C et se fracture autour de 500°C. Au niveau de la dentine, des fissures apparaissent vers 600°C et se désintègre à partir de 800°C (Quatrehomme et al., 2015). La fracturation des couronnes intervient majoritairement le long du bord des cuspidés, là où elles sont le plus fines (Schmidt, 2015). Parfois, l'émail se détache complètement en raison de la rétraction de la dentine sous-jacente. Sandholzer et al. (2013) et (Sandholzer, 2015) ont constaté que le rétrécissement dentinaire moyen dans les racines était compris entre 4,78% (à 400°C) et 32,53% (à 1000°C), avec une forte augmentation entre 700°C et 800°C (11,5-24,2%). Pour certains auteurs, au-delà de 800°C, il existerait une fusion des cristaux empêchant la poursuite du rétrécissement et de fractures liées à la chaleur (Shipman et al., 1984 ; et Buikstra & Swegle, 1989).

L'action du feu sur les matériaux de restauration a également été étudié (Dumaure & Paul, 2015; Nossintchouk et al., 1993)

- Restauration métallique : l'amalgame est le moins résistant. Plus il contient du mercure, plus il est fragile. Il prend l'aspect d'un dépôt poussiéreux au-delà de 200°C. Par ordre croissant de résistance suivent l'or (température de fusion : entre 870°C et 1095°C), le platine, les alliages nickel-chrome, les alliages chrome-cobalt (prothèses amovibles à châssis métallique : température de fusion vers 1300°C) avec une température de fusion semblable à celle des céramiques de haute fusion.
- Restauration en résines composites : elles sont plus résistantes que les résines polyméthylméthacrylates. Elles se désagrègent vers 500°C lorsque la trame de résine est détruite. Elles prennent à cette température l'aspect de cire.
- Restaurations en céramique : elles sont les plus résistantes. Il y a une variation de 650°C - 870°C (couronne céramo-métallique) à 1380°C (prothèse adjointe). La porcelaine a une température de fusion comprise entre 870°C et 1095°C.

Enfin, une analyse du comportement de la dentition déciduale a été réalisée par Karkhanis et al. (2009). Un total de 90 dents de lait, extraites dans le cadre d'un traitement clinique de routine, ont été exposées à des températures s'échelonnant de 100°C à 1100°C pendant 30 minutes. Après l'incinération, les dents ont été analysées à la loupe binoculaire et au microscope électronique à balayage afin d'évaluer les changements morphologiques. Une évaluation colorimétrique a également été effectuée afin d'évaluer les changements de couleurs dus au stress thermique. Les résultats sont résumés dans le tableau 36.

Température en °C	Couleurs	Observations microscopiques
100	- Couronne : jaune pâle à brun pâle. - Racine : brun jaunâtre.	- Couronnes : fracture des dents antérieures. - Fragilisation de la surface. - Fusion de la surface externe.
200	- Couronne : jaune pâle à gris. - Collet : marron foncé. - Racine : noir brillant.	- Formation de vésicules et de bulles à la surface des racines. - Dépôts argent à la surface des racines.
300	- Couronnes : gris clair. - Collet : gris foncé. - Racine : noir brillant.	- Formation de bulles à la surface des racines. - Formation globulaire en forme de bouton sur la surface pré-dentinaire.
400	- Email : marron très pâle. - Collet : marron très foncé. - Dentine : gris bleuté foncé. - Cément : gris brun, gris brun clair.	- Début de séparation émail-dentine. - Fissures profondes de la surface de la racine à travers la dentine.
500	- Email : brun très pâle. - Collet : gris foncé. - Dentine : gris-bleuté foncé. - Cément : brun gris, brun gris clair.	- Séparation couronne-racine. - Séparation complète de l'émail et de la dentine. - Perte d'émail. - Réduction du diamètre tubulaire, en particulier près de la jonction dentine-émail.
600	- Email : gris clair. - Collet : gris très foncé. - Dentine : gris bleuté foncé. - Cément : noir bleuté.	- Fragilité extrême. - Fissures profondes de la dentine et du ciment.
700	- Email : gris bleuté clair. - Dentine gris bleuté foncé. - Cément : noir bleuté clair.	- Réduction extrême du diamètre des tubules de la dentine.
800	- Email : gris bleuté. - Dentine gris bleuté très foncé. - Cément : gris bleuté très foncé.	- Aspect spéculaire de la surface pré-dentinaire.
900	- Email : blanc neutre. - Dentine gris bleuté clair. - Cément : gris bleuté clair. - Collet : gris bleuté très foncé.	- Structures fibrillaires de forme étoilée émergeant de la matrice dentinaire inter-tubulaire. - Cément non identifié, d'aspect granuleux.
1000	- Email : gris bleuté clair. - Dentine : gris bleuté clair. - Cément (externe) : noir bleuté. - Cément (sous la surface) : gris bleuté clair.	- Oblitération des tubules de la dentine - Structure prismatique de l'émail et morphologie tubulaire de la dentine.
1100	- Email/dentine/cément : bleu gris clair - Prédentine : gris verdâtre clair, décoloration de la couronne	- Email et dentine identifiables. - Aspect granuleux de la dentine inter-tubulaire. - Cément non identifiable avec apparence granulaire.

Tableau 36 : changements induits par la chaleur pour les dents déciduales, d'après Karkhanis et al. (2009).

Les dents déciduales et définitives, de la même manière que l'os subissent des transformations importantes qui impacteront également notre capacité à les utiliser de manière fiable pour une identification.

Au vu de l'ensemble de ces éléments, nous pouvons conclure que l'impact des hautes températures est extrêmement délétère pour une identification exacte. Qui plus est, l'identité présumée n'est pas toujours connue. Une méthode reconstructive devra alors être entreprise.

## 2. En pratique : l'identification reconstructive

---

Dans les cas de carbonisations avancées ou totales, il persiste toujours des fragments osseux ou dentaires ayant résisté à l'action de la chaleur. Que ce soit l'étude de crémations actuelles (Depierre, 2013), ethnologiques (Grevin, 2005) ou archéologiques telle que nous l'abordons ici, chacune montre la persistance de nombreux restes humains<sup>24</sup>. Leur analyse constitue une source d'informations précieuses. Même si les méthodes classiques d'identifications exactes, sont difficilement applicables, les techniques d'identifications reconstructives pourront être tentées.

Les recherches méthodologiques concernant le matériel osseux brûlé ont donné naissance à une multitude de travaux (Buikstra & Swegle, 1989; DeHaan et al., 1999; DeHaan & Nurbakhsh, 2001; Delattre, 2000; Duday et al., 2000; Dunlop, 1978; Eckert et al., 1988; Eckert & Perper, 1981; Fairgrieve, 2008b; Gejvall, 1969; Grévin et al., 1998; Mayne Correia, 1997; McKinley, 2000; Richards, 1977; Stewart, 1979; Thompson, 2004, 2005; Thurman & Willmore, 1982; Van Vark, 1974; Wells, 1960). Nous avons montré au cours du chapitre précédent, que certains fragments étaient plus pertinents que d'autres dans la détermination des critères d'identifications biologiques. Nous allons tenter de préciser à partir de nos résultats concernant les régions anatomiques les mieux préservées ainsi que des données de la littérature, quelles pourraient être les méthodes les plus adaptées à l'identification des individus carbonisés.

### a) *L'identification de l'espèce*

---

Après une carbonisation intense, l'identification de l'espèce est la première réponse à apporter. En effet, il est parfois complexe de simplement réussir à discriminer les fragments d'os humains des fragments de faune.

En archéologie, il est fréquent de retrouver des os d'animaux mélangés aux restes humains. C'est le cas par exemple dans les urnes du Tophet de Salammbô à Carthage où les ossements des jeunes enfants sont associés à des ossements de jeunes animaux, augmentant la complexité de l'étape de détermination anatomique des fragments. De plus, pour certaines régions

---

<sup>24</sup> Quatrehomme et al. (2015) nuancent ce propos en citant la problématique des nourrissons et des nouveaux nés. D'après Spitz (1993) et Svensson & Wendel (1955), il serait possible de réduire le corps d'un jeune enfant en cendres dans un laps de temps assez court, dans un four par exemple. Nous avons trouvé peu de publications sur le sujet, en revanche dans les urnes de Carthage qui contiennent presque exclusivement des individus morts en période périnatale la représentabilité des régions anatomiques est plutôt bien équilibrée, ce qui suggère une persistance des fragments d'os malgré la crémation.

anatomiques même complètes, il est parfois difficile de différencier l'humain de l'animal. Nous pouvons citer l'exemple des osselets de l'oreille moyenne, très semblables entre les jeunes humains et les jeunes caprinés mis en évidence au sein des assemblages de Carthage.

En contexte médico-légal, il est également possible d'imaginer dans un cadre purement criminel, un homicide avec tentative de dissimulation de preuves en mélangeant volontairement des ossements brûlés humains et animaux. Cette situation a été notamment décrite par Quatrehomme et al. (2015).

La discrimination de ces fragments sur des critères purement anatomiques est parfois un véritable challenge à relever. Elle nécessite à la fois une connaissance de l'ostéologie humaine, mais aussi des notions d'ostéologie animale. La collaboration avec des spécialistes (archéozoologues ou vétérinaires) est souvent indispensable.

L'apport de la microscopie ou les analyses biomoléculaires peuvent également être d'une grande aide dans certains cas. Cattaneo et al. (1999), par exemple ont montré l'intérêt de la microscopie quantitative en mettant en évidence des différences hautement significatives entre les paramètres mesurés de l'ostéon et du canal de Havers entre des fragments brûlés d'os humains et des fragments osseux d'animaux domestiques. Concernant les techniques biomoléculaires, les auteurs ont également montré qu'il était possible de détecter de l'albumine humaine sur un échantillon brûlé.

Après avoir trié les fragments osseux et isolé les restes d'origine non humaine, les deux critères principaux d'identification biologique sont l'évaluation du sexe et l'estimation de l'âge au décès.

## *b) L'évaluation du sexe<sup>25</sup>*

---

### **(1) Les méthodes classiques**

De nombreux auteurs ont affirmé que les méthodes classiquement utilisées pour évaluer le sexe des squelettes non brûlés pouvaient également être appliquées aux restes carbonisés (Geber et al., 2017; Lara et al., 2015; Mayne Correia & Beattie, 2002; Rubini et al., 1997; Wahl, 2015).

Au cours de cette étude, nous avons pu observer que certaines d'entre elles avaient été majoritairement utilisées. Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre précédent, leur application était conditionnée par les phénomènes de fragmentation et de conservation différentielle, ainsi que par la capacité de l'observateur à identifier de façon précise l'origine anatomique des fragments.

---

<sup>25</sup> Depuis la publication des directives BABA0 2004, les niveaux de certitudes concernant la détermination du sexe ont considérablement évolué et le terme « détermination » a été modifié en « évaluation » du sexe (Robson Brown & Roberts, 2007).

Les deux régions anatomiques les plus fréquemment utilisées étaient la région pelvienne et le crâne. Comme cela a déjà été souligné à plusieurs reprises, la région du bassin est la partie du squelette la plus discriminante (Bruzek & Murail, 2006). L'extrémité céphalique, quant à elle, est souvent choisie en l'absence des os coxaux et elle est facilement identifiable en contexte de crémations (Depierre, 2013).

Dans la grande majorité des cas, il n'était pas appliqué « une » méthode particulière, mais il s'agissait plutôt de la recherche/observation d'une série de critères.

Ces critères, associés les uns aux autres, formaient un faisceau d'arguments en faveur de tel ou tel sexe biologique.

De plus, il existait des critères secondaires tels que l'évaluation de la robustesse ou de gracilité du squelette, susceptibles de donner une orientation, mais en aucun cas de conclure sur l'évaluation du sexe.

Dans notre échantillon, il n'a pas été possible d'appliquer de méthodes ostéométriques. Les phénomènes de rétractions, de déformations et de fragmentations induits par la chaleur, rendaient ce type d'analyses impossibles ou incertaines. Néanmoins, un recueil des données de la littérature a mis en évidence que certains auteurs avaient pu obtenir de bons résultats avec ces techniques. Warren & Maples (1997) en pratiquant des mesures au niveau des extrémités proximales de l'humérus et du fémur ont constaté une différence significative entre les hommes et les femmes. van Vark et al. (1996) ont examiné l'expression de divers traits sexuellement dimorphiques du squelette crânien et infra crânien. Ils ont constaté de bons résultats pour les deux sexes avec une supériorité pour le sexe masculin (92 % de classifications correctes pour les hommes vs. 79 % pour les femmes). Gonçalves et al. (2013) ont également obtenu de bons scores de classification du sexe à partir de mesures humérales, fémorales, talaïres et calcanéennes. Cavazzuti et al. (2019) ont proposé des « *cut-off points* » au niveau du condyle mandibulaire, de la dent de l'axis, des extrémités de l'humérus, du radius et du fémur ainsi que du lunatum, de la patella, du talus, du naviculaire et du premier métatarsien. Cependant, ils nuancent ces résultats en soulignant la nécessité d'appliquer des méthodes spécifiquement adaptées à la population étudiée, particulièrement dans le cas de restes incinérés d'individus anciens. Enfin, plusieurs articles concernaient également des mesures réalisées sur certains fragments de crâne dont la région pétreuse et le conduit auditif externe de l'os temporal (Gonçalves et al., 2011a, 2015b; Lynnerup et al., 2006; Masotti et al., 2013, 2019; Noren et al., 2005; Schutkowski & Herrmann, 1983; Wahl, 1981; Wahl & Graw, 2001). Ces pistes sont très intéressantes à retenir, compte tenu de la représentation de ces deux régions anatomiques dans notre échantillon. Elles nous ont également amené à nous intéresser à une publication de Braga et al. (2019) relatif au dimorphisme sexuel cochléaire. La cochlée humaine, principal organe de l'audition présente une forme adulte dans la région pétreuse de l'os temporal dès la naissance. Une étude tridimensionnelle de la forme de la cochlée logée dans l'os pétreux a mis en évidence un dimorphisme sexuel cochléaire mesuré avec une précision moyenne allant de 0,91 à 0,93 tout au long de la vie.

Nous avons montré dans notre échantillon qu'en contexte de crémation l'os temporal et particulièrement la région pétreuse était un os très bien identifié et très bien représenté. Il était déjà l'un des fragments d'intérêt les plus qualitatifs, en raison de son fort taux de latéralisation et de son implication dans la recherche des liaisons ou des exclusions, cette nouvelle piste concernant la possibilité d'une diagnose sexuelle de l'ensemble des individus (adultes et immatures) est extrêmement intéressante à suivre. Elle nécessiterait d'être testée sur un échantillon d'os brûlé.

## (2) La méthode pondérale

Plusieurs chercheurs ont envisagé la possibilité d'utiliser le poids des fragments brûlés pour discriminer le sexe des individus (Depierre, 2013; Herrmann, 1976; Malinowski, 1969; Malinowski & Porawski, 1969; Rosing, 1977; Van Deest et al., 2011).

Dans notre échantillon, nous avons souhaité tester cette hypothèse. L'analyse a été réalisée uniquement à partir des assemblages dont le NMI était égal à 1, les données relatives aux assemblages du Vatican ont donc été exclues. En ce qui concernait la masse totale des fragments dans chaque assemblage, nous avons pu observer une différence significative selon le sexe des individus. Les individus classés « Masculin » (que l'évaluation du sexe soit certaine ou probable), présentaient toujours une masse totale supérieure à celle des individus classés « Féminin ». Cependant, bien que la différence soit statistiquement significative, l'amplitude de variation des valeurs féminines pouvait se superposer à celles des valeurs masculines. Par ailleurs, nous avons également pu noter « un effet site ». Les masses des individus de Cumes (masculins et féminins) étaient statistiquement plus élevées que celles des individus de Pompéi, de telle sorte que sur le simple argument de la masse, un individu féminin à Cumes aurait pu être classé masculin à Pompéi.

Par ailleurs, nous avons identifié plusieurs biais ou facteurs limitant à l'utilisation de cette méthode.

- **Le degré d'exhaustivité du squelette**, en lien avec les altérations thermiques. Dans un contexte de carbonisation, il est indispensable d'analyser la représentation anatomique préalablement à l'analyse pondérale. Une représentation déséquilibrée pourrait être le signe que des éléments squelettiques sont manquants. Dans ce cas, il sera impossible d'appliquer une méthode pondérale afin de discriminer le sexe des individus. La masse d'un assemblage peut être comparée à des normes de références afin d'évaluer son exhaustivité. Il existe une telle documentation pour divers échantillons de population en Europe, aux États-Unis et en Asie (Bass & Jantz, 2004; Depierre, 2013; Gonçalves et al., 2013; Herrman, 1976; McKinley, 1993; Thamrong Chirachariyavej & Seetala Sanggarnjanavanich, 2006; Van Deest et al., 2011; Warren & Maples, 1997).
- **Les atteintes taphonomiques**. Au-delà de l'altération thermique, il est parfois possible de mettre en évidence des altérations pouvant jouer sur la densité osseuse, ou des encroûtements qui pourraient majorer la masse des fragments.

- **Les atteintes pathologiques.** Il existe des pathologies qui peuvent influencer sur la masse osseuse : une déminéralisation osseuse consécutive à une ostéoporose ou à l'inverse des maladies ostéo-condensantes. La possibilité d'une intoxication au fluor par les eaux de boissons a été évoquée comme facteur expliquant les résultats obtenus à Cumes (Orellana-González et al., 2021).
- **Les différences régionales d'habitudes alimentaires.** Il a déjà été évoqué par Bass & Jantz (2004), que les variations de poids corporel engendrées par les différences d'habitudes alimentaires au sein des populations vivantes, pouvaient influencer sur la masse des fragments après la combustion du corps.
- **Les manipulations anthropiques.** Qu'ils s'agissent de pratiques funéraires en contexte archéologique ou d'action de manipulation du corps (tentative de dissimulation, déplacement du corps, prélèvements incomplets lors de la levée de squelette...) toutes les interventions humaines postérieures au processus de combustion peuvent engendrer des modifications dans la représentation du squelette.
- **Les différences liées à l'âge des sujets.** Elles peuvent également interférer avec une évaluation pertinente (Gonçalves et al., 2011b).

L'analyse de la masse totale des fragments offre l'avantage d'être un critère objectif et reproductible à la condition que les méthodes de pesées des fragments soient standardisées. Cependant, compte tenu de l'ensemble des facteurs décrits ci-dessus, il nous semble difficile d'utiliser ce critère isolément pour évaluer le sexe des individus.

### (3) Les techniques moléculaires

Malgré des coûts financiers importants, les techniques moléculaires ont été largement utilisées au sein de certains assemblages archéologiques (Barriel, 2005; Ginolhac et al., 2011; Halbout et al., 1996; Hänni, 1994). Elles représentent souvent l'unique possibilité d'espérer connaître le sexe des individus immatures. Toutefois, l'ADN ancien n'est pas toujours bien conservé. Les molécules peuvent être détériorées ou détruites et les risques de contaminations par les archéologues préleveurs, les chercheurs ou les techniciens eux-mêmes au sein des laboratoires sont majeurs.

De plus, dans un contexte d'altération thermique, nous avons vu plus haut que l'ADN est souvent détruit. Les travaux d'Harbeck et al. (2011) ont cependant montré que pour des faibles températures (jusqu'à 300°C) l'amplification était possible. Entre 300 et 600° C, les résultats devenaient aléatoires au-delà de 600°C en revanche les possibilités d'analyses génétiques sont quasi nulles. Von Wurmb-Schwark et al. (2009) ont utilisé la technique du screening par PCR développée pour l'ADN dégradée et ont obtenu des résultats identiques à Harbeck (2011).

Une étude réalisée par Schwark et al., (2011) a montré l'évolution des concentrations d'ADN dans différents échantillons suivant le niveau de brûlure.

Dans les échantillons intacts, l'analyse PCR a révélé des concentrations d'ADN comprises entre 10 et 114 ng/μl avec une moyenne à 75 ng/μl. Dans les échantillons semi-brûlés les concentrations varient de 1,6 à 21,7 ng/μl soit une moyenne de 4,9 ng/μl. Les os carbonisés, de couleur noir charbonneux fournissent des concentrations comprises entre 0,01 et 0,84 ng/μl. Enfin, dans le dernier groupe des os calcinés, de couleur gris-bleu à blanc l'ADN quantifié est compris entre 0 et 0,17 ng/μl pour les os gris-bleu et 0 et 0,03 ng/μl pour les os gris à blanc. Dans les groupes d'os carbonisés et calcinés, seulement 38,9 % ont pu avoir au moins un marqueur analysé : le plus souvent l'ADN mitochondrial. Une détermination fiable du sexe a pu être faite dans seulement 25 % des échantillons du groupe.

Les résultats de cette étude montrent donc que l'identification génétique n'est possible de manière fiable et reproductible qu'à partir d'os bien conservés ou semi-brûlés.

Depierre (2013) a mis en évidence différentes catégories osseuses visuellement identifiables selon le niveau de fiabilité de l'identification génétique.

- **I : bien conservés (non brûlés ou peu brûlés)**
- **II : à demi brûlés (sans plus de précision)**
- III : brûlés de couleur noire
- IV : brûlés de couleur bleu-gris
- V : brûlés de couleur bleu-gris-blanc.

Seules les deux premières catégories offrent une possibilité d'identification génétique fiable. À partir de la troisième catégorie, les possibilités deviennent aléatoires.

Dans notre échantillon, les données colorimétriques ont été relevées pour évaluer le degré de crémation de chaque assemblage osseux. À Pompéi, sur les 110 assemblages analysés, seuls 27 présentaient des fragments de couleur ocre à brun (soit 24,5 %) et pouvaient potentiellement appartenir aux catégories I et II de Depierre (2013). À Cumes et au Vatican les résultats obtenus étaient encore plus faibles (15 % et 16 % respectivement).

#### **(4) Les données du sexe social**

La notion de sexe biologique s'exprime à travers le dimorphisme sexuel qui regroupe des caractéristiques biologiques et physiologiques séparant les hommes des femmes (Boucherie, 2021; Bruzek & Murail, 2006; Peyre & Wiels, 2015). La notion de genre, elle, n'est pas régie par ces processus biologiques mais par la construction d'une identité individuelle et sociale. Cette identité correspond la plupart du temps à l'identité biologique de l'individu mais ce n'est pas toujours le cas (Mathieu, 2010).

Pendant de nombreuses années, l'archéologie funéraire s'est focalisée principalement sur l'étude du mobilier funéraire ou l'architecture des sépultures (Duday & Sellier, 1990). Les chercheurs identifiaient le sexe des squelettes uniquement à partir de la nature du mobilier présent sans s'intéresser aux ossements (Knüsel & Ripley, 2000). Puis, avec le développement

de l'archéo-anthropologie de terrain, le squelette a été replacé au cœur des préoccupations scientifiques en archéologie funéraire (Duday et al., 2009).

Qu'il s'agisse d'une « enquête » judiciaire ou de recherches archéologiques, il est toujours souhaitable d'analyser l'ensemble des données dont nous disposons.

Un certain nombre d'informations peuvent découler de l'environnement extérieur du squelette. Dans un contexte archéologique, l'étude de l'ensemble funéraire permet parfois de mettre en évidence des différences visibles entre les sexes à plusieurs niveaux. Il peut s'agir de différence dans la typologie des sépultures, de leur architecture, leur construction, leur structure... Par exemple des indications peuvent être apportées par un type particulier de stèle ou des épitaphes. Le mode de traitement du cadavre et le mobilier funéraire peuvent également différer selon le sexe et même selon l'âge des individus.

Cette utilisation a souvent fait l'objet de critiques, en raison d'une fiabilité discutable.

Plusieurs auteurs ont travaillé sur ces questions (Dedet, 2008; Mathieu, 2010; Millet, 2008; Rottier, 2003, 2010). Un même constat est systématiquement réalisé : l'absolue nécessité d'un cadre chronologique et géographique.

Thomas (2011) dans sa thèse a réalisé un travail de croisement des données archéologiques et biologiques sur un corpus composé d'une dizaine de nécropoles du Bassin parisien au Néolithique moyen. Cette étude a permis de mettre en évidence des liens significatifs entre le sexe biologique et le choix du mobilier funéraire. L'auteur a pu mettre en évidence, un lien strict et significatif entre certains objets d'accompagnement et le sexe des individus. Leurs occurrences dans des tombes d'enfants permettaient d'émettre une hypothèse quant au sexe biologique de ces enfants, vraisemblablement des garçons. Il s'agirait alors de pratiquer une diagnose sexuelle tertiaire.

Cette démarche doit nécessairement s'appuyer sur un traitement statistique solide, au préalable, entre les données biologiques du sexe et les observations archéologiques. Cependant, elle offre la possibilité de réaliser une évaluation *a posteriori* du sexe des sujets classés « indéterminés » à partir des indicateurs uniquement biologiques.

Dans un contexte médico-légal, la situation est un peu différente, dans le sens où la volonté d'associer un objet au défunt est plus rare. Des objets sont retrouvés avec ou à proximité de la victime au moment de la découverte du corps. Ils peuvent ne pas lui appartenir, avoir une signification particulière pour lui... Dans ce cadre, il n'est pas possible de s'appuyer sur un traitement statistique des données. De façon anecdotique, seule la mise en évidence d'un dispositif intra utérin pourrait conduire à une évaluation quasi certaine du sexe de l'individu.

Par ailleurs, depuis plusieurs années, on observe l'émergence de nouvelles problématiques sur la notion d'identité sociale, de genre et de sexe, qui dans un simple contexte d'identification peuvent entraîner des difficultés jusque-là insoupçonnées.

## **(5) Vers la fin de la bicatégorisation du sexe ? Notion de sexe et de genre : une nouvelle problématique médico-légale.**

Le dimorphisme sexuel regroupe l'ensemble des caractéristiques biologiques, physiologiques et physiques qui différencient les hommes et les femmes (Bruzek & Murail, 2006; Peyre & Wiels, 2015). La variable « sexe » s'entend comme une catégorie biologique qui s'exprime au travers du dimorphisme sexuel. Les différences biologiques se marquent au fur et à mesure de la croissance et jusqu'à la puberté, sous influence hormonale (Callewaert et al., 2010). Elles s'expriment au niveau génétique, gonadique, génital et somatique.

Cependant, au-delà d'une simple binarité, il peut déjà exister une intersexuation visible au niveau génétique, gonadique et ou génital (Peyre & Wiels, 2015). De nombreux travaux depuis les années 80-90, se développent dans les champs de recherche de la différenciation sexuelle. Ils mobilisent les outils de la biologie afin de montrer que la binarité des sexes loin d'être naturelle serait un processus de bicatégorisation produit par les scientifiques (Fausto-Sterling, 2012; Gardey & Vuille, 2018; Jordan-Young & Karkazis, 2019). Les recherches de la philosophe C. Krauss mettent en évidence la complexité des mécanismes de sexuations et l'absence d'un facteur unique de détermination du sexe, de sorte qu'il serait impossible de démontrer une dichotomie naturelle entre les mâles et les femelles en tant que groupes humains biologiquement séparés.

Par ailleurs, la notion de genre, davantage entendue comme un sexe social, serait une construction de l'identité individuelle et sociale qui pourrait s'acquérir au cours du temps et ne correspondrait pas forcément au sexe biologique (Mathieu, 2010).

Depuis quelques années on observe donc une évolution sociale et biologique, qui tend vers une disparition de la dichotomie absolue entre les sexes. Cela peut sembler encore anecdotique, mais dans le contexte d'une identification reconstructive, cette problématique ne devrait pas être négligée. En effet, l'évaluation du sexe doit normalement d'emblée discriminer 50 % de la population et être le point de départ de l'enquête. Une erreur même si elle est toujours possible doit au maximum être évitée à ce niveau-là de l'identification. De plus, nous pouvons légitimement nous poser la question de savoir si l'augmentation actuelle du nombre de personnes s'identifiant comme transgenre ou non binaire pourrait entraîner un biais dans l'identification reconstructive.

### *c) L'estimation de l'âge au décès*

---

L'estimation de l'âge au décès est basée sur des indicateurs osseux associés au développement, à la croissance, aux phénomènes de maturation et à la sénescence (Fairgrieve, 2008). Le vieillissement n'est pas un phénomène linéaire, il est multifactoriel et résulte d'une importante variabilité interindividuelle (Susanne, 2003). Après la phase de croissance et de maturation, ce sont les changements dégénératifs qui apparaissent.

En anthropologie médico-légale, l'estimation de l'âge au décès à partir d'indicateurs squelettiques est le second facteur le plus important pour l'identification biologique.

Dans un contexte de carbonisation, il est primordial que les méthodes d'évaluations soient adaptées au matériel brûlé et aussi précises et fiables que possible.

Globalement, l'estimation de l'âge au décès est réalisée en deux temps :

- une première distinction visuelle des dimensions globales des os et du degré de maturation permet de distinguer les adultes des non-adultes (Curtin, 2015; McKinley, 2017) ;
- dans un second temps, une observation plus fine et l'application des méthodes habituellement mises en œuvre sur les os non brûlés (Geber et al., 2017; Irish et al., 2015; Lara et al., 2015; Mayne Correia, 1997; Mayne Correia & Beattie, 2002; Rubini et al., 1997).

Fairgrieve (2008) a montré que chacune d'elles pouvait être impactée par l'action des hautes températures (tableau 37). Il peut être important de noter que les parties les plus proches de la surface du corps seront plus touchées par le feu que les parties enfouies dans les tissus mous. La température et la durée d'exposition directe sont également des facteurs déterminants (Fairgrieve, 2008).

Méthodes	Régions affectées	Changements
<b>Longueur diaphysaire</b> (Hoffman, 1979)	Diaphyses et régions métaphysaires	Diminution de la longueur diaphysaire, érosion de la région métaphysaire, amincissement des corticales
Apparition des <b>centres d'ossifications primaires</b>	Centres d'ossifications avec des hautes teneurs en cartilages de conjugaisons	Destruction par le feu des centres d'ossifications
<b>Stade de formation dentaire</b> (Moorrees et al., 1963b, 1963a)	Couronnes et racines dentaires dans les alvéoles	Dessiccation des couronnes et racines. Elles peuvent être préservées dans les alvéoles en fonction des conditions de préservation de la mandibule ou de l'os maxillaire. L'os maxillaire est plus souvent sévèrement fracturé.
<b>Éruption dentaire</b> (Massler et al., 1941)	Couronnes et racines de dents en éruption	Dessiccation des couronnes et racines des dents qui sont sorties ; les dommages des dents incluses dépendent des conditions de conservation de l'os alvéolaire
Fusion épiphysaire (Buikstra & Ubelaker, 1994)	Épiphyses et régions métaphysaire	Fracture des épiphyses et destruction des cartilages de croissances ou régions métaphysaires
Symphyse pubienne (Brooks & Suchey, 1990; Katz & Suchey, 1986; Meindl et al., 1985)	Région de la symphyse pubienne	Fracture, déformation
Surface auriculaire (Lovejoy et al., 1985 ; Schmitt, 2005)	Surface auriculaire et région rétro-auriculaire	Fracture déformation, difficulté d'observation de la porosité, des stries et de l'organisations transverses.
Extrémité sternale des côtes (Işcan et al., 1985 ; Işcan et al., 1984; Işcan, 1985; Işcan & Loth, 1986a)	Texture, surface et contour de l'extrémité sternale des côtes	Fracturation, difficulté d'observation
Fermeture des sutures crâniennes (Buikstra & Ubelaker, 1994; Galera et al., 1998; Meindl & Lovejoy, 1985; Todd & Lyon, 1925; Todd & Lyon Jr, 1924, 1924, 1925)	Voûte crânienne	Fracturation, délamination et fragmentation extrême
Suture palatine (Buikstra & Ubelaker, 1994 ; Gruspier & Mullen, 1991 ; Gutiérrez-Tiznado et al., 2023)	Région palatine de l'os maxillaire et os palatin	Fracturation

**Tableau 37 : impact des hautes températures sur les méthodes d'identification. Certaines méthodes sont présentées à titre d'exemple et n'ont pas vocation d'être exhaustives. D'après Fairgrieve (2008).**

## **(1) L'âge au décès des immatures**

Il est globalement accepté que les méthodes d'estimation de l'âge chez les individus les plus jeunes sont les plus précises et les plus fiables. En effet, c'est à cette période que les indicateurs du développement sont les plus nombreux.

Les observations relatives à la croissance et au stade de maturation (osseux et dentaire) sont les premières réalisées (apparences, tailles des os y compris les longueurs diaphysaires, fusion des centres d'ossifications, stade de formation et d'éruption dentaire...).

Dans notre corpus, l'observation globale des épiphyses et des régions de fusion des cartilages de conjugaisons a été réalisée chez plus de 95 % des individus. C'est la première observation.

Ensuite, les deux principales méthodes appliquées concernaient l'observation des stades de formations et d'éruptions dentaires et l'analyse des dimensions de certains os intacts.

### **➤ Les enfants morts en période périnatale et les nourrissons**

Nous avons précisé à plusieurs reprises que l'exposition au feu entraînait des modifications morphologiques et notamment une rétraction osseuse. C'est une donnée qu'il est indispensable de prendre en compte si l'on envisage de réaliser des mesures sur le squelette. Chez les individus les plus jeunes, Petersohn & Kohler (1965) puis Huxley & Kósa (1999) ont étudié l'impact précis de la carbonisation. Huxley & Kosa (1999) ont calculé pour chacune des diaphyses de fœtus âgés entre 4 et 10 mois lunaires ainsi que pour les nouveau-nés un pourcentage de rétraction moyen due à l'action du feu. Ils suggèrent que le phénomène de rétraction diminue avec l'âge. Le niveau de calcification du squelette et le type d'os auraient également une influence, de même que la durée d'exposition au feu qui détermine la quantité de matière organique détruite.

Ils ont donc établi des données, offrant un moyen d'évaluer le taux de rétraction de chaque diaphyse, pour chaque groupe d'âge.

La rareté des crémations d'enfants morts en période périnatale et/ou de nourrissons dans les gisements archéologiques n'a pas permis d'établir une quantité suffisante de données. Nous sommes donc très enthousiastes à l'idée de pouvoir prochainement analyser les données relatives aux individus du Tophet de Salammbô à Carthage afin de pouvoir conclure sur les méthodes applicables aux individus de cette classe d'âge.

Par ailleurs, de nouvelles méthodes innovantes, se focalisant sur la reconnaissance de la ligne néonatale pourraient apporter des informations précieuses dans un contexte judiciaire.

La ligne néonatale est une zone d'hypominéralisation due aux perturbations physiologiques liées à la naissance. La transition du milieu intra- à extra-utérin laissant son empreinte dans les dents déciduales et la première molaire permanente. Elle sépare l'émail formé durant la vie intra-utérine de celui formé après la naissance. La présence de cette ligne est susceptible de permettre de dater le moment de la naissance et pourrait jouer un rôle capital dans les enquêtes d'infanticides (Daures Cathrine, 2002; Zanolli et al., 2011). Une mesure de l'apposition tissulaire à partir de cette ligne, permettrait d'estimer l'âge du nouveau-né. Smith & Avishai (2005) ont proposé de l'utiliser pour distinguer les sujets morts au cours de la période périnatale de ceux

survenus plus tard dans la petite enfance (après la fin du premier mois). L'émail formé après la naissance pouvant être mesuré, il serait alors possible d'évaluer le temps de survie de l'enfant. Ces méthodes ont pour l'instant été appliquées sur des sujets non brûlés et ont permis d'obtenir des résultats prometteurs. Chez les sujets brûlés, l'os alvéolaire joue un rôle de facteur protecteur des bourgeons dentaires pendant l'exposition au feu, nous permettant d'envisager leur application.

### ➤ Les autres immatures

En dehors des enfants morts en période périnatales, l'âge au décès de la plupart des sujets immatures étudiés dans notre échantillon a principalement été estimé à partir des stades de maturations dentaires. L'application de la méthode de Moorrees et al. (1963a, 1963b) avait permis d'obtenir une estimation de l'âge assez précise et nous avait conduit à classer nos individus dans des classes d'âges assez réduites : 0-1ans ; 1-4 ans ; 5-9 ans ; 10-14 ans ; et 15-19 ans.

Cependant, de façon générale, les stigmates de crémations ne permettront pas toujours d'estimer l'âge des individus avec autant de précision.

De même que Depierre (2013) nous préconisons pour des questions de fiabilité, d'appliquer :

- soit les divisions proposées par Classen (1991) ; Dokládál (1999) ; Duday et al. (2000) ; Holck (1986) ; Kühn (1986) ; Lenorzer (2006) ; Prouin (2007) ; Rosing (1977) :
  - groupe 0 → 0 à 1 ans
  - *Infans 1* → de 1 à 6 ans (éruption de la première molaire permanente)
  - *Infans 2* → de 7 à 13 ans (éruption de la deuxième molaire)
  - *Juvenis* → de 14 à 19 ans (fin de l'immaturité biologique : fermeture de la syndesmose sphéno-occipitale)
- soit la classification établie par McKinley (1994b) :
  - *Infant* → 0 à 4 ans
  - *Juvenile* → 5 à 12 ans
  - *Subadult* → 13 à 18 ans

Le degré de précision de ce type de classification peut paraître très faible en contexte médico-légal, mais il faut savoir s'adapter au matériel étudié. En effet, dans le cadre d'une identification reconstructive, comme l'a précisément évoqué Fairgrieve (2008), fournir une large estimation de l'âge au décès n'est pas un échec de la méthode mais plutôt une estimation prudente. Elle donnera aux enquêteurs une liste potentiellement plus longue de personnes disparues à prendre en considération mais l'estimation sera bien plus fiable.

## (2) Les individus de taille adulte

De même que pour les immatures chez les individus de taille adulte, nous avons souhaité privilégier la fiabilité et nous avons donc mis en place uniquement trois catégories d'âges :

- adultes jeunes ;
- adultes ;
- adultes âgés.

Nous avons intitulé cette section « individus de taille adulte » et non « adultes », car il est parfois très difficile à partir de l'âge osseux, de discriminer des adultes jeunes et des grands adolescents. Il s'agit d'une problématique très bien connue de la médecine légale du vivant, qui doit souvent répondre à des réquisitions d'estimation d'âge osseux. Ce type de demande se retrouve fréquemment au cœur de polémique, justement pour des raisons de précision et de fiabilité. On peut donc facilement comprendre que cette question, en contexte de carbonisation pose encore davantage de difficultés. C'est une des raisons pour lesquelles, lorsqu'il est impossible de recueillir suffisamment d'indices sur le degré de maturation osseuse (os longs épiphysés ou non), le stade d'éruption dentaire et que les os arborent des dimensions compatibles avec celles des adultes, il n'est pas possible de distinguer les deux catégories. La mention « sujet de taille adulte » permet de sous-entendre les deux catégories. Par ailleurs, les individus qui ne présentaient aucune caractéristique immature ou aucun signe de sénescence ont été classés dans la catégorie « adultes » tout simplement.

Nous avons pu mettre en évidence dans le chapitre précédant certaines régions anatomiques particulièrement informatives pour évaluer l'âge des adultes jeunes (20 à 30 ans). Il s'agit des points d'ossifications secondaires de fusions tardives (listels vertébraux ; crête iliaque ; extrémité sternale de la clavicule). La publication de Webb & Suchey (1985) offre notamment des fourchettes d'âges pour lesquels ces points ne sont pas fusionnés ; en cours de fusion ou complètement fusionnés.

Nous avons pu constater l'importance de ces observations dans notre échantillon puisqu'elles font partie avec les sutures crâniennes des observations les plus nombreuses. Elles sont donc particulièrement contributives chez les individus brûlés.

Concernant les autres méthodes habituellement employées, il faut toujours tenir compte des dégradations induites par l'action du feu (*cf.* tableau 38). Par exemple les méthodes impliquant une analyse des caractéristiques des côtes (Işcan & Loth, 1986c, 1986b; Kunos et al., 1999) sont difficilement envisageables compte tenu de l'état de fragmentation que nous avons pu observer pour ces dernières.

Les méthodes impliquant l'os coxal (Lovejoy et al., 1985; Rougé-Maillart et al., 2004, 2007, 2009; Schmitt, 2005, 2008) souvent considérées comme les plus performantes n'ont pu être que rarement appliquées compte tenu de la fragmentation. À l'inverse, dans plus de la moitié des cas l'observation des sutures crâniennes, considérée comme une méthode peu fiable et déconseillée, a pu être contributive.

De la même manière que pour l'évaluation du sexe, nous avons pu mettre en évidence qu'il convenait d'examiner le maximum d'éléments crâniens et infra crâniens et souvent de combiner diverses observations, tels qu'avaient déjà pu le proposer Bradtmiller & Buikstra (1984), Depierre (2013), Duda, (1987b); Dufková (1985), Lenorzer (2006), Prouin (2007).

Le dernier élément morphologique intéressant dans l'évaluation de l'âge au décès des individus adultes est un élément du versant de la pathologie puisqu'il concerne l'observation des lésions

dégénératives. Comme nous l'avons démontré dans le chapitre précédent, certaines de ces pathologies sont identifiables sur de très petits fragments.

Il s'agit d'un critère secondaire mais qui peut s'avérer très informatif lorsque les critères de croissance et de maturation ne peuvent plus être appliqués, comme cela a été montré pour l'utilisation de l'hyperostose frontale interne (Du Fayet de la Tour et al., 2023; Hershkovitz et al., 1999; May et al., 2011b). Bien entendu, son utilisation reste limitée, en raison de la variabilité des phénomènes de sénescence selon les différentes parties du squelette (Kemkes-Grottenthaler, 1996; Schmitt, 2005) et l'absence de standard sur des populations de références pour chaque indicateur (Baccino et al., 1991). Par ailleurs, après une phase de combustion, les problématiques de conservations et de fragmentations différentielles ont aussi un impact négatif sur ces méthodes d'évaluations.

On peut ajouter, que dans les assemblages où il semble coexister plusieurs individus mélangés, il est nécessaire d'effectuer l'estimation de l'âge, élément par élément ou après un premier tri des éléments squelettiques par individus

L'âge au décès est très difficile à évaluer à partir d'éléments isolés et encore plus quand il s'agit de fragments qui ont subi des agressions par le feu.

Les méthodes basées sur une observation macroscopique et l'observation de changements dégénératifs sont fortement affectées par l'interprétation subjective de l'observateur et sont limitées par les l'action du feu. Il est donc important d'analyser les autres méthodes envisageables.

### **(3) Autres perspectives pour l'estimation de l'âge au décès des sujets brûlés : les méthodes histologiques**

Les méthodes histologiques d'estimation de l'âge au décès des individus, à partir d'un matériel osseux et/ou dentaire constituent des alternatives aux méthodes macroscopiques que nous venons d'évoquer.

#### **➤ Les méthodes histologiques à partir d'un matériel osseux**

Plusieurs études ont rapporté des relations entre la forme, la taille, le nombre des ostéons et l'âge des individus. Ces méthodes d'estimation de l'âge reposent sur le remodelage osseux. Il existerait avec l'âge, une diminution du nombre de canaux « non haversiens » et une augmentation du nombre d'ostéons secondaires (Robling & Stout, 2007), par ailleurs d'autres paramètres tels que la surface ou la circularité des ostéons auraient également été identifiés comme évoluant de manière significative avec l'âge des individus (Crowder et al., 2012; Crowder & Dominguez, 2012; Goliath, 2010; Goliath et al., 2016; Ortner, 1975). Les précurseurs de ce type de recherches sont Balthazard & Lebrun (1911), Kerley (1965), Kerley & Ubelaker (1978), Lynnerup et al. (1998), Singh & Gunberg (1970).

Cependant, il a également été prouvé qu'un certain nombre de facteurs autres que l'âge chronologique était susceptible d'affecter le remodelage osseux (Stout, 1988). Ces facteurs concernent principalement les variations d'ordre génétique, les conditions pathologiques, les traumatismes et les contraintes mécaniques. Des différences peuvent également résulter de facteurs méthodologiques (Bednarek, 2008; Lynnerup et al., 2006; Martrille et al., 2009). Même si l'utilisation de ces méthodes histologiques est souvent évoquée, de nombreux auteurs soulignent qu'elles devraient être utilisées uniquement comme simples indicateurs (Chan et al., 2007; García-Donas et al., 2021; Lagacé et al., 2019; Paine & Brenton, 2006).

Concernant le type d'os utilisé, le fémur est celui qui a fait l'objet du plus grand nombre d'études, malgré sa forte variabilité histomorphométrique résultant des contraintes biomécaniques auquel il est soumis. Les côtes ont également souvent été prises en compte. Il a été montré récemment dans une étude de validation des méthodes par Karydi et al. (2022) que seule la méthode développée par Cho et al. (2002) pour les côtes et la méthode de Kerley & Ubelaker (1978) pour le fémur étaient des marqueurs fiables.

D'autres auteurs se sont penchés sur de nouvelles approches : Maat et al. (2006) ont proposé une méthode simple et peu invasive en évaluant le remodelage du tissu osseux lié à l'âge. Contrairement au comptage habituel des ostéons, il s'agissait d'un comptage des tissus non remodelés.

Une autre étude a montré que l'épaisseur des trabécules diminuait avec l'âge chez les hommes mais restait stable ou augmentait chez les femmes (Vijayapalan et al., 2003).

Concernant l'application de ces méthodes à l'os brûlé, Bradtmiller & Buikstra (1984) ont évoqué la possibilité de réaliser une estimation précise de l'âge microscopique, à condition que des températures de 600 °C n'aient pas été dépassées.

Absolonova et al. (2013) ont testé l'effet de températures d'expositions plus élevées et ont montré que les changements microstructuraux induits par la combustion étaient similaires aux changements liés à l'âge, réduisant fortement l'applicabilité de ces méthodes pour des restes brûlés au-delà de 800 °C. Ils ont donc établi des équations de régressions pour les os non brûlés, les os brûlés à 700 ° et les os brûlés à 800°.

### ➤ **La méthode des anneaux du ciment dentaire**

Le ciment est intéressant dans l'estimation de l'âge pour plusieurs raisons. Il s'agit d'un tissu dur et non vascularisé qui ne subit ni remodelage ni influence génétique. De plus, l'épaisseur du ciment est proportionnelle à l'âge de la dent (Stein & Corcoran, 1994). Il existe une apposition linéaire tout au long de la vie et une relation linéaire entre le nombre de couches cémentaires et l'âge des individus à raison d'un anneau par année écoulée (Blondiaux et al., 2006; Wittwer-Backofen, 2012; Wittwer-Backofen et al., 2004). Enfin, cette structure subit peu l'attaque de l'environnement oral ou des processus taphonomiques (Colard et al., 2008).

La méthode quantitative des anneaux de ciment offre l'avantage d'évaluer un âge chronologique et non un âge biologique comme le proposent les méthodes traditionnelles. En outre, la distribution qualitative des anneaux de ciments semble également corrélée à certains

processus pathologiques ou physiologiques marqués par des modifications d'épaisseur de l'anneau correspondant à l'année de la pathologie ou de l'évènement physiologique (grossesse par exemple). Ce sont des informations capitales dans un contexte d'identification comparative. Elles permettraient d'approcher l'histoire chronologique de l'individu, et donc de réduire de manière significative les catégories d'âges (Wittwer-Backofen, 2012).

Malheureusement cette méthode ne devrait être tentée que lorsque la température de combustion est inférieure à 600°C (Gocha & Schutkowski, 2013). Elle implique la conservation du matériel dentaire et nous avons précédemment évoqué les difficultés relatives à la crémation sur la conservation du tissu dentaire. Au cours de cette étude, nous avons pu comptabiliser 3491 fragments dentaires. Ce nombre peut sembler élevé mais il ne représente que 1,2 % de l'échantillon total et les dents sont souvent très fragmentées.

### 3. L'analyse des éléments pathologiques : la frontière entre identification reconstructive et comparative.

---

Nous avons pu constater que l'os brûlé, malgré ses déformations et sa fragmentation, offrait toujours la possibilité de mettre en évidence des stigmates lésionnels.

L'analyse d'éventuelles lésions ou pathologies osseuses, d'allures récentes ou anciennes est absolument capitale dans le contexte de crémation puisqu'elle permet d'obtenir deux types d'informations :

- des informations concernant l'identification : les caractéristiques personnelles uniques
- des informations relatives à la compréhension des causes et des mécanismes du décès.

#### *a) Les caractéristiques personnelles uniques : un atout pour l'identification comparative*

---

L'observation de l'ensemble des fragments d'os brûlés à la recherche de stigmates pathologiques est particulièrement intéressant dans le cadre d'une identification comparative lorsque le dossier médical du patient est disponible. De même que les comparaisons réalisées par les odontologistes médico-légaux au niveau dentaire, il est possible de repérer des points de comparaisons au niveau osseux. Mayne Correia & Beattie (2002) proposent à la fois une observation morphologique et structurelle afin d'établir des éléments de comparaisons.

#### **(1) Observations macroscopiques**

Il conviendra d'être capable de mettre en évidence sur l'os brûlés, des stigmates engendrés par les pathologies ou les traumatismes dont il est fait mention dans le dossier médical. Chaque fragment devra être examiné à la recherche d'éléments inhabituels, pouvant conduire à une identification positive (Mayne Correia & Beattie, 2002).

Comme l'avait déjà suggéré Reinhard & Fink (1994) certains types de pathologies comme les maladies dégénératives, l'hyperostose porotique ou dense, peuvent être identifiés de manière fiable et fournir des informations concernant l'identification.

C'est également à ce niveau que la recherche de matériel d'ostéosynthèse entre en jeu. En plus d'identifier la prise en charge d'une lésion sur le plan chirurgical, le matériel d'ostéosynthèse est numéroté. Chaque chirurgie ayant une obligation de traçabilité, tous les matériaux d'ostéosynthèses présentent un numéro correspondant à un individu unique qu'il est facile de retrouver. De plus, le matériel d'ostéosynthèse a une composition qui lui offre une très bonne résistance à l'action du feu et de hautes températures.

## (2) Observations structurelles

C'est à cette étape que l'imagerie peut devenir particulièrement informative. En effet, il existe des caractéristiques structurelles de l'os trabéculaire ou de la forme des sinus qui lui confèrent une sorte d'unicité. Des comparaisons entre des examens d'imageries radiographiques ou scanographiques *ante-mortem*, et d'autres réalisés sur certains os ou fragments osseux sont susceptibles d'établir une identité formelle de l'individu (Angyal & Derczy, 1998; Kahana & Hiss, 1997; Mayne Correia & Beattie, 2002). Nous avons précisé longuement les problèmes de conservation et de fragmentation relatifs aux os brûlés dans la première partie de cette discussion : nous n'y reviendrons pas ici.

### b) *Les recherches de la cause ou des mécanismes du décès*

---

La recherche de traumatismes osseux *peri-mortem* pouvant évoquer un mécanisme du décès suspect, autre que l'inhalation de fumée ou la carbonisation doit être systématique. Plusieurs auteurs ont analysé l'effet de la chaleur sur des lésions préalables (Alunni et al., 2018; Emanovsky et al., 2002; Herrmann & Bennett, 1999b; Kooi & Fairgrieve, 2013; Macoveciuc et al., 2017; Marciniak, 2009; Poppa et al., 2011, 2011; Robbins et al., 2015).

Herrmann & Bennett (1999b) ont notamment montré qu'il était possible de mettre en évidence les traumatismes par objets tranchants. En revanche cela n'était pas possible pour les traumatismes balistiques en raison de la trop grande fragmentation du squelette. Concernant les traumatismes contondants, il était nécessaire de pratiquer des reconstructions avant toute évaluation.

Vachirawongsakorn et al. (2022, 2023) ont montré à travers plusieurs études expérimentales sur les lésions par armes blanches, que l'identification de marques de coupes était possible malgré la crémation. Ces marques pouvaient réagir différemment selon l'intensité de la chaleur et les variables expérimentales.

Ces études sont très prometteuses quant à l'analyse lésionnelle des os brûlés, dans la recherche de l'intervention d'un tiers avant le processus de combustion, cependant, en pratique, il est souvent extrêmement difficile de distinguer les traumatismes thermiques des traumatismes

*peri-mortem*. Mata Tutor et al. (2021) ont réalisé une étude sur le taux de survie des marques d'outils après la crémation, ainsi qu'une analyse descriptive des variables pouvant influencer la survie. Ils ont analysé des lésions de machettes et de couteaux dentelés type couteau à pain au niveau de la cuisse, du genou de la cheville et du poignet. Les cadavres ont ensuite été incinérés dans un crématorium puis étudiés au laboratoire d'anthropologie de l'université de Madrid. Après crémation, ils ont visualisé seulement 13 % des lésions.

## C. Position, manipulations du corps, chronologie : l'intégration des données spatiales

---

Peu importe le contexte (accidentel, criminel ou autres), la phase de constatations sur les lieux après la découverte d'un cadavre est indispensable à toute enquête. Elle en est la pierre angulaire et en constitue généralement le point de départ. La mise au jour de restes humains impose la nécessité d'une « levée de corps ». Lorsque ces restes sont squelettisés, il est possible d'employer le terme de « levée de squelette » (Quatrehomme et al., 2015).

La levée de squelette classique, non brûlé, présente déjà quelques particularités. Le ramassage exhaustif de l'ensemble des os ou fragments d'os est capital, mais il est rarement suffisant. Il entraîne à coup sûr une perte d'informations. De même, si les données spatiales sont négligées. En effet, il est indispensable de pouvoir s'appuyer sur ces éléments afin de mieux comprendre l'organisation d'un assemblage osseux. Ils permettront de reconstituer les faits, les gestes associés et leur chronologie : le corps a-t-il été déplacé ? Modifié ? Y a-t-il eu des tentatives pour le dissimuler ? Des éléments extérieurs sont-ils venus perturber ou dégrader la scène ?

La réponse à ces questions implique un enregistrement des données sur place, précis et méthodique. Lorsque le squelette est dégradé ou dans le cas qui nous intéresse altéré par l'action du feu, cette entreprise se révèle bien plus complexe.

La levée de squelette, comme la fouille archéologique est un acte destructeur. La seule façon de conserver toutes les informations relevées sur le terrain est de les enregistrer de façon exhaustive.

Dans la littérature, plusieurs références orientent vers l'utilisation de techniques archéologiques pour procéder aux premières constatations et à la récupération des restes humains lors des levées de squelettes (Bass, 1987; Fairgrieve, 2008b; Morse et al., 1983; Skinner & Lazenby, 1983; Ubelaker, 1989). Fairgrieve (2008) y consacre même un chapitre entier de son ouvrage intitulé « *Forensic Cremation Recovery and Analysis* », en présentant des techniques de terrain adaptées à la découverte d'os brûlés en contexte médico-légal.

La présence sur le terrain d'un médecin légiste et/ou d'un anthropologue, formés à la reconnaissance de restes fragmentaires et brûlés est indispensable. Cependant, l'équipe d'identification (cellule d'investigation criminelle pour la gendarmerie ou identité judiciaire pour la police) devrait nécessairement posséder des notions concernant la récupération spécifique des os brûlés. Un partenariat est essentiel, entre le médecin légiste, l'anthropologue (s'il est présent), l'équipe d'identification et les enquêteurs. Un travail d'équipe, un examen approfondi des lieux et la présence d'un personnel expérimenté sont primordiaux dans le traitement de la scène. Particulièrement dans le cas où les fragments osseux apparaissent dispersés (Fairgrieve, 2008).

Des restes humains sont susceptibles d'être mis au jour dans de multiples contextes ou conditions : en surface, enterrés ou partiellement enterrés, dans l'eau, à l'intérieur d'une structure (bâtiment, voiture, train, avion) ... Chaque situation impose une stratégie de recherche et un protocole d'enregistrement adapté (Fairgrieve, 2008).

## 1. L'enregistrement sur le terrain : un prérequis nécessaire à l'analyse spatiale.

---

### a) *L'importance d'utiliser une méthodologie archéologique*

---

Les restes humains découverts en contexte archéologique n'ont pas toujours fait l'objet du même intérêt. Comme nous l'avons rapidement évoqué au chapitre précédent, jusqu'au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle, les tombes étaient vidées de leur contenu, sans méthode ou problématique spécifiques. Seuls l'architecture de la tombe et le mobilier d'accompagnement retenaient l'attention (Duday et al., 1990). Les recherches menées sur les nécropoles de Téviec et Hoëdic dans le Morbihan (Péquart et al., 1937; Péquart & Péquart, 1954) puis la fouille de l'hypogée II des Mournouards (Leroi-Gourhan et al., 1962) ont vu naître de nouvelles méthodes de fouilles et d'enregistrements, tournées vers un recueil exhaustif des données in situ.

En 1982, le colloque « *Anthropologie physique et archéologie. Méthodes d'étude des sépultures* » a été le théâtre de discussions méthodologiques qui ont marqué la naissance d'une nouvelle discipline : l'anthropologie de terrain. Elle rassemblait l'anthropologie biologique et l'archéologie (Duday & Masset, 1987). Elle sera plus tard nommée « archéothanatologie », terme permettant d'englober tout un vaste champ de problématiques (Boulestin & Duday, 2005) À partir de ce moment-là, de nouvelles méthodes et protocoles de fouilles ou d'études des sépultures, ont été mis en place. L'objectif était de replacer le cadavre au premier plan : « restituer l'attitude originelle du corps, l'agencement des pièces d'habillement, des éléments de parures et du mobilier »(Duday et al., 1990 : 29). Cette méthodologie se fondait sur une approche taphonomique, concept déjà bien connu de l'archéologie depuis le milieu des années 70 (Duday, 1975; Leclerc, 1979; Poplin, 1979). Elle consistait en « une approche dynamique des sépultures qui privilégie la reconstitution conjointe des gestes funéraires et des distorsions que les facteurs taphonomiques ont déterminées par rapport à l'agencement initial de la tombe » (Duday et al., 1990 : 30).

Les phénomènes taphonomiques sont en étroite relation avec la structure de la tombe elle-même et son fonctionnement. Ils résultent de multiples facteurs ayant trait à la décomposition des corps et l'intervention d'agents naturels dans la tombe (érosion, concrétion, altérations physico-chimiques, bioturbation). Ils doivent être identifiés et discutés car ils peuvent être à l'origine de nombreuses distorsions.

Actuellement, en contexte archéologique, les sépultures bénéficient d'un protocole de fouille et d'enregistrement stricts, qui permet de récolter sur le terrain toutes les informations essentielles à leur étude postérieure. L'ensemble de ces méthodes vise à mettre en évidence des gestes funéraires pouvant se rapporter à la fois aux pratiques préparatoires, sépulcrales et post sépulcrales (Duday et al., 1990).

L'approche archéo-anthropologie est pluridisciplinaire et s'appuie sur de nombreuses spécialités (analyses isotopiques, paléogénétiques, paléopathologiques, entomologiques, paléoparasitologiques...) qui viennent enrichir les connaissances du contexte culturel et les problématiques propres (Schmitt & Bizot, 2016).

Les questions que se posent les archéologues ou les anthropologues avant d'aborder un site, ne sont pas si éloignées de celles que peuvent se poser des enquêteurs face à la découverte de restes humains : quels sont les éléments à l'origine de cet assemblage, qui le constitue ? Quels sont les gestes qui ont pu y conduire ? Quelle en est la chronologie ?

Par ailleurs, les questions d'ordre taphonomique, sont également communes aux deux disciplines.

Finalement, seule la notion temporelle est différente. L'archéologie pourrait être considérée comme une enquête à grande échelle, avec un délai beaucoup plus long entre les faits et leur découverte. Ce laps de temps, très long dans un contexte archéologique, plus ou moins long en contexte médico-légal, est marqué par un risque élevé de perte ou d'altération de l'information. Dans ce contexte, il semble opportun d'emprunter des méthodes qui ont fait leurs preuves pour reconstituer des faits datant de plusieurs centaines, voire plusieurs milliers d'années afin d'analyser des scènes actuelles.

De plus, en contexte médico-légal, les restes humains sont susceptibles d'être découverts dans une grande variété de contextes ou d'états de conservation. Un enregistrement précis des données relatives aux fragments humains et à l'environnement doit nécessairement être réalisé et ceci dans les trois plans de l'espace afin de mieux comprendre l'organisation de la scène de découverte. Les méthodes utilisées lors de fouilles archéologiques sont particulièrement bien adaptées à cette problématique (Bass & Birkby, 1978; Dirkmaat & Adovasio, 1997; Dirkmaat & Cabo, 2012; Haglund, 2001; Morse et al., 1976; Owsley, 1993; Tuller, 2006). Les restes incinérés provenant de contextes archéologiques étant probablement les plus complexes à analyser, la mise en œuvre de protocoles bioarchéologiques sur les scènes de morts médico-légales ou d'identification de squelettes, constitue l'une des avancées récentes les plus essentielles en anthropologie médico-légale (Symes et al., 2015).

#### b) La levée de squelettes ayant subi un processus de combustion

Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, en médecine légale comme en archéologie, l'étude des restes humains commence sur le terrain, avec un décapage soigneux et un enregistrement exhaustif des données. Elle conditionnera la validité des analyses futures. En archéothanatologie cette étape est la seule susceptible de mener à une interprétation globale des pratiques funéraires (Duday, 1978, 1987a, 1987b; Duday et al., 1990; Masset, 1987). Il n'est généralement pas possible de retrouver ces informations *a posteriori* lorsqu'elles n'ont pas été recueillies sur le terrain. Dans ces conditions, la compréhension générale des sépultures reste alors limitée (Duday, 1990).

La levée de squelette médico-légale répond aux mêmes attentes. Elle peut parfois s'avérer difficile, principalement lorsque les os sont altérés par des processus post dépositionnels. De même, les restes brûlés sont souvent fragmentés et fragiles. Un grand soin doit être apporté à cette étape. Nous rappelons, qu'il n'est pas possible de faire disparaître entièrement un corps à l'aide du feu. Même dans un espace confiné ou au cours d'incendies intenses avec l'utilisation d'accélérateurs (Bass, 1984; Fairgrieve, 2008b; Quatrehomme et al., 2015).

De façon générale, les enquêteurs procèdent toujours à une première inspection visuelle. Il est bien entendu que cette étape doit avoir lieu après la mise en sécurité du site, si l'incendie est récent. La phase de récupération des restes humains pourra ensuite être réalisée dans des conditions de sécurité optimales, avec des équipements de protection individuels (casques, bottes de sécurité, protection oculaire et pulmonaire) si nécessaire.

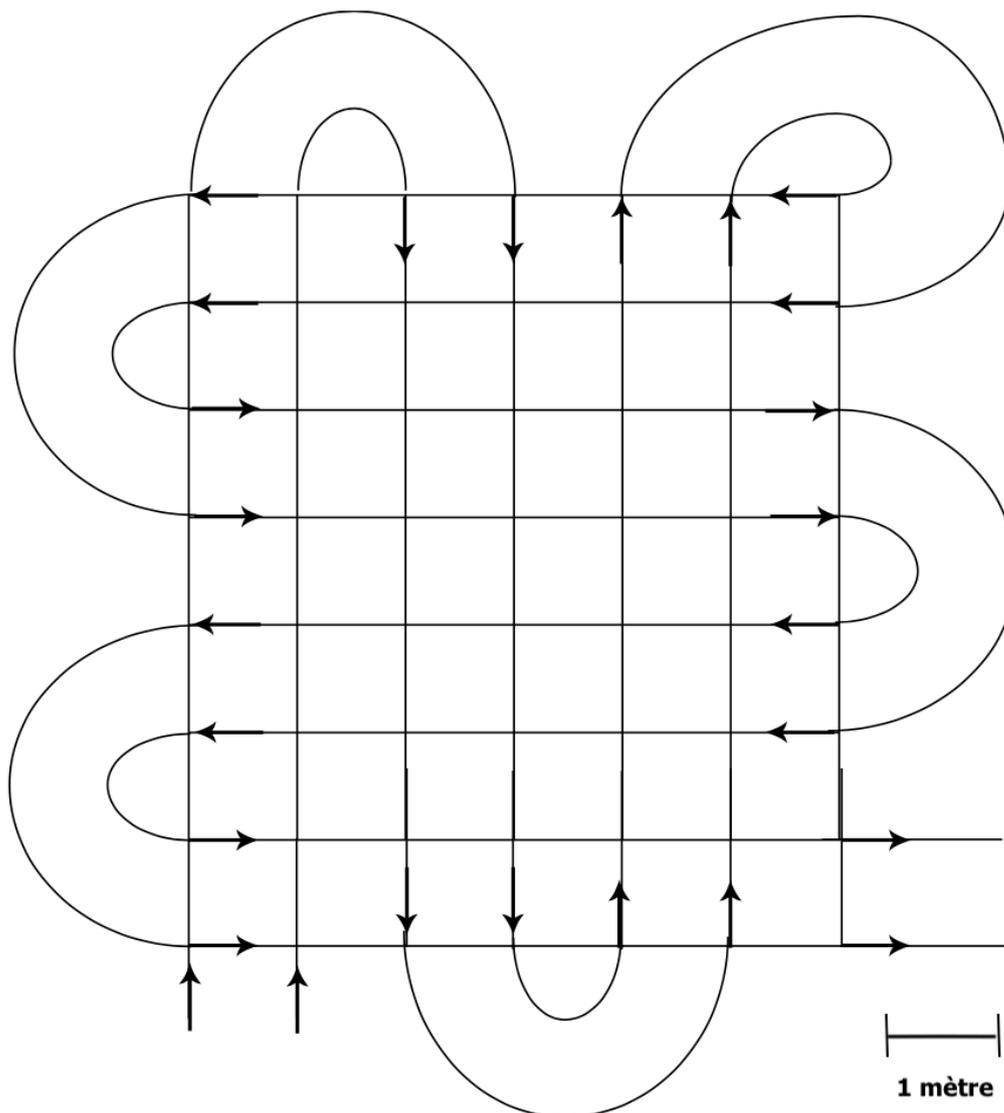
En parallèle, il semble important de pouvoir échanger avec les pompiers afin d'être capable d'identifier les perturbations qui incombent à l'extinction de l'incendie et à la mise en sécurité du site pour ne pas les interpréter à tort.

La récupération des restes humains pourra se faire sur des espaces très restreints (fragments placés dans un contenant à la suite d'une tentative de dissimulation par exemple) ou à l'opposé être disséminés sur de grandes surfaces. Lorsque les restes humains sont retrouvés en milieu clos (bâtiment, structure quelconque, véhicule) la fouille pourra être réalisée sur le terrain ou directement en laboratoire avec un prélèvement monobloc. Cette technique a pu être utilisée en archéologie dans le cadre de la fouille des urnes funéraires (Grévin, 1990). Dans ce contexte, il sera indispensable d'enregistrer au préalable l'ensemble des données correspondant à la fois à l'assemblage osseux et à l'environnement immédiat. L'assemblage devra être cartographié précisément dans les trois plans de l'espace. Des relevés topographiques avec l'aide d'une station totale (ou tachéomètre)<sup>26</sup> sont conseillés, le cas échéant, une couverture photographique précise devra être réalisée. Les données relatives à l'environnement immédiat sont aussi très importantes (nature du terrain, existence ou non de creusement, relevé des objets pertinents autour de l'assemblage osseux...). Il est nécessaire de relever et cartographier tout élément potentiel de preuve ou d'incohérence. L'assistance de spécialistes (morphoanalystes de traces, analystes en scène de crimes, experts incendie...) est conseillée à ce stade des investigations.

En extérieur, il peut arriver que les restes soient dispersés et qu'une grande surface doive être fouillée. Dans ce contexte et en raison des contraintes de temps, il peut être nécessaire pour une première visualisation des zones spécifiques à fouiller de faire appel à plusieurs enquêteurs. La réalisation d'un schéma de recherche en grille est préconisée par Fairgrieve (2008), elle nécessite le concours d'au moins deux enquêteurs (figure 152). Cette technique implique la participation de personnes qui soient capables de reconnaître l'os. Cette étape est souvent difficile en présence d'os brûlés. L'inspection visuelle, est dépendante de l'expérience et de l'expertise de chacun (Fairgrieve, 2008). Il faut être capable de distinguer l'os des matériaux de construction ou d'autres objets altérés par le feu, mais aussi de restes d'animaux. Des restes de faune peuvent se retrouver mélangés aux fragments humains dans de multiples contextes : animaux domestiques ou sauvages pris au piège d'un incendie, résidus de boucherie mélangés intentionnellement à des fins de dissimulation, trophées de chasses présents dans des habitations... Fairgrieve (2008) évoque aussi la possibilité du recours à des chiens qualifiés dans la recherche de cadavres brûlés, pouvant couvrir une zone plus vaste en un temps réduit.

---

<sup>26</sup> Une station totale est un théodolite couplé à un distancemètre. Elle permet de mesurer les angles verticaux, horizontaux et les distances.



**Figure 152 : représentation schématique d'une grille de recherche montrant comment une zone est parcourue deux fois et à des approches différentes par deux enquêteurs. Chaque enquêteur est symbolisé par une flèche. Les flèches indiquent la direction du déplacement de chaque chercheur dans son secteur respectif. L'espace entre les deux enquêteurs est d'environ un mètre. (dessin de S. Fairgrieve ; Fairgrieve et al., 2008).**

Si l'on envisage de réaliser une analyse spatiale, la mise au jour de l'ensemble des fragments est obligatoire. Chaque assemblage osseux devra être repéré au fur et à mesure. Une fois les différents assemblages de restes humains détectés, la récupération pourra se faire avec des méthodes de fouilles traditionnelles (utilisation de carroyage ou station totale) et un enregistrement dans les trois plans de l'espace avant la récupération. Lors de cette étape, il faudra prêter une attention particulière à la recherche des connexions anatomiques et les documenter en réalisant une couverture photographique exhaustive.

Lorsqu'un corps brûle de manière « naturelle », c'est-à-dire sans intervention humaine, les éléments squelettiques doivent respecter un ordre anatomique. Si tel n'est pas le cas, il faut suspecter des processus de perturbations secondaires. Ils peuvent soit être liés à l'environnement, soit correspondre à une intervention humaine. Dans ce cas, ils seront hautement suspects. La présence d'un médecin légiste ou d'un anthropologue formé aux

techniques développées pour l'archéothanatologie est indispensable à cette étape. Dans un contexte de carbonisation, il est essentiel que les personnes qui se chargent de la récupération des os soient expérimentées afin de pratiquer une récupération exhaustive. Dans le cas contraire, la probabilité d'ignorer certains restes est augmentée (Fairgrieve, 2008). Lors de la récupération, les fragments osseux doivent être conditionnés par carré (si fouille à l'aide d'un carroyage) et par passe de 2 à 3 cm afin de faciliter l'analyse stratigraphique et spatiale. Par ailleurs, il ne faut pas ignorer la possibilité de restes mélangés appartenant à plusieurs individus. Stratton & Beattie (1999) décrivent l'exemple d'une catastrophe ferroviaire survenue au Canada dans les années 1980, impliquant de multiples victimes. Sur le terrain un premier pré-tri par individu peut être réalisé. Il est parfois plus facile de distinguer les individus in situ que lors de l'analyse en laboratoires si tous les fragments ont été ramassés de façon aléatoire et mélangés. La récupération des fragments doit être minutieuse et délicate, afin d'éviter une fragmentation secondaire. Les fragments d'os brûlés sont par définition très fragiles et doivent être conditionnés avec le plus grand soin (éviter par exemple les empilements de contenants souples) afin de limiter au maximum les risques de fragmentation secondaire. Ce même soin doit également être apporté lors du transport des fragments jusqu'à l'institut médico-légal ou vers le laboratoire chargé de réaliser l'analyse. Il est important de limiter au maximum la re-fragmentation pour permettre la détermination anatomique et l'analyse biologique. Elles sont toutes deux conditionnées par l'observation morphologique.

De façon concomitante, il sera toujours intéressant de procéder aux prélèvements habituellement réalisés lors d'une levée de corps. Selon la position du cadavre, des tissus mous peuvent persister malgré la carbonisation. Si la découverte du corps n'est pas immédiate, il se peut que des larves de diptères se nourrissent de ces tissus mous restant. Il conviendra de les prélever selon les protocoles habituels, à des fins d'analyse entomologique.

Enfin, un tamisage des sédiments provenant des couches de prélèvement du matériel osseux permettra de récupérer tous les petits éléments (fragments osseux, dentaires, éléments balistiques ...) qui auraient pu passer inaperçus lors de la phase de récupération des os.

Un protocole d'enregistrement strict sur le terrain et un ramassage exhaustif permettront d'évaluer la représentation squelettique et le degré de fragmentation à partir de la masse et du nombre de fragments. Il permettra également d'identifier des biais dans la représentation des différentes régions anatomiques et de comprendre l'organisation spatiale des assemblages (Duday et al., 2000, 2009).

## 2. L'examen du squelette : analyses pondérales et spatiales

---

Si les restes humains ont été prélevés en bloc, la première étape sera la fouille. Elle sera réalisée au laboratoire, selon les mêmes techniques que sur le terrain. Il s'agira alors plutôt d'une « micro-fouille » qui permettra de dégager précautionneusement les restes osseux. Le dégagement devra s'effectuer par couche de faible épaisseur. Les connexions anatomiques devront être repérées et il conviendra de procéder au fur et à mesure à un enregistrement

photographique. La réalisation d'une imagerie scanner au préalable est possible, mais elle ne remplacera ni la fouille, ni l'enregistrement. De même que sur le terrain, un pré-triage par individu et par région anatomique est important. La présence et la position d'objets ou d'éléments de preuves annexes devront également être enregistrées.

L'analyse anthropologique pourra débuter une fois ces étapes terminées. Notre étude a montré que l'obtention de résultats était conditionnée à la fois par un prélèvement exhaustif des fragments osseux et par un travail d'identification précis.

Le processus de récupération doit être exhaustif, il doit également prendre en compte tous les besoins possibles à la réalisation d'analyses ultérieures. Toutes les précautions doivent donc être prises afin d'éviter la destruction ou la contamination des éléments de preuves. Cette étape est essentielle. L'identification d'un maximum de fragments est ensuite nécessaire pour mettre en évidence des individus surnuméraires et donc estimer le nombre minimum d'individus. Elle permet également d'évaluer si le squelette est complet, en estimant le taux de représentation de chaque région anatomique et joue un rôle capital dans l'identification biologique du squelette, conditionnée par l'analyse de certains fragments particuliers (cf. section A.5).

Enfin, une phase de détermination la plus précise possible est nécessaire pour réaliser une analyse spatiale des fragments. C'est elle qui permettra éventuellement d'indiquer si le corps a été manipulé après la combustion. Là encore même si les objectifs sont différents (en archéologie il s'agira de comprendre des rituels funéraires alors que dans un contexte médico-légal l'objectif sera de reconstituer des événements qui ont pu produire un tel assemblage), l'emprunt des techniques archéologiques fournira de précieuses informations sur la reconstitution des gestes.

#### *a) Analyse pondérale : la représentation anatomique et l'analyse de la distribution verticale*

---

Pour chacun des individus identifiés, la proportion de chaque région anatomique doit être documentée par rapport au poids total du squelette. Depierre (2013), dans son ouvrage décrit plusieurs études, dans différents contextes, qui résument les variations connues du poids du squelette. Cela permet d'évaluer si chaque région est représentée de façon homogène ou s'il existe un biais. Les indices de poids sont différents pour les enfants et doivent être adaptés en conséquence (Trotter & Hixon, 1974).

Les analyses menées par Trotter & Peterson (1955, 1962) et André et al. (2015) ont pu montrer que les variations de poids générées par la chaleur exerçaient une influence minime sur les proportions des différentes régions anatomiques et leurs interprétations. Des feuilles de calculs proposées par Duday et al. (2000) permettent de générer des graphiques directement à partir de la fiche d'enregistrement et de les comparer aux valeurs de références. Elles permettent par exemple, de connaître la distribution anatomique des fragments à l'intérieur d'une passe de prélèvement. Bien entendu ces données sont conditionnées par la nécessité de fouiller les assemblages osseux par passes successives (Duday, 2019; Duday et al., 2000; Grévin, 1990).

Les informations que nous apportent ces données sur l'organisation anatomique et la distribution des fragments concernent la mise en évidence de gestes de manipulation du corps pendant et/ou après la phase de combustion. Nous avons évoqué précédemment le fait que la combustion, si elle n'était pas entretenue, n'entraînait pas de réelle modification de l'organisation du squelette. Un assemblage osseux dont l'organisation semble perturbée doit être analysé de façon à mettre en évidence des gestes ou manipulations (collecte, rassemblement des fragments) ou tenter de déterminer la position du corps avant l'acte de combustion. En contexte archéologique, ces données ont grandement fait leurs preuves quant à l'identification de différents gestes de collecte sur le bûcher. À Porta Nocera à Pompéi par exemple, plusieurs profils de collecte des ossements sur le bûcher ont été identifiés, en fonction de l'analyse de la distribution verticale des fragments au sein des urnes (Van Andringa et al., 2013).

### *b) Représentation anatomique : la mise en évidence de structures dédiées*

---

Les données de la représentation anatomique des fragments, peuvent aider à distinguer différents types d'assemblage osseux, afin d'être capable par exemple de dire si le corps a été brûlé sur place ou si les fragments sont en position secondaire (déplacés après le processus de combustion). Ce type d'information est important sur le plan médico-légal.

Duday dans Van Andringa et al. (2013) a montré à travers ses analyses, qu'il existait à Porta Nocera une différence significative dans la représentation anatomique de certains éléments en fonction du type de structure étudiée. Dans les aires de crémation, le taux de représentation des dents, des os du carpe, des métacarpiens et des phalanges des mains et des pieds est particulièrement élevé, alors que les os des pieds par exemple ont un indice de représentation plus faible. L'explication de cette différence tient à un processus simple de réaction du corps à la chaleur. Lors de la combustion, on observe une atteinte différentielle des régions anatomiques (Symes et al., 2015). Les phalanges sont les os qui se détachent le plus rapidement en raison de la pauvreté en tissu mou des mains (déshydratation très rapide). Lorsqu'elles se détachent, elles sont rapidement recouvertes par les cendres. Si le corps est ensuite déplacé, ces os ne seront plus visibles et resteront souvent sur place. Les dents répondent au même schéma, mais les os des pieds, beaucoup plus volumineux, seront préférentiellement collectés (Van Andringa et al., 2013). L'analyse des tombes de Porta Nocera a mis en évidence à plusieurs reprises la présence des os les plus volumineux dans l'urne et des résidus de curages du bûcher dans la fosse de creusement de l'urne. L'étude de ces résidus, montrait un taux de représentation anatomique des dents ou des os des mains plus élevé que dans l'urne elle-même.

### (1) La recherche d'exclusions pour l'estimation du NMI

La première question que l'on peut se poser face à un assemblage de fragments osseux sans organisation visuellement identifiable est celle du nombre d'individus. S'il y a plusieurs individus, comment les distinguer ?

Il semble utopique de vouloir réaliser des analyses génétiques sur chaque fragment, ce d'autant que nous avons précisé à plusieurs reprises les difficultés qu'engendraient l'exposition à des températures supérieures à 600°C pour l'analyse ADN (Walker et al., 2008).

L'utilisation des données pondérales a également été évoquée pour mettre en évidence un individu surnuméraire (ou un dépôt incomplet). Le poids moyen d'un squelette brûlé a été examiné dans plusieurs études expérimentales au sein de crématoriums (Bass & Jantz, 2004; Depierre, 2010, 2013; May, 2011; Van Deest et al., 2011). Le postulat est simple : une masse de cendre trop élevée comparée aux données de la littérature devrait systématiquement faire suspecter la présence d'un individu supplémentaire. De même, la présence d'une masse de cendre trop faible devrait orienter vers un dépôt partiel et donc faire rechercher des manipulations sur le corps. Cependant, Duday (2019) a montré que ces données n'étaient pas toujours fiables et pouvaient être influencées par divers facteurs. Certaines atteintes pathologiques (maladie ostéo-condensantes ou déminéralisation du squelette) ou des processus taphonomiques sont susceptibles de modifier sensiblement la masse osseuse.

À Pompéi par exemple, il existe des tombes d'adultes caractérisées par une faible masse alors que les indices pondéraux des régions anatomiques sont équilibrés et conformes aux valeurs de références. Ces tombes correspondent la plupart du temps à des sujets âgés de sexe féminin. Cette faible masse a été mise en relation avec des phénomènes de déminéralisation ostéoporotique. À l'inverse à Cumes, il a été mis en évidence plusieurs sujets dont la masse du squelette était beaucoup plus importante et pouvait être en relation avec une ostéopétrose consécutive à une intoxication au fluor (Duday, 2019 ; Orellana-González et al., 2021).

Pour s'assurer de la fiabilité des données pondérales, il est nécessaire d'évaluer de façon concomitante le taux de représentation de chaque région anatomique et de vérifier s'il est bien équilibré. Même alors, des erreurs sont toujours possibles.

La seule méthode permettant d'objectiver avec certitude la présence d'un ou plusieurs individus supplémentaires consiste à analyser les fragments osseux de façon systématique à la recherche d'exclusions anatomiques. Comme nous l'avons détaillé précédemment, il peut s'agir de la mise en évidence de doublets (*a minima*) ou de critères d'incompatibilités (croissance / stade de maturation (figure 153), pathologie, critères taphonomiques ou analyse des stigmates de combustion par exemple).



Figure 153 : incompatibilité d'âge entre deux fémurs de la tombe 15, Enclos 23-25 US 23116 et US 23114.

## (2) L'apport des liaisons ostéologiques

Il existe plusieurs types de liaisons ostéologiques. Les liaisons de premier ordre correspondent aux connexions anatomiques observées lors de la fouille, qu'elle soit réalisée *in situ* ou en laboratoire (Duday, 1987a). Dans un contexte de carbonisation, où les restes sont très fragmentés et souvent disloqués, elles sont rares mais subsistent parfois. Elles peuvent même exister après que les os ont été collectés sur le bûcher. Nous avons pu observer de tels exemples lors de la fouille des urnes de Carthage, qui sont pourtant des dépôts secondaires (figure 154). Les liaisons ostéologiques de second ordre, visent au sein d'un ou différents assemblages à mettre en évidence des fragments qui se rapportent à un même individu et qui sont pourtant physiquement séparés. Elles ne correspondent pas forcément à une logique anatomique. La recherche systématique de ce type de liaisons est le meilleur moyen pour comprendre l'organisation d'un assemblage et les phénomènes de dispersions des fragments osseux (André et al., 2015; Duday, 2019a).

Le type de liaisons à rechercher concerne :

- les collages de fragments jointifs,
- les appariements d'os symétriques,
- la mise en évidence de contiguïtés articulaires (sutures crâniennes, jonction sacro-iliaque...)
- la mise en évidence d'éléments de concordances spécifiques tels que :
  - o l'identité de sexe,

- la correspondance des critères de maturation osseuse,
- la similitude des critères de robustesse,
- l'appartenance à un même ensemble pathologique,
- la correspondance des stigmates de crémation,
- la correspondance des stigmates taphonomiques.

Toutes les liaisons anatomiques ne présentent pas forcément le même degré de fiabilité. Les collages de fragments jointifs sont considérés comme les plus fiables, viennent ensuite les symétries, l'appartenance à un même ensemble pathologique et l'identité du stade de maturation. Les liaisons par contiguïté articulaire ou la similitude des critères de robustesse ont pu être utilisés parfois, mais leur fiabilité est moindre, particulièrement dans un contexte de carbonisation en raison des modifications induites par la chaleur (Duday, 2019 ; Villena Mota et al., 1996).



Figure 154 : 4ème et 5ème métatarsiens droits en connexion anatomique stricte. Urne 497, Carthage. Cliché H. Duday

À ce jour, la recherche systématique des liaisons ostéologiques est encore assez peu répandue dans un contexte médico-légal. L'analyse anthropologique de restes humains brûlés se limite généralement aux critères principaux d'identifications et à la recherche de signes (pathologiques ou traumatiques) pouvant nous orienter vers les causes ou le mécanisme du décès. Or, il existe une réelle plus-value de la recherche des liaisons anatomiques dans la compréhension des gestes et la reconstitution de l'histoire et la chronologie d'un assemblage osseux. Elles peuvent établir un lien entre deux (ou plusieurs) assemblages osseux séparés physiquement et/ou appartenant à deux structures distinctes. Elles objectivent de façon certaine un acte de manipulation du corps ou de parties du corps après la combustion et offrent des indications sur une éventuelle séquence chronologique.

De façon générale, qu'il s'agisse d'os brûlés ou non, ces analyses sont toujours très informatives. Concernant la nature du matériel, la seule différence réside dans le type d'os ou de fragments d'os susceptibles d'apporter la plus grande quantité d'informations. Duday et al. (1990) précisait dans son article sur les os non brûlés, que les types d'os qui offraient les meilleurs scores d'appariement étaient les patellas et les petits os des extrémités (carpe, tarse, métatarsien et

métacarpien). Pour les os brûlés, les fragments d'intérêt ont été clairement listés dans les tableaux 33 et 34.

### (3) L'observation des stigmates de combustion

Les stigmates de la combustion sont intéressants à connaître et à savoir identifier. Il est important de savoir distinguer les lésions imputables à la chaleur, des lésions traumatiques *peri-mortem* et des modifications d'ordre taphonomique. De plus, l'étude de la distribution des couleurs, du type de fracturation, l'examen des déformations peut également aider à reconstituer les gestes mis en œuvre autour de la combustion du corps. Elle pourrait également fournir des informations sur les processus post dépositionnels (Duday et al., 2000; Naji et al., 2014; Weitzel & McKenzie, 2008). Il est possible à l'aide de ces marqueurs, de documenter certains paramètres tels que le type de combustible utilisé, l'oxydant, l'état de décomposition du (ou des) cadavre(s) avant le processus de combustion (cadavre frais ou déjà squelettisé), l'intensité et la dynamique de combustion, ainsi que le traitement et la gestion du feu (De Becdelievre et al., 2015, 2016).

Bien que les critères d'identification soient les premiers et les principaux éléments à rechercher lors de l'analyse d'un assemblage de fragments d'os brûlés, s'accorder du temps pour mettre en évidence les liaisons anatomiques peut constituer un apport non négligeable pour la suite de l'enquête. Nous allons montrer à partir de plusieurs exemples concrets issus des analyses réalisées par Henri Duday à Porta Nocera, à Santa Rosa et à Carthage les apports de l'analyse des liaisons et des exclusions dans la compréhension d'un assemblage osseux.

### 3. L'apport de la recherche des liaisons ostéologiques à partir de trois exemples précis

---

L'ensemble des données présentées ici est issu de l'analyse des relations ostéologiques réalisées par Henri Duday. Certaines données proviennent de résultats ayant déjà été publiés notamment pour le site de Santa Rosa (Duday et al. 2013) d'autres éléments concernant Porta Nocera et Carthage proviennent d'observations encore inédites.

#### a) Exemple de l'enclos 1F à Porta Nocera

---

À Porta Nocera, la fouille de multiples structures dans ce contexte de faible perturbation des niveaux archéologiques, a offert l'opportunité, de mettre en évidence l'ensemble des opérations qui intervenaient au cours de la crémation. Ces questionnements sur la gestion du corps se rapprochent énormément des questions auxquelles un médecin légiste est amené à répondre

dans les cas de carbonisation : le corps a-t-il été brûlé à l'endroit où il a été découvert ? a-t-il été déplacé ? le foyer d'incendie a-t-il été entretenu ? le corps a-t-il été mobilisé après la combustion ?

L'enclos 1F de Porta Nocera fait partie de la zone B (Porta Nocera Est). Sa fouille a débuté en 2015 et s'est terminée en 2019. L'ouverture du secteur B était motivée par la volonté de comparer une zone funéraire proche des portes de la ville et des tombes de l'aristocratie locale et une zone plus éloignée de l'espace urbain en relation avec une route fréquentée (Van Andringa et al., 2015) ainsi que de mieux comprendre les stratégies funéraires de groupes familiaux autour d'un changement d'ère. Elle concerne un ensemble d'enclos mis au jour en 1983, de part et d'autre de la route. L'enclos 1 F ou enclos des Veranii est situé au nord de la route.

Les différentes structures prises en compte au sein de cet enclos sont les tombes SP 1, SP 2, SP 3 et SP 3bis, SP 4, SP 5, SP 6, SP 7, SP 8, SP 9, SP 10 (absence de restes osseux, possible cénotaphe ?), SP 11, SP 13, SP 12 (inhumation), SP 16 et SP 17 ; les structures ST 14 et ST 15, les aires de crémations AC 603 et AC 615 et l'assemblage 1F-19<sup>27</sup>.

Parmi ces ensembles, la tombe SP 12 avait été exclue de notre étude, s'agissant d'une inhumation.

## (1) Relations établies

Au sein des 18 ensembles ayant révélé des os brûlés, tous les types de liaisons évoqués précédemment ont été recherchés : collages, symétries, concordances et contiguïtés. Elles ont été cotées selon leur degré de fiabilité de 1 à 3 :

- 1, liaison probable ;
- 2, liaison très probable ;
- 3 liaison certaine.

Dans le secteur 1F un type de liaison supplémentaire, que nous n'avions jamais évoquée jusqu'ici a été recherché. Il s'agit de « l'exclusion de toutes les autres possibilités ». Par définition les relations d'exclusions excluent la relation entre deux pièces osseuses. Cependant, si le nombre de sujets dans un ensemble est connu, et qu'un fragment est incompatible avec tous les individus à l'exception d'un seul, il est alors très probable que ce fragment lui appartienne. Henri Duday, dans l'étude du secteur 1F a pu exploiter cette relation d'exclusion au même titre que les liaisons classiques<sup>28</sup>.

---

<sup>27</sup> Au départ l'assemblage 1F-19 était considéré comme une tombe recoupée par le creusement de la tombe 1F-3 d'un prolongement du contenu de 1F-3 résultant d'un processus taphonomique (infiltration d'eau).

<sup>28</sup> À noter que cette méthode n'a été utilisée que pour les individus de taille adulte.

Dans les différents ensembles de 1F, 72 relations de liaisons ont été mises en évidence :

- 37 liaisons par « collages » ou « collages multiples » ;
- 13 relations de « symétries » ;
- 9 liaisons ont été réalisées par une « exclusion de toutes les autres possibilités » ;
- 1 relation de contiguïté articulaire ;
- 12 relations de « concordances » parmi lesquelles sont retrouvées :
  - ⇒ **Les concordances du mode de crémation** (relation entre la tombe **1F-3** US 3126 R6 bis, C4, 3128...et **1F-4** US 6308.14, dans le comblement de fosse 1F-4). La relation de concordance est réalisée sur l'observation de l'identité du mode de crémation (en lunules) sur plusieurs fragments de diaphyse d'un probable humérus.
  - ⇒ **Les concordances d'âges** (relation entre la tombe **1F-5** US6171 R3 et l'aire de crémation **AC 615** US 6599 B5). La concordance est réalisée sur l'observation de l'identité du stade de sénescence à partir de l'observation d'une ossification du premier cartilage costo-sternal sur deux fragments.
  - ⇒ **Les concordances morphologiques** : ces relations de concordances sont réalisées à partir de critères d'identités de formes, de robustesses ou de dimensions :
    - relations entre la tombe **1F-6** (US 6032 R6, 6022 Rn) et l'aire de crémation **AC 615** (US 6597 A et E) → **identité morphologique** de la section de la diaphyse tibiale à hauteur de la tubérosité ;
    - relations entre les tombes **1F-14** (US 6403 B1R4) et **1F-4** (US 6315 R3) → **concordance de robustesse** entre l'épiphyse distale de l'ulna non soudée et la partie distale de la diaphyse de l'ulna non soudée ;
    - relations entre la structure ST-14 (US 6403 A2 R3, B1 R4) et **1F-4** (US6308 R4 et R6) → **identité de dimensions des fragments** de clavicule ;
    - relations entre la structure 1F-19 (US6369 R1 S) et la tombe **1F-3** (US 3126 R6 C3) → **concordance de robustesse** entre deux os de la main droite : le triquetrum et le lunatum ;
    - relations entre la structure **ST 618** (US6573) et la tombe **1F-16** (US6561 R13 C) → **concordance de robustesse** entre deux os de la main droite scaphoïde et lunatum.
  - ⇒ **Les concordances pathologiques** :
    - relations entre les tombes **1F-14** (US 6403 B2 R4) et **1F-4** (US 6315 R3) même ensemble pathologique sur deux corps de vertèbres thoraciques ;
    - relations entre l'assemblage **1F-19** (US6369 R1 Sud et nettoyage) et **1F-3 (1)** → Deux fragments d'os frontal présentant une hyperostose frontale interne ;

- relation entre la structure ST 618 (US6573) et la tombe **1F-16** (US6561 R13 C) → concordance pathologique : liseré d'ossification de la capsule articulaire entre le scaphoïde et le lunatum droit.

⇒ **Les concordances d'aspect macroscopique :**

- relations entre la tombe **1F-6** (US 6022 R12) et l'aire de crémation **AC 615** (US 6599 C3) similitude d'aspect entre la base d'un troisième métatarsien gauche et la base d'un deuxième métatarsien droit.

Parfois plusieurs niveaux de liaisons pouvaient coexister :

- « **collages** » et « **concordances** » : plusieurs collages ont été réalisés sur des os frontaux porteurs d'une hyperostose frontale interne par exemple. Cette identité pathologique fait de l'os frontal porteur d'un HFI un fragment très facilement identifiable et très informatif ;
- « **concordances** » et « **exclusions de toutes les autres possibilités** » : exemple de la relation entre la structure 1F-14 (US 6403 C2 R3) et la tombe 1F-8 (US 3087 R3) deux arcs de vertèbres thoraciques qui présentent le même stade de maturation, par ailleurs ce fragment est également incompatible avec l'ensemble des autres individus ;
- « **exclusions de toutes les autres possibilités** » et « **symétries** » : exemple de la relation de symétrie probable entre le fragment de la partie pétreuse de l'os temporal gauche de la structure 1F-14 (US 6403 A1 R2) et le pétreux droit de la tombe 1F-16 (US 6561 R6 D). Le fragment de pétreux gauche était incompatible avec toutes les autres structures étudiées dans cet enclos.

De plus, sur le plan spatial il a été mis en évidence différents niveaux de liaisons<sup>29</sup> au sein des ensembles du secteur 1F.

- **Les liaisons que nous nommerons « internes »**

Elles concernent des liaisons réalisées entre deux (ou plus) unités stratigraphiques d'un même ensemble. Deux situations peuvent se retrouver :

⇒ **Liaisons entre le contenu d'une urne et les restes osseux présents dans les cendres contenues dans la fosse : le cas de SP 1F-16.**

Plusieurs liaisons ont pu être établies entre le contenu de l'urne SP 1F-6 (US 6032) et les cendres déversées dans de la fosse (US 6022) :

- collages multiples pour la mandibule ;
- symétries pétreux droit et gauche ;
- processus zygomatique droit de l'os frontal et le processus frontal de l'os zygomatique droit ;

<sup>29</sup> À ne pas confondre avec les niveaux de fiabilité évoqués plus haut.

- collage de deux fragments d'un premier métatarsien.

*Conclusions : les cendres déversées dans la fosse SP 1F-6 proviennent de façon certaine du bûcher sur lequel a été brûlé le sujet.*

⇒ **Liaisons entre deux unités stratigraphiques du comblement d'une même fosse.**

Deux cas de ce type de liaison ont été retrouvés et concernent :

- la fosse de la SP 1F-9 → collage de deux fragments du temporal droit (US 6038 et US 6051 R2) ;
- la fosse de la tombe SP 1F-11 → collage de deux fragments jointifs de mandibule (US 6018 et US 6001).

– **Les liaisons que nous nommerons « externes ».**

Ces relations concernent deux ensembles physiquement séparés. Plusieurs cas peuvent se présenter :

⇒ **liaisons entre deux tombes** (plusieurs liaisons de ce type existent au sein de l'enclos 1F) :

- tombes SP 1F-6 et SP 1F-17 : dans SP 1 F-6 il existait un fragment de basi-occipital d'adulte incompatible avec les autres fragments de la base du crâne de 1F-6 en revanche un collage certain a pu être établi avec un morceau du corps du sphénoïde de la tombe 1F -17 ;

*Conclusions : les individus de la SP 1F-6 et 1F-17 ont probablement été brûlés au même endroit.*

- tombes SP 1F-5 et SP 1F-1 : un fragment de la partie postérieure de la masse latérale droite de l'atlas de SP 1F-5 qu'il a été possible de recoller sur l'atlas de la SP 1F-1 ;

*Conclusions : les individus de la SP 1F-1 et 1F-5 ont probablement été brûlés au même endroit.*

- collage entre le processus styloïde du temporal trouvé dans les cendres déversées dans la fosse SP 1F-13 (9,1 g d'os brûlés) et le temporal gauche de la SP 1F-17 (figure 155).

*Conclusions : les cendres provenant de la fosse 1F-13 correspondent à l'individu présent dans la tombe 1F-7. Les deux tombes 1F-13 et 1F-7 contiennent les os du même défunt.*

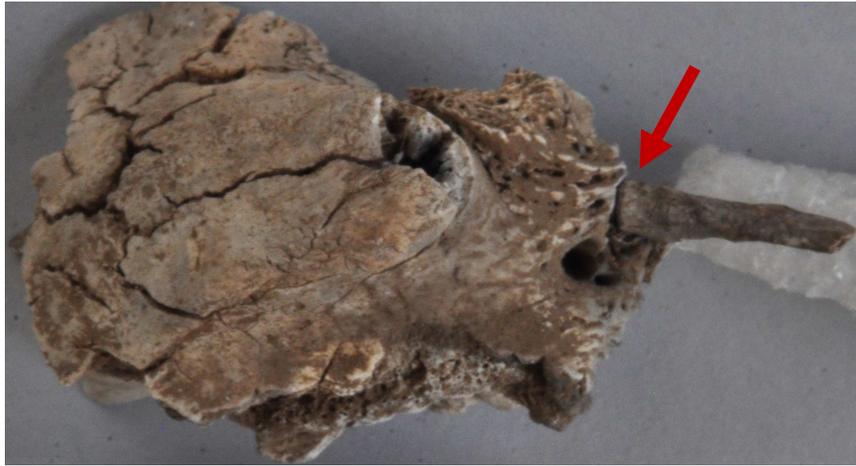


Figure 155 : collage entre le processus styloïde du temporal retrouvé dans les cendres déversées dans la fosse SP 1F-13 et le temporal gauche de la SP 1F-17.

**Il est à noter ici l'importance de connaître et mémoriser les exclusions préalablement à la recherche des liaisons. Ce sont ces fragments incompatibles et exclus pour lesquels il conviendra de rechercher des liaisons et d'établir leur appartenance à un autre individu.**

⇒ **Liaison entre une tombe et une aire de crémation (figures 156 et 157) :**

- tombe 1F-5 et aire de crémation AC 615 : de multiples liaisons existent entre les US 6592 ; 6593 ; 6597 et 6599 de AC 615 et le contenu de l'urne 1F-5 (US 6171) → collages multiples de fragments jointifs de mandibule, relation de symétries à partir de fragments de mandibule, appartenance à un même ensemble pathologique (hyperostose frontale interne) et identité du stade de maturation/sénescence (ossification du premier cartilage costo-sternal) ;

*Conclusions : la masse de cendres composant le remplissage de l'aire de crémation AC 615 correspond aux résidus du bûcher sur lequel a été brûlée la femme adulte âgée de la tombe SP 1F-5.*



Figure 156 : collage entre l'aire de crémation AC 615 et la tombe Sp 1F-5 : fémur gauche, région sous trochantérienne.



Figure 157 : collages entre l'aire de crémation AC 615 et la tombe Sp 1F-5 : os temporal, vue externe et vue interne.



Figure 158 : collages entre l'aire de crémation AC 615 et la tombe Sp 1F-5 : dent de l'axis.

- tombe 1F-17 et AC 615 : collage entre deux fragments jointifs de la surface articulaire postéro-supérieure droite de l'axis (figure 159) ;

*Conclusions : le sujet adulte, robuste, de sexe masculin probable de la SP 1F-17 a lui aussi été brûlé sur l'aire de crémation AC 615.*

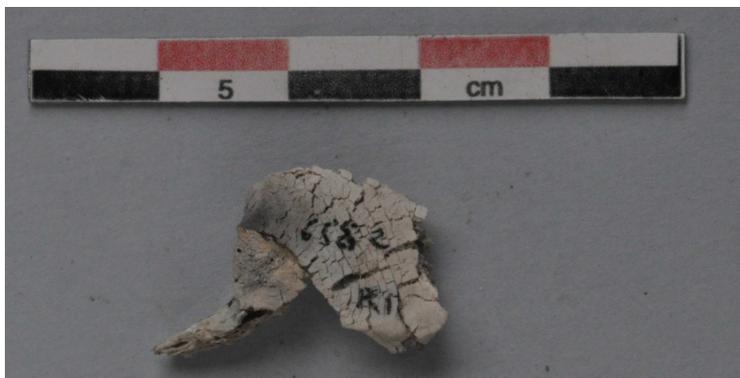


Figure 159 : collage réalisé entre un fragment de l'aire de crémation AC 615 et un fragment de la tombe Sp 1F-7 : axis, vue face externe et face interne.

- tombe SP 1F-6 et AC 615 : deux liaisons probables ont pu être réalisées. Il s'agit d'un collage « incertain » entre deux fragments de tibia présentant une identité morphologique et de la similitude d'aspect morphologique et des critères de crémation entre les bases de deux métatarsiens ;

*Conclusions : le sujet 1F-6 a probablement été brûlé sur l'aire de crémation AC 615. Cette observation est tout à fait compatible avec les résultats du collage obtenus entre la SP 1F-6 et 1F-17. En effet il avait déjà été conclu précédemment que ces deux individus avaient été brûlés au même endroit : il s'agit bien de l'aire de crémation AC 615.*

*Les sujets 1F-1, 1F-5, 1F-6 et 1F-16 ont donc tous les quatre été brûlés sur l'aire de crémation AC 615.*

*La présence de multiples liaisons entre le bûcher AC 615 et la SP 1F-5 semble indiquer qu'il serait le dernier individu brûlé sur ce bûcher.*

*La présence du fragment de basi occipital appartenant à 1F-17 retrouvé dans 1F-6 permet de dire que l'individu 1F-17 aurait été brûlé sur l'aire de crémation AC 615 avant le sujet 1F-6.*

*Il n'a pas été retrouvé de liaison ostéologique permettant de situer chronologiquement la crémation de l'individu 1F-1 par rapport aux autres. En revanche, ces informations ont été apportées par les données de la fouille archéologique : l'individu 1F-1 aurait été le premier à avoir été brûlé à cet emplacement.*

***L'ordre de crémation sur le bûcher AC 615 serait donc : SP 1F-1, 1F-17, 1F-6 et enfin 1F-5.***

- tombe SP 1F-4 et aire de crémation AC 603 : liaisons par symétrie et identité du stade de maturation entre les deux extrémités proximales de deux diaphyses humérales ;

*Conclusions : l'enfant âgé d'environ 12 ans, de la SP 1F-4 a été brûlé sur l'aire de crémation AC 603. Le nombre important de fragments dont les dimensions correspondent à l'enfant de 1F-4 semblent indiquer qu'il pourrait être le dernier à avoir brûlé sur l'aire de crémation 603.*

- Tombe SP 1F-8 et AC 603 : un fragment de la couronne de la première molaire inférieure droite découvert en AC 603 et le symétrique parfait du fragment de la première molaire inférieure gauche de l'enfant âgé de 2 à 4 ans mis au jour dans la tombe 8.

*Conclusions : Les deux enfants SP 1F-4 et 1F-8 auraient été brûlés au même endroit sur l'aire de crémation 603 et dans l'ordre suivant : SP 1F-8 puis SP 1F-4 compte tenu du nombre de fragments retrouvés sur l'aire de crémation AC 603 dont les dimensions sont compatibles avec celles des restes de l'enfant SP 1F-4.*

⇒ **Liaisons entre deux structures d'interprétation incertaine : SP1F-3bis et SP1F-11.**

La structure SP 1F-11 correspond à une fosse comblée par des résidus provenant d'une aire de crémation (os + cendres + charbons). Elle contient les restes d'un

seul individu immature âgé de 4 à 6 ans (masse d'os brûlés 160,3 g). La SP 1F-3bis correspond à un dépôt intentionnel d'os brûlés au fond du tube à libation de la SP 1F-3 (masse 78,5 g). Ces deux structures sont distantes de 2m. Plusieurs liaisons par collage et symétrie (collage de fragment de mandibule, symétrie des deux pétreux et collage du pétreux gauche : figure 160) ont permis d'établir avec certitude que les restes des deux ensembles appartenaient au même individu. Les poids moyens des fragments dans les deux ensembles sont équivalents, mais la SP 1F-11 comporte un grand nombre de germes et de fragments dentaires ainsi que des fragments de métacarpiens et phalanges des mains alors qu'il n'est retrouvé qu'un seul germe dentaire et aucun os des mains en SP 1F-3bis.

*Conclusions : ces constatations suggèrent une collecte manuelle d'une petite quantité d'os prélevée sur l'aire de crémation, puis introduite dans le tube à libation SP 1F-3bis et enfin un curage soigné de l'aire de crémation déposé dans la fosse 1F-11. La véritable tombe serait donc 1F-3 bis.*



Figure 160 : Symétrie des pétreux entre la Sp 1F-11 et la Sp 1F-3bis.

⇒ **Liaisons entre une structure (ST 14) et l'ensemble des tombes de l'enclos 1F**

La structure ST14 a livré une grande quantité d'ossements humains (nombre de fragments et masse). Elle est comparable à celle qui a pu être observée dans les tombes de 1F. Lors de la fouille de ce dépôt il a été constaté la présence de deux sous-ensembles : la partie nord (carré A1, A2, B1, B2) qui comportait de gros fragments dont les fragments de crâne et la partie sud, dépôt cendreux riche en fragments de petites tailles. La recherche systématique des liaisons de deuxième ordre a été très bénéfique :

- pour les sujets de taille adulte : trois liaisons avec le contenu de l'urne SP1F-1 (figure 161) et trois liaisons avec le contenu de SP 1F-17 ;
- pour les sujets immatures : sept liaisons avec la SP 1F-4 et une liaison avec l'enfant de la fosse SP 1F-8 ;
- deux autres liaisons auraient été mises en évidence avec la tombe 1F-16 et 1F-7.



Figure 161 : collage entre la structure 1F-14 et la Sp 1F-1 : branche mandibulaire processus coronoïde gauche et incisive mandibulaire gauche. Vue interne et vue externe.

*Conclusions : la structure 14 présente des liaisons avec au moins quatre sujets, brûlés sur deux aires de crémations distinctes. Cet assemblage ne correspondrait pas à une tombe mais plutôt à une structure où le produit de nettoyage de la zone des deux bûchers AC 603 et AC 615 aurait été déversé.*

*Les liaisons réalisées avec les tombes 1F-7 et 1F-16, deux tombes plus anciennes seraient probablement dues à des fragments qui auraient été « remontés » lors du creusement des fosses. L'absence du sujet SP 1F-6, brûlé sur l'aire de crémation AC-615 pourrait s'expliquer par le fait qu'après la collecte des os placés dans l'urne, les restes du bûcher auraient fait l'objet d'un curage méthodique et soigneux avant d'être déversés dans la fosse (US 6022).*

*Aucune relation n'a été retrouvée avec SP 1F-5, il n'a pas été concerné par la « collecte » qui a alimenté le dépôt ST 14.*

*Par ailleurs, les données archéologiques montrent un creusement unique de ST 14, cette structure serait donc en relation avec un épisode de nettoyage unique des aires de crémation AC-603 et AC-615 survenu après la crémation de SP 1F-1 et SP 1F-17 mais avant celle de SP 1F-5.*

⇒ **Liaisons entre une structure (ST 15) et les deux individus 1F-3 (2) et 1F-3 (1)**

Plusieurs liaisons ont été mises en évidence entre les fragments d'os de l'US 6505 de la ST 15 et les os brûlés de SP 1F-3. Certains se rapportent à un individu de

sexe féminin (fragments avec une hyperostose frontale interne), un collage entre deux fragments de trapèze gauche, symétrique du trapèze droit de l'US 6369 (ex SP 1F-19). D'autres appartiennent à un autre individu : collage de deux fragments jointifs du maxillaire droit et une probable liaison par appartenance à un même ensemble pathologique entre un pont de synostose et un bloc bi-vertébral thoracique.

*Conclusions : cet ensemble résulte manifestement de démantèlement d'une aire de crémation et les liaisons montrent que cette aire de crémation est celle sur laquelle ont été brûlés les deux sujets de la tombe SP 1F-3 (1) et (2).*

## **(2) L'apport des liaisons afin de déterminer le nombre minimum d'individus au sein de l'enclos 1F**

Au sein de l'enclos 1F, le nombre minimal d'individus global a pu être déterminé à partir de l'os temporal et plus particulièrement la région pétreuse de l'os temporal. C'est le pétreux gauche et précisément sa partie postéro médiale comportant le méat acoustique interne qui a été le fragment le plus contributif.

- SP 1F-1 : pétreux droit (US 6045 R6) et gauche (US 6045 R4)
- SP 1F-3 (1) : pétreux droit (US 3126 R2 C1) et gauche (US 3126 R3 C3)
- SP 1F-3 (2) : pétreux gauche (US 6579)
- SP 1F-4 : pétreux droit (US 6315 R3) et gauche (US 6315 R6)
- SP 1F-5 (+ AC 615) : pétreux droit (US 6593 E6) et gauche (US 6599 F6)
- SP 1F-6 : pétreux droit (US 6022 R10) et gauche (US 6032 R2)
- SP 1F-7 : pétreux droit (US 6108 R1) et gauche (US 6108 R2)
- SP 1F-8 : pétreux droit (US 3087 R5) et gauche (US 3087 R6)
- SP 1F-9 : pétreux droit (US 6051 R3) et gauche (US 6051 R2)
- SP 1F-11/1F-3bis : pétreux droit (US 6368 R3) et gauche (US 6018)
- SP 1F-16 : pétreux droit (US 6516 R6) et gauche (US 6403 A1 R2)
- SP 1F-17 : pétreux droit (US 6403 A1 R3) et gauche (US 6403 A1 R3)

*Au total, dans le secteur 1F, le nombre minimal d'individus est de 12 individus brûlés (l'inhumation SP 1F-12 d'un enfant de 1 à 2 ans n'est pas comptabilisée ici).*

Les individus mis en évidence sont les suivants :

- Neuf individus de taille adulte : cinq hommes et quatre femmes.  
En reprenant les données à la fois biologiques et archéologiques, on retrouve :
  - ⇒ SP 1F-1 : sujet adulte robuste, stèle masculine (sans chignon) ;
  - ⇒ SP 1F-3 (1) : sujet adulte âgé, sexe biologique féminin, stèle féminine (présence d'un chignon), inscription prénom féminin (*Clara*) ;
  - ⇒ SP 1F-3 (2) : sujet adulte âgé, robustesse forte, stèle avec inscription prénom masculin (*Rufus*) ;

- ⇒ SP 1F-5 : sujet adulte âgé, sexe biologique féminin, stèle féminine (présence d'un chignon) ;
- ⇒ SP 1F-6 : sujet adulte de sexe biologique indéterminé, sexe archéologique masculin (stèle sans chignon) ;
- ⇒ SP 1F-7 : sujet adulte âgé, sexe biologique féminin, stèle de forme indéterminée ;
- ⇒ SP 1F-9 : sujet adulte, sexe biologique féminin, très gracile, pas de stèle ;
- ⇒ SP 1F-16 : sujet adulte âge de sexe biologique masculin, stèle masculine (absence de chignon) ;
- ⇒ SP 1F-17 : sujet adulte très robuste (sexe biologique masculin ?), pas de stèle.
- Trois individus immatures :
  - ⇒ SP 1F-3bis / SP 1F 11 : enfant de 4 à 6 ans ;
  - ⇒ SP 1F-4 : enfant d'environ 12 ans, (pas de stèle si la stèle SP 1F-4 se rapporte en fait à *Quintus*) ;
  - ⇒ SP 1F-8 : enfant de 2 à 4 ans.

### (3) Utilisation des liaisons pour interpréter la distribution spatiale des restes humains : la position d'un corps sur le bûcher.

Il a été montré que l'aire de crémation AC 615 (figure 162) avait fait l'objet d'un curage poussé avant la crémation de l'individu 1F-5 (cf. relations entre ST-14 et enclos 1-F ci-dessus). L'étude de la distribution des vestiges osseux qu'a livré AC 615 a permis de livrer des informations sur la position du corps de 1F-5.

La sépulture 1F-5 n'a livré que 521,6 g d'os (valeur très basse pour un sujet adulte). La présence d'une hyperostose frontale interne permet d'indiquer qu'il s'agit d'un sujet de sexe féminin et probablement ménopausé. La faible masse des os cependant ne pouvait pas être expliquée par la seule déminéralisation ostéoporotique (pas d'amincissement des corticales par exemple), il est donc probable que la collecte des os sur le bûcher n'ait été que partielle. Une analyse spatiale a permis de montrer la répartition des différentes régions anatomique sur le bucher. Cette analyse a été possible en raison de méthodes de fouilles par carré (20 cm de côté) et un enregistrement strict des données notamment la quantification des restes par région anatomique pour chaque unité de prélèvement.

Les restes céphaliques sont concentrés à l'Est-Nord-Est de la fosse ; le tronc est plus diffus mais il occupe principalement les travées 4 à 7 ; les membres supérieurs se focalisent dans la zone B-E / 5-7 (77,4 %), donc près des restes de la tête, constat d'autant plus logique que parmi les fragments attribués aux membres supérieurs, les deux tiers se rapportent en fait à la racine du membre (scapula et humérus représentent à eux seuls 10,8 g sur un totale de 16,2 g d'os des membres supérieurs), les os des mains étant assez dispersés dans la partie centrale de la cuvette. Les os des membres inférieurs sont nettement déportés vers l'Ouest-Sud-Ouest et plus encore les os des pieds dont 90,3 % se trouvent dans les travées 1-4.

*Au total, la distribution spatiale des fragments d'os sur l'AC 615 reproduit l'image d'un corps allongé la tête à l'Est-Nord-Est et les pieds à l'Ouest-Sud-Ouest.*

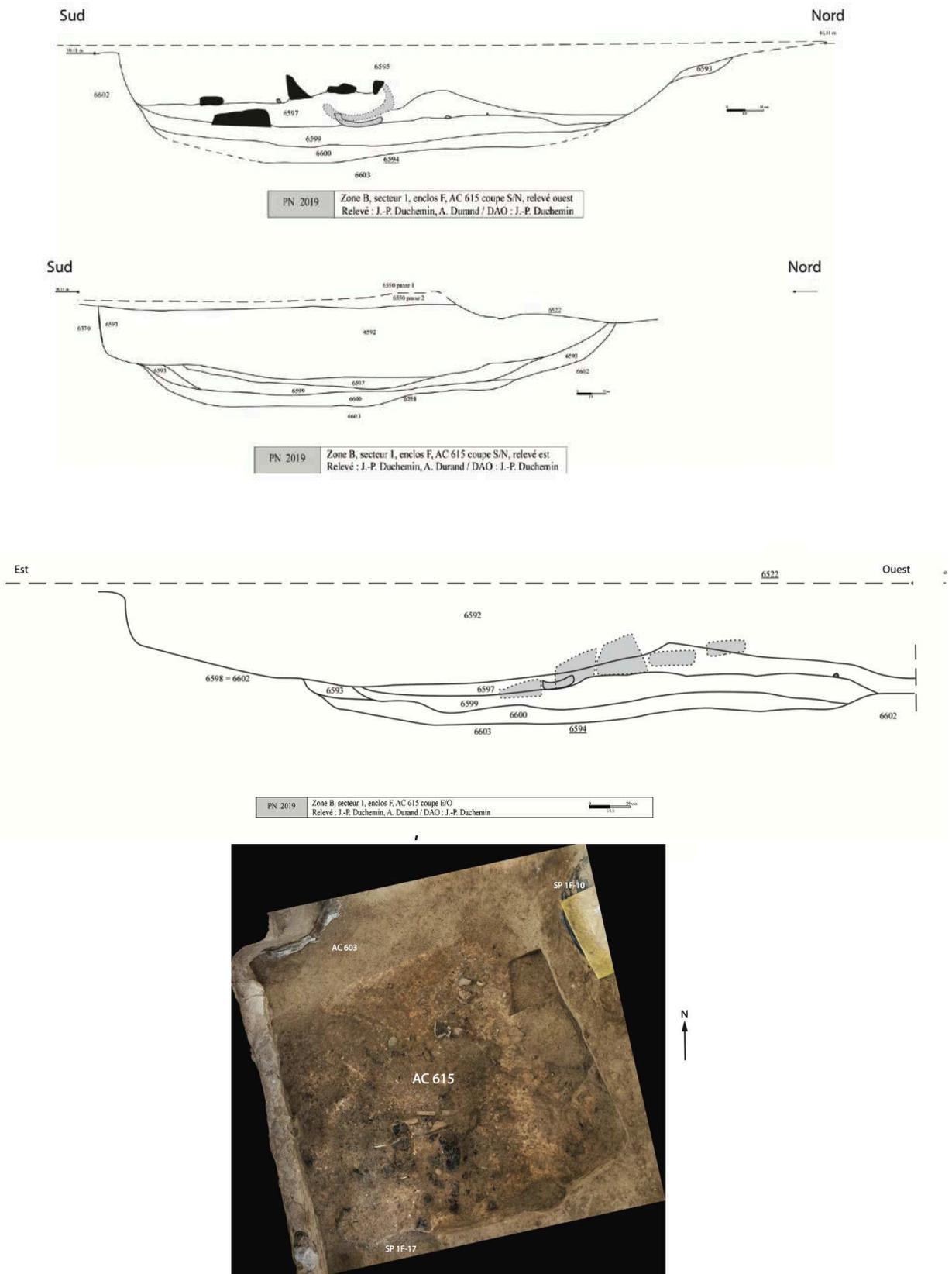


Figure 162 : Aire de crémation AC 615 coupe Nord-Sud, Est-Ouest et vue zénithale. Extrait du rapport final d'opération Porta Nocera, campagne 2020 (Van Andringa W & Duday H, 2020).

#### (4) Reconstitution de l'histoire de l'enclos 1F à partir de l'ensemble des données des liaisons ostéologiques

Associée aux données archéologiques, la recherche des liaisons ostéologiques constitue un apport inestimable afin de mieux comprendre la chronologie des dépôts de l'enclos 1F. Il a pu ainsi être montré qu'il existait trois phases successives dans l'histoire de l'enclos 1F. Le plan général de l'enclos est présenté en figure 163.

- La phase 1 (période Augustéenne) :
  - ⇒ crémation de l'individu SP 1F-16, collecte des os brûlés dans une urne en céramique, dépôt de l'urne dans une fosse, curage de l'aire de crémation et déversement des cendres dans le comblement de la fosse. Possible mise en place d'une stèle avec un tube à libation ;
  - ⇒ crémation de l'individu SP 1F-13, collecte des os brûlés (dans un sac ?), dépôt du sac dans la fosse, le tout recouvert d'une jatte retournée. Curage de l'aire de crémation déversé dans le comblement de la fosse. Possible mise en place d'une stèle.
- La phase 2 (époque Augusto-Thibérienne) :
  - ⇒ monumentalisation de l'enclos : remblaiement général, construction des murs et de la façade ;
  - ⇒ creusement pour la mise en place de la tombe SP 1F-3 (coffre) qui endommage SP 1F-13. Les restes de SP 1F-13 sont alors placés dans une urne en céramique. Une nouvelle fosse est creusée (SP 1F-7) et l'urne contenant les restes de SP 1F-13 sont placés dans la fosse 1F-7. Crémation de l'individu SP 1F-3 (2) et curage de l'aire de crémation. Les os et les cendres sont placés dans le coffre 1F-3 ;
  - ⇒ creusement de la fosse pour la stèle de SP 1F-2 au fond de laquelle est déposé un os brûlé de SP 1F-3 (2) ;
  - ⇒ crémation de l'individu 1F-3 (1) au même emplacement que l'individu 1F-3 (2), curage de l'aire de crémation, ouverture du coffre 1F-3 et déversement des résidus, os brûlés et cendres.
- La phase 3 (époque Claudienne)
  - ⇒ destruction de l'aire de crémation de SP 1F-3 (1) et 1F-3 (2). Les déblais sont rejetés au voisinage (structure ST-15) ;
  - ⇒ aménagement d'une nouvelle aire de crémation AC 615 ;
  - ⇒ crémation de l'individu de la SP 1F-1 sur l'aire de crémation AC 615 et collecte manuelle des os, placés dans une urne. L'urne est déposée dans la fosse 1F-1 dont le creusement recoupe les fosses des tombes 1F-7 et 1F-2. Mise en place d'une stèle et d'une plaque de scellement sur 1F-1 ;
  - ⇒ crémation de l'individu SP 1F-17 sur l'aire de crémation AC 615, collecte manuelle des os de 1F-17 placés dans une urne. L'urne est déposée dans la fosse 1F-17. Pas de stèle ;

- ⇒ creusement d'une deuxième aire de crémation (AC 603) au nord de l'aire de crémation AC 615.
- ⇒ crémation de l'individu 1F-8 (enfant de 2 à 4 ans) sur AC 603. Il est probablement brûlé la tête à l'ouest-sud-ouest. Puis curage direct de l'aire de crémation sans collecte manuelle préalable et déversement dans une fosse SP -1F8, peu profonde à l'angle sud-ouest de l'enclos. Pas de stèle ;
- ⇒ crémation de l'individu 1F-4 (enfant de 12 ans environ) sur l'aire de crémation AC 603, la tête à l'ouest sud-ouest. Collecte manuelle des os brûlés placés dans une urne en céramique. L'urne est déposée dans la fosse SP 1F-4 contre la *tegula* du coffre SP 1F-3. Pas de stèle ;
- ⇒ Nettoyage général des deux aires de crémation AC 603 et AC 615, ramassage manuel des gros fragments puis curage des deux aires de crémation (cendres, charbons et petits fragments) déversés dans ST 14 avec ensuite le dépôt des os ramassés manuellement. ST 14 contient donc les restes de SP 1F-1 ; 1F-17 ; 1F-8 et 1F-4.
- ⇒ Crémation de l'individu 1F-6 sur AC 615, collecte manuelle des fragments d'os brûlés placés dans une urne. Dépôt de l'urne dans la fosse SP 1F-6, puis mise en place d'une stèle et d'un tube à libation, curage complet de l'aire de crémation AC 615 et dépôt des résidus dans le comblement de la fosse de SP 1F-6. Mise en place d'une plaque de scellement ;
- ⇒ crémation de l'individu 1F-5 sur AC 615, la tête à l'Est Nord-Est. Collecte très partielle de os placés dans une urne, creusement et dépôt de l'urne dans la fosse 1F-5. Mise en place d'une stèle à chignon ;
- ⇒ creusement de la fosse 1F-10, mise en place à l'horizontale dans la fosse d'une amphore découpée. Pas de corps dans l'amphore ;
- ⇒ Creusement de la fosse SP 1F-12 (qui recoupe ST 14), inhumation d'un enfant de 1 à 2 ans.
- Phase 4 (époque Néronienne ou post Néronienne) :
  - ⇒ remblaiement de l'enclos (moitié nord) qui scelle les aires de crémation AC 603 et AC 615 ;
  - ⇒ crémation de l'individu SP 1F-9 (femme adulte) sur un bûcher d'emplacement inconnu. Collecte des os brûlés placés dans un sac. Creusement d'une fosse circulaire en arrière de la stèle de la SP 1F-7 et dépôt du sac dans la fosse. Pas de stèle ;
  - ⇒ crémation de l'enfant de 4 à 6 ans 1F-3 bis / 1F -11 sur une aire de crémation d'emplacement inconnu. Collecte manuelle d'une petite quantité d'os brûlés déversés dans le tube à libation de SP 1F-3. Creusement de la fosse SP 1F-11, curage de l'aire de crémation et déversement dans la fosse. Pas de stèle. Les structures 1F-3 bis et 1F-11 contiennent les restes du même enfant.

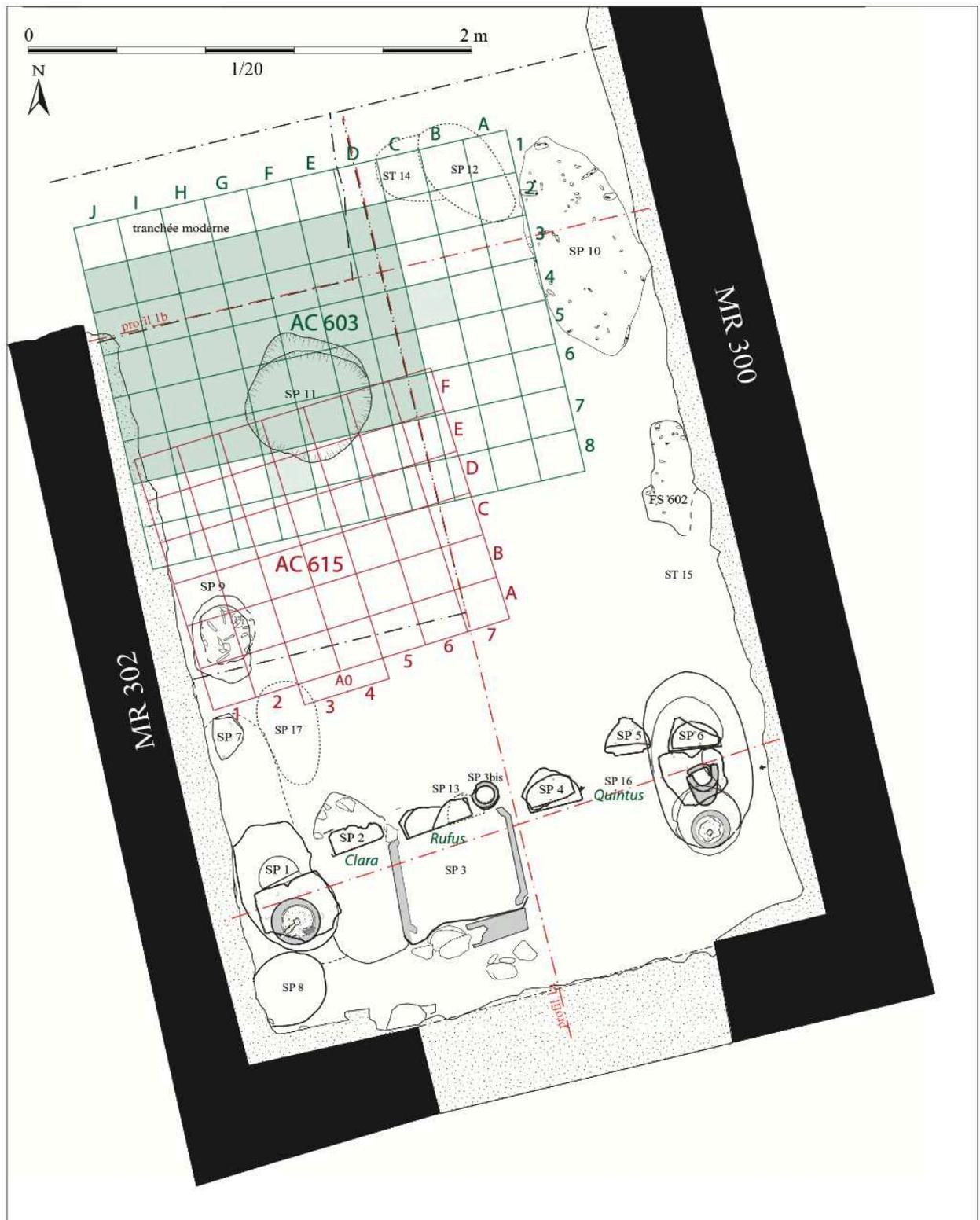


Figure 163 : plan du secteur 1F. Extrait du rapport final d'opération, Porta Nocera, campagne 2020 (Van Andringa W & Duday H, 2020).

b) *L'exemple du Mausolée XX de Santa Rosa au Vatican (figure 164)*

Le Mausolée XX est un édicule de plan carré de 150 cm de côté. Une stèle indique qu'il aurait été érigé par Fabia Philtate en l'honneur de son époux Alcimus, un esclave de l'empereur Néron qui exerçait les fonctions d'architecte de scène du théâtre de Pompée (Duday et al. 2013).

Il contenait six urnes en céramique, notées de XX-1 à XX-6 dans le sens horaire à partir de l'urne située immédiatement en arrière et à gauche de l'entrée. Ces urnes étaient prises dans le mortier constituant le sol de la chambre au centre de laquelle s'ouvraient d'une part un tube à libation cylindrique en céramique et d'autre part un conduit menant à une petite chambre souterraine (XX SI). Dans l'angle situé au fond à gauche du mausolée se situait une plaque de marbre présentant un dispositif à libation sous forme d'une dépression circulaire multiforée qui au moment de la découverte était couverte d'une coupelle en céramique sigillée retournée. Cette plaque fermait une dépression aménagée au dépend de la maçonnerie dans laquelle étaient placés les os brûlés (XX-8). Dans l'angle au fond à droite était posée sur le sol une urne en verre bleu (XX-7) contenant des os brûlés. Enfin un amas d'os humains brûlés a été retrouvé sur le sol de la chambre (XX-US73).

Au total, la fouille du Mausolée XX, a mis au jour 11 assemblages qui ont livrés des restes humains brûlés. Le tableau 38 résume les données de masse des os brûlés qu'ont livrés chacune de ces structures.



Figure 164 : Mausolée XX de la nécropole de Santa Rosa au Vatican. Fouille G.-D. Spinola et L di Blasi. Duday et al. (2015).

## (1) Apport de l'analyse des relations d'exclusions pour déterminer le NMI

De façon intuitive, il serait logique de penser que chacune des urnes 1 à 7 ait livré les restes d'un individu. Il y aurait donc dans le mausolée sept sépultures au moins (avec des incertitudes concernant le dépôt XX-8 et XX-US 73). Cependant la recherche des exclusions lors de l'analyse anthropologique de chacune des structures a permis de calculer le nombre minimum d'individus dans chacun des ensembles. On s'aperçoit que l'association « un individu = une urne » est bien éloignée de la réalité (Tableau 38). Seule l'urne XX-2 contient les restes d'un unique individu : une femme de taille adulte (âge supérieur à 30 ans).

Les restes humains présents dans chacune des urnes sont détaillés ci-dessous :

- Dans l'urne XX-1, au-dessus d'un dépôt de cendres placé au fond de l'urne, se trouvent les restes :
  - ⇒ du sujet principal, un enfant âgé de 8 à 10 ans (m = 411,4 g) ;
  - ⇒ d'un individu de taille adulte et de sexe indéterminé (m = 160,0 g) ;
  - ⇒ de deux fragments jointifs d'un ischium d'enfant, incompatibles selon le stade de maturation avec le sujet principal (enfant plus jeune de la classe d'âge 1-4 ans).
- Dans l'urne XX-2, il y a 1489,7 g d'os correspondant aux restes d'un seul individu.
- Dans l'urne XX-3, il n'y a que 82,4 g d'os, le nombre minimum d'individus pour l'urne XX-3 est difficilement évaluable devant l'infime quantité de fragments osseux présents dans le dépôt cendreceux on le comptera à 1.
- Dans l'urne XX-4, on retrouve 2135,6 g d'os se rapportant à trois individus au moins. Ils sont tous de taille adulte : un individu de sexe masculin et deux individus de sexe indéterminé.
- Les os contenus dans l'urne XX-5 (m = 1701,6 g.) indiquent la présence de deux individus de taille adulte et de sexe indéterminé.
- L'urne XX-6, de la même manière que l'urne XX-1 contenait un dépôt cendreceux au fond de l'urne. Au-dessus, les restes de deux sujets adultes dont au moins un de sexe masculin (m = 762,6 g.)
- L'urne en verre XX-7 a livré 356,3 g d'os : les restes d'un enfant âgé de 3 à 6 ans (sujet principal avec une masse de 295,2 g) ; le talus droit d'un enfant dont le stade de maturation est incompatible avec le sujet principal (enfant nettement plus grand) et des os se rapportant à deux autres sujets de taille adulte pour une masse de 37,8 g.

*Conclusion : si l'on additionne le nombre minimum d'individus dans chacune de ces urnes, il serait de 16 individus, sans compter les individus dans la fosse, sous la plaque en marbre et l'amas d'os sur le sol de la chambre qui majorent le NMI de 24 soit  $16 + 24 = 40$  individus).*

Structure	Masse en grammes	NMI
XX-1	Enfant : 411,1 Adulte : 160 Indéterminé : 90,5	3
XX-2	1489,7	1
XX-3	82,4	1
XX-4	2135,6	3
XX-5	1701,6	2
XX-6	762,8	2
XX-7	Adulte : 298,5 Enfant : 57,8	4
XX-8	1267,9	2
XX- US 73	NC	2
XX-TL	153,4	1
XX-SI	32784,6	19
<b>Total mausolée XX</b>	<b>41395,9</b>	<b>40</b>

Tableau 38 : tableau récapitulatif des masses d'os brûlés livrées par chaque structure du mausolée XX et du nombre minimal d'individus (NMI) associé. NC pour information non communiquée.

## (2) Apport de la recherche des liaisons ostéologiques pour affiner le NMI

Nous avons vu précédemment qu'en analysant de façon indépendante les dépôts d'os brûlés présents dans chacun des réceptacles (hors XX-8 ; US-73 ; XX-TL ; XX-SI), et en additionnant chaque NMI obtenu, le NMI global était évalué à 16 individus. Cependant, la recherche systématique des liaisons ostéologiques a pu fournir des résultats différents et tout à fait surprenants.

- Les individus immatures retrouvés au sein des urnes XX-1 et XX-7 sont les mêmes et dans des proportions inverses.
- L'individu adulte de l'urne XX-7 est également présent dans l'urne XX-6.
- De multiples relations ont également été établies entre les urnes suivantes
  - ⇒ XX-3, XX-4 et XX-6
  - ⇒ XX-4 et XX-3, XX-5 et XX-6
  - ⇒ XX-5 et XX-1 (sujet adulte), XX-4 et XX-6
  - ⇒ XX-6 et XX-3, XX-4, XX-5 et XX-7.

*Conclusion : l'ensemble des fragments ne correspondrait en fait qu'à six individus : quatre adultes (une femme, un homme et deux sujets de sexe indéterminé) et deux enfants.*

Concernant le dépôt XX-8 (qui a livré 1268,2 g d'os brûlés correspondant majoritairement aux restes d'un individu adulte de sexe indéterminé, associé à deux fragments appartenant à un autre sujet) et l'amas XX-US 73 (qui correspond à un individu immature mort entre l'âge de 10 et 13 ans, associé à deux fragments se rapportant à un squelette adulte), aucune liaison n'a pu

être établie avec les six individus précédents. Parmi ces os surnuméraires, certains sont totalement incompatibles avec les sujets précédents. Ces fragments ne représentent qu'une faible part du dépôt et pourraient correspondre à une erreur de collecte sur le bûcher (vestiges résiduels).

### (3) Exemple de calcul du NMI à partir d'un ensemble considérable de fragments : XX-SI

Au sein du Mausolée XX, il existe un dernier ensemble que nous n'avons pas encore évoqué pour le moment : la chambre inférieure ou « *spazio inferiore* » (XX-SI). La fouille de cet espace a été réalisée de la même manière que la fouille d'une urne, sous forme de passes successives. Les fragments d'os de chacun des relevés ont été analysés ensuite. Il existait 51 relevés, nommés de R0 à R50. La masse totale des fragments mis au jour dans cet espace était de 32 784,6 g soit 37 133 fragments (hors esquilles). La fragmentation de cet ensemble est forte (le poids moyen des fragments sauf esquille n'est que de 0,77 g) et le taux de détermination assez faible, de l'ordre de 64,5% (ce qui peut s'expliquer par le fort taux de fragmentation).

Afin de pouvoir calculer le nombre minimum d'individus dans cet ensemble, il a été nécessaire d'observer l'ensemble des fragments d'intérêts, le NMI par région est indiqué entre parenthèses. Les régions qui ont été recherchées sont les suivantes :

- os temporal, région pétreuse (NMI=18 ; pétreux gauche) ;
- os temporal, région du méat/conduit auditif externe comportant l'épine supra méatique (NMI = 15 ; CAE droit) ;
- os temporal, fosse mandibulaire (NMI = 16 ; fosse mandibulaire droite) ;
- os temporal, processus mastoïde (NMI = 9 ; processus mastoïde gauche) ;
- os maxillaire (NMI=15 ; 10 fragments de maxillaire gauche + 5 complets) ;
- os zygomatique, région du processus frontal du zygomatique (NMI = 11 : 10 os zygomatique droit + 1 fragment d'os frontal comportant une partie de l'os zygomatique droit) ;
- os frontal, régions orbitaires et processus zygomatiques + la région de la glabelle (NMI = 11 ; orbite droite) ;
- os occipital, pars basilaris (NMI = 10) ;
- os lacrymal (NMI = 9 ; os lacrymal gauche) ;
- mandibule, condyle mandibulaire (NMI = 16 ; condyle gauche) ;
- mandibule, processus coronoïde de la mandibule (NMI = 13 ; processus coronoïde gauche) ;
- mandibule, épine mentonnière (NMI = 17) ;
- os hyoïde (NMI = 2) ;
- atlas, facette articulaire pour la dent de l'axis (NMI =17) ;
- atlas, tubercule postérieur (NMI = 8) ;
- **axis, processus odontoïde (NMI = 19) ;**
- axis, processus épineux (NMI = 9) ;
- clavicule extrémité sternale (NMI = 10 ; extrémité sternale gauche) ;

- clavicule, extrémité acromiale (NMI = 6 ; extrémité acromiale droite) ;
- scapula, épine (NMI = 13 ; épine droite) ;
- scapula, processus coracoïde (NMI = 12 ; coracoïde droit) ;
- première vertèbre sacrée (NMI = 8) ;
- humérus, épiphyse proximale (NMI = 3 ; épiphyses proximales droite et gauche) ;
- humérus, épiphyse distale (NMI = 9 ; épiphyses distales droite et gauche) ;
- radius, épiphyse proximale (NMI = 7 ; épiphyses proximales droite et gauche) ;
- os coxal, tubérosité ischiatique (NMI = 16 ; tubérosité ischiatique gauche) ;
- fémur, extrémité proximale (NMI = 8 ; extrémité proximale droite) ;
- patella (NMI = 12 ; patella droite) ;
- fibula, extrémité distale (NMI = 12 ; extrémité distale droite) ;
- talus (NMI = 11 ; talus droit) ;
- calcanéus (NMI = 7 ; calcanéus droit) ;
- os naviculaire (NMI = 5 ; naviculaire droit) ;
- os cuboïde (NMI = 7 ; os cuboïde gauche) ;
- os cunéiforme médial (NMI = 2, cunéiforme médial droit et gauche) ;
- os cunéiforme intermédiaire (NMI = 1 ; cunéiforme intermédiaire droit et gauche) ;
- os cunéiforme latéral (NMI = 3 ; cunéiforme latéral gauche) ;
- tête du premier métatarsien (NMI = 8 ; tête MTT1 gauche) ;
- quatrième métatarsien (NMI = 2 ; MTT4 droit et gauche) ;
- cinquième métatarsien (NMI = 1 ; MTT5 droit et gauche) ;

*Le nombre minimum d'individu dans cet ensemble a donc pu être établi à partir du processus odontoïde de l'axis. Il est de 19 individus.*

*Par ailleurs, une recherche des exclusions par incompatibilité d'âge a permis de mettre en évidence les restes de deux enfants âgés de classe « Juvenile », [5-12 ans] incompatibles avec les 19 axis dont le sommet de la dent est entièrement ossifié, ramenant le NMI à 21 individus.*

### *c) Des liaisons réalisées entre les mausolées à Santa Rosa*

---

D'autres mausolées ont été étudiés et ont pu révéler des restes humains brûlés.

#### ➤ **Le mausolée XXV (figure 165)**

Il s'agit d'une structure endommagée par un glissement de terrain à la fin du premier ou au début du deuxième siècle de notre ère. Il renfermait plusieurs urnes :

- ⇒ les urnes XXV-1 et XXV-2 dans la partie Sud-Ouest du monument (intactes) et les urnes XXV-3 et XXV-4 situées au Nord-Est (endommagées lors du glissement de terrain). Malgré les dégâts, les urnes ont pu être fouillées par passes consécutives de 2 à 3 cm et les sédiments tamisés à sec à la maille de 1 mm. Tous les vestiges ont été triés et conservés séparément. Seule l'urne XXV-3 a subi des dégâts liés à la destruction du

monument, certains os qu'elles contenaient sont sortis du réceptacle. Chacune des quatre urnes contenait les restes brûlés d'un sujet bien identifié :

- un enfant de 5 à 7 ans (XXV-1) ;
- un enfant de 4 à 5 ans (XXV-2) ;
- un adulte de sexe indéterminé (XXV-3) ;
- une femme adulte (XXV-4).

*Des liaisons ostéologiques établies entre ces quatre individus, permettent d'affirmer qu'ils ont été brûlés sur le même bûcher probablement dans l'ordre suivant : XXV-2 ; XXV-1 ; XXV-3 et XXV-4.*



Figure 165 : mausolée XXV de Santa Rosa au Vatican, extrait de Duday et al. (2015).

### ➤ Le mausolée XXXI (figure 166)

Le mausolée XXXI lui aussi a subi des dommages. Sa couverture est partiellement effondrée mais les urnes sont intactes. Il comporte quatre urnes (XXXI-1 ; XXXI-2 ; XXXI-3 et XXXI-4) prises dans le sol de la chambre. Une cinquième urne a été secondairement insérée dans l'urne XXXI-4.

- L'urne XXXI-5 contient les restes d'un homme adulte d'âge moyen ou avancé.
- L'urne XXXI-4 contient les restes d'un enfant d'environ 9 ans.
- L'urne XXXI-1 contient les restes d'une femme de 20 à 25 ans.
- L'urne XXXI-2 ceux d'un homme de plus de 25 ans.
- L'urne XXXI-3 ne semble contenir que les restes du curage d'une aire de crémation sur laquelle ont été brûlés les sujets des urnes XXXI-4 et XXXI-2.



Figure 166 : mausolée XXXI de Santa Rosa au Vatican extrait de Duday et al. (2015)

### ➤ Le mausolée XXXIV (figure 167)

Il a été lui aussi endommagé par le glissement de terrain. Il contenait également quatre urnes qui correspondaient au dépôt funéraire d'un seul et même sujet : un homme adulte âgé. La majeure partie des os a été collectée et déposée dans l'urne XXXIV-3. Les résidus du curage de l'aire de crémation ont été déversés dans les urnes XXXIV-1 et XXXIV-2 associés à divers objets (pierre, lampes, clous, balsamaire de verre, monnaie) les cendres du bûcher se trouvaient à la

partie sommitale des deux urnes. L'urne XXXIV- 4 n'a livré que peu de restes humains mais l'étude des liaisons anatomiques a pu montrer qu'il s'agissait bien du même individu.



Figure 167 : mausolée XXXIV de Santa Rosa au Vatican extrait de Duday et al. (2015).

Par ailleurs, l'étude des relations d'exclusions a pu mettre en évidence au sein des mausolées XXXIV et XXXI, la présence de fragments brûlés surnuméraires n'appartenant pas aux sujets principaux des dépôts.

- ⇒ L'urne XXXIV-3 (R2) contenait une deuxième molaire inférieure droite qui se rapporte à un enfant d'environ 7 ans.
- ⇒ L'urne XXXI-1 contenait le germe isolé d'une première molaire supérieure droite attribuable à un enfant de 5 à 7 ans.

Ces deux germes dentaires ne sont pas présents chez l'enfant XXV-1 et leur stade de maturation est en parfaite concordance avec celui-ci. De plus, malgré les déformations imputables à la chaleur, il semblerait que la prémolaire supérieure de XXI-1 (R3) soit le symétrique de la première prémolaire supérieure gauche de XXV-1 (R4).

*Conclusions : sur les 22 urnes étudiées dans les différents mausolées, seul le mausolée XXV contient les restes d'un enfant de 5 à 7 ans (urne XXV-1). Il semble donc très probable que ces*

*deux fragments lui appartiennent. Cela suggèrerait que les individus XXXI-1 ; XXXIV et XXV-1 auraient été brûlés sur des bûches érigés au même endroit. De plus, les deux adultes auraient été brûlés après l'enfant.*

Dans l'urne XXXI-2 a été retrouvé un fragment de crâne d'aspect pathologique n'appartenant pas à l'individu XXXI-2. Il présentait des empreintes vasculaires inhabituelles situées à sa face exocrânienne. Cet aspect a également été observé sur plusieurs fragments de voûte mis au jour dans l'urne XXV-4. Il est fort probable que l'ensemble de ces fragments appartiennent au même individu.

*Conclusions : L'homme XXXI-2 aurait donc été brûlé au même emplacement que la femme jeune XXV-4 et après elle.*

*Conclusions générales : L'analyse des liaisons ostéologiques a donc montré que les quatre sujets du Mausolée XXV ont été brûlés au même endroit mais pas en même temps. Les sujets XXXI-1 et XXXIV ont été brûlés au même endroit que l'enfant XXV-1 et l'homme XXXI-2 au même endroit que la femme XXV-4. Une chronologie relative des dépôts est proposée ci-dessous :*

- *Enfant XXV-2*
- *Enfant XXV-1*
- *Adulte XXV-3*
- *Femme adulte XXV-4*
- *Homme adulte XXXI-2*
- *la femme XXXI-1 et l'homme XXXIV ont été brûlés après l'enfant XXV-1 mais, il n'est pas possible de déterminer à quel moment par rapport aux sujets XXV-3, XXV-4 et XXXI-2*

*Il apparait ainsi que tous les bûchers auraient pu être élevés au même endroit, pouvant témoigner d'un emplacement spécifique dans la nécropole réservé à l'édification des bûchers. Il pourrait s'agir d'une aire de crémation publique, c'est-à-dire utilisée pour brûler les corps d'individus appartenant à des familles différentes.*

*d) L'exemple de Carthage : l'importance des liaisons anatomiques afin de ne pas surestimer le nombre minimum d'individus.*

---

Pour le site du Tophet de Salammbô, l'ensemble des urnes fouillées n'a pas encore été étudié toutefois des résultats préliminaires concernant 69 urnes sont intéressants.

La plupart des sujets identifiés dans les urnes sont des enfants morts en période périnatale. Une première évaluation retrouvait seulement deux individus plus âgés (2 ans ou +) dans l'urne 492 et l'urne 255.

La masse totale des fragments d'os brûlés dans chaque urne est en moyenne de 66,97 g. L'urne ayant livré la plus faible quantité de fragments était l'urne 273, avec 10,95 g de fragments et

celle qui présentait la masse la plus importante était l'urne 255, avec 211,15 g. de fragments. Nous avons vu précédemment que l'individu de l'urne 255 concernait un enfant plus âgé (2 ans ou +).

Dans chacune des urnes il a été constaté la présence de nombreux résidus de cendres et de charbons de bois associés aux os humains. L'inventaire précis des fragments osseux identifiés a permis de mettre en évidence de grandes quantités d'os de très petites dimensions.

- Des osselets de l'oreille moyenne : uncus, malleus et stapès. Ces os sont des os pairs au nombre de 6 dans le squelette humain. En moyenne, il a été retrouvé 2,3 osselets par sépulture et jusqu'à 14 dans l'urne 174. Les osselets de l'oreille moyenne étant par ailleurs fort reconnaissables et facilement latéralisables (uncus et malleus), **il a été possible pour certains individus de les utiliser afin de dénombrer les individus dans l'urne.**
- Des germes dentaires : le nombre de germes dentaires chez un individu périnatal est de 24. Le nombre moyen de germes retrouvé dans chaque urne est de 16. Dans l'urne 502, 49 germes ont été mis au jour.
- Les petits os des pieds et des mains (métacarpiens, métatarsiens et phalanges). Il existe 76 os de cette catégorie chez les périnataux. En moyenne 43 étaient retrouvés dans chaque urne avec un maximum de 105 dans l'urne 174.

La présence en très grande quantité de ces os de faibles dimensions, impossible à récupérer par une collecte manuelle os par os, associée à des cendres et des charbons de bois semble indiquer un curage direct des résidus de crémation.

De même que ce que nous avons pu constater à Santa Rosa, chaque urne n'est pas associée à un seul individu. Le nombre minimal d'individus varie de 1 à 4 avec une moyenne dans l'ensemble des urnes de 2,31 individus identifiés. Ces résultats sont donc susceptibles encore une fois de surestimer le NMI global. D'où la nécessité de réaliser un travail sur les liaisons anatomiques.

Le site étant encore en cours d'étude, les données présentées ici ne constituent que des résultats préliminaires. **Le nombre d'urnes prises en compte est de 69.** Le NMI global calculé en additionnant les NMI de chaque urne serait de 156.

Il est toutefois important d'être en mesure de dire si les urnes doivent être considérées de manière indépendante et ont fait l'objet de dépôts multiples ou si la présence d'os surnuméraires dans les urnes devrait plutôt être associée à des erreurs de collecte (ramassages involontaires d'os restés sur le bûcher à l'issue de la (ou des) crémation(s) précédente(s).

Nous avons pu voir que certaines régions anatomiques présentaient un meilleur pouvoir informatif que d'autres dans la recherche des liaisons. C'est le cas de la région pétreuse de l'os temporal.

En comptabilisant les os pétreux retrouvés dans l'ensemble des urnes on obtient le nombre de 130 : 64 pétreux droits et 66 pétreux gauches.

Le NMI global établi à partir des os pétreux est donc de 66, ce qui se rapproche très fortement du nombre d'urnes.

Une analyse des liaisons anatomiques à partir des os pétreux a donc été entreprise par Henri Duday afin de vérifier l'hypothèse que les os d'un même enfant pourraient être présents dans deux ou plusieurs urnes.

Cette recherche a été réalisée pour toutes les urnes dans lesquelles ont été découverts des os pétreux et par périodes de dépôts (des périodes correspondant à des unités stratigraphiques différentes)

- US 1241 (VI<sup>ème</sup> – V<sup>ème</sup> siècles avant notre ère) → cinq liaisons par symétrie intra urne
- US 1238-1240 (trois premiers quarts du IV<sup>ème</sup> siècle avant notre ère) → cinq liaisons par symétrie intra urne et **une liaison par symétrie inter-urne** (UR 511 R7 et UR 508 N1) (figure 168).
- US 1216 (III<sup>ème</sup> siècle avant notre ère. → six liaisons par symétrie intra urne et **deux liaisons par symétrie inter-urne** (UR 158 et UR 159 R7 et UR 160 et UR 158)
- US 1135 -1195 (première moitié du II<sup>ème</sup> siècle avant notre ère) → quatre liaisons intra urne et **un collage entre l'urne 4 et l'Urne 91 R1** (figure 169 et 170).



Figure 168 : liaison par symétrie entre UR 511 R7 et UR 508 N1, Carthage. Clichés H. Duday.

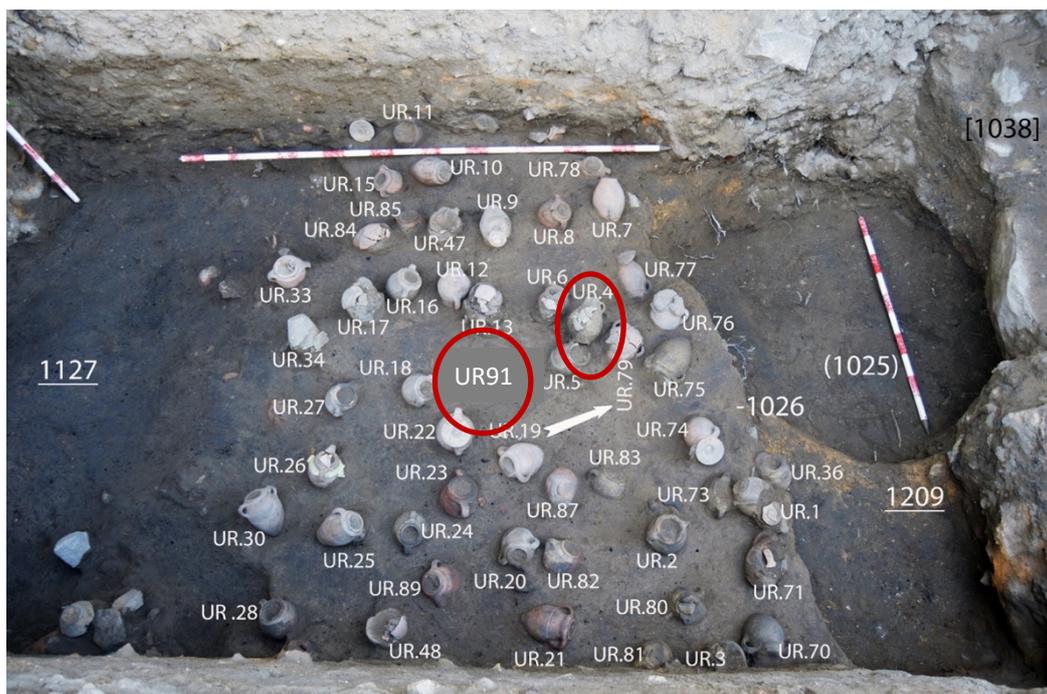


Figure 169 : photographie de la fouille de l'US US 1135 – 1195 (première moitié IIe s. avant notre ère), visualisations de l'emplacement des urnes ayant permis de réaliser un collage.



Figure 170 : collage réalisé entre deux fragments d'os temporal (région pétreuse) entre l'urne 4 et l'urne 91, de l'US US 1135 – 1195 (première moitié IIe s. avant notre ère).

La mise en évidence des liaisons anatomiques par symétrie et collage confirme la présence des os d'un même individu dans plusieurs urnes différentes.

À travers les exemples de ces trois sites nous avons pu entrevoir les possibilités que peut apporter la recherche systématique des liaisons et des exclusions anatomiques, tant sur le plan du dénombrement des individus que sur la compréhension et l'interprétation des assemblages osseux.

Dans un contexte médico-légal *a fortiori* criminel, la valeur ajoutée de ce type d'analyse pourrait être considérable compte tenu du type d'information qu'elle va fournir : identification de plusieurs individus, position du corps dans le foyer, mise en évidence de gestes de manipulations du corps après la combustion, établissement de chronologies....

Cependant, il s'agit d'un travail complexe et extrêmement chronophage qui comprend un certain nombre de limites et de biais méthodologiques qu'il convient de prendre en compte.

#### 4. Les biais méthodologiques

---

##### a) Les biais d'observation et d'identification

---

Nous avons déjà évoqué ces biais précédemment. La mise en évidence des liaisons anatomiques est soumise aux capacités de l'observateur, d'analyser et d'exploiter les informations recueillies, sur l'ensemble des fragments de manière exhaustive. Ces fragments doivent au préalable avoir été reconnus et déterminés de façon précise. Une excellente connaissance de l'ostéologie et des stigmates engendrés par la crémation est indispensable. Le facteur « expérience » joue un rôle considérable.

Afin d'optimiser ce travail, il serait intéressant de pouvoir d'emblée (au cours de la phase de détermination), repérer les régions anatomiques les plus susceptibles de créer des liaisons et les mettre en relief. Il serait ainsi plus aisé de les retrouver au cours de l'analyse des données spatiales.

Nous avons mis en évidence ces différentes régions anatomiques d'intérêts. Un tableau récapitulatif, regroupe l'ensemble des fragments qu'il conviendrait de rechercher. Ce constat sera une aide précieuse, lors de la phase de recherche des liaisons, de même que dans la mise en évidence des exclusions. En effet, dans le cas des grands assemblages, comportant plusieurs individus différents, tels qu'il pourrait en exister dans un accident de la circulation, un accident industriel ou un attentat, la mémorisation de l'ensemble des pièces osseuses est très complexe voire impossible. Cela nous conduit à envisager un autre biais : le biais de mémorisation.

### *b) Le biais de mémorisation*

---

Identifier les fragments osseux est le prérequis indispensable pour l'analyse spatiale. Mais de façon logique, cette étape n'intervient que dans le second temps de l'analyse, après que les divers assemblages osseux ont été étudiés. Cela implique un laps de temps (plus ou moins long) entre le moment de l'observation des fragments et la recherche des liaisons anatomiques. À moins de posséder une mémoire photographique exceptionnelle, il sera rarement possible d'être capable de se souvenir de l'ensemble des fragments observés pour rechercher les liaisons. De même, il paraît inconcevable de tester l'ensemble des fragments (souvent plusieurs centaines voire milliers) entre eux.

Afin de pallier ce biais de mémorisation chacun peut s'approprier des stratégies. La prise d'un maximum de notes lors de la phase de détermination anatomique est indispensable. Ces notes devront mettre en relief les structures morphologiques les plus susceptibles de générer des liaisons anatomiques telles que des collages ou des symétries. Elles pourront s'accompagner de photographies de travail afin de reconnaître plus facilement les pièces à posteriori.

Nous proposons l'utilisation d'un tableau répertoriant les fragments d'intérêts dans chaque assemblage osseux.

Il peut également être intéressant au cours de la phase d'identification des fragments d'en isoler certains afin de préparer au mieux la recherche des liaisons anatomiques, de même que l'on pourrait isoler des fragments pathologiques ou porteurs de signes particuliers.

## *5. Limites et perspectives*

---

### *a) Limites*

---

Bien que les données recueillies lors de l'analyse spatiale des fragments contribuent à mieux comprendre ou interpréter le déroulement des faits, il s'agit d'un travail extrêmement chronophage et complexe.

Ce type de recherche doit nécessairement être planifié au préalable et ne pourra pas être systématiquement réalisé. Il est indispensable d'effectuer une première lecture de la scène de découverte des restes humains brûlés pour évaluer la nécessité d'entreprendre une telle

analyse. La balance entre les bénéfices attendus et le temps d'analyse nécessaire doit être clairement évalué et discuté avec les enquêteurs et le magistrat requérant, selon les attentes de ces derniers.

Ce type d'analyse et le travail de recherche des liaisons sera à privilégier dans l'hypothèse ou une activité criminelle est soupçonnée ou lors d'une expertise consécutive à une catastrophe de masse impliquant plusieurs individus et des restes susceptibles d'être mélangés.

Dans un simple incendie domestique accidentel, ce type de recherche sera rarement nécessaire. De plus, ces analyses mettent une nouvelle fois en lumière la nécessité d'un prélèvement exhaustif de l'ensemble des fragments osseux, même les plus petits. Il faudra être attentif à se déplacer sur le terrain chaque fois que nécessaire. Une récupération des seuls fragments de grande taille ou des éléments jugés « nobles » (crâne, mandibule, grands os long des membres) ne sera jamais suffisante et risquerait de compromettre les résultats de l'ensemble des analyses. Le processus de récupération des fragments doit être mené à bien en équipe, en coordonnant les efforts des enquêteurs, des personnes chargées de l'identification (techniciens d'identifications, médecins légistes, anthropologues, odontologistes...) et des experts incendies qui pourront fournir des informations contextuelles.

L'utilisation d'outils technologiques peut également jouer un rôle afin de faciliter les processus d'analyses.

#### *b) Perspectives pour l'analyse spatiale : l'utilisation d'outil SIG*

---

L'outil SIG ou Système d'Information Géographique est un système permettant de créer, gérer, analyser et cartographier tous types de données. Il connecte des informations descriptives à un système de cartographie intégrant des données de localisation. Ce système aide les utilisateurs à comprendre des modèles, des relations et un contexte géographique en créant des requêtes interactives. Les premières utilisations du SIG datent de la fin des années 60. Il s'agissait d'une application pour l'aménagement du territoire. Aujourd'hui, son utilisation est très large et s'intègre dans de nombreux domaines (Denègre & Salgé, 2004). Appliqué à l'archéologie, le SIG permet de géolocaliser les vestiges découverts lors des opérations : chaque élément est ainsi coordonné dans un référentiel cartographique utilisé de manière nationale. Pour ce faire, les relevés topographiques sur le terrain sont réalisés à l'aide d'appareils spécialisés (tachéomètre ou GPS). Les relevés sont centralisés et comportent toutes les informations rattachées (localisation, type de vestige, datation...).

L'utilisation du SIG a déjà été envisagée dans l'analyse des crémations et l'identification des connexions ostéologiques (Naji et al., 1994). Cette technique offre la possibilité de réaliser des recherches multicritères par type d'os, dans la base de données, afin de faciliter l'identification des liaisons anatomiques et localiser plus facilement les divers fragments impliqués.

La topographie comparée des relations ostéologiques permettrait de suivre le mouvement des fragments d'os, leurs directions et la distance parcourue dans l'espace. L'interprétation de ces mouvements nous informe sur l'évolution d'un assemblage, sa constitution, et les perturbations

subies qu'elles soient naturelles (d'ordre taphonomique) ou artificielles (intervention humaine) (Naji et al., 2014).

L'exemple archéologique de « la truie pendue » (Yonne) avec plus de 160 000 fragments, a bénéficié d'un traitement des données à l'aide du SIG pour mieux comprendre la distribution spatiale du dépôt (De Becdelievre et al., 2016). Le SIG a permis d'évaluer la fragmentation différentielle, l'organisation spatiale du dépôt mais également de donner des notions sur la chronologie des événements et le mode de combustion.

La multitude de données apportées par cette étude, permettant une interprétation dynamique des assemblages d'ossements brûlés est très encourageante dans des perspectives médico-légales. Il serait intéressant de pouvoir tester ces techniques dans ce contexte.

### *c) Et l'intelligence artificielle, la conception d'algorithme pour résoudre les liaisons anatomiques ?*

---

L'intelligence artificielle est un concept qui a commencé à émerger dans les années 50, puis qui s'est fortement développé. Des applications à l'archéologie existent depuis les années 90 (Dries, 1998; Negro Ponte, 1995; Puyol-Gruart, 2002; Rathnayake, 2013). Actuellement de multiples projets impliquant la reconnaissance numérique 3D par une intelligence artificielle se développent, afin d'être capable de reconstituer des éléments de bâti, des fresques ou de la céramique. C'est le cas par exemple du projet RePAIR (pour «*Reconstructing the Past: Artificial Intelligence and Robotics*») actuellement mené à Pompéi dans le but de reconstituer des fresques. Ce système associe un scanner à haute définition à un logiciel de reconnaissance numérique 3D géré par une intelligence artificielle. Il a pour but de reconnaître, faire correspondre et assembler les fragments de la fresque, le tout de manière autonome et en un temps très court (RePair project, 2022).

En anthropologie, l'intelligence artificielle a déjà été testée pour la détermination du sexe de restes squelettisés par la création d'un réseau de neurones artificiels, visant à évaluer le sexe des individus à partir de l'extrémité céphalique. Le réseau neuronal a été créé à partir de reconstructions 3D produites à partir des tomodensitométries de 900 crânes. Les résultats étaient satisfaisants puisqu'ils ont montré une précision de 95% lors de la détermination du sexe (Bewes et al., 2019).

On peut donc naturellement se poser la question de savoir si l'utilisation de l'intelligence artificielle pourrait être adaptée à la recherche des liaisons anatomiques sur les os brûlés. Il s'agit d'une perspective attirante, mais à notre connaissance, il n'existe pas encore à ce jour d'étude expérimentale publiée mettant en avant de tels résultats. Cela peut s'expliquer, compte tenu de la complexité du matériel osseux et de la nécessité d'intégrer les stigmates de crémation dans l'algorithme d'apprentissage.

---

## *Fiches méthodologiques*

---

À l'issue de ce travail, nous proposons deux fiches méthodologiques.

Elles sont destinées à la fois aux enquêteurs et aux personnels d'identification présents sur le terrain mais aussi aux médecins légistes ou aux anthropologues en charge de l'analyse des restes osseux.

La première est destinée à être utilisée le terrain, lors de la levée de corps. Elle donne les différentes étapes pour aborder la récupération des fragments osseux et l'enregistrement des données afin de limiter la perte d'informations.

La seconde fiche est une aide pour la réalisation l'analyse anthropologique.

Ces deux documents sont présentés en annexe 8.

---

## *Conclusions*

---

Lorsqu'il est brûlé, le corps humain subit une série de changements majeurs dont l'ampleur augmente avec l'intensité de la combustion. Dans des conditions extrêmes, les tissus mous sont entièrement détruits et le squelette fortement altéré. L'autopsie selon ses modalités classiques n'est alors plus envisageable et l'analyse anthropologique fortement compromise.

Cependant, malgré des changements de couleur, de forme et une fragmentation parfois intense, il persiste toujours du matériel osseux. À travers cette étude nous avons mis en évidence l'importance de l'exhaustivité dans l'analyse de ces fragments osseux et cela sans distinction de leur taille ou de leur origine. La variabilité des fragments d'intérêt que nous avons mis en évidence nous permet d'affirmer que la sélection (de fragments plus volumineux ou de certaines régions anatomiques d'apparence plus noble) n'est pas une solution envisageable. Le prélèvement doit nécessairement être le plus exhaustif possible au risque de perdre une grande partie des données.

Aussi fastidieux que puisse paraître le processus de récupération des restes humains brûlés et fragmentés, nous avons montré que leur analyse est loin d'être négligeable. Elle peut fournir des informations utiles pour l'identification biologique de l'individu, mais également nous renseigner sur l'état de santé du défunt, la position du corps dans le foyer, la mise en évidence d'actions sur le corps post combustion et même apporter des éléments quant à la reconstitution d'une chronologie.

Pour être en mesure d'analyser l'ensemble de ces fragments et pouvoir interpréter correctement les résultats obtenus, la « levée de corps » est donc une étape essentielle. Elle permettra le prélèvement exhaustif de l'ensemble des fragments et l'enregistrement de la position des assemblages osseux. Il sera également utile de relever des données relatives à l'environnement ou d'éventuels éléments de preuves associées.

Nous avons montré à travers cette étude que les méthodes de l'archéo-anthropologie permettent de mettre en évidence une somme considérable de renseignements et cela même pour des assemblages osseux constitués il y a plusieurs centaines d'années.

La comparaison entre les recherches archéologiques et des investigations médico-légales est aisée. Nous souhaitons pouvoir généraliser l'application de ces méthodes précises et fiables en contexte médico-légal.

Nous proposons pour cela un ensemble de fiches méthodologiques simplifiées, basées sur nos résultats, afin de faciliter le prélèvement sur le terrain, l'enregistrement et l'analyse de restes humains ayant subi un processus de combustion intense.

Nous restons cependant consciente des contraintes de moyens ou de temps associées à ces analyses en contexte judiciaire. Elles ne doivent pas nécessairement être appliquées en routine, il est essentiel de s'adapter à la problématique de chaque découverte.

---

## *Bibliographie*

---

Absolonova K, Veleminsky P, Dobisikova M, Beran M, Zocova J. 2013. Histological Estimation of Age at Death from the Compact Bone of Burned and Unburned Human Ribs. *Journal of Forensic Sciences* **58**: 135–145.

Acsadi Gy, Nemeskeri J. 1970. *History of human life span and mortality*. Akadémiai Kiado: Budapest.

Albert AM, Maples WR. 1995. Stages of epiphyseal union for thoracic and lumbar vertebral centra as a method of age determination for teenage and young adult skeletons. *Journal of forensic sciences* **40** (4): 623–633.

Alberts B, Bray D, Lewis J, Raff M, Roberts K, Watson JD. 1995. Jonctions cellulaires, adhérence cellulaire et matrice extracellulaire. In *Biologie Moléculaire de la Cellule. 3e Edition*. Médecine-Sciences, Flammarion: Paris; 949–1010.

Alexandersen V, Bennike P, Hvass L, Nielsen K-HS. 1981. Egtvedpigen—nye undersøgelser. *Aarbøger for Nordisk oldkyndighed og Historie* **1981**: 17–46.

Alsop BK. 2007. *Investigation of Second, Fourth, and Eighth Sternal Rib End Variation Related to Age Estimation*. Master's Thesis, University of Tennessee. [online] Available from: [https://trace.tennessee.edu/utk\\_gradthes/104](https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/104). Consulté le 4 avril 2023.

Alunni V, Grevin G, Buchet L, Quatrehomme G. 2014. Forensic aspect of cremations on wooden pyre. *Forensic Science International* **241**: 167–172. DOI: 10.1016/j.forsciint.2014.05.023.

Alunni V, Nogueira L, Quatrehomme G. 2018. Macroscopic and stereomicroscopic comparison of hacking trauma of bones before and after carbonization. *International Journal of Legal Medicine* **132**: 643–648.

André A, Leahy R, Rottier S. 2015. Cremated human remains deposited in two phases: evidence from the necropolis of the Tuileries site (Lyon, France: 2nd century AD). *International Journal of Osteoarchaeology* **25**: 489–501.

Angyal M, Derczy K. 1998. Personal identification on the basis of antemortem and postmortem radiographs. *Journal of forensic sciences* **43**: 1089–1093.

Centre Jean Bérard. 2021. La mémoire retrouvée : la nécropole tardo-hellénistique de Cumes - Film documentaire du Centre Jean Bérard. Centre Jean Bérard, USR 3133 CNRS-EFR. [online] Available from: <https://www.efrome.it/actualite/la-memoire-retrouvee-la-necropole-tardo-hellenistique-de-cumes>. Consulté le 22 mars 2023.

Code de déontologie médicale 2021. Code de déontologie médicale. Edition février 2021.

[online] Available from: <https://www.conseil-national.medecin.fr/sites/default/files/codedeont.pdf>. Consulté le 12 mai 2023.

Babrauskas V. 2003. *Ignition handbook: principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science*. Fire Science Publishers: Society of Fire Protection Engineers: Issaquah, WA.

Baby RS. 1954. *Hopewell cremation practices*. Ohio Historical Society: Columbus, Ohio.

Baccino E, Tavernier J-C, Lamendin H, Frammery D, Nossintchouk R, Humbert J-F. 1991. Recherche d'une méthode multifactorielle simple pour la détermination de l'âge des cadavres adultes. *Journal de médecine légale droit médical* **34**: 27–33.

Bachrach L, Hastie T, Wang M, Narasimhan B, Marcus R. 1999. Bone mineral acquisition in healthy Asian, Hispanic, black, and Caucasian youth: a longitudinal study. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* **84**: 4702–4712. DOI: 10.1210/jcem.84.12.6182.

Baker PT, Newman RW. 1957. The use of bone weight for human identification. *American Journal of Physical Anthropology* **15**: 601–618.

Balas D, Philip P. 2010. histgen4. *Cours d'histologie générale*. [online] Available from: <http://www.db-gersite.com/HISTOLOGIE/HISTGENE/histgen1/histgen4/histgen4.htm>. Consulté le 6 juillet 2023.

Ball J. 1971. Enthesopathy of rheumatoid and ankylosing spondylitis. *Annals of the Rheumatic Diseases* **30**: 213–223. DOI: 10.1136/ard.30.3.213.

Balthazard L, Lebrun R. 1911. Les canaux de Havers de l'os humain aux différents ages. *Annales d'hygiène publique et de médecine légale* **15**: 144–152.

Barriel V. 2005. La Paléogénétique. In Dutour O, Hublin J-J & Vandermeersch B. *Objets et méthodes en Paléanthropologie*, CTHS, Collection : Orientations et méthodes. Paris; 363-394.

Bass WM. 1984. Is it possible to consume a body completely in a fire. In Rathbun T and Buikstra JE (eds). *Human identification: Case studies in forensic anthropology*. Springfield; 159–167.

Bass WM. 1987. *Human osteology: a laboratory and field manual*. 3rd edition Missouri Archaeological Society Inc.: Columbia; 334–336.

Bass WM. 2005. *Human Osteology: A Laboratory and Field Manual*. 5th edition. Missouri Archaeological Society Inc.: Columbia.

Bass WM, Birkby WH. 1978. Exhumation: the method could make the difference. *FBI Law Enforcement Bulletin* **47**: 6–11.

Bass WM, Jantz RL. 2004. Cremation Weights in East Tennessee? *Journal of Forensic Sciences* **49** (5): 901–904. DOI: 10.1520/JFS2004002.

Bataille M, Crainic K, Leterreux M, Durigon M, de Mazancourt P. 1999. Multiplex amplification of mitochondrial DNA for human and species identification in forensic evaluation. *Forensic science international* **99**: 165–170.

Beach JJ, Passalacqua NV, Chapman EN. 2008. Heat-related changes in tooth color: temperature versus duration of exposure. In Schmidt CW and Symes SA (eds). *The analysis of burned human remains*. Academic Press: San Diego; 137–145.

Beauthier J-P. 2008. *Traité de médecine légale*. De Boeck et Larcier: Bruxelles.

Bednarek J. 2008. Metody oceny wieku w chwili śmierci w oparciu o histomorfometrię istoty zbitęj tkanki kostnej. *Archiwum Medycyny Sądowej i Kryminologii* **58**: 197–204.

Behrensmeyer AK. 1975. The taphonomy and paleoecology of Plio-Pleistocene vertebrate assemblages east of Lake Rudolf, Kenya. *Bulletin of the Museum of Comparative Zoology at Harvard College* **146**: 473-578.

Belcastro MG, Facchini F, Rastelli E. 2006. Hyperostosis Frontalis Interna and sex identification of two skeletons from the Early Middle Ages necropolis of Vicenne-Campochiaro (Molise, Italy). *International Journal of Osteoarchaeology* **16**: 506–516. DOI: <https://doi.org/10.1002/oa.851>.

Belcastro MG, Todero A, Fornaciari G, Mariotti V. 2011. Hyperostosis frontalis interna (HFI) and castration: the case of the famous singer Farinelli (1705-1782): HFI and castration. *Journal of Anatomy* **219**: 632–637. DOI: 10.1111/j.1469-7580.2011.01413.x.

Bello S. 2001. Taphonomie des restes osseux humains : effet des processus de conservation du squelette sur les paramètres anthropologiques. Thèse de doctorat; Université Aix-Marseille 2.

Bello S, Signoli M, Rabino Massa E, Dutour O. 2002a. Les processus de conservation différentielle du squelette des individus immatures. Implications sur les reconstitutions paléodémographiques. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris. BMSAP* **14**: 3-4. DOI : 10.4000/bmsap.187.

Bello SM, Thomann A, Signoli M, Rabino-Massa E, Dutour O. 2002b. La conservation différentielle des os humains et le "profil théorique de survie osseuse". *Anthropologica et praehistorica* **113**: 105-120.

Bénichou-Safar H. 1981. À propos des ossements humains du tophet de Carthage. *Rivista di studi fenici* **9**: 5–9.

Bénichou-Safar H. 1995. Les fouilles du tophet de Salammbô à Carthage (première partie). *Antiquités africaines* **31**: 81–199.

Bénichou-Safar H. 2004. *Le tophet de Salammbô à Carthage: essai de reconstitution*. École française de Rome: Rome.

Bennett JL, Benedix DC. 1999. Positive identification of cremains recovered from an automobile based on presence of an internal fixation device. *Journal of forensic sciences* **44**: 1296–1298.

Bertillon A. 1881. *Une application pratique de l'anthropométrie sur un procédé d'identifications*. Masson: Paris.

Bewes J, Low A, Morphett A, Pate FD, Henneberg M. 2019. Artificial intelligence for sex determination of skeletal remains: Application of a deep learning artificial neural network to human skulls. *Journal of forensic and legal medicine* **62**: 40–43.

Binford L. 1963. An analysis of cremations from three Michigan sites. *Wisconsin Archeologist* **44**: 98–110.

Binford L, Bertram J. 1977. Bone frequencies and attritional processes. In Binford L (ed). *For Theory Building in Archaeology. Essays On Faunal Remains, Aquatic Resources, Spatial Analysis, and Systematic Modeling*. Academic Press: New York.

Biwasaka H, Aoki Y, Tanijiri T, Sato K, Fujita S, Yoshioka K, Tomabechi M. 2009. Analyses of sexual dimorphism of contemporary Japanese using reconstructed three-dimensional CT images – Curvature of the best-fit circle of the greater sciatic notch. *Legal Medicine* **11**: S260–S262. DOI: 10.1016/j.legalmed.2009.02.052

Blondiaux J, Gabart N, Alduc-Le Bagousse A, Niel C, Tyler E. 2006. Relevance of cement annulations to paleopathology. *Paleopathology Newsletter* **135**: 4–13.

Bohnert M, Rost T, Faller-Marquardt M, Ropohl D, Pollak S. 1997. Fractures of the base of the skull in charred bodies—post-mortem heat injuries or signs of mechanical traumatization? *Forensic science international* **87**: 55–62.

Bonar LC, Glimcher MJ. 1970. Thermal denaturation of mineralized and demineralized bone collagens. *Journal of Ultrastructure Research* **32**: 545–548. DOI: 10.1016/s0022-5320(70)80027-2.

Bontrager AB, Nawrocki SP. 2015. A taphonomic analysis of human cremains from the Fox Hollow Farm serial homicide site. In Schmidt CW and Symes SA (eds). *The analysis of burned human remains*. Academic Press: San Diego; 211–226.

Bonucci E, Graziani G. 1975. Comparative thermogravimetric, x-ray diffraction and electron microscope investigations of burnt bones from recent, ancient and prehistoric age. *Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali. Rendiconti* **59**: 517–532.

Boucherie A. 2021. Approche archéo-anthropologique d'ensembles funéraires : question de sexe biologique ou de genre ? In *Archéologie du genre - Construction sociale des identités et culture matérielle*. Université des femmes: Bruxelles; 41-59.

Boucherie A, Polet C, Lefèvre P, Vercauteren M. 2021. Sexing the bony labyrinth: A morphometric investigation in a subadult and adult Belgian identified sample. *Journal of forensic sciences* **66**: 808–820.

Boulestin B, Duday H. 2005. Ethnologie et archéologie de la mort: de l'illusion des références à l'emploi d'un vocabulaire. In Mordant C, Depierre G. *Les pratiques funéraires à l'âge du Bronze en France*. Éditions du CTHS, Société archéologique de Sens: Sens ; 17–30.

Boulestin B, Duday H, Semelier P. 1996. Les modifications artificielles sur l'os humain: une approche fondamentale du traitement des cadavres. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* **8**: 261–273.

Bowler JM, Jones R, Allen H, Thorne AG. 1970. Pleistocene human remains from Australia: A living site and human cremation from Lake Mungo, western New South Wales. *World Archaeology* **2**: 39–60. DOI: 10.1080/00438243.1970.9979463.

Boyde A. 2015. Osteoclast. *Bone Research Society*. [online] Available from: <https://boneresearchsociety.org/resources/image/19/#top>. Consulté le 17 juin 2023.

Bradtmiller B, Buikstra JE. 1984. Effects of burning on human bone microstructure: a preliminary study. *Journal of Forensic Sciences* **29**: 535–540.

Braga J, Samir C, Risser L, Dumoncel J, Descouens D, Thackeray JF, Balaesque P, Oettlé A, Loubes J-M, Fradi A. 2019. Cochlear shape reveals that the human organ of hearing is sex-typed from birth. *Scientific reports* **9**: 10889. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47433-9>.

Brauer G. 1988. Osteometrie. In Knussmann R (ed). *Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen*. Gustav Fischer Verlag: Stuttgart; 160–232.

Brewer P, Fernandes JA. 2016. Osteochondroses. *Orthopaedics and Trauma* **30**: 553–561. DOI: 10.1016/j.mporth.2016.08.006.

Brickley M, Brickley M, Ferllini R. 2007. A case of disposal of a body through burning and recent advances in the study of burned human remains. In *Forensic anthropology: Case studies from Europe*. Springfield; 69–85.

Broca P. 1875. *Instructions craniologiques et craniométriques de la Société d'Anthropologie de Paris*. Masson: Paris.

Brooks S, Suchey JM. 1990. Skeletal age determination based on the os pubis: A comparison of the Acsádi-Nemeskéri and Suchey-Brooks methods. *Human Evolution* **5**: 227–238. DOI: 10.1007/BF02437238.

Brothwell D. 1961. The palaeopathology of early British man: an essay on the problems of diagnosis and analysis. *The Journal of the Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland* **91**: 318–344.

Brothwell DR. 1981. *Digging up bones: the excavation, treatment, and study of human skeletal remains*. Cornell University Press: Ithaca, New York.

Brown KA, O'Donoghue K, Brown TA. 1995. DNA in cremated bones from an early bronze age cemetery cairn. *International Journal of Osteoarchaeology* **5**: 181–187.

Brun J-P, Munzi P, Cavassa L, Le Berre S, Meluziis N, Neyme D. 2012. Cumes: Campagne de fouilles 2011. *Chronique des activités archéologiques de l'École française de Rome*. DOI: 10.4000/cefr.633.

Bruzek J. 1992. La diagnose sexuelle à partir du squelette : possibilités et limites. *Archéo-Nil* **2**: 43–51. DOI: 10.3406/arnil.1992.1162.

Bruzek J. 1996. Degree of pelvic sexual dimorphism in human populations. A greene t-test application. *Human Evolution* **11**: 183–189.

Bruzek J. 2002. A method for visual determination of sex, using the human hip bone. *American Journal of Physical Anthropology* **117**: 157–168. DOI: 10.1002/ajpa.10012.

Bruzek J, Murail P. 2006. Methodology and reliability of sex determination from the skeleton. In Schmitt A, Cunha E, Pinheiro J (eds). *Forensic anthropology and medicine: complementary sciences from recovery to cause of death*. Humana Press: Totowa NJ; 225–242.

Buckberry JL, Chamberlain AT. 2002. Age estimation from the auricular surface of the ilium: a

revised method. *American Journal of Physical Anthropology* **119**: 231–239. DOI: 10.1002/ajpa.10130.

Buikstra J, Swegle M. 1989. Bone modification due to burning: experimental evidence. In Bonnichsen R and Sorg MH (eds). *Bone modification*. Center for the Study of the First Americans: Orono; 247–258.

Buikstra J, Ubelaker D. 1994. *Standards for data collection of human skeletal remains. Proceedings of a Seminar at the Field Museum of Natural History organized by Jonathan Haas*. Arkansas Archeological Survey: Fayetteville.

Byers S. 2005. *Introduction to Forensic Anthropology*. 2nd edition. Pearson: Toronto.

Callewaert F, Sinnesael M, Gielen E, Boonen S, Vanderschueren D. 2010. Skeletal sexual dimorphism: relative contribution of sex steroids, growth hormone-insulin-like growth factor-I (GH-IGF-I) and mechanical loading. *Journal of Endocrinology* **207**: 127–134.

Campobasso CP, Dell’Erba AS, Belviso M, Di Vella G. 2007. Craniofacial identification by comparison of antemortem and postmortem radiographs: two case reports dealing with burnt bodies. *The American journal of forensic medicine and pathology* **28**: 182–186.

Cardoso HF. 2008. Age estimation of adolescent and young adult male and female skeletons II, epiphyseal union at the upper limb and scapular girdle in a modern Portuguese skeletal sample. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists* **137**: 97–105.

Cardoso HF, Rios L. 2011. Age estimation from stages of epiphyseal union in the presacral vertebrae. *American Journal of Physical Anthropology* **144**: 238–247.

Carroll EL, Squires KE. 2020. Burning by numbers: A pilot study using quantitative petrography in the analysis of heat-induced alteration in burned bone. *International Journal of Osteoarchaeology* **30**: 691–699.

Castillo RF, Ubelaker DH, Acosta JAL, de la Fuente GAC. 2013. Effects of temperature on bone tissue. Histological study of the changes in the bone matrix. *Forensic science international* **226**: 33–37.

Castillo RF, Ubelaker DH, Acosta JAL, de la Rosa RJE, Garcia IG. 2013. Effect of temperature on bone tissue: histological changes. *Journal of forensic sciences* **58**: 578–582.

Cattaneo C. 2007. Forensic anthropology: developments of a classical discipline in the new millennium. *Forensic Science International* **165**: 185–193. DOI: 10.1016/j.forsciint.2006.05.018.

Cattaneo C, DiMartino S, Scali S, Craig OE, Grandi M, Sokol RJ. 1999. Determining the human origin of fragments of burnt bone: a comparative study of histological, immunological and DNA techniques. *Forensic Science International* **102**: 181-191. DOI: 10.1016/S0379-0738(99)00059-6.

Cattaneo C, Gelsthorpe K, Sokol R, Phillips P. 1994. Immunological detection of albumin in ancient human cremations using ELISA and monoclonal antibodies. *Journal of archaeological science* **21**: 565–571.

Cavazzuti C, Bresadola B, d’Innocenzo C, Interlando S, Sperduti A. 2019. Towards a new osteometric method for sexing ancient cremated human remains. Analysis of Late Bronze Age and Iron Age samples from Italy with gendered grave goods. *Plos one* **14**: e0209423. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209423>.

Cave AJE. 1937. The anatomical and obstetric significance of the sacro sciatic notch. *Journal of Anatomy, London* **72**: 140–142.

CEEDMM. 2022. Item 128 - Ostéopathies fragilisantes. In *Société Française d’Endocrinologie*. [online] Available from: <https://www.sfendocrino.org/item-128-osteopathies-fragilisantes/>. Consulté le 02 novembre 2022.

Chan AH, Crowder CM, Rogers TL. 2007. Variation in cortical bone histology within the human femur and its impact on estimating age at death. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists* **132**: 80–88.

Chappard D. 2010. La microarchitecture du tissu osseux – Académie nationale de médecine | Une institution dans son temps. **194**: 1469–1481.

Chappard D, Baslé MF, Legrand E, Audran M. 2011. New laboratory tools in the assessment of bone quality. *Osteoporosis International* **22**: 2225–2240. DOI: 10.1007/s00198-011-1573-6.

Chilvarquer I, Katz JO, Glassman DM, Prihoda TJ, Cottone JA. 1987. Comparative radiographic study of human and animal long bone patterns. *Journal of Forensic Sciences* **32**: 1645–1654.

Cho H, Stout SD, Madsen RW, Streeter MA. 2002. Population-specific histological age-estimating method: a model for known African-American and European-American skeletal remains. *Journal of forensic sciences* **47**: 12–18.

Christensen AM, Hatch GM. 2018. Advances in the use of frontal sinuses for human identification. In Latham KE, Bartelink EJ, Finnegan M (eds). *New perspectives in forensic human skeletal identification*. Academic Press, Elsevier; 227–240.

Civjan S, Selting W, De Simon L, Battistone G, Grower M. 1972. Characterization of osseous

- tissues by thermogravimetric and physical techniques. *Journal of Dental Research* **51**: 539–542.
- Classen H. 1991. Methoden zur Lebensaltersbestimmung am Menschlichen Skelett, Dargestellt am Beispiel von Hallstattzeitlichen Körper- und Brandbestattungen. *Zeitschrift für Gerontologie* **24**: 316–318.
- Colard T, Gabart N, Blondiaux J. 2008. A palaeopathological case of a right maxilla's cemento-ossifying fibroma. *International Journal of Osteoarchaeology* **18**: 195–201.
- Coqueugniot H, Giacobini G, Malerba G. 2002. L'utilisation de caractères morphologiques dans la diagnose sexuelle des mandibules d'enfants. Application à la collection ostéologique de Turin (Italie). *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris. BMSAP* **14** (1-2): 131–139.
- Crawford MH, Beaty KG. 2013. DNA fingerprinting in anthropological genetics: past, present, future. *Investigative Genetics* **4**: 23. DOI: 10.1186/2041-2223-4-23.
- Crowder C, Dominguez VM. 2012. A new method for histological age estimation of the femur. presented at the Proceedings of the American Academy of Forensic Sciences. *American Academy Forensic Sciences Physical Anthropology section* **2012**: 374–375.
- Crowder C, Heinrich J, Stout SD. 2012. Rib histomorphometry for adult age estimation. In Bell LS (ed). *Forensic microscopy for skeletal tissues: Methods and protocols*. Humana Press; 109–127.
- Culbert WL, LAW FM. 1927. Identification by comparison of roentgenograms: of nasal accessory sinuses and mastoid processes. *Journal of the American Medical Association* **88**: 1634–1636.
- Cunha E, Fily M-L, Clisson I, Santos AL, Silva AM, Umbelino C, Cesar P, Corte-Real A, Crubezy E, Ludes B. 2000. Children at the convent: comparing historical data, morphology and DNA extracted from ancient tissues for sex diagnosis at Santa Clara-a-Velha (Coimbra, Portugal). *Journal of Archaeological Science* **27**: 949–952.
- Cunningham C, Scheuer L, Black S. 2016. *Developmental juvenile osteology*. Academic press: london.
- Curtin AJ. 2015. Putting together the pieces: Reconstructing mortuary practices from commingled ossuary cremains. In Schmidt CW and Symes SA (eds). *The analysis of burned human remains*. Academic Press: San Diego; 219–227.
- Cutler RG. 1975. Evolution of human longevity and the genetic complexity governing aging rate. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **72**: 4664–4668.
- Cvetković D, Nikolić S, Brković V, Živković V. 2019. Hyperostosis frontalis interna as an age-

related phenomenon – Differences between males and females and possible use in identification. *Science & Justice* **59**: 172–176. DOI: 10.1016/j.scijus.2018.09.005.

Dastugue J, Torre S. 1966. Les sépultures d'ifs. Étude anthropologique. *Annales de Normandie* **16**: 323–332. DOI : 10.3406/annor.1966.6776.

Daures Cathrine. 2002. *La Ligne néonatale en odontologie médico-légale / Catherine Daures*. Thèse de doctorat, Université de Nancy 1, UFR de chirurgie dentaire: Nancy

De Becdelievre C, Thiol S, Santos F, Rottier S. 2015. From fire-induced alterations on human bones to the original circumstances of the fire: an integrated approach of human cremains drawn from a Neolithic collective burial. *Journal of Archaeological Science: Reports* **4**: 210–225.

De Becdelievre C, Thiol S, Saligny S, Granjon L, Rottier S. 2016. The role of fire within Neolithic collective burials: Spatial analyses of cremains from the site of La Truie Pendue, France. *Journal of Field Archaeology* **41** (5):550-567.

Dedet B. 2008. La recherche des enfants dans les tombes: le dénombrement archéologique. In *Les enfants dans la société protohistorique l'exemple du sud de la France*. Collection de l'école Française de Rome **396**: 1000–1057.

Dedet B, Duday H, Tillier A-M. 1991. Inhumations de fœtus, nouveau-nés et nourrissons dans les habitats protohistoriques du Languedoc: l'exemple de Gailhan (Gard). *Gallia* **48**: 59–108.

DeHaan J. 2015. Fire and bodies. In Schmidt CW and Symes SA (eds). *The analysis of burned human remains, 2nd edition*. Academic Press: San Diego; 1–15.

DeHaan JD. 2002. *Kirk's Fire Investigation (5th Edition) (SIGNED)*. Fifth Edition. Prentice Hall / Pearson Education: Upper Saddle River, New Jersey.

DeHaan JD. 2012. Sustained combustion of bodies: some observations. *Journal of Forensic Sciences* **57**: 1578–1584. DOI: 10.1111/j.1556-4029.2012.02190.x.

DeHaan JD, Campbell SJ, Nurbakhsh S. 1999. Combustion of animal fat and its implications for the consumption of human bodies in fires. *Science & Justice* **39**: 27–38. DOI: 10.1016/S1355-0306(99)72011-3

DeHaan JD, Nurbakhsh S. 2001. Sustained combustion of an animal carcass and its implications for the consumption of human bodies in fires. *Journal of forensic sciences* **46**: 1076–1081.

Delannoy Y. 2016. *Caractérisation de la diagénèse osseuse en anthropologie médico-légale : étude macroscopique, spectrométrique et histomorphologique*. Thèse de Doctorat, Université du

Droit et de la Santé - Lille II: Lille.

Delannoy Y, Colard T, Le Garff E, Mesli V, Aubernon C, Penel G, Hedouin V, Gosset D. 2016. Effects of the environment on bone mass: A human taphonomic study. *Legal Medicine* **20**: 61–67. DOI: 10.1016/j.legalmed.2016.04.006.

Delattre VF. 2000. Burned beyond recognition: Systematic approach to the dental identification of charred human remains. *Journal of Forensic Science* **45**: 589–596.

Demirjian A, Goldstein H. 1976. New systems for dental maturity based on seven and four teeth. *Annals of human biology* **3**: 411–421.

Denègre J, Salgé F. 2004. *Les Systèmes d'information géographique*. Collection : Que sais-je, Presse Universitaire de France: Paris.

Depierre G. 1995. Les pratiques funéraires gallo-romaine liées à l'incinération. *Apports spécifiques de l'ostéologie, de l'archéologie et de l'éthnologie. Mémoire de Diplôme d'Etudes Appliquées "Méthodologie et Technique Nouvelles des Sciences de l'Homme"*. Université de Franche-Comté, Besançon.

Depierre G. 2010. Des incinérations du passé aux crémations en milieu à haute technologie. Approches méthodologiques et réalités archéologiques. Thèse de doctorat en Archéologie, Université de Dijon, Dijon.

Depierre G. 2013. *Crémation et archéologie : nouvelles alternatives méthodologiques en ostéologie humaine*. Edition universitaire de Dijon: Dijon.

Dérobot L, Hadengue A, Campana J-P. 1974. *Médecine légale*. Flammarion: Paris.

Desoutter J, Mentaverri R, Brazier M, Kamel S. 2012. Le remodelage osseux normal et pathologique. *Revue Francophone des Laboratoires* **2012**: 33–42. DOI: 10.1016/S1773-035X(12)71733-1.

Devlin J, Herrmann N. 2013. Taphonomy of fire. In Tersigni-Tarrant MTA and Shirley NR (eds). *Forensic anthropology: an introduction*. CRC Press: Boca raton, London, New york; 307–323.

Devlin JB, Herrmann NP. 2008. Bone color as an interpretive tool of the depositional history of archaeological cremains. In Schmidt CW and Symes SA (eds). *The Analysis of Burned Human Remains*, Academic Press: San Diego; 109–128.

Devriendt W, Piercecchi-Marti M-D, Adalian P, Sanvoisin A, Dutour O, Leonetti G. 2005. Hyperostosis Frontalis Interna: Forensic Issues. *Journal of Forensic Science* **50**: JFS2004173-4.

DOI: 10.1520/JFS2004173.

DiGangi EA, Bethard JD, Kimmerle EH, Konigsberg LW. 2009. A new method for estimating age-at-death from the first rib. *American Journal of Physical Anthropology* **138**: 164–176. DOI: 10.1002/ajpa.20916.

DiMaio D, DiMaio VJ. 2001. *Forensic Pathology*. 2<sup>nd</sup> Edition, CRC Press, London.

Dirkmaat DC, Adovasio JM. 1997. The role of archaeology in the recovery and interpretation of human remains from an outdoor forensic setting. *Forensic taphonomy: The postmortem fate of human remains*; 39–64.

Dirkmaat DC, Cabo LL. 2012. Forensic anthropology: embracing the new paradigm. In Dirkmaat DC (ed). *A companion to forensic anthropology*. John Wiley & Sons, Ltd; 1–40. DOI:10.1002/9781118255377.CH1.

Djonc D, Bracanovic D, Rakocevic Z, Ivovic M, Nikolic S, Zivkovic V, Djuric M. 2016. Hyperostosis frontalis interna in postmenopausal women—Possible relation to osteoporosis. *Women & Health* **56**: 994–1007. DOI: 10.1080/03630242.2016.1178685.

Dokládál M. 1969. Die Osteologie des Mährischen Riesen Josef Drásal. *Anthropologie (1962)* : 9–24.

Dokládál M. 1971. A further contribution to the morphology of burned bones. In Novotny V. (ed). *Proceedings of Aleš Hrdlicka Anthropological Congress*. Czechoslovak Academy of Sciences: Prague; 561–568.

Dokládál M. 1999. *Morfologie spálených kostí: význam pro identifikaci osob*. Masarykova univerzita.

Dries M van den. 1998. *Archaeology and the application of artificial intelligence: case-studies on use-wear analysis of prehistoric flint tools*. Fac. of Archaeology, University of Leiden: Leiden.

Du Fayet de la Tour A. 2020. *Diagnostic de l'hyperostose frontale interne : nouvelles perspectives dans l'identification des corps carbonisés*. Thèse d'exercice, Faculté de médecine, Université de Limoges: Limoges.

Du Fayet de la Tour A, Couture C, Paraf F, Duday H. 2023. Hyperostosis frontalis interna: A new perspective in burned individuals' analysis for determining age and sex from archeo-anthropological and medicolegal contexts. *International Journal of Osteoarchaeology* **33**: 114–127.

Duclos-Vallée J, Ichaï P, Chapuis P, Misrahi M, Woimant F. 2006. La maladie de Wilson. *orphanet*. [online] Available from : <https://www.orpha.net/data/patho/FR/fr-Wilson.pdf>. Consulté le 3 avril 2023.

Duday H. 1975. Le squelette du sujet féminin de la sépulture pré-néolithique de Bonifacio (Corse). Essai d'interprétation paléthnologique. *Cahiers d'Anthropologie*, Mémoire **24**.

Duday H. 1978. Archéologie funéraire et anthropologie. Application des relevés et de l'étude ostéologiques à l'interprétation de quelques sépultures pré-et protohistoriques du midi de la France. *Cahiers d'Anthropologie Paris* **1978** (1): 55–101.

Duday H. 1987a. Contribution des observations ostéologiques à la chronologie interne des sépultures collectives. In Duday H and Masset C (eds). *Anthropologie Physique et Archaeologie. Méthode d'étude des sépultures : actes du colloque de Toulouse, 4, 5 et 6 novembre 1982*. Editions du Centre national de la recherche scientifique : Presses du CNRS, diffusion : Paris; 51–61.

Duday H. 1987b. Organisation et fonctionnement d'une sépulture collective néolithique. L'aven de la Boucle à Corconne (Gard). In Duday H and Masset C (eds). *Anthropologie physique et archéologie : méthodes d'étude des sépultures : actes du colloque de Toulouse, 4, 5 et 6 novembre 1982*. Editions du Centre national de la recherche scientifique : Presses du CNRS, diffusion : Paris; 89–104

Duday H. 2017. L'archéothanatologie : Une manière nouvelle de penser l'archéologie de la Mort. In Beaune SA de and Francfort H-P (eds). *L'archéologie à découvert : Hommes, objets, espaces et temporalités*. CNRS Éditions: Paris; 62–71. DOI: 10.4000/books.editions-cnrs.11241.

Duday H. 2019. Sépultures secondaires à crémation. Quelques réflexions sur trente années d'évolution méthodologique en France. *Les nouvelles de l'archéologie* **157-158**: 100–106. DOI: 10.4000/nda.7831.

Duday H, Cipriani AM, Pearce J. 2009. *The archaeology of the dead: lectures in archaeothanatology*. Oxbow books.

Duday H, Courtaud P, Crubézy É, Sellier P, Tillier A-M. 1990. L'Anthropologie « de terrain » : reconnaissance et interprétation des gestes funéraires. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* **2**: 29–49. DOI: 10.3406/bmsap.1990.1740.

Duday H, Depierre G, Janin T. 2000. Validation des paramètres de quantification, protocoles et stratégies dans l'étude anthropologique des sépultures secondaires à incinération. L'exemple des nécropoles protohistoriques du Midi de la France. In *Archéologie de la Mort, Archéologie de la Tombe au premier Âge du Fer*. Actes du XXI colloque International de l'AFEAF: Conques -

Montrozier; 7–29 .

Duday H, Masset C (eds). 1987. *Anthropologie physique et archéologie: méthodes d'étude des sépultures: actes du colloque de Toulouse, 4, 5 et 6 novembre 1982*. Editions du Centre national de la recherche scientifique : Presses du CNRS, diffusion : Paris.

Duday H, Sellier P. 1990. L'archéologie des gestes funéraires et la taphonomie. *Nouvelles de l'archéologie* **40**: 12–14.

Duday H, Spinola G, Blasi LD, Ricciardi M, Bucci I, Caldarini C, Giannantonio SD. 2015. Nécropole Santa Rosa (Rome, Cité du Vatican). *Chronique des activités archéologiques de l'École française de Rome*. [online] Available from <https://doi.org/10.4000/cefr.1349>. Consulté le 13 Janvier 2023.

Duffe P, Marec M. 1999. Mission administrative d'enquête technique sur l'incendie survenu le 24 mars 1999 au tunnel routier du Mont Blanc. *vie-publique.fr* [online] Available from: <http://www.vie-publique.fr/rapport/24992-mission-administrative-denquete-technique-sur-lincendie-survenu-le-24>. Consulté le 21 juin 2023.

Duffy JB, Waterfield JD, Skinner MF. 1991. Isolation of tooth pulp cells for sex chromatin studies in experimental dehydrated and cremated remains. *Forensic science international* **49**: 127–141.

Dufková J. 1985. Contribution to identification of cadaver/skeletal parts with reference to burn cadavers. I: Conclusive position on the density of teeth as a possibility for age determination. II: Identification by bone structures--comparison using roentgen images. *Beitrag zur gerichtlichen Medizin* **43**: 233–248.

Dumaure É, Paul A. 2015. *L'identification odontologique comparative au service de la médecine légale*. Thèse d'exercice, Université de Nice Sophia Antipolis : Nice.

Dunlop JM. 1978. Traffic Light Discoloration in Cremated Bones. *Medicine, Science and the Law* **18**: 163–173. DOI: 10.1177/002580247801800304.

Durić M, Rakocević Z, Donić D. 2005. The reliability of sex determination of skeletons from forensic context in the Balkans. *Forensic Science International* **147**: 159–164. DOI: 10.1016/j.forsciint.2004.09.111.

Durigon M. 1987. *Pathologie médico-légale*. Masson: Paris.

Dutour O. 1986. Enthesopathies (lesions of muscular insertions) as indicators of the activities of Neolithic Saharan populations. *American Journal of Physical Anthropology* **71**: 221–224. DOI: 10.1002/ajpa.1330710209.

Dutour O. 2011. *La paléopathologie*. CTHS: Paris.

Echard A. 2017. *Caractérisation multi-échelle du tissu osseux: Application à l'ostéogénèse imparfaite*. Thèse de doctorat, Université de Lyon: Lyon.

Eckert WG, James S, Katchis S. 1988. Investigation of cremations and severely burned bodies. *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology* **9**: 188–200. DOI: 10.1097/00000433-198809000-00002.

Eckert WG, Perper J. 1981. The medicolegal and forensic aspects of fires. *The American journal of forensic medicine and pathology* **2**: 347–358.

Ekizoglu O, Hocaoglu E, Inci E, Bilgili MG, Solmaz D, Erdil I, Can IO. 2014. Sex estimation from sternal measurements using multidetector computed tomography. *Medicine* **93** (27): e240.

Emanovsky P, Hefner JT, Dirkmaat DC. 2002. Can sharp force trauma to bone be recognized after fire modification? An experiment using *Odocoileus virginianus* (white-tailed deer) ribs. *Proceeding from annual meeting of American Academy of Forensic science* **8**: 214–215.

EUR-Lex. 2008. EUR-Lex - jI0005 - EN - EUR-Lex [online] Available from: <https://eur-lex.europa.eu/FR/legal-content/summary/stepping-up-cross-border-cooperation-the-pr-m-decision.html>. Consulté le 19 juin 2023.

Evans FG. 1973. *Mechanical properties of bone*. Thomas: Springfield, Ill.

Fairgrieve SI. 2008. *Forensic cremation: recovery and analysis*. CRC Press: Boca Raton.

Falsetti AB. 1995. Sex assessment from metacarpals of the human hand. *Journal of Forensic Sciences* **40**: 774–776.

Faruch Bilfeld M. 2015. *Etude du dimorphisme sexuel de l'os coxal immature en morphométrie géométrique par une analyse de 400 examens tomодensitométriques*. Thèse de doctorat. Université Toulouse III-Paul Sabatier: Toulouse.

Fatu C, Puisoru M, Rotaru M, Truta A. 2006. Morphometric evaluation of the frontal sinus in relation to age. *Annals of Anatomy-Anatomischer Anzeiger* **188**: 275–280.

Fausto-Sterling A. 2012. *Sex/gender: Biology in a social world*. Routledge.

Fédération nationale des sapeurs pompiers de France 2023. Prévention des risques d'incendies domestiques. *Pompiers.fr* [online] Available from: <https://www.pompiers.fr/grand-public/prevention-des-risques/prevention-des-risques-dincendies-domestiques>. Consulté le 12

mai 2023.

Ferembach D, Schwidetzky I, Stloukal M. 1979. Recommandations pour déterminer l'âge et le sexe sur le squelette. **6**: 7–45. DOI: <https://doi.org/10.3406/bmsap.1979.1945>.

Ferembach D, Susanne C, Chamla M-C (eds). 1986. *L'Homme, son évolution, sa diversité: manuel d'anthropologie physique*. Editions du CNRS : Doin: Paris.

Forbes G. 1941. The Effects of Heat on the Histological Structure of Bone. *The Police Journal* **14**: 50–60. DOI: 10.1177/0032258X4101400108.

Forbes RMLcoo, Cooper A, Mitchell H. 1953. The composition of the adult human body as determined by chemical analysis. *Journal of Biological Chemistry* **203**: 359–366.

Franchet L. 1933. *La coloration des os dans le sol: le bouillage des cadavres au Moyen-âge*. Editions de la Revue politique et littéraire (Revue bleue) et de la Revue scientifique: Paris, France.

Frederic J. 1906. Untersuchungen über die normale Obliteration der Schädelnähte. *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie* : 373–456.

Frost HM. 1987. Bone “mass” and the “mechanostat”: A proposal. *The Anatomical Record* **219**: 1–9. DOI: 10.1002/ar.1092190104.

Frost HM. 1988. Vital biomechanics: Proposed general concepts for skeletal adaptations to mechanical usage. *Calcified Tissue International* **42**: 145–156. DOI: 10.1007/BF02556327.

Gabilondo FE. 1994. Aspectos macroscópicos del hueso sometido al fuego: revisión de las cremaciones descritas en el País Vasco desde la arqueología. *Munibe Antropologia-Arkeologia* **46**: 111–116.

Gaha M, Dedouit F, Ducloyer M, Dumoussset E, Auffret M, Saccardy C, Ben Salem D. 2022. Post-mortem Computed Tomography of Charred Victims in Modern Forensic Medicine. In Dedouit F, Yen K, and Heinze S (eds), *Forensic imaging: a practical guide*. Springer International Publishing: Cham; 137–150. DOI: 10.1007/978-3-030-83352-7\_10.

Gaillard J. 1960. Détermination sexuelle d'un os coxal fragmentaire. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* **1** (2): 255–267.

Galera V, Ubelaker DH, Hayek L-A. 1998. Comparison of macroscopic cranial methods of age estimation applied to skeletons from the Terry Collection. *Journal of Forensic Sciences* **43**: 933–939.

Gallo G, Fyhrie M, Paine C, Ushakov SV, Izuho M, Gunchinsuren B, Zwyns N, Navrotsky A. 2021. Characterization of structural changes in modern and archaeological burnt bone: Implications for differential preservation bias. *PLOS ONE* **16**: e0254529. DOI: 10.1371/journal.pone.0254529.

García-Donas JG, Bonicelli A, Scholl AR, Lill C, Paine RR, Kranioti EF. 2021. Rib histomorphometry: A reliability and validation study with a critical review of histological techniques for forensic age estimation. *Legal Medicine* **49**: 101827.

García-Parra P, Fernández ÁP, Djorojevic M, Botella M, Alemán I. 2014. Sexual dimorphism of human sternum in a contemporary Spanish population. *Forensic Science International* **244**: 313.e1-313.e9.

Gardey D, Vuille M. 2018. *Les sciences du désir. La sexualité féminine, de la psychanalyse aux neurosciences*. Lormont, Le Bord de l'eau.

Gatto E. 2003. *La place de la crémation dans le traitement des défunts à la fin du Néolithique en France : outils méthodologiques et études de sites*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1: Bordeaux.

Geber J, Hensey R, Meehan P, Moore S, Kador T. 2017. Facilitating Transitions: Postmortem Processing of the Dead at the Carrowkeel Passage Tomb Complex, Ireland (3500–3000 cal. B.C.). *Bioarchaeology International* **1**: 35–51.

Gejvall N-G. 1963. Cremations. In *Science in Archaeology*. Thames and Hudson: London; 379–390.

Gejvall N-G. 1969. Cremations. In *Science in Archaeology: A Comprehensive Survey of Progress and Research*. Thames and Hudson: London; 468–479.

Gejvall NG. 1981. *Determination of burned bones from prehistoric graves: Observations on the cremated bones from the graves at Horn*. Osteological Research Laboratory at the University of Stockholm: Stockholm.

Genovés S. 1959. L'estimation des différences sexuelles dans l'os coxal: différences métriques et différences morphologiques. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* **10**: 3–95.

Georget C, Fronty P, Sapanet M. 2001. *L'identification comparative*. Atlantique : Poitiers.

Ginolhac A, Rasmussen M, Gilbert MTP, Willerslev E, Orlando L. 2011. mapDamage: testing for damage patterns in ancient DNA sequences. *Bioinformatics* **27**: 2153–2155.

Glanville E. 1967. Sexual dimorphism in the pelvic bones of the Tellem, a medieval Negro

population from the Mali Republic. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen. Series C. Biological and Medical Sciences* **70**: 368–377.

Glassman D, Crow R. 1996. Standardization model for describing the extent of burn injury to human remains. *Journal of forensic sciences* **41**: 152–154.

Gnoli G, Vernant JP (eds). 1982. *La Mort, les morts dans les sociétés anciennes*. Cambridge University Press ; Maison des sciences de l'homme: Cambridge ; New York : Paris.

Gocha TP, Schutkowski H. 2013. Tooth cementum annulation for estimation of age-at-death in thermally altered remains. *Journal of forensic sciences* **58**: 151–155.

Goliath JR. 2010. Variation in osteon circularity and its impact on estimating age at death. Master's thesis, Ohio State University. [online] Available from: [http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc\\_num=osu1273762376](http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=osu1273762376). Consulté le 17 mars 2023.

Goliath JR, Stewart MC, Stout SD. 2016. Variation in osteon histomorphometrics and their impact on age-at-death estimation in older individuals. *Forensic science international* **262**: 282-e1.

Gonçalves D, Campanacho V, Cardoso HF. 2011a. Reliability of the lateral angle of the internal auditory canal for sex determination of subadult skeletal remains. *Journal of forensic and legal medicine* **18**: 121–124.

Gonçalves D, Thompson TJU, Cunha E. 2011b. Implications of heat-induced changes in bone on the interpretation of funerary behaviour and practice. *Journal of Archaeological Science* **38**: 1308–1313. DOI: 10.1016/j.jas.2011.01.006.

Gonçalves D, Thompson TJU, Cunha E. 2013. Osteometric sex determination of burned human skeletal remains. *Journal of Forensic and Legal Medicine* **20**: 906–911. DOI: 10.1016/j.jflm.2013.07.003.

Gonçalves D, Cunha E, Thompson TJ. 2015a. Estimation of the pre-burning condition of human remains in forensic contexts. *International Journal of Legal Medicine* **129**: 1137–1143.

Gonçalves D, Thompson TJ, Cunha E. 2015b. Sexual dimorphism of the lateral angle of the internal auditory canal and its potential for sex estimation of burned human skeletal remains. *International journal of legal medicine* **129**: 1183–1186.

Grévin G. 1990. La fouille en laboratoire des sépultures à incinération : son apport à l'archéologie. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* **2**: 67–74. DOI: 10.3406/bmsap.1990.1744.

Grevin G. 2004. L'étude des crémations sur bûchers. *Archéologia* **408**: 44–51.

Grevin G. 2005. La Crémation sur bûcher dans l'Antiquité à la lumière de l'ethno-archéologie. *Ktèma* **30**: 15–20.

Grevin G. 2011. Les os brûlés : étude et identification. In Beauthier J-P. *Traité de médecine légale*. De Boeck et Larcier: Bruxelles.

Grévin G, Bailet P, Quatrehomme G, Ollier A. 1998. Anatomical reconstruction of fragments of burned human bones: a necessary means for forensic identification. *Forensic Science International* **96**: 129–134. DOI: 10.1016/S0379-0738(98)00115-7.

Grupe G, Herrmann B. 1983. Über das Schrumpfungsverhalten experimentell verbrannter spongiöser Knochen am Beispiel des Caput femoris. *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie* **74**: 121–127.

Gruspier KL, Mullen GJ. 1991. Maxillary suture obliteration: a test of the Mann method. *Journal of forensic sciences* **36**: 512–519.

Gupta HS, Stachewicz U, Wagermaier W, Roschger P, Wagner HD, Fratzl P. 2006. Mechanical modulation at the lamellar level in osteonal bone. *Journal of Materials Research* **21**: 1913–1921. DOI: 10.1557/jmr.2006.0234.

Gutiérrez-Tiznado P, López-Lázaro S, Fonseca GM. 2023. Age estimation by evaluation of obliteration of the palatine sutures: a scoping review. *Forensic Science, Medicine and Pathology* : 1–8. <https://doi.org/10.1007/s12024-023-00645-y>.

Guyomarc'h P, Bruzek J. 2010. Cranial sexual dimorphism of identified subjects (collection Olivier, MNHN, Paris): An evaluation by geometric morphometrics. *Bulletins et mémoires de la Société d'anthropologie de Paris* **22**: 216–229.

Haglund W. 1992. Remains identification by frontal sinus radiographs. *Journal of Forensic Sciences* **37**: 1207–1207.

Haglund WD. 2001. Archaeology and forensic death investigations. *Historical Archaeology* **35**: 26–34.

Halbout PA, Legrand A, Ulrich E, Pomarèdes H, Cornillet P. 1996. Détermination du sexe par Polymerase Chain Reaction à partir de restes osseux humains antiques et médiévaux. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* **8**: 465–479. DOI: 10.3406/bmsap.1996.2463.

Hänni C. 1994. Utilisation de l'ADN ancien en anthropologie. *Bulletins et Mémoires de la Société*

*d'Anthropologie de Paris* **6**: 5–28. DOI: 10.3406/bmsap.1994.2382.

Hanson M, Cain CR. 2007. Examining histology to identify burned bone. *Journal of Archaeological Science* **34**: 1902–1913.

Harbeck M, Schleuder R, Schneider J, Wiechmann I, Schmahl WW, Grupe G. 2011. Research potential and limitations of trace analyses of cremated remains. *Forensic Science International* **204**: 191–200. DOI: 10.1016/j.forsciint.2010.06.004.

Harsanyi L. 1975. Scanning electron microscopic investigation of thermal damage of the teeth. *Acta Morphologica Academiae Scientiarum Hungaricae* **23**: 271–281.

Harsányi L. 1993. Differential diagnosis of human and animal bone. *In the Histology of Ancient Human Bone: Methods and Diagnosis*. “Palaeohistology Workshop” held from 3–5 October 1990: Göttingen; 79–94. DOI:10.1007/978-3-642-77001-2\_5

Hartnett KM. 2010. Analysis of age-at-death estimation using data from a new, modern autopsy sample—Part I: Pubic bone. *Journal of forensic sciences* **55**: 1145–1151.

Hayward C, Porteous MEM, Brock DJH. 1994. A novel mutation in the fibrillin gene (FBN1) in familial arachnodactyly. *Molecular and Cellular Probes* **8**: 325–327. DOI: 10.1006/mcpr.1994.1045.

Hedges REM. 2002. Bone diagenesis: an overview of processes. *Archaeometry* **44**: 319–328. DOI: 10.1111/1475-4754.00064.

Hedges REM, Millard AR. 1995. Bones and Groundwater: Towards the Modelling of Diagenetic Processes. *Journal of Archaeological Science* **22**: 155–164. DOI: 10.1006/jasc.1995.0017.

Heglar R. 1984. Burned remains. In Rathbun Ted A. and Buikstra JE. *Human identification: Case Studies in Forensic Anthropology*. Charles C. Thomas: Springfield; 148–158.

Henry X, Tisserand-Martin A, Venandet G, Ancel P, Naudin E, Damas N. 2022. *Code civil: annoté*. 122e édition. Guionard P (ed). Dalloz: Paris.

Herrmann B. 1970. *Anthropologische Bearbeitung der Leichenbrände von Berlin rudow*. Ausgrabungen in Berlin. Berlin; 61–71.

Herrmann B. 1976. Neuere Ergebnisse zur Beurteilung menschlicher Brandknochen. *Zeitschrift für Rechtsmedizin* **77**: 191–200.

Herrmann B. 1977a. On histological investigations of cremated human remains. *Journal of*

*Human Evolution* **6**: 101–103.

Herrmann B. 1977b. Über die Abhängigkeit der Schrumpfung vom Mineralgehalt bei experimentell verbrannten Knochen. *Anthropologischer Anzeiger* **36**: 7–12.

Herrmann B. 1988. Behandlung von Leichenbrand. In Knussmann R. *Anthropologie Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen*. Fischer Verlag: Stuttgart; 576–585.

Herrmann NP, Bennett JL. 1999. The differentiation of traumatic and heat-related fractures in burned bone. *Journal of forensic sciences* **44**: 461–469.

Herskovitz I, Greenwald C, Rothschild BM, Latimer B, Dutour O, Jellema LM, Wish-Baratz S. 1999. Hyperostosis frontalis interna: An anthropological perspective. *American Journal of Physical Anthropology* **109**: 303–325. DOI: 10.1002/(SICI)1096-8644(199907)109:3<303::AID-AJPA3>3.0.CO;2-I.

Herskovitz I, Latimer B, Dutour O, Jellema LM, Wish-Baratz S, Rothschild C, Rothschild BM. 1997. Why do we fail in aging the skull from the sagittal suture? *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists* **103**: 393–399.

Hoffman JM. 1979. Age estimations from diaphyseal lengths: two months to twelve years. *Journal of Forensic Sciences* **24**: 461–469.

Holck P. 1986. *Cremated Bones: A Medico-anthropological Study of an Archaeological Material on Cremation Burials*. Antropologiske skrifter no. 1; Oslo: Anatomisk Institutt, Universitet i Oslo: Oslo

Holland TD. 1989. Use of the cranial base in the identification of fire victims. *Journal of Forensic Sciences* **34**: 458–460.

Houghton P. 1974. The relationship of the pre-auricular groove of the ilium to pregnancy. *American Journal of Physical Anthropology* **41**: 381–389.

Hrdlička A, Stewart TD. 1952. *Hrdlička's practical anthropometry*. 4th ed. Wistar Institute of Anatomy and Biology: Philadelphia.

Huch R, Jürgens KD (eds). 2019. *Mensch, Körper, Krankheit: Anatomie, Physiologie, Krankheitsbilder. Lehrbuch*. 8. Auflage. Elsevier: München.

Hummel S, Schutkowski H. 1986. Das Verhalten von Knochengewebe unter dem Einfluß höherer Temperaturen.—Bedeutungen für die Leichenbranddiagnose. *Zeitschrift für Morphologie und*

*Anthropologie* **77**: 1–9.

Hunger H, Leopold D (eds). 2011. *Identifikation*. Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1978. Springer: Berlin, Heidelberg, New York.

Huxley AK, Kósa F. 1999. Calculation of percent shrinkage in human fetal diaphyseal lengths from fresh bone to carbonized and calcined bone using Petersohn and Köhler's data. *Journal of forensic sciences* **44**: 577–583.

Huy P, Teissier N. 2011. Embryologie de l'oreille moyenne. *EMC - Oto-rhino-laryngologie* **6**: 1–9. DOI: 10.1016/S0246-0351(11)41884-5.

Interpol. 2020. Empreintes digitales [online] Available from: <https://www.interpol.int/fr/Notre-action/Police-scientifique/Empreintes-digitales>. Consulté le 4 avril 2023.

Introna F, Di Vella G, Campobasso CP, Dragone M. 1997. Sex determination by discriminant analysis of calcanei measurements. *Journal of Forensic Sciences* **42**: 725–728.

Iregren E, Jonsson R. 1973. Hur ben krymper vid kremering. *Fornvännen* **68**: 97–100.

Irish JD, Potter BA, Reuther JD. 2015. An 11,500-year-old human cremation from Eastern Beringia (Central Alaska). In Schmidt CW and Symes SA (eds). *The Analysis of Burned Human Remains*. Academic Press: San Diego; 295–306.

Işcan M, Krogman W. 1986. *Human Skeleton in Forensic Medicine*. 2nd Edition, Charles C. Thomas: Springfield.

Işcan M, Loth SR, Wright R. 1985. Age estimation from the rib by phase analysis: white females. *Journal of forensic sciences* **30**: 853–863.

Işcan MY. 1985. Osteometric analysis of sexual dimorphism in the sternal end of the rib. *Journal of Forensic Sciences* **30**: 1090–1099.

Işcan MY, Loth SR. 1986a. Determination of age from the sternal rib in white females: a test of the phase method. *Journal of Forensic Sciences* **31**: 990–999.

Işcan MY, Loth SR. 1986b. Determination of age from the sternal rib in white males: a test of the phase method. *Journal of Forensic Sciences* **31**: 122–132.

Işcan MY, Loth SR, King CA, Shihai D, Yoshino M. 1998. Sexual dimorphism in the humerus: a comparative analysis of Chinese, Japanese and Thais. *Forensic science international* **98**: 17–29.

Işcan MY, Loth SR, Wright RK. 1984. Age Estimation from the Rib by Phase Analysis: White Males. *Journal of Forensic Science* **29**: 1094–1104. DOI: 10.1520/JFS11776J

Işcan MY, Miller-Shaivitz P. 1984. Determination of sex from the tibia. *American Journal of Physical Anthropology* **64**: 53–57.

Ives R. 2015. Insights into health, life and death in Victorian London's east end. *London Archaeologist* **14**: 150–154.

Jalby C. 2017. *La police technique et scientifique*. 4<sup>ème</sup> édition, Presses Universitaires de France: Paris.

Jallet F, Blaizot F, Franc O. 2005. Une pratique funéraire originale du Néolithique moyen bourguignon : des vestiges de crémation à Lyon (Rhône). *Bulletin de la Société préhistorique française* **102**: 281–297.

Janssens PA, Perrot RJL. 2006. Précis d'anthropobiologie descriptive et métrique du squelette. [online] Available from: <http://www.laboratoireanthropologieanatomiqueetdepaleopathologiedelyon.fr/PRECIS%20D'ANTHROPOBIOLOGIE%20SOMMAIRE.htm>. Consulté le 12 novembre 2022.

Jauseau L. 2018. *Diagnostic différentiel des calcifications cervicales détectées à la radiographie panoramique et/ou à l'imagerie tridimensionnelle CBCT*. Thèse d'exercice, Paris Descartes: Paris.

Johnson E. 1985. Current developments in bone technology. *Advances in archaeological method and theory* **8**: 157–235.

Jordan-Young RM, Karkazis K. 2019. *Testosterone: An unauthorized biography*. 1<sup>st</sup> edition, Harvard University Press: Cambridge.

Kaczmarek M, Piontek J. 1982. Human cremated remains and the diversity of man. *Homo* **33**: 230–236.

Kaeswaren Y, Hackman L. 2019. Sexual dimorphism in the cervical vertebrae and its potential for sex estimation of human skeletal remains in a white scottish population. *Forensic Science International: Reports* **1**: 100023. DOI: 10.1016/j.fsir.2019.100023.

Kahana T, Hiss J. 1997. Identification of human remains: forensic radiology. *Journal of clinical forensic medicine* **4**: 7–15.

Kalsbeek N, Richter J. 2006. Preservation of burned bones: an investigation of the effects of temperature and pH on hardness. *Studies in conservation* **51**: 123–138.

Karkhanis S, Ball J, Franklin D. 2009. Macroscopic and microscopic changes in incinerated deciduous teeth. *The Journal of Forensic Odonto-Stomatology* **27**: 9–19.

Karydi C, García-Donas JG, Tsiminikaki K, Bonicelli A, Moraitis K, Kranioti EF. 2022. Estimation of Age-at-Death Using Cortical Bone Histomorphometry of the Rib and Femur: A Validation Study on a British Population. *Biology* **11**: 1615.

Katz D, Suchey JM. 1986. Age determination of the male os pubis. *American journal of physical anthropology* **69**: 427–435.

Kemkes-Grottenthaler A. 1996. Sterbealterbestimmung anhand des ektokranialen Nahtverschlusses: Eine Evaluierung der Meindl-Lovejoy-Methode. *Rechtsmedizin* **6**: 177–184.

Kennedy KA. 1989. Skeletal markers of occupational stress. In I İşcan MY and Kennedy KA (eds). *Reconstruction of Life from the skeleton*. Wiley-Liss; 129–160.

Kennedy KA. 1996. The wrong urn: commingling of cremains in mortuary practices. *Journal of forensic sciences* **41**: 689–692.

Kerley ER. 1965. The microscopic determination of age in human bone. *American Journal of Physical Anthropology* **23**: 149–163. DOI: 10.1002/ajpa.1330230215.

Kerley ER, Ubelaker DH. 1978. Revisions in the microscopic method of estimating age at death in human cortical bone. *American journal of physical anthropology* **49**: 545–546.

King JB. 1939. Calcification of the costal cartilages. *The British Journal of Radiology* **12**: 2–12.

Kirk NJ, Wood RE, Goldstein M. 2002. Skeletal identification using the frontal sinus region: a retrospective study of 39 cases. *Journal of forensic sciences* **47**: 318–323.

Knell B, Bussmann D. 1999. Identification odontostomatologique. *chweizerische monatsschrift fur zahnmedizin*, **109**: 1287–1298.

Knüsel C, Ripley K. 2000. The *Berdache* or man-woman in Anglo-Saxon England and Early medieval Europe. In Frazer WO, Tyrrell A (eds). *Social identity in early medieval Britain*, Leicester Univeristy Press: London, New York; 157–191.

Kooi RJ, Fairgrieve SI. 2013. SEM and stereomicroscopic analysis of cut marks in fresh and burned bone. *Journal of forensic sciences* **58**: 452–458.

Kranioti EF, Vorniotakis N, Galiatsou C, İşcan MY, Michalodimitrakis M. 2009. Sex identification

and software development using digital femoral head radiographs. *Forensic Science International* **189**: 113.e1-113.e7. DOI: 10.1016/j.forsciint.2009.04.014.

Krishan K, Kanchan T. 2013. Evaluation of spheno-occipital synchondrosis: A review of literature and considerations from forensic anthropologic point of view. *Journal of forensic dental sciences* **5**: 72–76.

Krogman W. 1949. *The human skeleton in legal medicine: Medical aspects*. Charles C Thomas: Philadelphia; 1–90.

Kühl I. 1986. Hinweise auf Belastungsdeformationen an Skelettresten aus prahistorischen Brandbestattungen. *Z Rechtsmed* **97**: 227–238.

Kunos CA, Simpson SW, Russell KF, Hershkovitz I. 1999. First rib metamorphosis: Its possible utility for human age-at-death estimation. *American Journal of Physical Anthropology* **110**: 303–323. DOI: 10.1002/(SICI)1096-8644(199911)110:3<303::AID-AJPA4>3.0.CO;2-O.

Kurihara Y, Kurihara Y, Ohashi K, Kitagawa A, Miyasaka M, Okamoto E, Ishikawa T. 1996. Radiologic evidence of sex differences: is the patient a woman or a man? *AJR. American journal of roentgenology* **167**: 1037–1040.

Kurki H. 2005. Use of the first rib for adult age estimation: a test of one method. *International Journal of Osteoarchaeology* **15**: 342–350.

Lagacé F, Verna E, Adalian P, Baccino E, Martrille L. 2019. Testing the accuracy of a new histomorphometric method for age-at-death estimation. *Forensic science international* **296**: 48–52.

Lancet 1893. Burial, cremation and the detection of crime. *Lancet* **141**: 478.

Lange M, Schutkowski H, Hummel S, Herrmann B. 1987. *A bibliography on cremation*. Presented at the PACT: Strasbourg; 1–168.

Lara M, Paz V, Lewis H, Solheim II W. 2015. Bone modifications in an early holocene cremation burial from Palawan, Philippines. *International Journal of Osteoarchaeology* **25**: 637–652. DOI: 10.1002/oa.2326.

Laurent F-X, Vibrac G, Rubio A, Thévenot M-T, Pène L. 2017. Les nouvelles technologies d'analyses ADN au service des enquêtes judiciaires. *médecine/sciences* **33**: 971–978. DOI: 10.1051/medsci/20173311014.

Lazer E. 1996. Revealing secrets of a lost city. *Medical Journal of Australia* **165**: 620–623. DOI:

10.5694/j.1326-5377.1996.tb138666.x.

Lazer E. 2009. *Resurrecting Pompeii*. Routledge, Taylor & Francis: London, New York.

Lazorthes G, Lhez A. 1939. Les caracteres sexuels de la grande échancrure sciatique. *Bulletins et mémoires de la Société d'anthropologie de Paris* **10**: 4–6.

Leclerc J. 1979. Problèmes d'observation et de terminologie à propos de la sépulture collective de la Chaussée-Tirancourt in Séminaire sur les structures d'habitat : Sépultures (1975). *Revista do Museu Paulista Sao Paulo* **26**: 83–88.

Lemmers SA, Gonçalves D, Cunha E, Vassalo AR, Appleby J. 2020. Burned fleshed or dry? The potential of bioerosion to determine the pre-burning condition of human remains. *Journal of Archaeological Method and Theory* **27**: 972–991.

Lenorzer S. 2006. Pratiques funéraires du Bronze final IIIb au premier âge du Fer en Languedoc occidental et Midi-Pyrénées : approche archéo-anthropologique des nécropoles à incinération. *Bulletin de la Société préhistorique française* **103**: 622–625.

Leroi-Gourhan A, Bailloud G, Brézillon M, Monmignaut C. 1962. L'hypogée II des Mournouards (Mesnil-sur-Oger, Marne). *Gallia préhistoire* **5**: 23–133.

Lisowski F. 1968. The investigation of human cremations. In *Anthropologie und Humangenetik* 4, Festschrift für Karl Saller: Stuttgart; 76-83.

Liversidge H, Marsden P. 2010. Estimating age and the likelihood of having attained 18 years of age using mandibular third molars. *British dental journal* **209** (8): E13. DOI: 10.1038/sj.bdj.2010.976

Liversidge HM. 2015. Controversies in age estimation from developing teeth. *Annals of Human Biology* **42**: 397–406.

Locard E. 1914. *La preuve judiciaire par les empreintes digitales*. A. Rey.

Loth SR, Henneberg M. 2001. Sexually dimorphic mandibular morphology in the first few years of life. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists* **115**: 179–186.

Lottering N, MacGregor DM, Alston CL, Gregory LS. 2015. Ontogeny of the spheno-occipital synchondrosis in a modern Queensland, Australian population using computed tomography. *American journal of physical anthropology* **157**: 42–57.

Lovejoy CO, Meindl RS, Pryzbeck TR, Mensforth RP. 1985. Chronological metamorphosis of the auricular surface of the ilium: a new method for the determination of adult skeletal age at death. *American Journal of Physical Anthropology* **68**: 15–28. DOI: 10.1002/ajpa.1330680103.

Lowenstein JM, Reuther JD, Hood DG, Scheuenstuhl G, Gerlach SC, Ubelaker DH. 2006. Identification of animal species by protein radioimmunoassay of bone fragments and bloodstained stone tools. *Forensic Science International* **159**: 182–188.

Lowrance E, Latimer HB. 1967. Weights and variability of components of the human vertebral column. *The Anatomical Record* **159**: 83–88.

Lynnerup N, Schulz M, Madelung A, Graw M. 2006. Diameter of the human internal acoustic meatus and sex determination. *International Journal of Osteoarchaeology* **16**: 118–123.

Lynnerup N, Thomsen JL, Frohlich B. 1998. Intra-and inter-observer variation in histological criteria used in age at death determination based on femoral cortical bone. *Forensic science international* **91**: 219–230.

Maat GJ, Maes A, Aarents MJ, Nagelkerke NJ. 2006. Histological age prediction from the femur in a contemporary Dutch sample. The decrease of nonremodeled bone in the anterior cortex. *Journal of forensic sciences* **51** (2): 230–237. DOI: 10.1111/j.1556-4029.2006.00062.x.

Maat GJ, Mastwijk RW, van der Velde EA. 1995. Skeletal distribution of degenerative changes in vertebral osteophytosis, vertebral osteoarthritis and DISH. *International Journal of Osteoarchaeology* **5**: 289–298.

Macoveciuc I, Márquez-Grant N, Horsfall I, Zioupos P. 2017. Sharp and blunt force trauma concealment by thermal alteration in homicides: An in-vitro experiment for methodology and protocol development in forensic anthropological analysis of burnt bones. *Forensic Science International* **275**: 260–271. DOI: 10.1016/j.forsciint.2017.03.014.

Malinowski A. 1969. Synthèse des recherches polonaises effectuées jusqu'à présent sur les os des tombes à incinération. *Przeegląd Antropologiczny* **35**: 127–147.

Malinowski A, Porawski R. 1969. Identifikationsmöglichkeiten Menschlicher Brandknochen mit Besonderer Berücksichtigung Ihres Gewichts. *Zacchia* **44**: 1–19.

Mall G, Hubig M, Büttner A, Kuznik J, Penning R, Graw M. 2001. Sex determination and estimation of stature from the long bones of the arm. *Forensic science international* **117**: 23–30.

Mamede AP, Gonçalves D, Marques MPM, Batista de Carvalho LA. 2018. Burned bones tell their own stories: A review of methodological approaches to assess heat-induced diagenesis. *Applied*

*Spectroscopy Reviews* **53**: 603–635.

Mann RW. 1998. Use of bone trabeculae to establish positive identification. *Forensic science international* **98**: 91–99.

Marciniak S. 2009. A preliminary assessment of the identification of saw marks on burned bone. *Journal of forensic Sciences* **54**: 779–785.

Marean CW. 1991. Measuring the post-depositional destruction of bone in archaeological assemblages. *Journal of archaeological Science* **18**: 677–694.

Marek Z, Kuśmiderski J, Lisowski Z. 1983. Radiograms of the paranasal sinuses as a principle of identifying catastrophe victims and unknown skeletons. *Archiv fur Kriminologie* **172**: 1–6.

Markus J-P, Cristol D, Peigné J, Autier E. 2023. *Code de la santé publique: annoté et commenté*. 37e édition. Dalloz: Paris.

Marlin DC, Clark MA, Standish SM. 1991. Identification of human remains by comparison of frontal sinus radiographs: a series of four cases. *Journal of Forensic Sciences* **36**: 1765–1772.

Martin R, Saller K. 1957. *Lerbuch der Anthropologie*. Gustav Fischer Vorlag: Stuttgart.

Martrille L, Irinopoulou T, Bruneval P, Baccino E, Fornes P. 2009. Age at death estimation in adults by computer-assisted histomorphometry of decalcified femur cortex. *Journal of forensic sciences* **54**: 1231–1237.

Masotti S, Pasini A, Gualdi-Russo E. 2019. Sex determination in cremated human remains using the lateral angle of the pars petrosa ossis temporalis: is old age a limiting factor? *Forensic Science, Medicine and Pathology* **15**: 392–398.

Masotti S, Succi-Leonelli E, Gualdi-Russo E. 2013. Cremated human remains: is measurement of the lateral angle of the meatus acusticus internus a reliable method of sex determination? *International journal of legal medicine* **127**: 1039–1044.

Masset C. 1982. *Estimation de l'âge au décès par les sutures crâniennes*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Paris VII: Paris.

Masset C. 1984. Le dénombrement dans les sépultures collectives. *Garcia de Orta. Serie Antropobiologia* **3**: 149–152.

Masset C. 1987. Le recrutement d'un ensemble funéraire. Presented at the Anthropologie physique et archéologie : méthodes d'études des sépultures. Editions du CNRS: Paris; 111–134.

Masset C, Castro e Almeida M. 1990. Age et sutures crâniennes. *Atti della Accadèmia Mediterrànea delle Scienze*: Catania.

Massler M, Schour I, Poncher H. 1941. Developmental pattern of the child as reflected in the calcification pattern of the teeth. *American Journal of Diseases of Children* **62**: 33–67.

Mata Tutor P, Márquez-Grant N, Villoria Rojas C, Muñoz García A, Pérez Guzmán I, Benito Sánchez M. 2021. Through fire and flames: post-burning survival and detection of dismemberment-related toolmarks in cremated cadavers. *International Journal of Legal Medicine* **135**: 801–815.

Mathieu A. 2010. Approche du genre au travers du mobilier funéraire issu de cinq nécropoles danubiennes. Mémoire de Master II, Archéologie et Préhistoire. Université de Provence: Aix-Marseille.

May H, Peled N, Dar G, Abbas J, Hershkovitz I. 2011a. Hyperostosis frontalis interna: what does it tell us about our health? *American Journal of Human Biology: The Official Journal of the Human Biology Council* **23**: 392–397. DOI: 10.1002/ajhb.21156.

May H, Peled N, Dar G, Cohen H, Abbas J, Medlej B, Hershkovitz I. 2011b. Hyperostosis frontalis interna: criteria for sexing and aging a skeleton. *International Journal of Legal Medicine* **125**: 669–673. DOI: 10.1007/s00414-010-0497-6.

May SE. 2011. The effects of body mass on cremation weight. *Journal of forensic sciences* **56**: 3–9.

Mayaud Y, Gayet C. 2022. *Code pénal : annoté*. 120e édition. Dalloz: Paris.

Mayer R. 1962a. Hyperostose frontale interne. *Acta Neurovegetativa* **23**: 265–299. DOI: 10.1007/BF01239848.

Mayer R. 1962b. L'obésité du Syndrome de l'hyperostose frontale interne ou Syndrome de Morgagni-Morel. *Acta Neurovegetativa* **24**: 565–571. DOI: 10.1007/BF01233024.

Mayer R, Martin E. 1969. Morgagni Morel Syndrome (latent diabetic condition). *Journal annuel de diabétologie de l'Hotel Dieu* **10**: 77–94.

Mayne Correia P. 1997. Fire Modification of Bone. In Haglund WD and Sorg MH (eds). *Forensic taphonomy: the postmortem fate of human remains*. CRC Press: Boca Raton; 275–293.

Mayne Correia P, Beattie O. 2002. A critical look at methods for recovering, evaluating, and interpreting cremated human remains. In Haglund WD and Sorg MH (eds). *Advances in Forensic*

*Taphonomy*. First edition, CRC Press: Boca Raton.

Mays S. 1998. *The archaeology of human bones*. Routledge: London.

Mays S, Cox M. 2000. Sex Determination in Skeletal Remains. In *Human Osteology in Archaeology and Forensic Science*. London; 117–30.

McCormick WF, Stewart JH, Greene H. 1991. Sexing of human clavicles using length and circumference measurements. *The American journal of forensic medicine and pathology* **12**: 175–181.

McFadden C, Oxenham MF. 2018. Sex, parity, and scars: A meta-analytic review. *Journal of forensic sciences* **63**: 201–206.

McKinley JI. 1993. Bone fragment size and weights of bone from modern British cremations and the implications for the interpretation of archaeological cremations. *International Journal of Osteoarchaeology* **3**: 283–287. DOI: 10.1002/oa.1390030406.

McKinley JI. 1994a. Bone Fragment Size in British Cremation Burials and its Implications for Pyre Technology and Ritual. *Journal of Archaeological Science* **21**: 339–342. DOI: 10.1006/jasc.1994.1033.

McKinley JI. 1994b. The Anglo-Saxon Cemetery at Spong Hill, North Elmham Part VIII: The Cremations. *East Anglian archaeology report* **69**: 78–120.

McKinley JI. 2000. The analysis of cremated bone. *Human osteology in archaeology and forensic science* **1**: 403–421.

McKinley JI. 2017. Compiling a skeletal inventory: cremated human bone. In Mitchell Piers D. and Brickley Megan (eds). *Updated Guidelines to the Standards for Recording Human Remains*. BABAO, British association for biological anthropology and osteoarchaeology; 14–20.

McKinnon M, Henneberg M, Higgins D. 2021. A review of the current understanding of burned bone as a source of DNA for human identification. *Science & Justice* **61**: 332–338. DOI: 10.1016/j.scijus.2021.03.006.

Meindl RS, Lovejoy CO. 1985. Ectocranial suture closure: A revised method for the determination of skeletal age at death based on the lateral-anterior sutures. *American journal of physical anthropology* **68**: 57–66.

Meindl RS, Lovejoy CO, Mensforth RP, Walker RA. 1985. A revised method of age determination using the os pubis, with a review and tests of accuracy of other current methods of pubic

symphyseal aging. *American journal of physical anthropology* **68**: 29–45.

Melchiorri V. 2012. Child cremation sanctuaries (“tophets”) and early Phoenician colonisation: markers of identity. In G.-J. Burgers, L. Donnelan et V. Nizzo (eds). *Contextualising early colonisation: archaeology, sources, chronology and interpretative models between Italy and the Mediterranean*. Acts of the International Congress: Rome.

Messmer JM, Fierro MF. 1986. Personal identification by radiographic comparison of vascular groove patterns of the calvarium. *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology* **7**: 159–162.

Metsäniitty, M., Waltimo-Sirén, J., Ranta, H., Fieuws, S., Thevissen, P., 2019. *Dental age estimation in Somali children and sub-adults combining permanent teeth and third molar development*. *International Journal of Legal Medicine* **133**: 1207–1215.

Meunier A. 2003. Le tissu osseux. Sollicitations mécaniques et remodelage. *L'actualité chimique* **31**: 27–31.

Miles AEW. 1962. Assessment of the ages of a population of Anglo-Saxons from their dentitions. *Proceedings of the Royal Society of Medicine* **55**(10): 881–886.

Millet É. 2008. La nécropole du second âge du Fer de Saint-Benoît-sur-Seine, «La Perrière»(Aube): étude synthétique. *Revue archéologique de l'Est* **57**:75–184.

Mitchell H, Hamilton T, Steggerda F, Bean H. 1945. The chemical composition of the adult human body and its bearing on the biochemistry of growth. *Journal of Biological Chemistry* **158**: 625–637.

Molleson T, Cruse K, Mays S. 1998. Some sexually dimorphic features of the human juvenile skull and their value in sex determination in immature skeletal remains. *Journal of Archaeological Science* **25**: 719–728.

Moore S. 1953. The Troell-Junet Syndrome. *Acta Radiologica* **os-39**: 485–493. DOI: 10.1177/028418515303900604.

Moore S. 1955. Hyperostosis Cranii. *Radiology* **65**: 285–285. DOI: 10.1148/65.2.285b.

Moorrees CF, Fanning EA, Hunt Jr EE. 1963a. Age variation of formation stages for ten permanent teeth. *Journal of dental research* **42**: 1490–1502.

Moorrees CF, Fanning EA, Hunt Jr EE. 1963b. Formation and resorption of three deciduous teeth in children. *American journal of physical anthropology* **21**: 205–213.

Morse D, Duncan J, Stoutamire J. 1983. *Handbook of forensic archaeology and anthropology*. D. Morse ed: Tallahassee.

Morse D, Stoutamire J, Duncan J. 1976. A unique course in anthropology. *American Journal of Physical Anthropology* **45**: 743–747.

Mostafa EM, El-Ellemi AH, El-Beblawy MA, Dawood AE-WA. 2012. Adult sex identification using digital radiographs of the proximal epiphysis of the femur at Suez Canal University Hospital in Ismailia, Egypt. *Egyptian Journal of Forensic Sciences* **2**: 81–88. DOI: 10.1016/j.ejfs.2012.03.001.

Mulhern DM, Ubelaker DH. 2001. Differences in osteon banding between human and nonhuman bone. *Journal of Forensic Sciences* **46**: 220–222.

Mulhern DM, Wilczak CA, Dudar JC. 2006. Brief communication: unusual finding at Pueblo Bonito: multiple cases of hyperostosis frontalis interna. *American Journal of Physical Anthropology* **130**: 480–484. DOI: 10.1002/ajpa.20396.

Muller M, Depreux R, Muller P, Fontaine M. 1952. Recherches anthropologiques sur les ossements retrouvés dans des urnes puniques. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* **3**: 160–173.

Munro LE, Longstaffe FJ, White CD. 2007. Burning and boiling of modern deer bone: effects on crystallinity and oxygen isotope composition of bioapatite phosphate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **249**: 90–102.

Munzi P, Brun J-P. 2011. Cumes (Italie). Les fouilles du Centre Jean-Bérard 2000-2010. *Revue archéologique* **51**: 147–172.

Murail P, Bruzek J, Houët F, Cunha E. 2005. DSP: A tool for probabilistic sex diagnosis using worldwide variability in hip-bone measurements. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* **17**: 167–176.

Murray KA, Rose JC. 1993. The analysis of cremains: a case study involving the inappropriate disposal of mortuary remains. *Journal of Forensic Science* **38**: 98–103.

Naji S, de Becdelievre C, Djouad S, Duday H, André A, Rottier S. 2014. Recovery methods for cremated commingled remains: analysis and interpretation of small fragments using a bioarchaeological approach. In Bradley JA and Byrd JE (eds), *Commingled Human Remains*. Academic Press, Elsevier; 33–56.

Nakano T, Umakoshi Y, Tokumura A. 2002. Variation in crystallinity of hydroxyapatite and the related calcium phosphates by mechanical grinding and subsequent heat treatment.

*Metallurgical and materials transactions A* **33**: 521–528.

Navega D, Vicente R, Vieira DN, Ross AH, Cunha E. 2015. Sex estimation from the tarsal bones in a Portuguese sample: a machine learning approach. *International journal of legal medicine* **129**: 651–659.

Negroponete N. 1995. *Being digital*. 1st ed. Knopf: New York.

Nelson K, Melton T. 2007. Forensic Mitochondrial DNA Analysis of 116 Casework Skeletal Samples\*. *Journal of Forensic Sciences* **52**: 557–561. DOI: 10.1111/j.1556-4029.2007.00407.x.

Nelson R. 1992. A microscopic comparison of fresh and burned bone. *Journal of Forensic Sciences* **37**: 1055–1060.

Newesely H. 1988. Chemical stability of hydroxyapatite under different conditions. Presented at the *Trace elements in environmental history: proceedings* of the Symposium held from June 24th to 26th, 1987, at Göttingen; 1–16.

Niepel GA, Sit'aj Š. 1979. Enthesopathy. *Clinics in Rheumatic Diseases* **5**: 857–872. DOI: 10.1016/S0307-742X(21)00266-6.

Nikita E. 2021. *An introduction to the study of burned human skeletal remains*. The Cyprus Institute Science and Technology in Archaeology and Culture Research Center (STARAC): Nicosia, Cyprus.

Nikolić S, Djonić D, Zivković V, Babić D, Juković F, Djurić M. 2010. Rate of occurrence, gross appearance, and age relation of hyperostosis frontalis interna in females: a prospective autopsy study. *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology* **31**: 205–207. DOI: 10.1097/PAF.0b013e3181d3dba4.

Noren A, Lynnerup N, Czarnetzki A, Graw M. 2005. Lateral angle: a method for sexing using the petrous bone. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists* **128**: 318–323.

Nossintchouk RM, Gaudy J-F, Tavernier J-C, Brunel G. 1993. *Atlas d'autopsie oro-faciale*. A. Lacassagne: Lyon.

Novotný V. 1983. Sex differences of pelvis and sex determination in paleoanthropology. *Anthropologie (1962)* **21**: 65–72.

Novotný V. 1986. Sex determination of the pelvic bone: a systems approach. *Anthropologie (1962)* **24**: 197–206.

Olejnik C. 2014. *Modifications de la composition et de la structure moléculaire du tissu osseux sous l'influence des bisphosphonates*. Thèse de doctorat, Université du Droit et de la Santé - Lille II: Lille.

Olivier G. 1960. *Pratique anthropologique*. Vigot Frères: Paris.

Orellana-González E, Munzi P, Brun J-P, Dubernet S, Lefrais Y, Kacki S, Duday H, Chapouliè R, Castex D. 2021. Diagnostic de la fluorose dans la population romaine de Cumes (Italie, II<sup>e</sup> siècle av. J.-C. – I<sup>er</sup> siècle apr. J.-C.) à partir d'une approche multidisciplinaire archéométrique et paléopathologique appliquée aux restes humains brûlés. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*. *BMSAP* **33** DOI: 10.4000/bmsap.7141.

Ortner DJ. 1975. Aging effects on osteon remodeling. *Calcified Tissue Research* **18**: 27–36.

Ortner DJ. 2003. *Identification of pathological conditions in human skeletal remains*. 2nd ed. Academic Press: San Diego.

Osipov B, Harvati K, Nathena D, Spanakis K, Karantanas A, Kranioti EF. 2013. Sexual dimorphism of the bony labyrinth: A new age-independent method. *American Journal of Physical Anthropology* **151**: 290–301.

Owsley D. 1993. Identification of the fragmentary, burned remains of two US journalists seven years after their disappearance in Guatemala. *Journal of forensic sciences* **38**: 1372–1382.

Özer BK, Özer İ, Sagir M, Güleç E. 2014. Sex determination using the tibia in an ancient Anatolian population. *Mediterranean Archaeology & Archaeometry* **14**: 329–336.

Paine RR, Brenton BP. 2006. Dietary health does affect histological age assessment: an evaluation of the Stout and Paine (1992) age estimation equation using secondary osteons from the rib. *Journal of forensic sciences* **51**: 489–492.

Paris C, Pangnarind V, Cambon A, Poisnel E, Dutasta F, Paris JF, Defuentes G. 2017. Céphalées révélatrices d'un syndrome de Morgagni-Stewart-Morel: une observation. *La Revue de Médecine Interne* **38**: A209–A210. DOI: 10.1016/j.revmed.2017.10.210.

Paschalis E, DiCarlo E, Betts F, Sherman P, Mendelsohn R, Boskey A. 1996. FTIR microspectroscopic analysis of human osteonal bone. *Calcified tissue international* **59**: 480–487.

Pastoureau P. 1990. Physiologie du développement du tissu osseux. *INRAE Productions Animales* **3**: 265–273. DOI: 10.20870/productions-animales.1990.3.4.4385.

Pelletier M. 1900. Recherches sur les indices pondéraux du crâne et des principaux os longs d'une série de squelettes japonais. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* **1**: 514–529.

Péquart M, Péquart S-JV, Boule M, Vallois H-V. 1937. *Téviec, station-nécropole méolithique du Morbihan*. Masson et Cie: Paris.

Péquart M, Péquart S-JV. 1954. *Hoëdic, deuxième station-nécropole du Méolithique côtier Armoricaïn*. De Sikkel.

Pereira JGD, Santos JBS, Sousa SP de, Franco A, Silva RHA. 2021. Frontal sinuses as tools for human identification: a systematic review of imaging methods. *Dento Maxillo Facial Radiology* **50**: 20200599. DOI: 10.1259/dmfr.20200599.

Petersohn F, Kohler J. 1965. Die bedeutung der Veränderungen an fetalen Rohrenknochen nach Trocknung und Hitzeeinwirkung für die forensische Begutachtung der Fruchtsgrosse. *Archives Kriminology* **135**: 143–62.

Peyre E, Wiels J. 2015. *Mon corps a-t-il un sexe?. Sur le genre, dialogues entre biologies et sciences sociales*. La Découverte (collection recherche): Paris.

Phenice TW. 1969. A newly developed visual method of sexing the os pubis. *American journal of physical anthropology* **30**: 297–301.

Phillips V, van Wyk Kotze T. 2009a. Dental age related tables for children of various ethnic groups in South Africa. *The Journal of Forensic Odonto-Stomatology-JFOS* **27**: 29–44.

Phillips V, van Wyk Kotze T. 2009b. Testing standard methods of dental age estimation by Moorrees, Fanning and Hunt and Demirjian, Goldstein and Tanner on three South African children samples. *The Journal of Forensic Odonto-Stomatology-JFOS* **27**: 20–28.

Piontek J. 1975. Polish methods and results of investigations of cremated bones from prehistoric cemeteries. *Glasnik Antropoloskog Drustva Jugoslavije* **12**: 23–34.

PJGN. 2023. *Les empreintes digitales: la doyenne des preuves scientifiques*. [online] Available from: <https://www.gendarmerie.interieur.gouv.fr/pjgn/ircgn/l-expertise-decodee/identification/les-empreintes-digitales-la-doyenne-des-preuves-scientifiques>. Consulté le 19 avril 2023.

Poplin F. 1976a. À propos du nombre de restes et du nombre d'individus dans les échantillons d'ossements. *Cahier du Centre de Recherche Préhistorique* **5**: 61–74.

Poplin F. 1976b. Remarques théoriques et pratiques sur les unités utilisées dans les études d'ostéologie quantitative, particulièrement en archéologie préhistorique. *IXe Congrès Union Internationale des Sciences Préhistoriques et Protohistoriques, Texte de lancement du thème spécialisé B. Problèmes ethnographiques des vestiges osseux*: Nice; 124–141.

Poplin F. 1979. Problèmes d'ostéologie, in : Séminaire sur les structures d'habitat-sépultures, Collège de France (1975), sous la dir. d'A. Leroi-Gourhan. *Revista do Museu Paulista* **26**: 90–97.

Poppa P, Porta D, Gibelli D, Mazzucchi A, Brandone A, Grandi M, Cattaneo C. 2011. Detection of blunt, sharp force and gunshot lesions on burnt remains: a cautionary note. *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology* **32**: 275–279.

Prouin Y. 2007. La nécropole d'Ensisheim/Reguisheimerfeld (Haut-Rhin) : illustration des pratiques funéraires au Bronze final en Alsace. Thèse de doctorat spécialité archéologie, Université de Bourgogne : Dijon.

Purkait R. 2001. Measurements of ulna--a new method for determination of sex. *Journal of Forensic Sciences* **46**: 924–927.

Puyol-Gruart J. 2002. Computer Science, Artificial Intelligence and Archaeology. *BAR International Series* **757**: 19–28.

Quatrehomme G, Beauthier J-P, Lefèvre P. 2015. *Traité d'anthropologie médico-légale*. De Boeck : Louvain-la-Neuve.

Quatrehomme G, Bolla M, Muller M, Rocca JP, Grévin G, Bailet P, Ollier A. 1998. Experimental single controlled study of burned bones: contribution of scanning electron microscopy. *Journal of Forensic Sciences* **43**: 417–422.

Quatrehomme G, Fronty P, Sapanet M, Grévin G, Bailet P, Ollier A. 1996. Identification by frontal sinus pattern in forensic anthropology. *Forensic Science International* **83**: 147–153. DOI: 10.1016/S0379-0738(96)02033-6.

Raikos A, Paraskevas GK, Yusuf F, Kordali P, Meditskou S, Al-Haj A, Brand-Saberi B. 2011. Etiopathogenesis of hyperostosis frontalis interna: a mystery still. *Annals of Anatomy = Anatomischer Anzeiger: Official Organ of the Anatomische Gesellschaft* **193**: 453–458. DOI: 10.1016/j.aanat.2011.05.004.

Rathnayake P. 2013. Using Artificial Intelligent Applications in Archaeology. *Proceedings of first annual research conferences - ARMH 2013*: 197–200.

Ravina A. 1960. L'identification des corps par le v-test. *Presse méd* **68**: 178.

Rees KA, Cox MJ. 2010. Comparative Analysis of the Effects of Heat on the PCR-Amplification of Various Sized DNA Fragments Extracted from Sus Scrofa Molars. *Journal of forensic sciences* **55**: 410–417.

Reinhard KJ, Fink TM. 1994. Cremation in southwestern North America: aspects of taphonomy that affect pathological analysis. *Journal of archaeological science* **21**: 597–605.

RePair project. 2022. *The RePAIR project comes online robotics and digitalisation at the service of archaeology. Pompeii Sites* [online] Available from: <http://pompeiiisites.org/en/comunicati/the-repair-project-comes-online-robotics-and-digitalisation-at-the-service-of-archaeology/>. Consulté le 19 juin 2023.

Rhine S, Sperry K. 1991. Radiographic identification by mastoid sinus and arterial pattern. *Journal of Forensic Sciences* **36**: 272–279.

Rho J-Y, Kuhn-Spearing L, Zioupos P. 1998. Mechanical properties and the hierarchical structure of bone. *Medical Engineering & Physics* **20**: 92–102. DOI: 10.1016/S1350-4533(98)00007-1.

Ribbe F-C. 1885. *Étude sur l'ordre d'oblitération des sutures du crâne dans les races humaines*. Thèse de doctorat, Faculté de médecine de Paris : Paris

Richards NF. 1977. Fire Investigation—Destruction of Corpses. *Medicine, Science and the Law* **17**: 79–82. DOI: 10.1177/002580247701700202.

Riebel F. 1929. Ossification of the costal cartilages: Their relation to habitus and disease. *American journal of Roentgenology Radium Therapy* **21**: 44–47.

Rist E, Gally L, Trocme C. 1928. L'ossification des cartilages costaux dans l'espece humaine. *Presse Medicale* **36**: 641–4.

Rivière É. 1904. Conservation des ossements humains et des os d'animaux dans les gisements préhistoriques. *Bulletin de la Société préhistorique française* **1**: 154–157. DOI: 10.3406/bspf.1904.11266.

Robbins SC, Fairgrieve SI, Oost TS. 2015. Interpreting the effects of burning on pre-incineration saw marks in bone. *Journal of forensic sciences* **60**: S182–S187.

Robling AG, Stout SD. 2003. Histomorphology, Geometry, and Mechanical Loading in Past Populations. In *Bone Loss and Osteoporosis: An Anthropological Perspective*, Agarwal SC and Stout SD (eds). Springer US: Boston, MA; 189–205. DOI: 10.1007/978-1-4419-8891-1\_12.

Robling AG, Stout SD. 2007. Histomorphometry of Human Cortical Bone: Applications to Age Estimation. *Biological Anthropology of the Human Skeleton: Second Edition* : 149–182. DOI: 10.1002/9780470245842.ch5.

Robling AG, Ubelaker DH. 1997. Sex estimation from the metatarsals. *Journal of Forensic Sciences* **42**: 1062–1069.

Robson Brown KA, Roberts AM (eds). 2007. *BABAO 2004: Proceedings of the 6th Annual Conference of the British Association for Biological Anthropology and Osteoarchaeology, University of Bristol: Proceedings of the 6th Annual Conference of the British Association for Biological Anthropology and Osteoarchaeology, University of Bristol*. University of Michigan Press: Ann Arbor. DOI: 10.30861/9781407300351.

Rogers TG. 1982. Crack extension and energy release rates in finitely deformed sheets reinforced with inextensible fibres. *International Journal of Solids and Structures* **18**: 705–721. DOI: 10.1016/0020-7683(82)90050-6.

Rogers TL. 1999. A visual method of determining the sex of skeletal remains using the distal humerus. *Journal of Forensic Sciences* **44**: 57–60.

Rohmani A, Shafie MS, Nor FM. 2021. Sex estimation using the human vertebra: a systematic review. *Egyptian Journal of Forensic Sciences* **11**: 25. DOI: 10.1186/s41935-021-00238-2.

Rosing F. 1977. Methoden und Aussagemöglichkeiten der anthropologischen Leichenbrandbearbeitung.(Méthodes et résultats possibles de l'étude anthropologique des incinérations). *Archäologie und Naturwissenschaften Mainz* **1**: 53–80.

Rottier S. 2003. *Pratiques funéraires de l'étape initiale du Bronze final dans les bassins de l'Yonne et de la Haute-Seine : l'exemple des sites funéraires de Barbuise, Courtavant, La Saulsotte et Barbey aux XIVème, XIIIème et XIIème siècles avant J.-C.* Thèse de doctorat en archéologie, Université de Bourgogne : Dijon.

Rottier S. 2010. Éléments de la « peau sociale » au début du Bronze final (XIV e -XII e s. av. J.-C.) dans le sud-est du Bassin parisien. *Bulletin de la Société préhistorique française* **107**: 121–135.

Rougé-Maillart C. 2023. Le don du corps à la science enfin encadré juridiquement. *Médecine & Droit* **2023** (179): 27–32. DOI: 10.1016/j.meddro.2022.11.004.

Rougé-Maillart C, Jousset N, Vielle B, Gaudin A, Telmon N. 2007. Contribution of the study of acetabulum for the estimation of adult subjects. *Forensic Science International* **171**: 103–110.

Rougé-Maillart C, Telmon N, Rougé D, Rissech C, Malgosa A. 2004. The determination of male

adult age at death by central and posterior coxal analysis—a preliminary study. *Journal of Forensic Sciences* **49** (2): 208–214.

Rougé-Maillart C, Vielle B, Jousset N, Chappard D, Telmon N, Cunha E. 2009. Development of a method to estimate skeletal age at death in adults using the acetabulum and the auricular surface on a Portuguese population. *Forensic Science International* **188**: 91–95.

Rubini M, Licitra M, Baleani M. 1997. A study of cremated human remains from an urn field dating to the final phase of the Bronze Age, found at “Le Caprine” (Guidonia, Rome, Italy 10th–9th century B.C.). *International Journal of Anthropology* **12**: 1–9. DOI: 10.1007/BF02447891.

Ryding D. 2020. Growing bones: osteochondrosis and serious paediatric conditions. In Porter S and Wilson J (eds). *A comprehensive guide to sports physiology and injury management*, Elsevier: St. Louis; 389–401. DOI: 10.1016/B978-0-7020-7489-9.00031-4.

Sakoda S, Zhu B-L, Ishida K, Oritani S, Fujita MQ, Maeda H. 2000. Dental identification in routine forensic casework: clinical and postmortem investigations. *Legal medicine* **2**: 7–14.

Sandholzer M. 2015. Influence of heating regimes on dimensional and colorimetric changes of teeth. In Schmidt CW and Symes SA (eds). *The analysis of burned human remains*. Academic Press: San Diego.Elsevier; 365–379.

Sandholzer MA, Baron K, Heimel P, Metscher BD. 2014. Volume analysis of heat-induced cracks in human molars: A preliminary study. *Journal of forensic dental sciences* **6**: 139–144.

Sandholzer MA, Walmsley AD, Lumley PJ, Landini G. 2013. Radiologic evaluation of heat-induced shrinkage and shape preservation of human teeth using micro-CT. *Journal of Forensic Radiology and Imaging* **1**: 107–111.

Schaefer U. 1958. Grenzen und Möglichkeiten der anthropologischen Untersuchung von Leichenbränden. *Bericht über den Internat Kongr f Vor und Frühgeschichte* **5**: 76.

Scheuer L, Black S. 2000. Development and ageing of the juvenile skeleton. In Cox M, and Mays S (eds). *Human osteology in archaeology and forensic science*. Cambridge University Press; 9–22.

Schmidt CW. 2015. Burned human teeth. In Schmidt CW and Symes SA (eds). *The analysis of burned human remains*. Academic Press: San Diego; Elsevier; 61–81.

Schmitt A. 2002. Estimation de l’âge au décès des sujets adultes à partir du squelette : des raisons d’espérer. *Bulletins et mémoires de la Société d’Anthropologie de Paris* **14** (1-2): 51–73.

Schmitt A. 2005. Une nouvelle méthode pour estimer l'âge au décès des adultes à partir de la surface sacro-pelvienne iliaque. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* **17** (1-2): 89–101.

Schmitt A. 2008. Une nouvelle méthode pour discriminer les individus décédés avant ou après 40 ans à partir de la symphyse pubienne. *Journal de médecine légale, droit médical* **51**(1): 15–24.

Schmitt A, Bizot B. 2016. Dealing with bone assemblages from neolithic collective burials: Feedback from three studies. *BMSAP* **28**: 190–201.

Schulter-Ellis F, Schmidt D, Hayek L, Craig J. 1983. Determination of sex with a discriminant analysis of new pelvic bone measurements: Part I. *Journal of Forensic Sciences* **28**: 169–180.

Schultz JJ, Warren MW, Krigbaum JS. 2008. Analysis of human cremains: gross and chemical methods. In Schmidt CW and Symes SA (eds). *The Analysis of Burned Human Remains*. Academic Press: San Diego; 75–94. DOI: 10.1016/B978-012372510-3.50006-X.

Schultz M. 1986. *Die mikroskopische Untersuchung prähistorischer Skelettfunde: Anwendung und Aussagemöglichkeiten der differentialdiagnostischen Untersuchung in der Paläopathologie*. Amt für Museen u. Archäologie: Liestal.

Schutkowski H. 1993. Sex determination of infant and juvenile skeletons: I. Morphognostic features. *American journal of physical anthropology* **90**: 199–205.

Schutkowski H, Herrmann B. 1983. Zur Möglichkeit der metrischen Geschlechtsdiagnose an der Pars petrosa ossis temporalis. *Zeitschrift für Rechtsmedizin* **90**: 219–227.

Shemesh A. 1990. Crystallinity and diagenesis of sedimentary apatites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **54**: 2433–2438.

Shipman P, Foster G, Schoeninger M. 1984. Burnt bones and teeth: an experimental study of color, morphology, crystal structure and shrinkage. *Journal of Archaeological Science* **11**: 307–325. DOI: 10.1016/0305-4403(84)90013-X.

Silva AM, Crubézy E, Cunha E. 2009. Bone weight: new reference values based on a modern Portuguese identified skeletal collection. *International Journal of Osteoarchaeology* **19**: 628–641.

Singh I, Gunberg D. 1970. Estimation of age at death in human males from quantitative histology of bone fragments. *American journal of physical anthropology* **33**: 373–381.

Singh S, Potturi BR. 1978. Greater sciatic notch in sex determination. *Journal of Anatomy* **125**: 619–624.

Skinner MF, Lazenby RA. 1983. *Found! Human remains: A field manual for the recovery of the recent human skeleton*. Simon Fraser University, Archaeology Press.

Skoglund P, Malmström H, Raghavan M, Storå J, Hall P, Willerslev E, Gilbert MTP, Götherström A, Jakobsson M. 2012. Origins and genetic legacy of Neolithic farmers and hunter-gatherers in Europe. *Science* **336**: 466–469.

Smith P, Avishai G. 2005. The use of dental criteria for estimating postnatal survival in skeletal remains of infants. *Journal of Archaeological Science* **32**: 83–89. DOI: 10.1016/j.jas.2004.06.008.

Sonek A. 1992. *The weight(s) of cremated remains*. Presented at the Proceedings of the 44th annual meeting of the American Academy of Forensic Sciences: New Orleans, LA, Colorado Springs, CO; 17–22.

Spence TF. 1968. The Anatomical Study of Cremated Fragments from Archaeological Sites. *Proceedings of the Prehistoric Society* **33**: 70–83. DOI: 10.1017/S0079497X00014055.

Spitz W. 1993. Thermal injuries. In Spitz WU and Fisher R (eds). *Spitz and Fisher's medicolegal investigation of death*. Charles C. Thomas: Springfield; 413–443.

Spitz W, Fisher R. 1980. *Medicolegal investigation of death: guidelines for the application of pathology to crime investigation*. Charles C Thomas: Springfield Illinois USA.

Squires KE. 2015. The integration of microscopic techniques in cremation studies. In Thompson T (ed). *The archaeology of cremation. burned human remains in funerary studies*. Oxbow Books; 151–72.

Squires KE, Thompson TJ, Islam M, Chamberlain A. 2011. The application of histomorphometry and Fourier Transform Infrared Spectroscopy to the analysis of early Anglo-Saxon burned bone. *Journal of Archaeological Science* **38**: 2399–2409.

Steckel R, Larsen C, Sciulli P, Walker P. 2005. *The Global History of Health. Data Collection Codebook*. Ohio State University: Columbus, OH.

Steckel RH, Larsen CS, Sciulli PW, Walker PL. 2018. Data Collection Codebook. In Roberts CA, Larsen CS, Baten J, and Steckel RH (eds). *The Backbone of Europe: Health, Diet, Work and Violence over Two Millennia*. Cambridge University Press: Cambridge; 397–427. DOI: 10.1017/9781108379830.016.

Stein TJ, Corcoran JF. 1994. Pararadicular cementum deposition as a criterion for age estimation in human beings. *Oral surgery, oral medicine, oral pathology* **77**: 266–270.

Stewart TD. 1968. Identification by the skeletal structures. In Camps FE (ed). *Gradwohl's legal medicine*. 2<sup>nd</sup> edition; John Wright & Sons, Ltd.: Bristol; 123–154.

Stewart TD. 1979. *Essentials of forensic anthropology: especially as developed in the United States*. Charles C. Thomas: Springfield.

Steyn M, İşcan MY. 1997. Sex determination from the femur and tibia in South African whites. *Forensic science international* **90**: 111–119.

Stiner MC, Kuhn SL, Weiner S, Bar-Yosef O. 1995. Differential burning, recrystallization, and fragmentation of archaeological bone. *Journal of archaeological science* **22**: 223–237.

Stojanowski CM. 1999. Sexing potential of fragmentary and pathological metacarpals. *American Journal of Physical Anthropology* **109**: 245–252. DOI: 10.1002/(SICI)1096-8644(199906)109:2<245::AID-AJPA8>3.0.CO;2-T.

Stout SD. 1988. The use of histomorphology to estimate age. *Journal of Forensic Sciences* **33**: 121–125.

Stratton S, Beattie O. 1999. Mass disasters: comments and discussion regarding the Hinton train collision of 1986. In Fairgrieve S (ed). *Forensic osteological analysis: case studies in forensic anthropology*. Charles C. Thomas: Springfield; 267–286.

Strzalko J, Piontek J, Malinowski A. 1974. Possibilities of burned human bone identifications in the light of experimental investigations. *Seria Antropologia* **2**: 31–43.

Stull KE, Cirillo LE, Cole SJ, Hulse CN. 2020. Subadult sex estimation and KidStats. In Klaes AR (ed). *Sex Estimation of the Human Skeleton*. Academic Press; 219–242. DOI: 10.1016/B978-0-12-815767-1.00014-6.

Sui T, Sandholzer MA, Lunt AJ, Baimpas N, Smith A, Landini G, Korsunsky AM. 2014. In situ X-ray scattering evaluation of heat-induced ultrastructural changes in dental tissues and synthetic hydroxyapatite. *Journal of the Royal Society Interface* **11**: 20130928.

Susanne C. 2003. Susanne C. Biologie des populations humaines. In Susanne C., Rebato E. and B. Chiarelli (Eds.). *Anthropologie biologique, sur les traces de la biologie humaine*. De Boeck université ; 295-318.

Susini A, Baud C-A, Tochon-Danguy H. 1988. Identification d'un traitement thermique des os

préhistoriques humains. In Buchet L (ed). *Anthropologie et histoire ou anthropologie historique. Actes des 3èmes journées anthropologiques*. Edition du CNRS : Paris; 43–67.

Susini AR. 1988. *Études des caractéristiques Biophysiques des tissus calcifiés humains (os, émail, dentine) soumis à des traitements thermiques : applications anthropologiques et médicales*. Thèse de doctorat ; University of Geneva. DOI: 10.13097/archive-ouverte/unige:73248.

Svensson A, Wendel O. 1955. *Crime detection: modern methods of criminal investigation*. Elsevier: Amsterdam.

Symes S, Rainwater C, Chapman E, Gipson D, Piper A. 2008. Patterned thermal destruction of human remains in a forensic setting. In Schmidt CW and Symes SA (eds). *The Analysis of Burned Human Remains*. Academic Press: San Diego; 15–54. DOI: 10.1016/B978-012372510-3.50004-6.

Symes S, Rainwater C, Chapman E, Gipson D, Piper A. 2015. Patterned thermal destruction in a forensic setting. In Schmidt CW and Symes SA (eds). *The Analysis of Burned Human Remains*, Schmidt CW and Symes SA. Academic Press: San Diego; 17–59.

Symes S, Smith O, Berryman H. 1996. Bones: bullets, burns, bludgeons, blunders, and why. *Proceedings of the American Academy of Forensic Sciences* **2**: 10–11.

Thamrong Chirachariyavej M, Seetala Sanggarnjanavanich D. 2006. The relationship between bone and ash weight to age, body weight and body length of Thai adults after cremation. *J Med Assoc Thai* **89**: 1940–1945.

Thieme U. 1970. Über Leichenbranduntersuchungen. *Neue Ausgrabungen und Forschungen in Niedersachsen* **5**: 253–286.

Thomas A. 2011. Identités funéraires, variants biologiques et facteurs chronologiques : une nouvelle perception du contexte culturel et social du Cerny (Bassin parisien, 4700-4300 avant J.-C.). Thèse de doctorat ; Université de Bordeaux 1: Bordeaux.

Thomas T, Martin A, Lafage-Proust M-H. 2010. Physiologie du tissu osseux. *EMC - Appareil locomoteur* **3**(1): 1–16. Doi : 10.1016/S0246-0521(08)40315-7.

Thompson T, Gauthier M, Islam M. 2009. The application of a new method of Fourier Transform Infrared Spectroscopy to the analysis of burned bone. *Journal of Archaeological Science* **36**: 910–914.

Thompson T, Islam M, Piduru K, Marcel A. 2011. An investigation into the internal and external variables acting on crystallinity index using Fourier Transform Infrared Spectroscopy on unaltered and burned bone. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **299**: 168–174.

Thompson TJ, Gonçalves D, Squires K, Ulguim P. 2017. Thermal alteration to the body. In Schostsmans E, Marquez-Grant N, Forbes S (eds). *Taphonomy of Human Remains: Forensic Analysis of the Dead and the Depositional Environment*. Wiley: Chichester; 318–334.

Thompson TJU. 2004. Recent advances in the study of burned bone and their implications for forensic anthropology. *Forensic Science International* **146**: S203–S205. DOI: 10.1016/j.forsciint.2004.09.063

Thompson TJU. 2005. Heat-induced dimensional changes in bone and their consequences for forensic anthropology. *Journal of Forensic Science* **50**: 1–8.

Thompson TJU. 2016. Anthropology: Cremated Bones – Anthropology. In Payne-James J and Byard RW (eds). *Encyclopedia of Forensic and Legal Medicine (Second Edition)*, Elsevier: Oxford; 177–182. DOI: 10.1016/B978-0-12-800034-2.00024-0.

Thouvenin Y, Véron S, Léautaud A, Cardini S, Vitry F, Marcus C. 2009. Identification médico-légale : détermination de l'âge osseux par étude tomographique de la paroi thoracique antérieure. *Feuillets de Radiologie* **49**: 32–39. DOI: 10.1016/S0181-9801(09)71564-7.

Thurman MD, Willmore LJ. 1982. A replicative cremation experiment. *North American Archaeologist* **2**: 275–283.

Tillier A-M, Duday H. 1990. Les enfants morts en période périnatale. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* **2**: 89–98.

Todd TW. 1920. Age changes in the pubic bone. I. The male white pubis. *American journal of physical anthropology* **3**: 285–334.

Todd TW, Lyon Jr D. 1924. Endocranial suture closure. Its progress and age relationship. Part I.—Adult males of white stock. *American Journal of Physical Anthropology* **7**: 325–384.

Todd TW, Lyon Jr D. 1925. Cranial suture closure. Its progress and age relationship. Part III.—Endocranial closure in adult males of Negro stock. *American Journal of Physical Anthropology* **8**: 47–71.

Todd T, Lyon D. 1925. Suture closure—its progress and age relationship. Part IV.—Ectocranial closure in adult males of Negro stock. *American Journal of Physical Anthropology* **8**: 149–168. DOI: 10.1002/ajpa.1330080203.

Tranoy L, Bel V, Georges P, Blaizot F. 2009. Chapitre V—Les espaces funéraires. *Gallia* **66**: 253–310.

Trotter M, Hixon BB. 1974. Sequential changes in weight, density, and percentage ash weight of human skeletons from an early fetal period through old age. *The anatomical record* **179**: 1–18.

Trotter M, Peterson RR. 1955. Ash weight of human skeletons in per cent. of their dry, fat-free weight. *Anatomical Record* **123**: 341–358.

Trotter M, Peterson RR. 1962. The relationship of ash weight and organic weight of human skeletons. *JBS* **44**: 669–681.

Tuller H. 2006. Keeping the pieces together: comparison of mass grave excavation methodology. *Forensic Science International* **156**: 192–200.

Turner-Walker G, Mays S. 2007. Histological Studies on Ancient Bone. In Pinhasi R and Mays S (eds). *Advances in Human Palaeopathology*. John Wiley & Sons, Ltd; 121–146. DOI: 10.1002/9780470724187.ch7.

Ubelaker DH. 1984. Positive Identification from the Radiographic Comparison of Frontal Sinus Patterns. In Rathbun TA and Buikstra JE, (eds). *Human identification case studies in forensic anthropology*. Charles C. Thomas; 399–411.

Ubelaker DH. 1989. *Human skeletal remains, excavation, analysis, interpretation*. 2nd edition; Taraxacum: Washington.

Ubelaker DH. 2009. The forensic evaluation of burned skeletal remains: A synthesis. *Forensic Science International* **183**: 1–5.

Ubelaker DH, De La Paz JS. 2012. Skeletal indicators of pregnancy and parturition: a historical review. *Journal of forensic sciences* **57**: 866–872.

Vachirawongsakorn V, Márquez-Grant N, Painter J. 2023. Survival of sharp force trauma in burnt bones: effects of environmental factors. *International Journal of Legal Medicine* **137**: 809–823. DOI: 10.1007/s00414-022-02916-9.

Vachirawongsakorn V, Painter J, Márquez-Grant N. 2022. Knife cut marks inflicted by different blade types and the changes induced by heat: a dimensional and morphological study. *International Journal of Legal Medicine* **136**: 329–342. DOI: 10.1007/s00414-021-02726-5.

Vallois H. 1937. La Duree de la vie chez l'homme fossile. *L'Anthropologie* **47**: 499–532.

Vallois H. 1957. Le poids comme caractere sexuel des os longs. *L'Anthropologie* **61**: 45–69.

Van Andringa W, Creissen T, Duday H. 2015. La nécropole romaine de Porta Nocera à Pompéi: le

secteur 26 OS. La campagne 2014. *Chronique des activités archéologiques de l'École française de Rome*. DOI : <https://doi.org/10.4000/cefr.1352>.

Van Andringa W, Creissen T, Duday H. 2016. La nécropole romaine de Porta Nocera à Pompéi : naissance et développement d'un paysage funéraire romain (1er siècle av. J.-C. – 1er siècle apr. J.-C.). *Chronique des activités archéologiques de l'École française de Rome* DOI: 10.4000/cefr.1528.

Van Andringa W, Duday H. 2020. Van Andringa W, Duday H. 2020. Pompéi – Fouille de la nécropole romaine de Porta Nocera. Campagne 2020. Rapport final d'opération.

Van Andringa W, Duday H. 2020. Pompéi – Fouille de la nécropole romaine de Porta Nocera. Campagne 2019. *Chronique des activités archéologiques de l'École française de Rome*. DOI: 10.4000/cefr.4663.

Van Andringa W, Duday H, Lepetz S, Joly D, Lind T. 2013. *Mourir à Pompéi. Fouille d'un quartier funéraire de la nécropole romaine de Porta Nocera*. Collection de l'École Française de Rome: Rome.

Van Deest TL, Murad TA, Bartelink EJ. 2011. A re-examination of cremains weight: sex and age variation in a Northern California sample. *Journal of Forensic Sciences* **56**: 344–349. DOI: 10.1111/j.1556-4029.2010.01658.x

Van Vark G. 1970. *Some statistical procedures for the investigation of prehistoric human skeletal material*. V.R.B. Offsetdr: Groningen.

Van Vark G. 1974. The investigation of human cremated skeletal material by multivariate statistical methods I. Methodology. *Ossa* **1**: 63–95.

van Vark G, Amesz-Voorhoeve WHM, Cuipers A. 1996. Sex-diagnosis of human cremated skeletal material by means of mathematical-statistical and data-analytical methods. *Homo* **47**: 305–338.

Végh EI, Czermak A, Márquez-Grant N, Schulting RJ. 2021. Assessing the reliability of microbial bioerosion features in burnt bones: A novel approach using feature-labelling in histotaphonomical analysis. *Journal of Archaeological Science: Reports* **37**: 102906.

Vijayapalan V, Sutton-Smith P, Parkinson IH, Martin RB, Fazzalari NL. 2003. Trabecular rod thickness by direct measurement from 3D SEM anaglyphs. *The Anatomical Record Part A: Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology: An Official Publication of the American Association of Anatomists* **271**: 286–290.

Viljoen D. 1994. Congenital contractural arachnodactyly (Beals syndrome). *Journal of Medical*

*Genetics* **31**: 640–643. DOI: 10.1136/jmg.31.8.640.

Villena Mota N, Duday H, Houët F. 1996. De la fiabilité des liaisons ostéologiques. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* **8**: 373–384.

Villotte S. 2006. Connaissances médicales actuelles, cotation des enthésopathies : nouvelle méthode. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris. BMSAP* **18**: 65–85. DOI: 10.4000/bmsap.1325.

Von Wurmb-Schwark N, Simeoni E, Ringleb A, Oehmichen M. 2004. Genetic investigation of modern burned corpses. *International Congress Series* **1261**: 50–52.

Wahl J. 1981. Ein Beitrag zur metrischen Geschlechtsdiagnose verbrannter und unverbrannter menschlicher Knochenreste-ausgeareitet an der pars petrosa ossis temporalis. *Zeitschrift für Rechtsmedizin* **86**: 79–101.

Wahl J. 2015. Investigations on Pre-Roman and Roman Cremation Remains. In Schmidt CW and Symes SA (eds). *The Analysis of Burned Human Remains (Second Edition)*. Academic Press: San Diego; 163–179. DOI: 10.1016/B978-0-12-800451-7.00009-7.

Wahl J, Graw M. 2001. Metric sex differentiation of the pars petrosa ossis temporalis. *International Journal of Legal Medicine* **114**: 215–223.

Walker P, Miller K, Richman R. 2008. Time, temperature, and oxygen availability: An experimental study of the effects of environmental conditions on the color and organic content of cremated bone. In Schmidt CW and Symes SA (eds). *The analysis of burned human remains*. Academic Press: San Diego; 129–135.

Wallin J, Wilting J, Koseki H, Fritsch R, Christ B, Balling R. 1994. The role of Pax-1 in axial skeleton development. *Development* **120**: 1109–1121.

Walsh-Haney H, Katzmarzyk C, Falsetti AB. 1999. Identification of human skeletal remains: was he a she or she a he. In Fairgrieve SI (ed). *Forensic osteological analysis: a book of case studies*. Charles C. Thomas: Springfield; 17–35.

Ward DL, Pomeroy E, Schroeder L, Viola TB, Silcox MT, Stock JT. 2020. Can bony labyrinth dimensions predict biological sex in archaeological samples? *Journal of Archaeological Science: Reports* **31**: 102354.

Warren MW, Maples W. 1997. The anthropometry of contemporary commercial cremation. *Journal of forensic sciences* **42**: 417–23 DOI: 10.1520/JFS14141J.

Washburn SL. 1948. Sex differences in the pubic bone. *American Journal of Physical Anthropology* **6**: 199–208. DOI: 10.1002/ajpa.1330060210.

Watson JT, Cerezo-Román JI, Maldonado SI, Guzmán CC, Villalpando ME. 2015. Death and community identity in the Trincheras cremation cemetery, Sonora, Mexico. In Schmidt CW and Symes SA (eds). *The Analysis of Burned Human Remains*. Academic Press: San Diego; 339–353.

Webb PAO, Suchey JM. 1985. Epiphyseal union of the anterior iliac crest and medial clavicle in a modern multiracial sample of American males and females. *American Journal of Physical Anthropology* **68**: 457–466.

Weitzel MA, McKenzie HG. 2008. Fire as a cultural taphonomic agent: Understanding mortuary behavior at Khuzhir-Nuge XIV, Siberia. In Schmidt CW and Symes SA (eds). *The Analysis of Burned Human Remains*. Academic Press: San Diego; 185–199.

Wells C. 1960. A study of cremation. *Antiquity* **34**: 29–37.

Western AG, Bekvalac JJ. 2017. Hyperostosis frontalis interna in female historic skeletal populations: Age, sex hormones and the impact of industrialization. *American Journal of Physical Anthropology* **162**: 501–515. DOI: 10.1002/ajpa.23133.

White T, Black M, Folkens P. 2016. *Traité d'ostéologie humaine*. 1ère édition; DeBoeck supérieur: Louvain-la-Neuve.

Whyte TR. 2001. Distinguishing remains of human cremations from burned animal bones. *Journal of Field Archaeology* **28**: 437–448.

Wilczak CA, Dudar JC. 2011. *Osteoware Software Manual*. Smithsonian Institution: Washington DC.

Wiley P, Galloway A, Snyder L. 1997. Bone mineral density and survival of elements and element portions in the bones of the Crow Creek massacre victims. *American Journal of Physical Anthropology* **104**: 513–528. DOI: 10.1002/(SICI)1096-8644(199712)104:4<513::AID-AJPA6>3.0.CO;2-S.

Williams D, Lewis M, Franzen T, Lissett V, Adams C, Whittaker D, Tysoe C, Butler R. 2004. Sex determination by PCR analysis of DNA extracted from incinerated, deciduous teeth. *Science & justice: journal of the Forensic Science Society* **44**: 89–94.

Wilson LA, Cardoso HF, Humphrey LT. 2011. On the reliability of a geometric morphometric approach to sex determination: A blind test of six criteria of the juvenile ilium. *Forensic science international* **206**: 35–42.

Wiredu EK, Kumoji R, Seshadri R, Biritwum RB. 1999. Osteometric Analysis of Sexual Dimorphism in the Sternal End of the Rib in a West African Population. *Journal of Forensic Sciences* **44**: 12017J. DOI: 10.1520/JFS12017J.

Wittwer-Backofen U. 2012. Age estimation using tooth cementum annulation. *Forensic microscopy for skeletal tissues: Methods and protocols* **915**: 129–143.

Wittwer-Backofen U, Gampe J, Vaupel JW. 2004. Tooth cementum annulation for age estimation: Results from a large known-age validation study. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists* **123**: 119–129.

von Wurmb-Schwark N, Preusse-Prange A, Heinrich A, Simeoni E, Bosch T, Schwark T. 2009. A new multiplex-PCR comprising autosomal and y-specific STRs and mitochondrial DNA to analyze highly degraded material. *Forensic Science International: Genetics* **3**: 96–103.

Yoder C, Ubelaker DH, Powell JF. 2001. Examination of Variation in Sternal Rib End Morphology Relevant to Age Assessment. *Journal of Forensic Sciences* **46**: 14953J. DOI: 10.1520/JFS14953J.

Zana M, Magli F, Mazzucchi A, Castoldi E, Gibelli D, Caccia G, Cornacchia F, Gaudio DA, Mattia M, Cattaneo C. 2017. Effects of Cremation on Fetal Bones. *Journal of Forensic Sciences* **62**: 1140–1144. DOI: 10.1111/1556-4029.13414.

Zanolli C, Bondioli L, Manni F, Rossi P, Macchiarelli R. 2011. Gestation Length, Mode of Delivery, and Neonatal Line-Thickness Variation. *Human Biology* **83**: 695–713.

Zazzo A. 2010. Géochimie isotopique des ossements brûlés: implications pour la reconstruction des régimes alimentaires et pour la datation par la méthode du radiocarbone. *Palethnologie* **2**: 163–172. DOI : 10.4000/palethnologie.8926.

---

## *Annexes*

---

**Annexe 1** : exemple de la documentation utilisée dans le cadre de l'étude. Documents scannés : notes de travail rédigées par H. Duday lors de l'analyse anthropologique des restes humains de Porta Nocera (2017). Ces notes sont relatives à la sépulture 5 du secteur 1F dans la Zone B (Sp 1F-5, US 6171).

PN 2017. #8. Sp 1F-5 UG 6171

R2. 99 Charbon, 99 infusés éclats de bord de turbine  
 à blanc, 1/2 plus sale, tibia fibula + moirures  
 Bla crânio-facial: tête, nature formée au niveau de d'après  
 stade 3, face ext  
 Thorax D avec alvéoles P1/dist) P2 H1 M L D.  
 trais microscopique (I ou ?) gros fibre  
 Corp VC inf lat d'après - Unus D tel, nettement épaie  
 (bon ?) d'écrite  
 épaie VC  
 3/4 corp VC côté 1/2 point termin ??  
 Haut de la cage ? tête radica pte. fmd sur lat ulna d  
 2/3 humerus  
 Tête PPH  
 Fmd thorax, tête femur, de, 2/3 t. hoch G  
 ligne épine facile  
 Tête tibia G, sub. humérale D, dist tibia G  
 dist fibula D

R2. 99 Charbon, épaie de ceramium (urne)  
 à blanc pur à gris sombre et en moirures  
 Bla crânio-facial: - proe f. de temporal G partie moyenne  
 proe frontal maxillaire G  
 tête  
 Mandibule: Condyle D  
 Axi: Corp de la masse lat G  
 VC inf corp + mlal G Unus large  
 f. notes part part lat du corp à la unus D écrit  
 Grosseur vt  
 Corp VL L5  
 fmd sacrum proe ant part sur D S1  
 Côté  
 Scapula coracoïde G pt fmd de humerus 2 points NTC  
 Coste traque scapule fmd branche coracohum (soudé)  
 de femur Tête tibia, de tibia Tête HTT

R3. 99 Charbon et de la musculature (écriture urne)  
 Mastoïde D pu robuste corp épaie proe p. de la tibia  
 fmd mandibule  
 fmd tibia, partie lat fmd VC inf gineur V ?  
 Corp VL avec enroure hermo intraspineum  
 Haut termin sa l'écrite caudal gineur VL  
 Côté Carbone costal externe ossifié  
 Scapula bord lat gine D (2 fmd fmd) G de dist  
 humerus G, de 2 PPH (1 hum + de, 1 tte)

R3 suite  
 Oxal fmds net, acrobatus, ou illophubreum  
 (non charbonnés) de avec ligne épine mince, joint condyle  
 Femur tte, de avec ligne épine mince, joint condyle  
 Patella D fmd de haut  
 Fmd tte K 210, epé dist fibula D, de  
 2/3 fibula  
 Calcaneus G

R4. 99 Charbon, épaie de ceramium (urne)  
 à blanc pur à gris sombre et en moirures  
 Bla crânio-facial: - proe f. de temporal G partie moyenne  
 proe frontal maxillaire G  
 tête  
 Mandibule: Condyle D  
 Axi: Corp de la masse lat G  
 VC inf corp + mlal G Unus large  
 f. notes part part lat du corp à la unus D écrit  
 Grosseur vt  
 Corp VL L5  
 fmd sacrum proe ant part sur D S1  
 Côté  
 Scapula coracoïde G pt fmd de humerus 2 points NTC  
 Coste traque scapule fmd branche coracohum (soudé)  
 de femur Tête tibia, de tibia Tête HTT

R5. 99 Charbon, épaie de ceramium (urne)  
 à blanc pur à gris sombre et en moirures  
 Bla crânio-facial: - proe f. de temporal G partie moyenne  
 proe frontal maxillaire G  
 tête  
 Mandibule: Condyle D  
 Axi: Corp de la masse lat G  
 VC inf corp + mlal G Unus large  
 f. notes part part lat du corp à la unus D écrit  
 Grosseur vt  
 Corp VL L5  
 fmd sacrum proe ant part sur D S1  
 Côté  
 Scapula coracoïde G pt fmd de humerus 2 points NTC  
 Coste traque scapule fmd branche coracohum (soudé)  
 de femur Tête tibia, de tibia Tête HTT

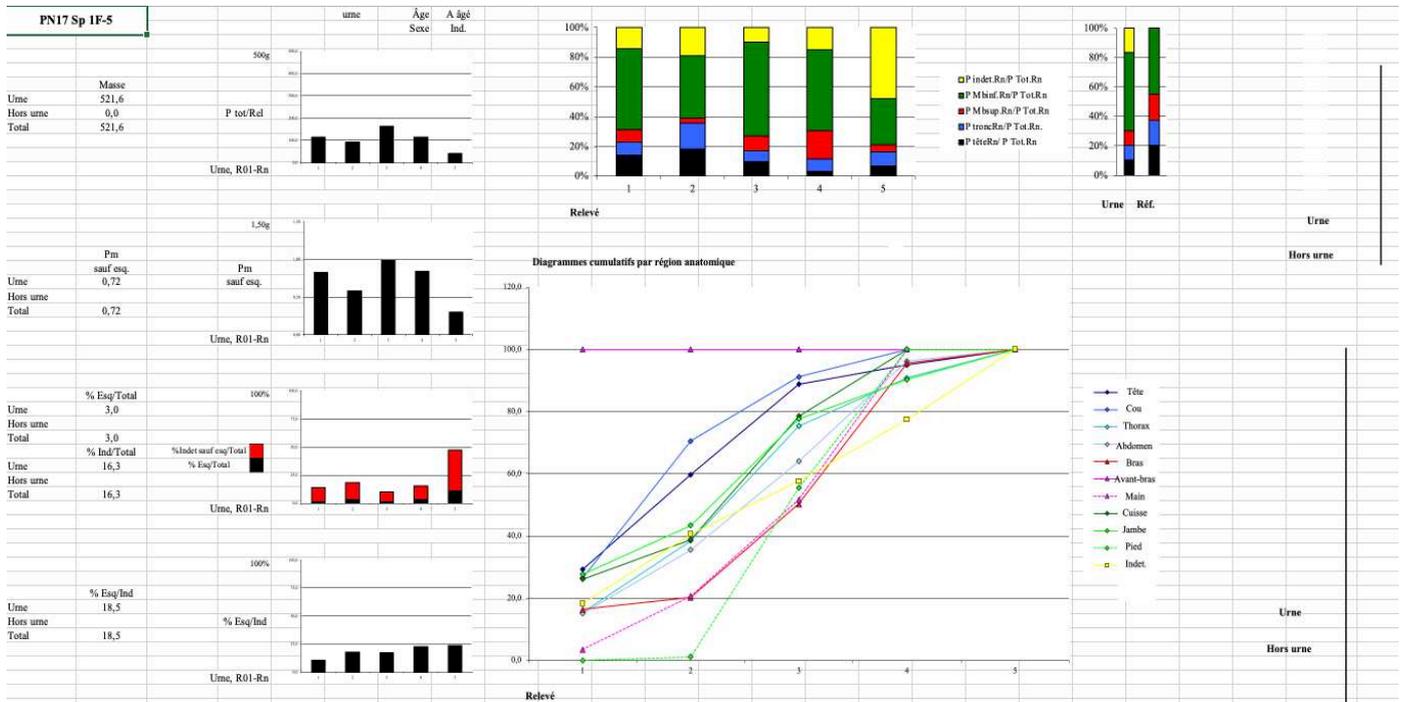
du total 1 peut être  
 Adulte  
 sexe indéterminé  
 proe f. de la tibia, de la tibia  
 proe f. de la tibia, de la tibia  
 proe f. de la tibia, de la tibia  
 proe f. de la tibia, de la tibia

Age 1 Car. cost. sternal sur tte  
 antérieurement (carré thorax)  
 A voir l'impression d'une surreprésentation d'un d'inf.  
 Toux tte proe représenté sans doute. Partie corp vertébraux sur  
 V thoraciques  
 Crémelin + hétérogène la tte et la base (carré sur coracohum  
 concentrique), à auto joint sombre en un non charbonné

**Annexe 2** : exemple de la documentation utilisée dans le cadre de l'étude.

Tableurs regroupant les données de la sépulture 1F-5 de la zone B (nombre et masse des fragments par région anatomique et par passe de démontage) génération de graphiques mettant en évidence la répartition des fragments. D'après le modèle décrit par Duday et al. (2000).

	A	B	C	D	E	F	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	DC	DD	DE	DF	DG	DH	DI	DJ	
1	Tombe/os	R01	R02	R03	R04	R05	TOTAL	Tot.Rég	%Ident.	%Tot.	Ref. A	R01	R02	R03	R04	R05	TOTAL	Tot.Rég	%Ident.	%Tot.	Pm/os	Pm/Rég.	Examineur	Observations	
2	PN17 Sp 1F-5	MASSE					MASSE					NOMBRE					NOMBRE								
3	Bloc crânio-facial	15,9	15,5	15,9	2,1	2,2	51,6				9,9	18,0	19	22	15	7	8	71				0,73		H. Duday	A âgé
4	Mandibule		1,2				1,4				0,3	2,4		1			1	2				0,70			Ind.
5	Dents sup.						0,0				0,0							0				0,00			
6	Dents inf.						0,0				0,0							0				0,00			
7	Dents indet.	0,1			1,3	0,3	1,7				0,0		1		3	2		6				0,28			
8	Os hyoïde						0,0				0,0							0				0,00			
9	Osslets oreille						0,0				0,0							0				0,00			
10	Cartilage calcifié						0,0				0,0							0				0,00			
11	Tête	16,0	16,7	15,9	3,4	2,7	54,7	12,5	10,5		26,4	20	23	15	10	11		79	22,0	11,3		0,69			
12	Atlas			0,3	0,3		0,6				0,0			1	1			2				0,30			
13	Axis		1,5				1,5				0,0		1					1				1,50			
14	Vert. C3-C7	1,8	1,5	1,1	0,3		4,7				0,0		1	2	1	1		5				0,94			
15	Vert. thoraciques	0,4	0,3	0,2	0,7		1,6				0,0		2	2	1	3		8				0,20			
16	Vert. lombaires	5,1	7,3	4,3	0,7	1,5	18,9	37,4	7,2		10,1	3	3	3	2	3		14				1,35			
17	Vert. indet.	1,6	1,0	0,1	0,8	0,5	4,0				0,0		5	6	1	3	6	21				0,19			
18	Sacrum		1,1		5,0		6,1				0,0			1		2		3				2,03			
19	Coccyx						0,0				0,0							0				0,00			
20	Côtes	1,3	3,1	3,4	1,7	1,7	11,2				2,1	6,4	14	25	19	18	17	93				0,12			
21	Sternum	0,1		2,2			2,3				0,4	0,5	1		2			3				0,77			
22	Tronc	10,3	15,8	11,6	9,5	3,7	50,9	11,7	9,8		17,0	26	40	28	30	26		150	41,8	21,5		0,34			
23	Clavicule						0,0				1,0							0				0,00			
24	Scapula	0,7	1,0	2,0	0,5		4,2				0,8	2,8	2	1	1	1		5				0,84			
25	Humérus	7,2	1,7	13,2	19,9	1,9	43,9				8,4	6,4	3	1	5	5	1	15				2,93			
26	Radius	0,7					0,7				0,1	2,2	1					1				0,70			
27	Ulna	0,8					0,8				0,2	2,7	1					1				0,80			
28	Cape						0,0				0,0							0				0,00			
29	Métacarpe		0,5		1,4		1,9	2,9			0,6	2,5				3		5	8			0,38			
30	Phalanges main	0,1		0,9			1,0				1,0		1	2	2	3		3				0,33			
31	Diaph. membre sup.						0,0				0,0							0				0,00			
32	Mb.sup.	9,5	3,2	16,1	21,8	1,9	52,5	12,0	10,1		17,6	8	4	8	9	1		30	8,4	4,3		1,75			
33	Coxal	3,6	4,0	13,6	14,2	0,6	36,0				6,9	7,8	4	4	11	7	1	27				1,33			
34	Fémur	31,3	15,3	47,5	25,7		119,8				23,0	17,7	7	4	12	6		29				4,13			
35	Patella			5,5			5,5				1,1	0,6		1				1				5,50			
36	Tibia	26,3	14,9	23,8	12,0	8,7	85,7				16,4	10,6	6	5	4	3	2	20				4,29			
37	Fibula			3,2		0,5	3,7				0,7	2,5	1	2		1		4				0,93			
38	Tarse			9,4	7,4		16,8				3,7	2,5		1	3			4				4,20			
39	Métatarse		0,2		0,3		0,5	17,3		3,3	5,8		1	1	2			3	7			0,17			
40	Phalanges pieds						0,0				0,0							0				0,00			
41	Scamoidé						0,0				0,0							0				0,00			
42	Diaph. membre inf.	1,2	3,8		1,7	2,5	9,2				0,0		2	2		1	2	7				0,00			
43	Mb.inf.	62,4	38,2	103,0	61,3	12,3	277,2	63,5	53,1		45,0	20	16	31	22	6		95	26,5	13,6		2,92			
44	MTC.MTT.Pm.Pp		0,7				0,4	1,1	1,1	0,3	0,2			4				5	5	1,4	0,7	0,22	0,22		
45																									
46	Total déterminé	98,2	74,6	146,6	96,0	21,0	436,4	436,4	100,0	83,7			74	87	82	71	45	359	359	100,0	51,4		1,22		
47																									
48	Os plat	5,4	6,0	5,5	4,4	6,1	27,4				0,0		37	40	42	33	48	200				0,14			
49	Os court ou épiphyse	1,4	1,1	2,7	1,1	0,7	7,0	69,4			13,3	13	13	28	10	10		74				0,99			0,20
50	Diaphyses indet.	7,7	6,8	5,3	7,8	7,4	35,0				3,0		12	12	10	16	15	65				0,54			
51	Esquilles	1,7	3,0	2,8	3,9	4,4	15,8	15,8			18,5														
52																									
53	Total indéterminé	16,2	16,9	16,3	17,2	18,6	85,2	85,2			16,3			62	65	80	59	73	339	339		48,6			
54																									
55	TOTAL	114,4	91,5	162,9	113,2	39,6	521,6	521,6			100,0		136	152	162	130	118	698	698		100,0		0,72		
56																									
57																									



**Annexe 3a** : extrait de la base de données relatives aux critères de détermination anatomique ; classeur concernant l'extrémité céphalique, incluant la mandibule, chez l'adulte. Données de Porta Nocera à Pompéi.



**Annexe 3b** : extrait de la base de données relatives aux critères de détermination anatomique ; classeur concernant le squelette infra-crânien, chez l'adulte. Données de Porta Nocera à Pompéi.



**Annexe 3c** : extrait de la base de données relatives aux critères de détermination anatomique ; classeurs concernant les restes dentaires. Données de Porta Nocera à Pompéi.



**Annexe 3d** : extrait de la base de données relatives aux critères de détermination anatomique ; classeurs concernant les données relatives aux individus immatures. Données du Tophet de Salammbô à Carthage.

	A	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
1		Ur 7	Ur 9	Ur 49	Ur 50	Ur 52	Ur 59	Ur 74	Ur 81	Ur 90	Ur 91	Ur 155	Ur 156	Ur 159	Ur 162	Ur 164	Ur 165	Ur 166	Ur 167	Ur 169	Ur 170	Ur 174	Ur 175	Ur 183
497	<b>Femur (total identifiés)</b>		2	2	3	4	10	5	8	4	13	4	8	7	4	10	8	6	4	5	7	9	10	
498	epiphyse prox indet																							
499	epiphyse prox D																			1				
500	epiphyse prox G																						1	
501	col femur indet																							
502	col femur D																							
503	col femur G							1																
504	grand trochanter indet																							
505	grand trochanter D																							
506	grand trochanter G							1																
507	petit trochanter																							
508	diaphyse femur indet						1				1		1	5		3	2			2		4	1	
509	diaphyse femur D													1		4		1						1
510	diaphyse femur G							1								1	4		1					
511	diaphyse prox femur indet												1						1				1	
512	diaphyse prox femur D								2		2		1				1			1	3	1		
513	diaphyse prox femur G		1				1	2			4					1		1		2		1	1	
514	diaphyse distale femur indet										1		3	1				1	1		1			4
515	diaphyse dist femur D										1			1										3
516	diaphyse dist femur G						1	1				2			1		2			1	2			
517	epiphyse distale femur indet																					1		2
518	epiphyse distale femur D																							
519	epiphyse distale femur G																							
520	point de Béclard		1						1														1	
521	condyle femur																							
522	zone intercondylenne																							
523																								
524	<b>Patella (total identifiés)</b>																							
525	patella indet																							
526	patella D																							
527	patella G																							
528																								
529	<b>Tibia (total identifiés)</b>		2	3	4		5	6	2	4	8	3	9	5	1	10	2	6	5	7	3	6	1	
530	epiphyse proximale tibia indet																							
531	epiphyse proximale tibia D																							
532	epiphyse proximale tibia G																							
533	diaphyse tibia indet												1			6	1			2		3		
534	diaphyse tibia D							1					1	1				1						
535	diaphyse tibia G								1		1		1	1		1		1	2					
536	crete tibiale										4													
537	proximal diaphyse tibia indet							1				1								1			2	
538	proximal diaphyse tibia D						1							2	1			1	1	1	1	1		
539	proximal diaphyse tibia G													1			1	1	1	1	1	1		1
540	distal diaph tibia indet		1								2			1					1	2	1	1		

**Annexe 4a** : extrait du tableur regroupant l'ensemble des indicateurs biologiques relatifs à chaque structure. Données de la nécropole de Porta Mediana à Cumes.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1		34218	34219	34220	34221	34236	34241	34242	34253	34276	34279	34283	29008	29014	29050	29060	34174	35203	35258	35291	35300	35306	35309	35335	35362	35380
2	<b>Sexe</b>	féminin	féminin	masculin	masculin probable	indéterminé	féminin	féminin	masculin probable	masculin	féminin	féminin	indéterminé	féminin	masculin	féminin	indéterminé	indéterminé	féminin	féminin	masculin	masculin	féminin	féminin	masculin	féminin
3	Diagnose sexuelle bio	féminin	féminin	masculin	masculin probable	indéterminé	féminin	féminin	masculin probable	masculin	féminin	féminin	minin probat	féminin	masculin	féminin	masculin probable	indéterminé	indéterminé	féminin	féminin	masculin	masculin	féminin	féminin	masculin
4	Sexe épitaphe	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	féminin	NC	NC	NC	NC	NC	NC
5	Age épitaphe	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
6	Présence d'un chignon	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
7	NMI	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	3	1	1	1	2
8	Doublet	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
9	Incompatibilité	oui	oui	non	oui	non	oui	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui	non	non	non	oui
10	Collage / symétrie	oui	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	oui	oui	non	non	non	oui
11	Age	adulte agé	adulte agé	adulte agé	adulte agé	adulte	15-19	adulte agé	adulte jeune	adulte	adulte agé	adulte	adulte	adulte agé	adulte	adulte jeune	adulte agé	adulte	adulte	adulte agé	adulte	adulte	adulte jeune	adulte jeune	adulte jeune	adulte jeune
12																										
13	<b>Indicateurs d'âge</b>																									
14	observation des cartilages	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
15	observation de l'épiphyse	non	oui	non	oui	non	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui
16	observation de l'extrémité	oui	oui	non	oui	non	oui	non	non	non	non	non	non	oui	oui	non	non	non	oui	oui	oui	oui	non	non	non	oui
17	observation de la crête iliac	oui	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	oui
18	observation des listels vert	oui	oui	non	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
19	observation des sutures cr	non	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	non	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
20	observation de la symphyse	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non
21	observation de la surface a	non	non	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non
22	analyse du stade de maturat	oui	oui	non	non	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
23	observation des apex dent	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
24	observation de l'usure den	oui	oui	non	oui	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
25	dimensions du squelette p	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
26	épaisseur des corticales dia	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
27	présence d'une HFI	oui	oui	non	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
28	présence de pathologies de	oui	oui	oui	oui	non	non	oui	non	non	oui	non	non	oui	non	non	oui	non	non	oui	oui	oui	non	non	non	non
29	présence d'une calcificatio	non	oui	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non
30	présence d'une calcificatio	oui	non	oui	oui	non	non	non	oui	non	non	non	non	oui	oui	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
31																										
32	<b>Indicateurs de sexe</b>																									
33	observation de la grande in	non	oui	oui	non	non	oui	oui	non	oui	non	oui	non	non	oui	oui	non	non	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non
34	observation de la zone de	non	oui	oui	non	non	non	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	oui	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui
35	présence d'un tubercule de	NU	non	oui	NU	NU	NU	non	non	non	non	non	NU	non	NU	non	NU	NU	NU	non	non	non	NU	non	NU	non
36	observation de l'angle sous	non	oui	oui	non	non	oui	non	oui	oui	non	oui	oui	non	oui	non	oui	non	non	oui	oui	oui	oui	non	oui	non
37	observation de la forme du	non	oui	oui	non	non	oui	non	oui	oui	non	oui	non	oui	non	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non
38	observation morphologique	non	non	non	non	non	non	non	non	oui	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	oui	oui	non	non	non	non
39	observation des reliefs d'in	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non
40	présence d'une HFI	oui	oui	non	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
41																										
42	<b>Robustesse</b>	gracile	gracile	forte	forte	forte	gracile	forte	forte	NC	gracile	gracile	gracile	gracile	moyenne	gracile	forte	moyenne	moyenne	gracile	forte	gracile	gracile	moyenne	forte	moyenne
43																										
44	<b>Pathologies</b>																									
45	ostéophytes / syndesmop	non	oui	oui	oui	non	non	oui	non	oui	oui	oui	non	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	oui	non
46	enthésopathie du ligament	non	oui	oui	oui	non	non	oui	non	oui	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
47	enthésopathie dent de l'ax	non	oui	oui	oui	non	non	oui	non	non	oui	oui	non	non	non	non	oui	non	non	non	oui	non	oui	non	non	non
48	arthrose rachidienne	non	oui	oui	oui	non	non	oui	non	non	oui	oui	non	oui	non	non	oui	non	non	oui	oui	non	non	non	non	non
49	rétrécissement des trous d	non	oui	oui	oui	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non
50	hypervascularisation verté	non	non	oui	oui	non	non	non	non	non	oui	non	non	oui	oui	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
51	hernie intraspongieuse / no	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
52	anomalie transitionnelle lom	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
53	ostéochondrose de Scheue	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
54	DISH	non	non	oui	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non



**Annexe 5a** : extrait du tableau relatif à l'enregistrement des liaisons ou des exclusions ostéologiques. Ce tableau précise le type de liaison (collage, symétrie et concordance) ou le type d'exclusion (doublet, incompatibilité). Données issues de la nécropole de Santa Rosa au Vatican.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Structure / Tombe	Doublet	Incompatibilité (maturation)	Incompatibilité (sexe)	Incompatibilité (robustesse)	Incompatibilité (patho)	Incompatibilité (dissymétrie)	Incompatibilité (texture/aspect)	Incompatibilité (critères de crémation)	Collage	Symétrie	Concordance anatomique	Concordance tapho	Concordance stigmates de crémation
SR XX-3	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
SR XXV - TL	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
SR XXV-SI	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Urne en marbre 52165	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
XXXI-4	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
XXXIV-4	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
XXXV-1	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
XXXV-3	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
XXXV-TL	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Sep III Ur 1	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Sep III parete Sx Niche sup et med	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Sep III Niche 16	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Sep III Niche 5	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Sep III olle in US100	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Sep III Ur 2	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
SR XX- US73	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
XXXV-2	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Sep III A	oui	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
SR XXV-2	oui	oui	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Sep III B	oui	oui	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Sep III parete Dx niche centrale en bas	oui	oui	non	non	non	oui	non	non	non	non	non	non	non
Sep III parete Sx nichio medio in fondo	oui	oui	non	non	non	oui	non	non	non	non	non	non	non
Sep III Ur 52403 Niche 17	non	oui	non	oui	non	oui	oui	non	non	non	non	non	non
XXXV-4	non	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
Sep III Niche 19	non	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
Sep III Niche 15	non	oui	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non
Sep III niche 20	oui	oui	non	oui	oui	oui	non	oui	non	non	non	non	non
XXXI-5	non	non	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non
SR XX-5	oui	non	non	oui	oui	oui	non	non	oui	non	non	non	non
SR XX-6	oui	non	non	oui	oui	oui	non	non	oui	non	non	non	non
SR XX-4	oui	oui	non	oui	oui	oui	non	non	oui	non	non	non	non
SR XX - TL	oui	oui	non	oui	oui	oui	non	non	oui	non	non	non	non
Sep III Niche 12 ur 22	oui	non	non	oui	non	non	non	non	oui	oui	non	non	non
SR XX-8	oui	oui	non	oui	non	oui	non	non	oui	oui	non	non	non
XXXV5-SI	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	oui	non	non
XXXI-1	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	oui	non	non
XXXIV-2	non	non	non	non	non	non	non	non	oui	non	oui	non	non
XXXI-3	non	oui	non	non	non	non	non	non	oui	non	oui	non	non
XXXIV-1	non	non	non	oui	non	non	non	non	oui	non	oui	non	non
SR XX-7	non	oui	non	oui	non	oui	non	non	oui	non	oui	non	non
XXXI-2	non	oui	non	non	oui	non	oui	non	oui	non	oui	non	non
XXXIV-4 bis	oui	oui	non	non	oui	non	oui	non	oui	non	oui	non	non
SR XX-1	oui	oui	non	oui	non	non	non	oui	oui	non	oui	non	non
SR XX-SI	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui	oui	oui	non	non
XXXIV-3	oui	oui	non	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	non	non
SR XX-2	non	oui	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	oui	non
SR XXV-3	oui	oui	non	oui	non	non	non	non	oui	oui	oui	non	oui
SR XXV-1	non	oui	non	oui	oui	non	non	non	oui	oui	oui	non	oui
SR XXV-4	non	oui	non	oui	oui	oui	non	non	oui	oui	oui	non	oui

**Annexe 5b (1)** : extrait du tableau relatif à l'enregistrement des liaisons ou des exclusions ostéologiques. Il dénombre les fragments selon leur origine anatomique et le type de liaison et/ou d'exclusion qu'ils ont permis de réaliser. Tableau concernant les fragments de l'extrémité céphalique uniquement. Données issues de la nécropole de Santa Rosa au Vatican.

	A	B	C	D	E	F	G	H
		collage	symétrie	contiguïté	concordance		doublet	Incompatibilité
1								
2	voute indet	6		1				17
3	os parietal							
4	os frontal, processus zygomatique						5	4
5	os frontal, voute	3						4
6	os frontal, glabelle	2					7	
7	os frontal, crête frontale médiane	2					3	
8	os frontal, région orbitaire						21	1
9	os nasaux							1
10	os zygomatique, processus frontal						1	2
11	os zygomatique, corps						22	
12	arcade zygomatique							
13	zygomatique bd inf orbite							
14	os temporal processus zygomatique	3						2
15	os temporal, processus styloïde							
16	os temporal	1	2				1	2
17	Suture sphéno temporale						4	
18	Os temporal, pétreux		6				47	5
19	Os temporal, condyle						28	11
20	Os temporal, processus mastoïde	1	2				19	2
21	Os temporal CAE						26	6
22	os occipital , ecaïlle	1					10	
23	os occipital, POI						2	11
24	os occipital, éminence cruciforme							
25	Os occipital, condyle						19	1
26	basioccipital						10	
27	Sphénoïde		4					1
28	Mandibule						2	3
29	Mandibule, condyle	1	4				29	2
30	Mandibule, branche	4	6				2	3
31	Mandibule, processus coronoïde	1	2				26	9
32	Mandibule région symphysaire						17	1
33	Mandibule gonion							
34	Mandibule lingula	1						1
35	Mandibule, corps	9						8
36	Maxillaire	7			2		23	6
37	Maxillaire, processus frontal	2	4					2
38	Maxillaire, processus palatin						2	
39	Maxillaire, processus zygomatique							1
40	Incus							

**Annexe 5b (2)** : extrait du tableau relatif à l'enregistrement des liaisons ou des exclusions ostéologiques. Il dénombre les fragments selon leur origine anatomique et le type de liaison et/ou d'exclusion qu'ils ont permis de réaliser. Tableau concernant les fragments du squelette infra-crânien. Données issues de la nécropole de Santa Rosa au Vatican.

	A	B	C	D	E	F	G	H
		collage	symétrie	contiguité	concordance		doublet	Incompatibilité
1								
46								
47	Os hyoïde						2	
48	Humérus diaphyse	2						4
49	Humérus, extrémité sup						8	9
50	Humérus, extrémité inf	4	4				18	6
51	Ulna, diaphyse	1	2					2
52	Ulna, extrémité proximale						15	1
53	Ulna, extrémité distale							1
54	Radius diaphyse				2			1
55	Radius, extrémité proximale						21	
56	Radius, extrémité distale						2	1
57	Scapula						25	
58	Scapula, processus coracoïde		2				20	
59	Scapula, épine							14
60	Scapula, cavité glénoïde							2
61	Os acromial							
62	Clavicule, diaphyse	2						2
63	Clavicule, ext médiale						24	7
64	Clavicule, ext acromiale						11	
65	Os coxal							
66	Os coxal, pubis	2						1
67	Os coxal EIAI							
68	Os coxal, acetabulum							5
69	Os coxal, branche ilio pubienne							
70	Os coxal, branche ischio-pubienne	2						1
71	Os coxal, ilium							1
72	Os coxal, surface auriculaire							10
73	Os coxal, ischium	2	3				28	7
74	Os coxal, GII				1			2
75	Sacrum						8	3
76	Fémur, proximal	9	6		2		16	9
77	Fémur, diaphyse	4						16
78	Fémur, ext dist			1				4
79	Tibia, proximal	4		1	5		3	6
80	Tibia, diaphyse	8	2				18	13
81	Tibia, distal	2						2
82	fibula, diaphyse	23						2
83	fibula, ext prox							
84	fibula, ext dist	5	2		2		21	

**Annexe 6a** : Ensemble des résultats (tables et figures) relatif à la détermination anatomique ayant permis de réaliser les bilans globaux des fragments d'intérêts et les comparaisons entre les sites. Résultats concernant le site de Porta Mediana à Cumes.

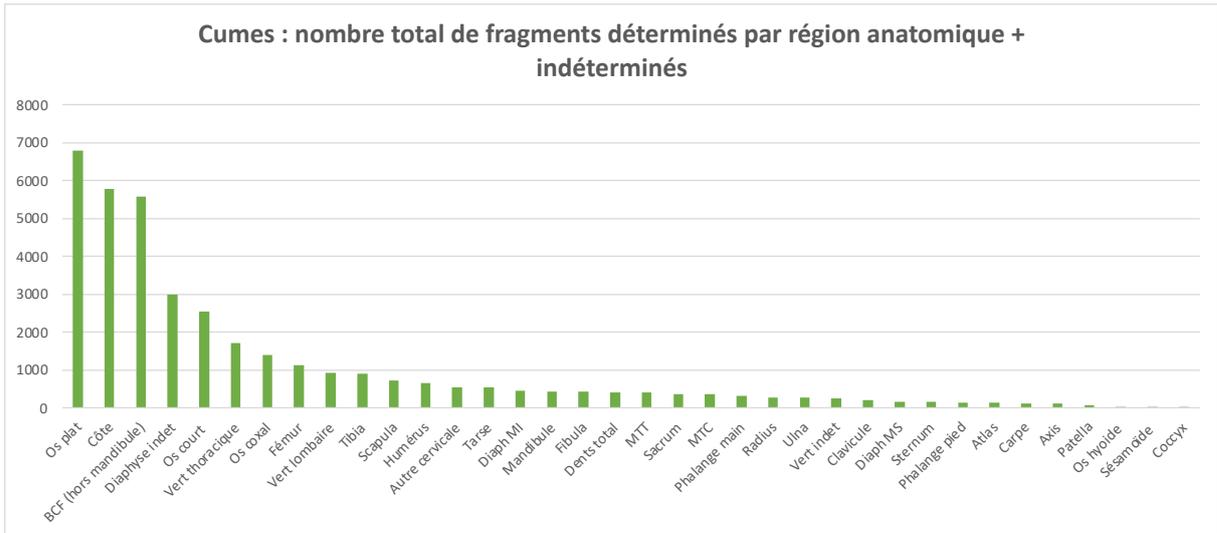


Figure 1 : nombre de fragments « identifiés » appartenant à chaque région anatomique. Les fragments « non identifiés » sont classés comme « indéterminés » et sont distribués selon des critères morphologiques dans les catégories « os plats » ; « os courts » et « diaphyses indéterminées ».

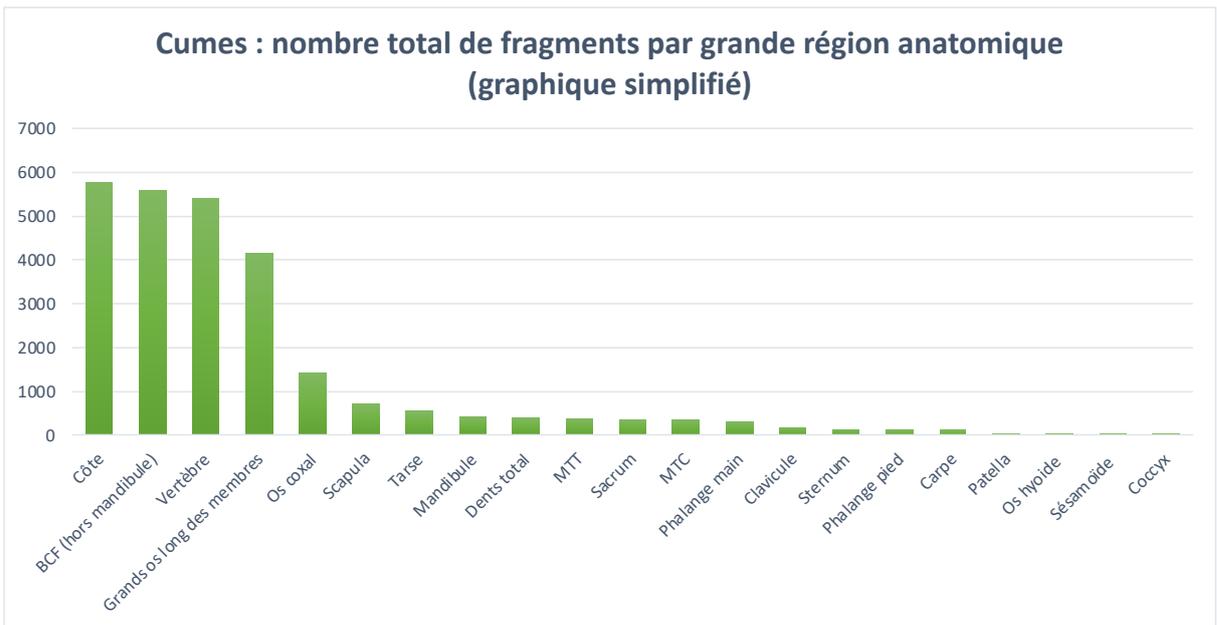


Figure 2 : représentation simplifiée des effectifs par grandes régions anatomiques. Les fragments non identifiés de façon précise ont été exclus. Tous les fragments appartenant à l'humérus, au radius, à l'ulna, au fémur, au tibia et à la fibula ainsi que les fragments classés « diaphyses membres sup. » et « diaphyses membres inf. » ont été regroupés dans la catégorie « grands os longs des membres ». L'atlas, l'axis, les autres vertèbres cervicales, les vertèbres thoraciques et lombaires ont été regroupés dans la catégorie « Vertèbres ».

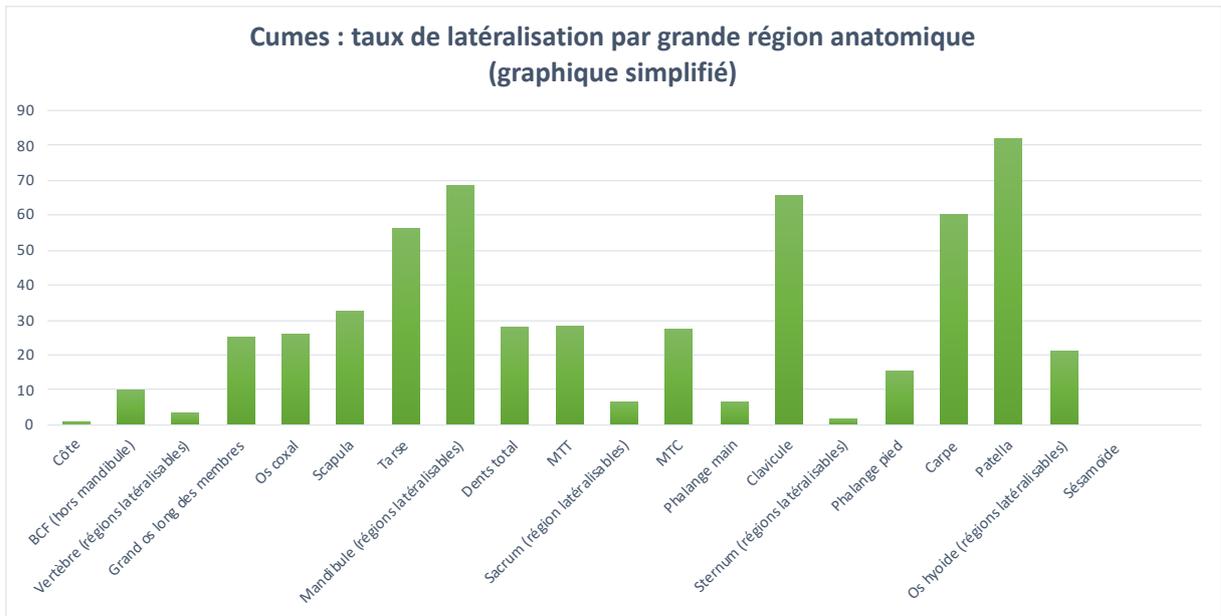


Figure 3 : représentation simplifiée des taux de latéralisation par grandes régions anatomiques. Les fragments indéterminés ont été exclus. Il s'agit des mêmes régions anatomiques que celles représentées sur la figure 2 et dont l'ordre a été respecté : de gauche à droite les effectifs des fragments sont décroissants.

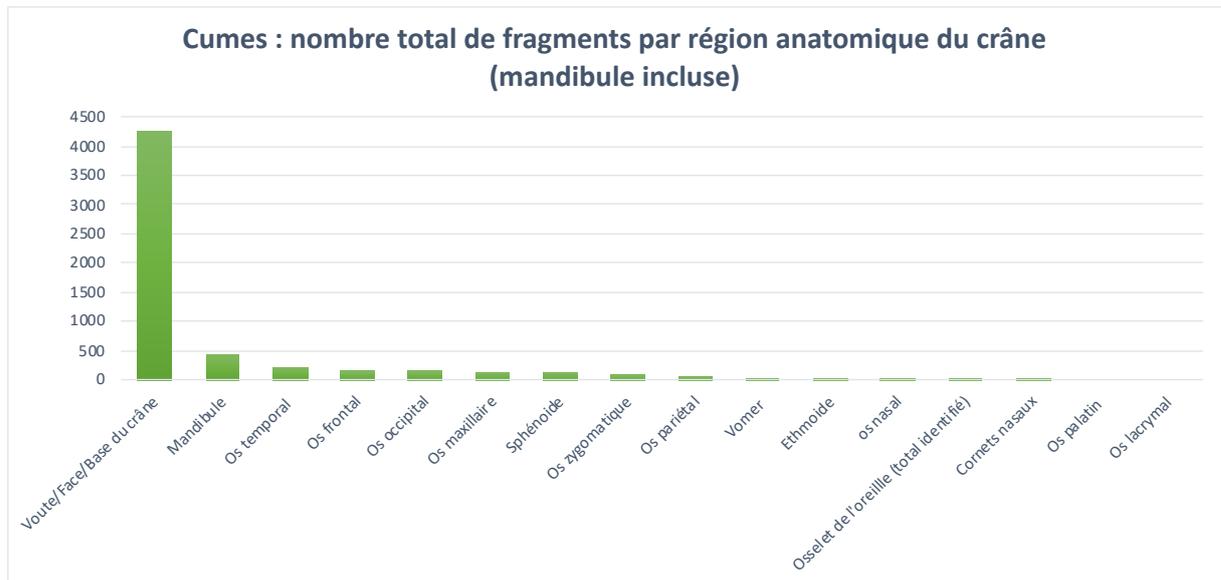


Figure 4 : Effectif des fragments crâniens par région anatomique. Les fragments non identifiés de façon précise sont classés dans la catégorie « Voute/face/base ».

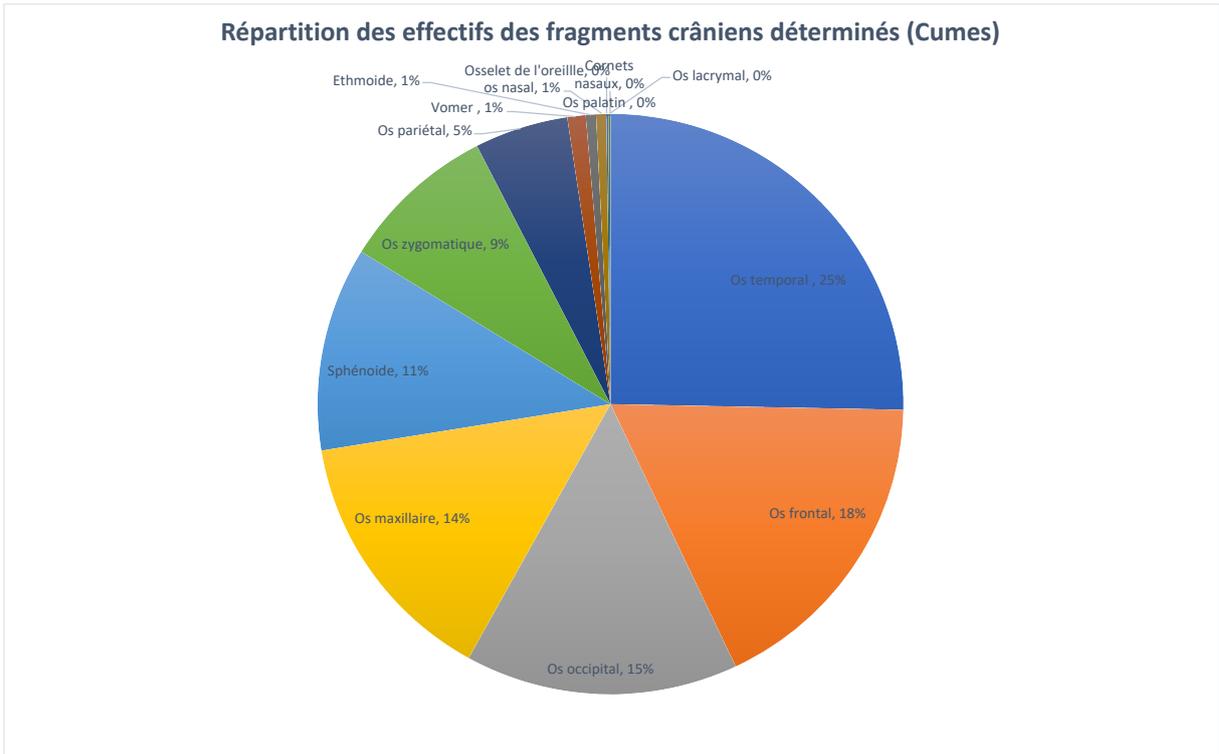


Figure 5 : répartition des effectifs des fragments crâniens déterminés de façon précise, mandibule incluse.

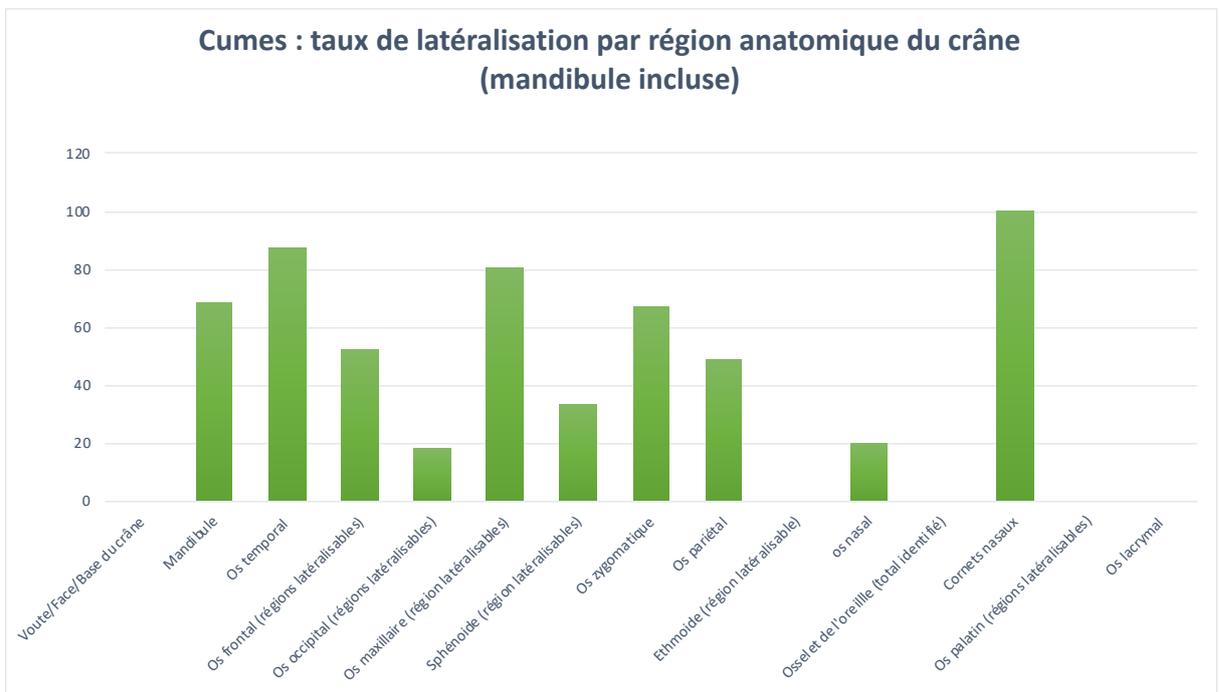


Figure 6 : taux de latéralisation des fragments crâniens par région anatomique, version corrigée. Seuls les os nasaux retrouvés isolés ont été pris en compte pour le calcul du taux de latéralisation. Les fragments non identifiés de façon précise sont classés dans la catégorie « Voute/face/base ».

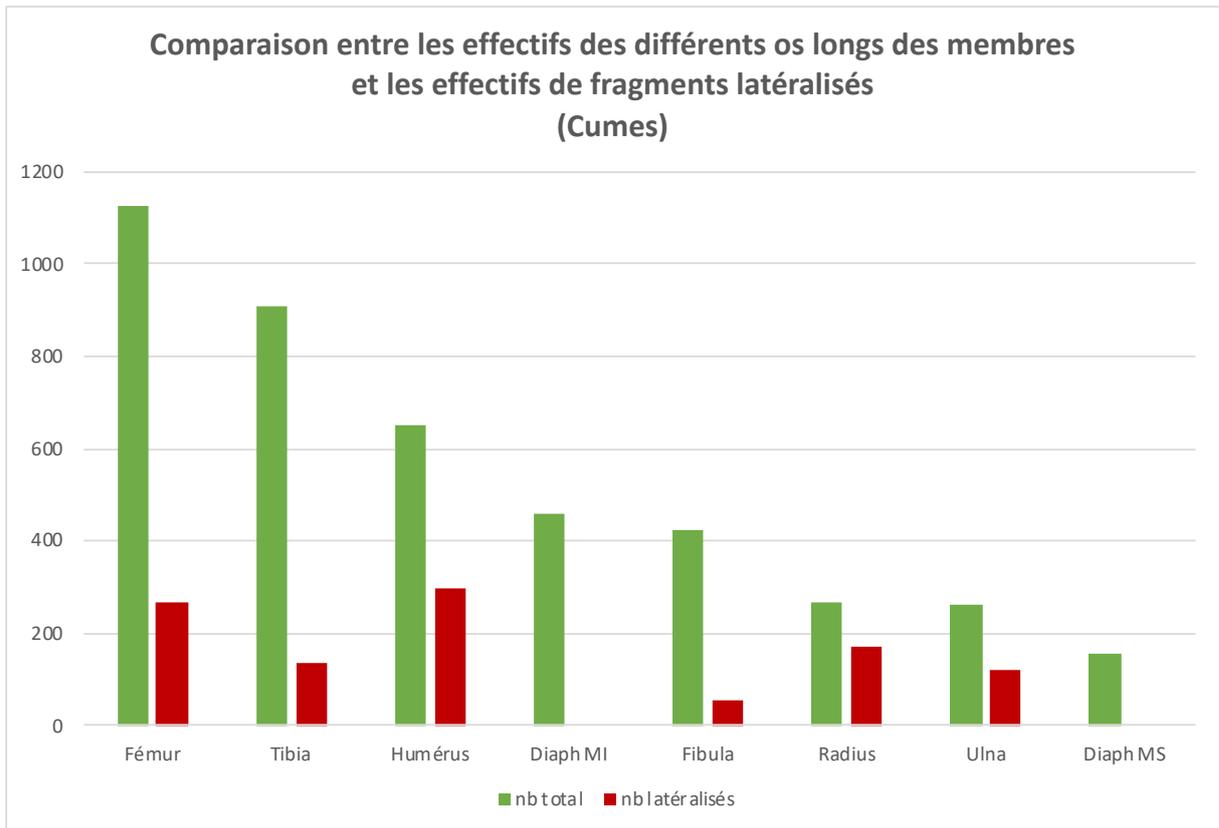


Figure 7 : histogramme comparatif entre le nombre total de fragments identifiés d'os longs des membres et le nombre de fragments latéralisés pour chacune de ces régions anatomiques.

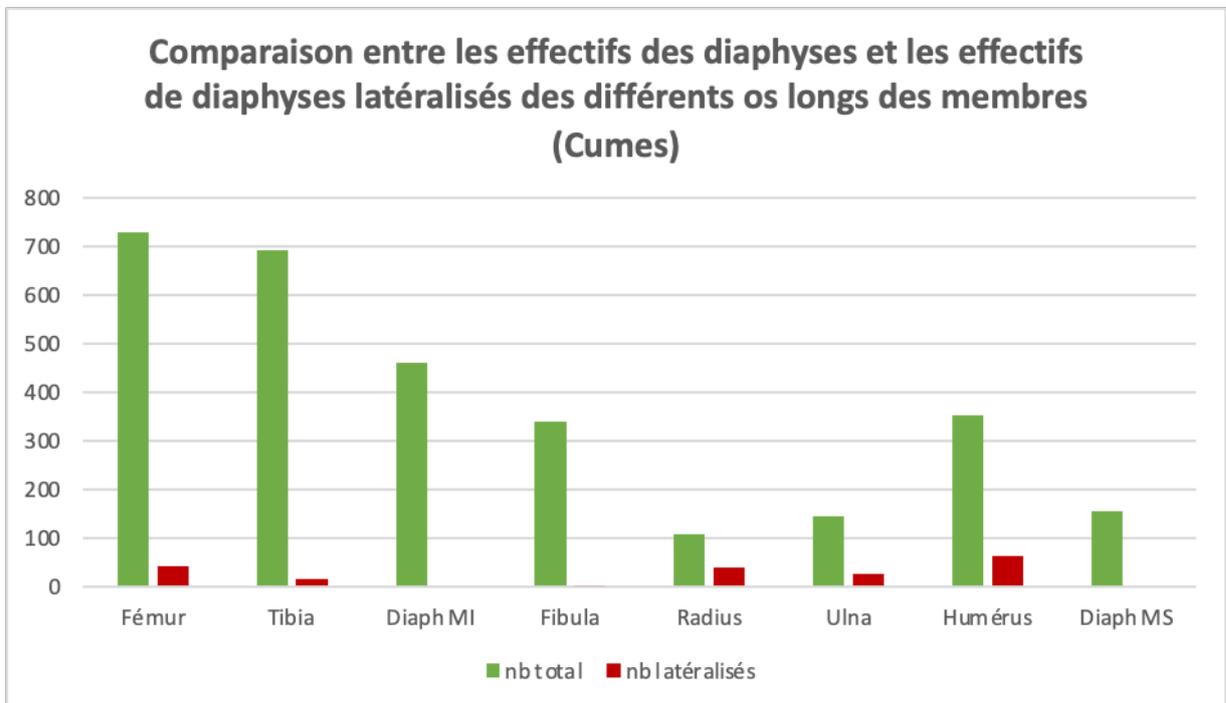
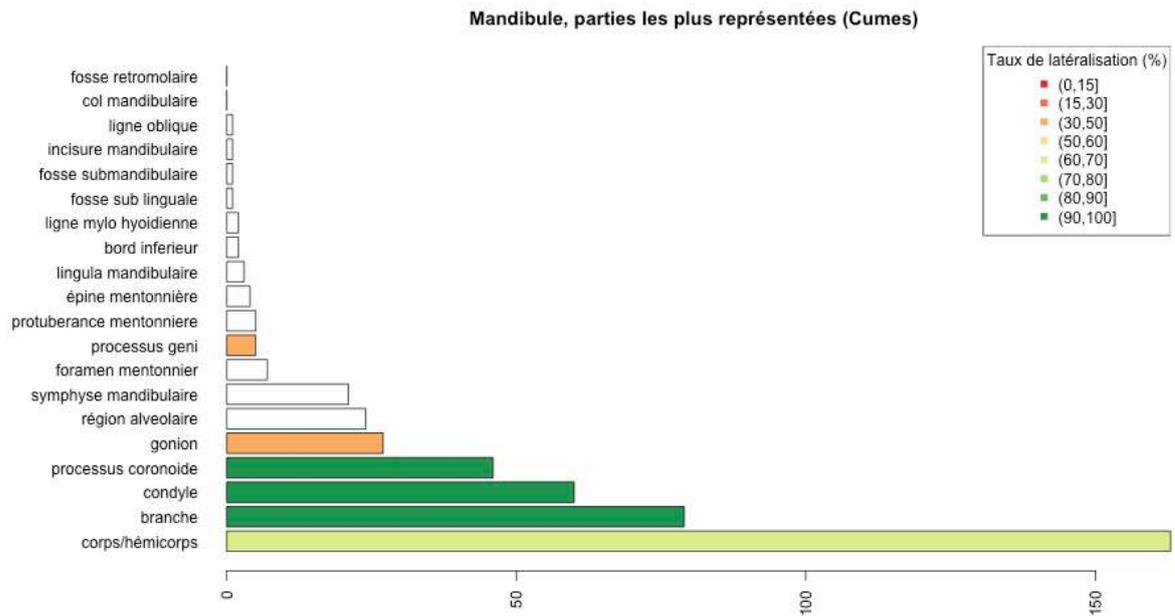
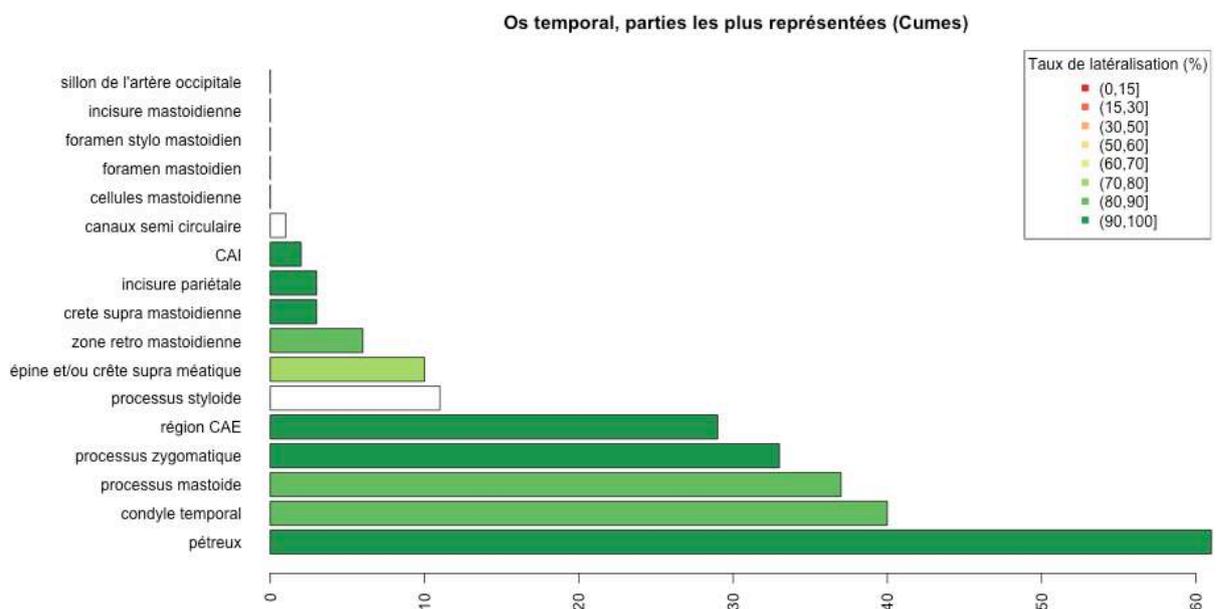


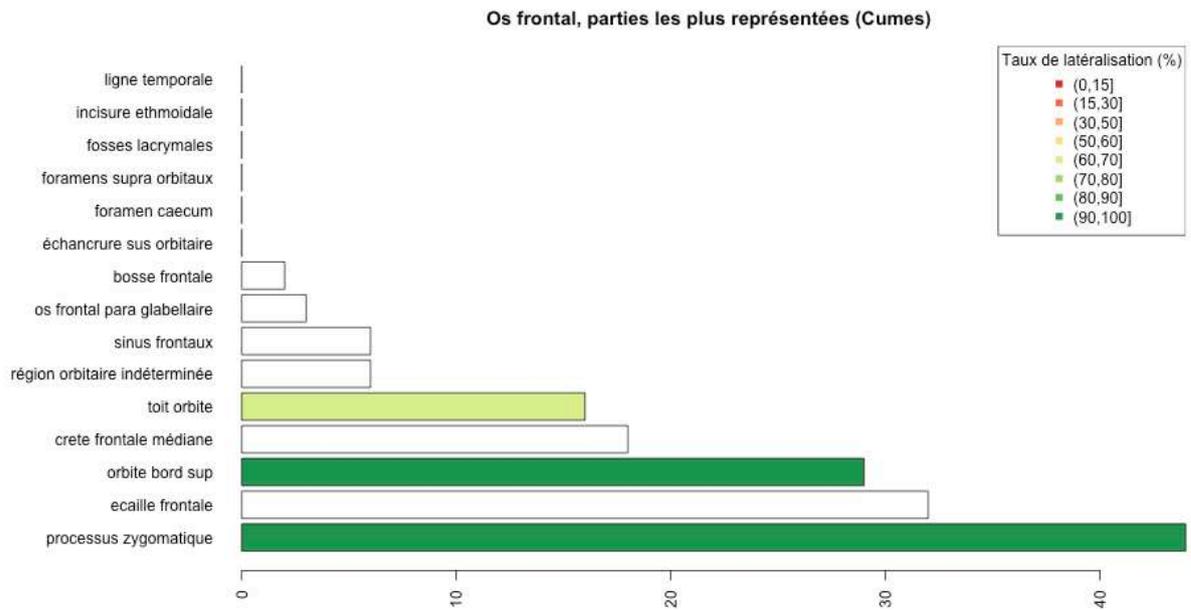
Figure 8 : histogramme comparatif entre le nombre total de fragments identifiés des diaphyses d'os longs des membres et le nombre de fragments latéralisés pour chacune d'entre elles.



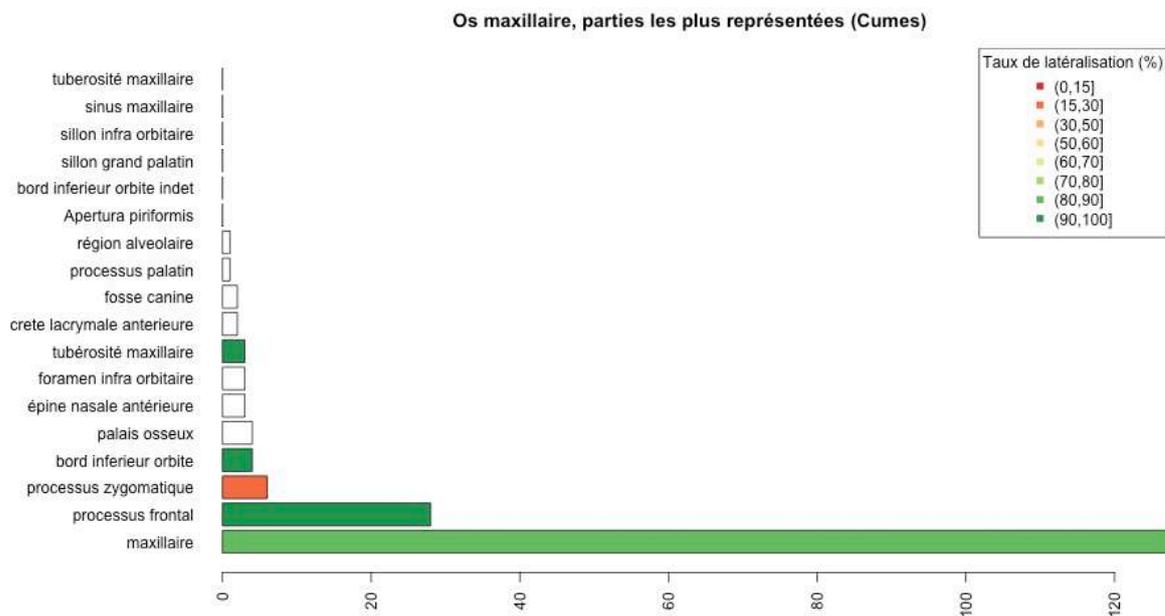
**Figure 9 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la mandibule. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



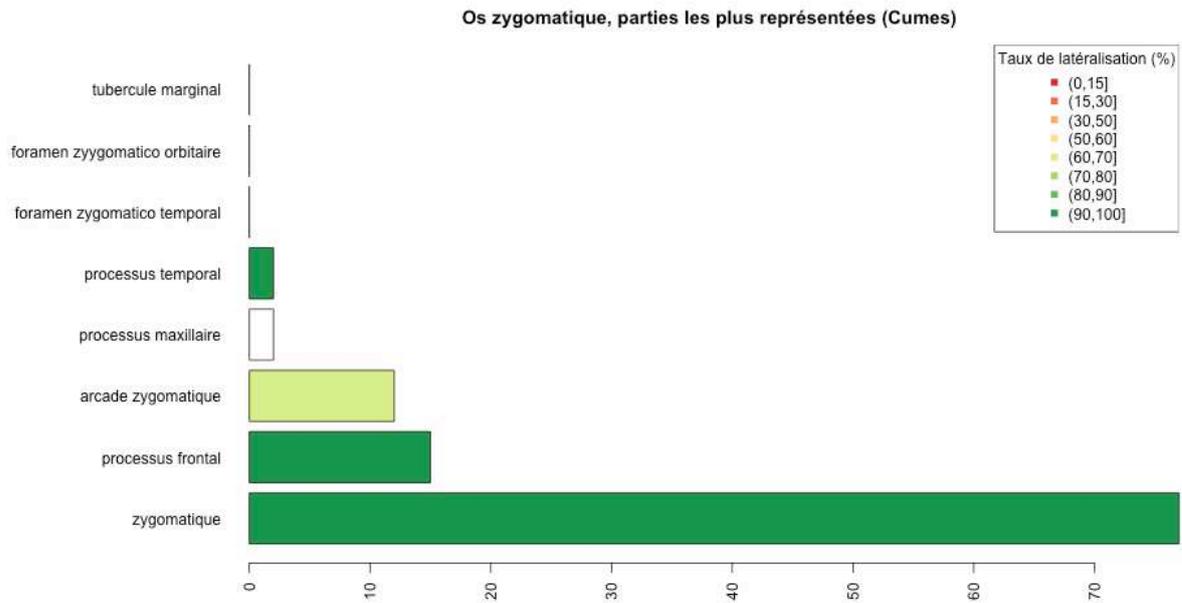
**Figure 10 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os temporal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



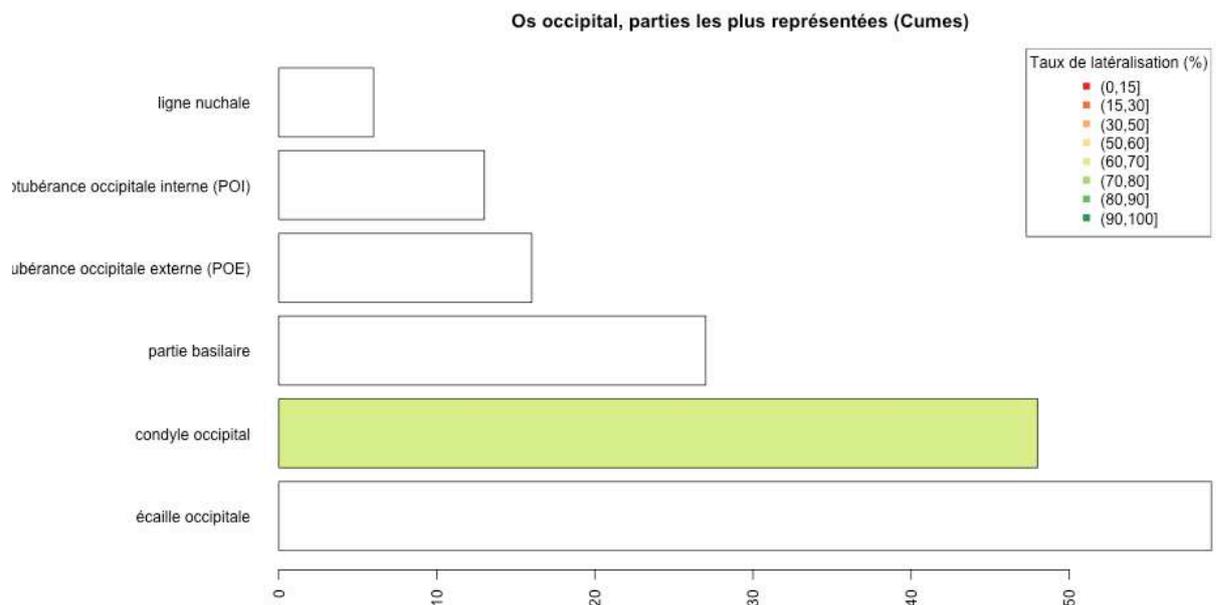
**Figure 11 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os frontal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



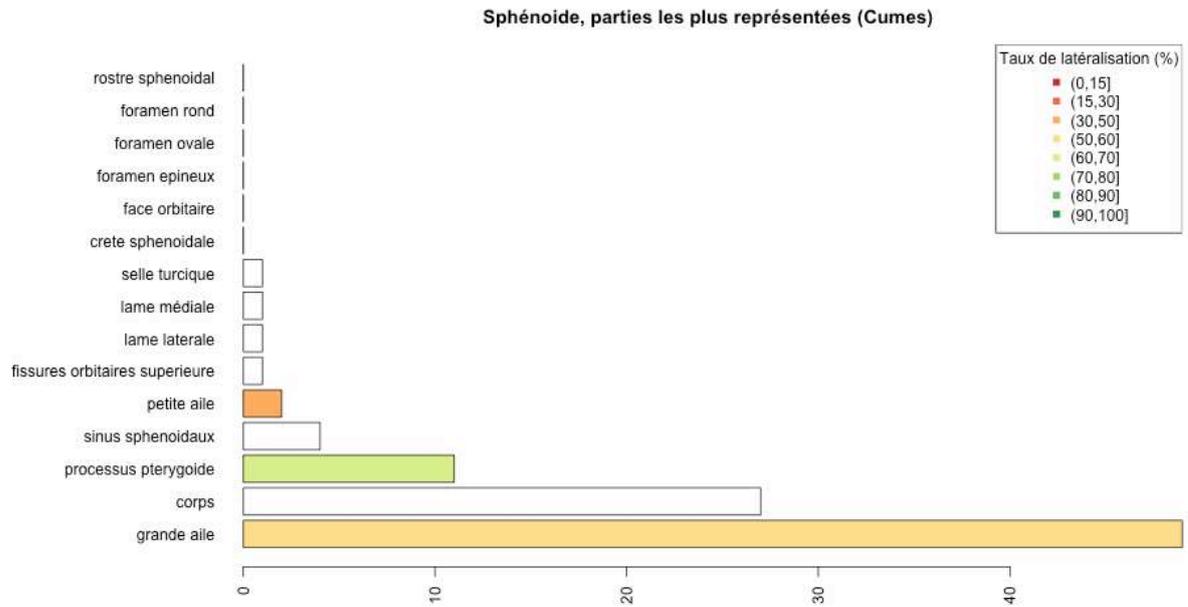
**Figure 12 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os maxillaire. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



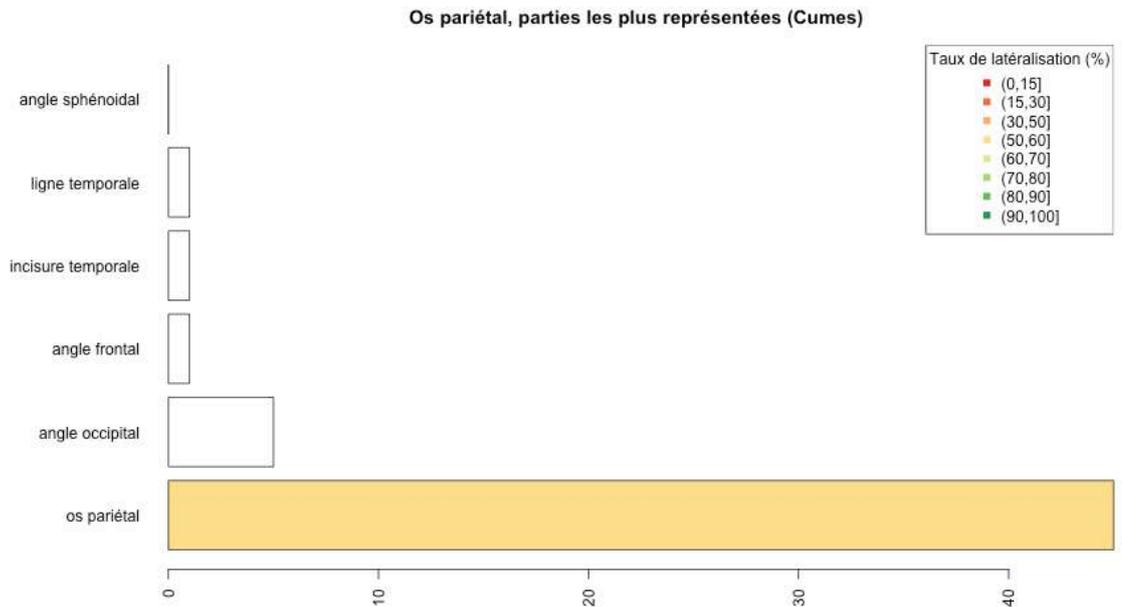
**Figure 13 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os zygomatique. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 14 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os occipital. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 15 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os sphénoïde. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 16 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os pariétal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

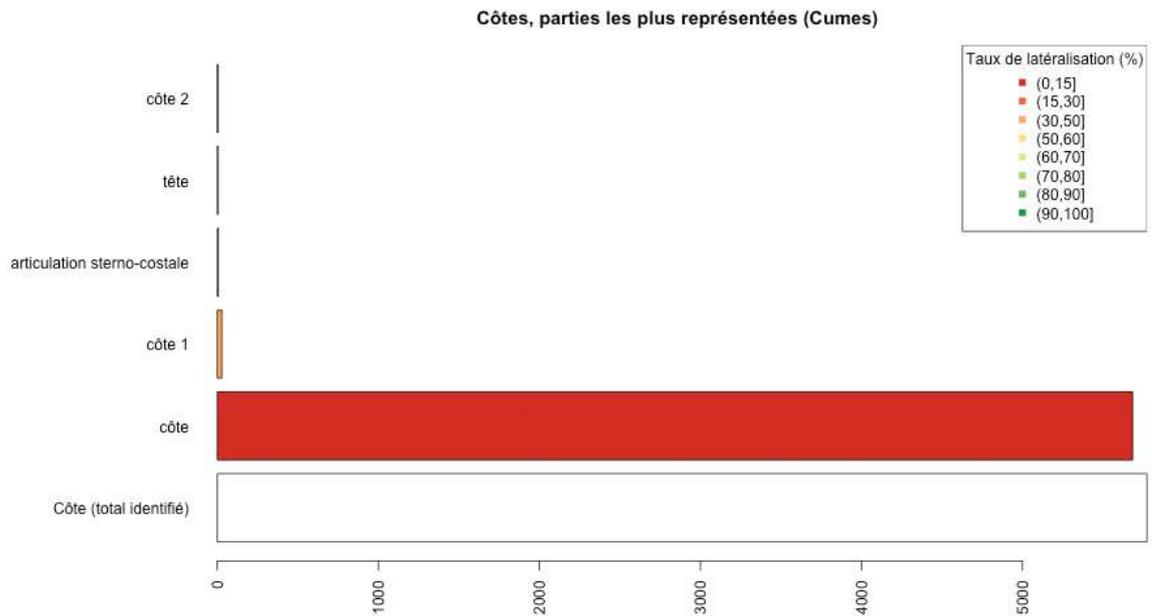


Figure 17 : effectif total des fragments de côtes. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

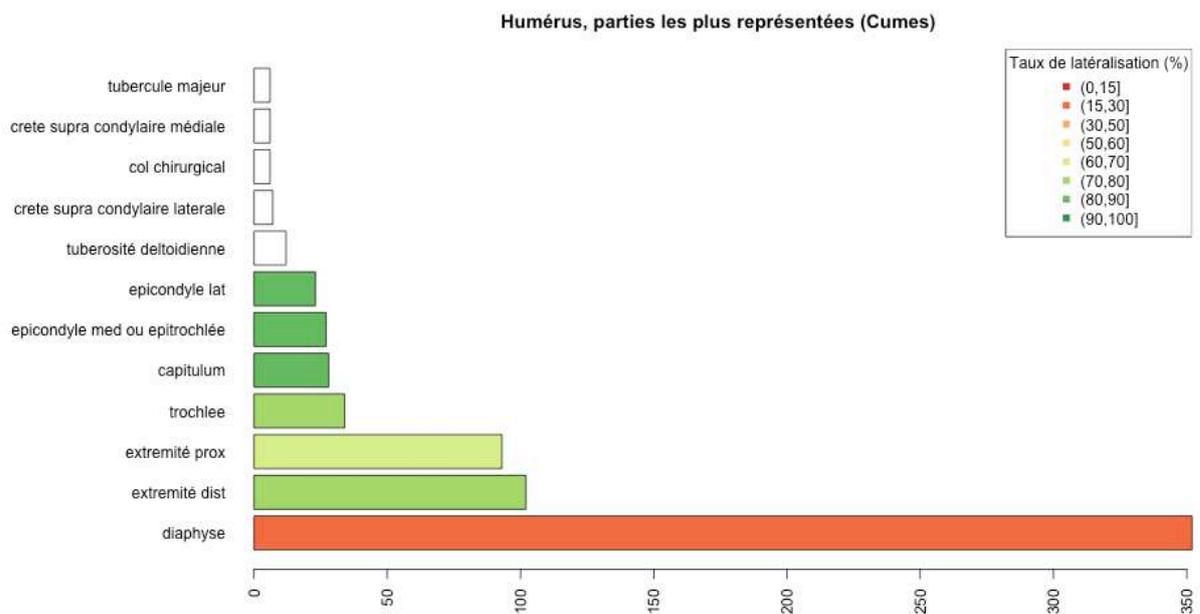
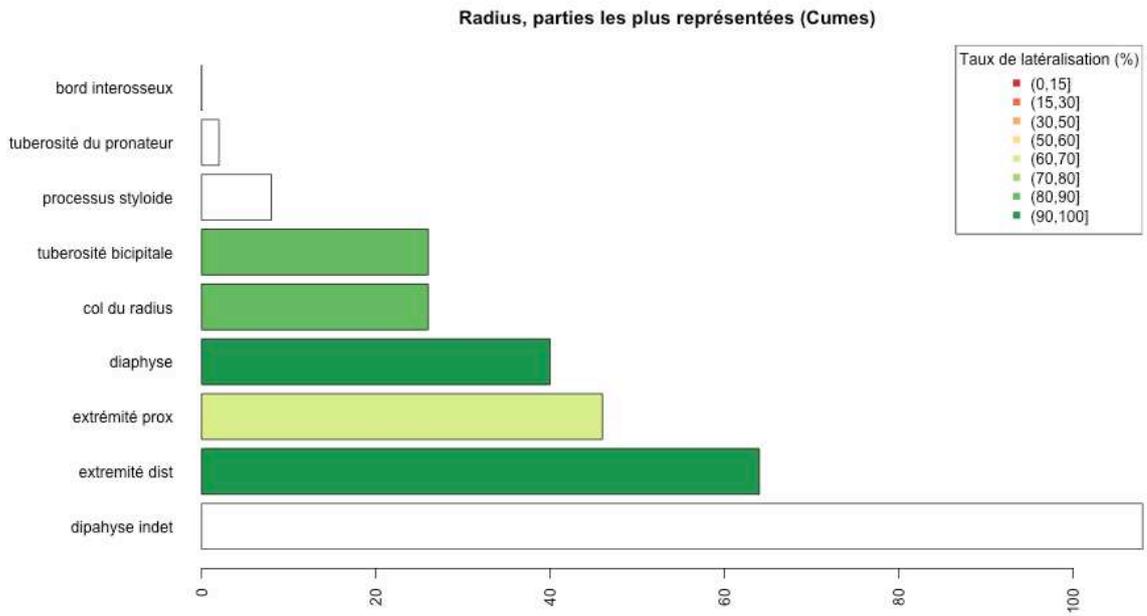
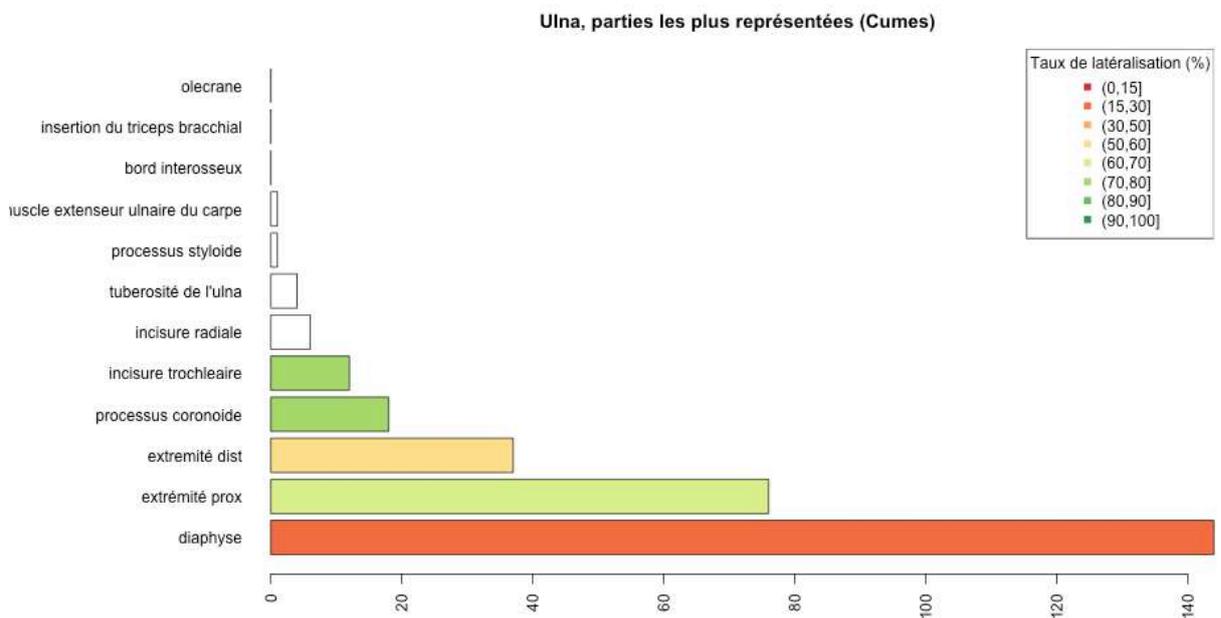


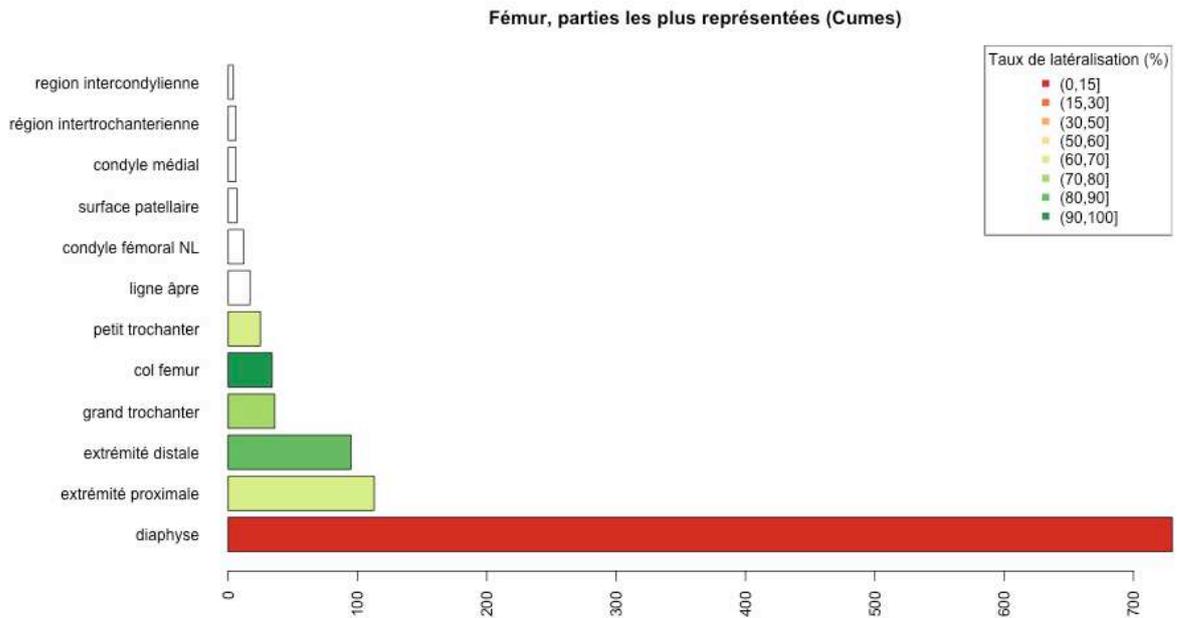
Figure 18 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'humérus. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



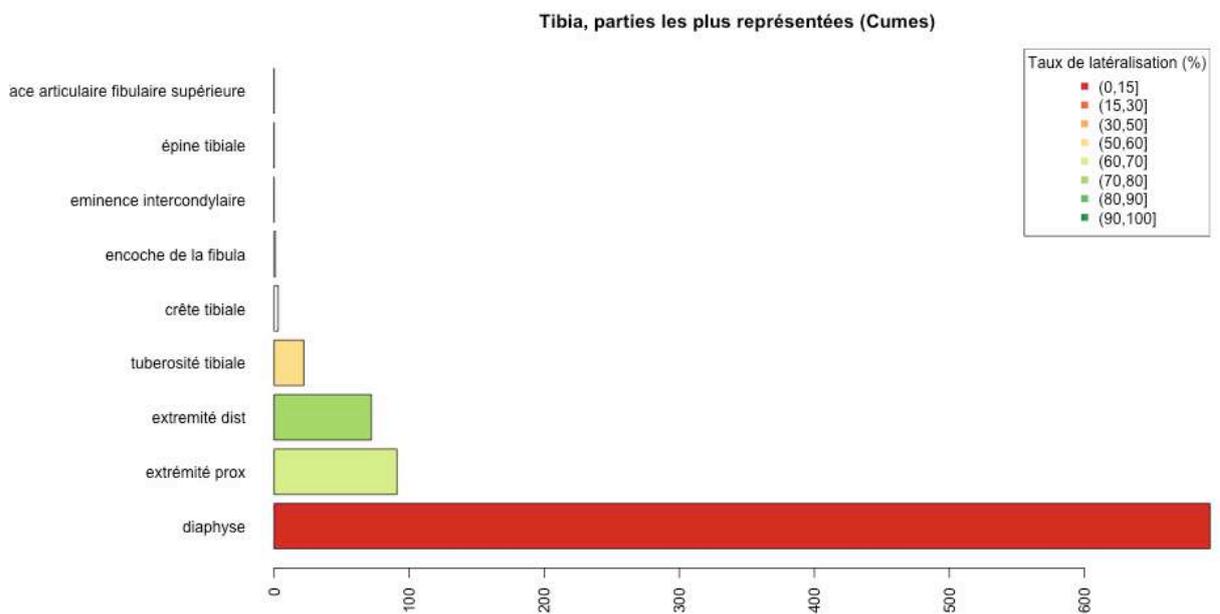
**Figure 19 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt du radius. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



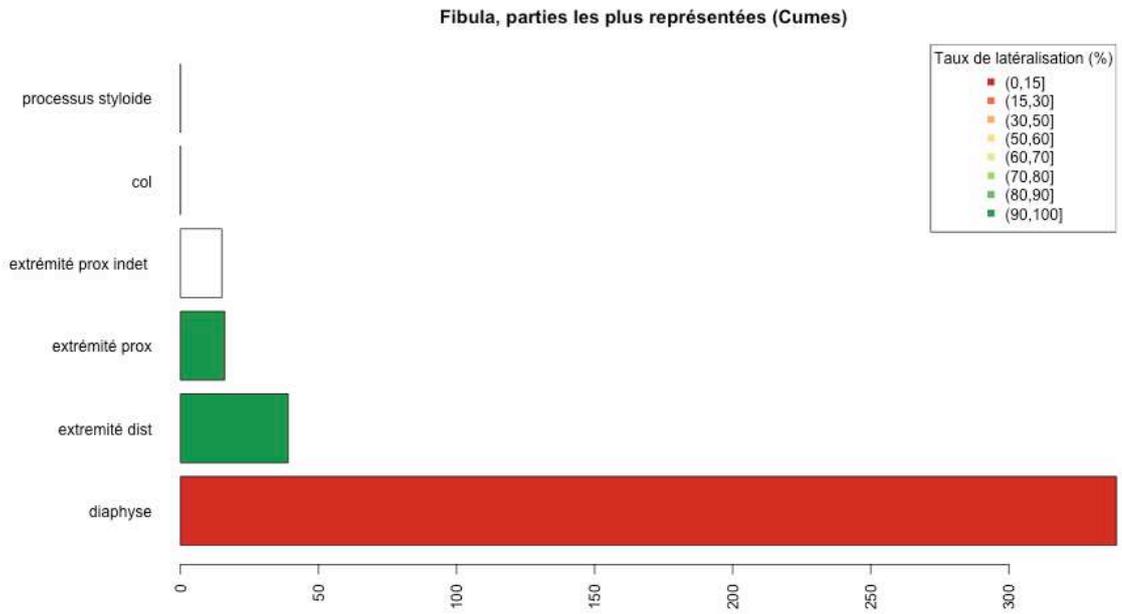
**Figure 20 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'ulna. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



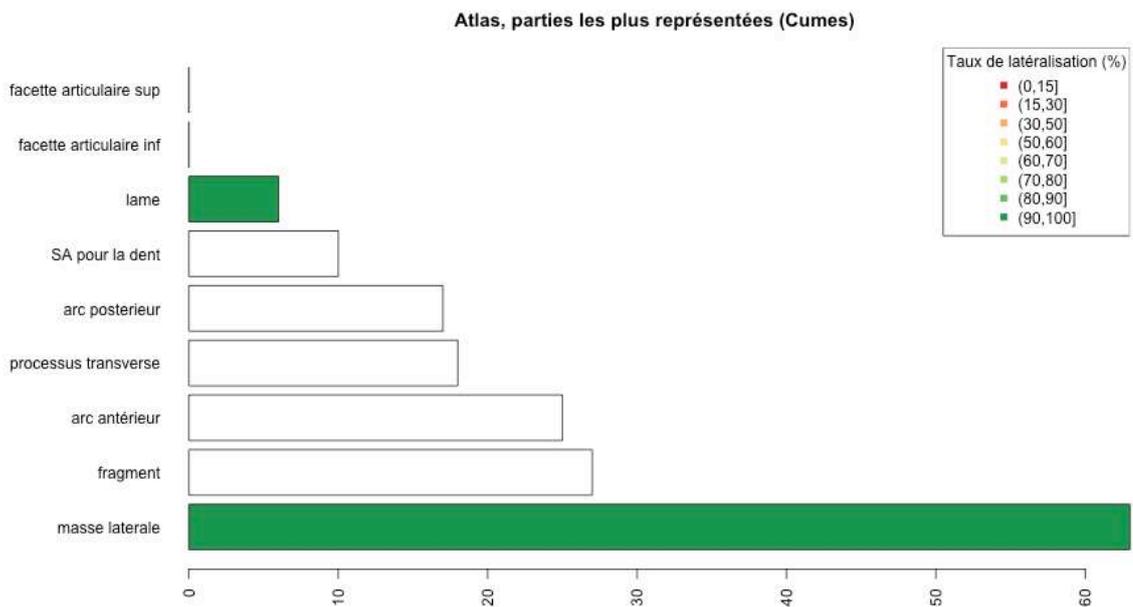
**Figure 21 :** effectif total des fragments de fémur. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



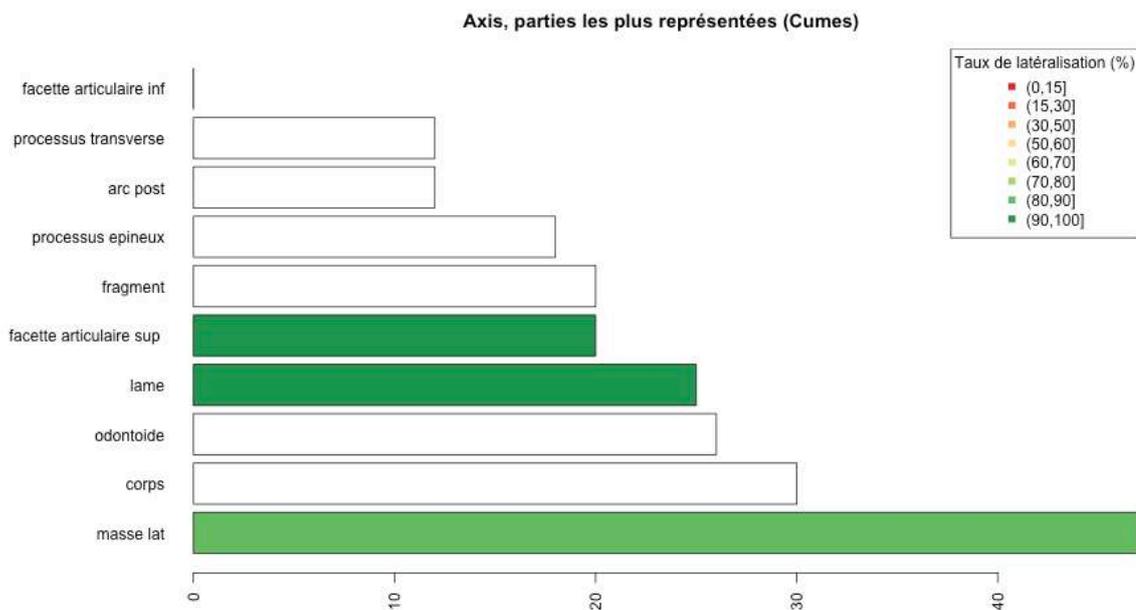
**Figure 22:** Effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt du tibia. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant des tons vert (90-100 %) aux tons rouges (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



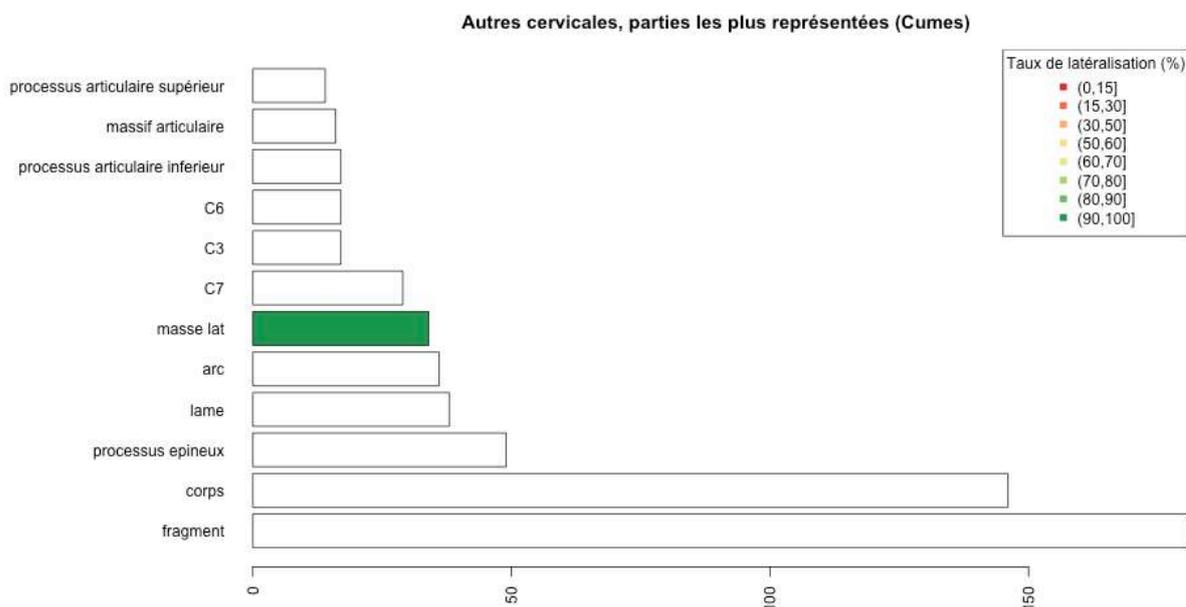
**Figure 23 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la fibula. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 24 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'atlas. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 25 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'axis. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 26 :** Effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt des vertèbres cervicales (hors atlas et axis). Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant des tons vert (90-100 %) aux tons rouges (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

Vertèbres thoraciques, parties les plus représentées (Cumes)

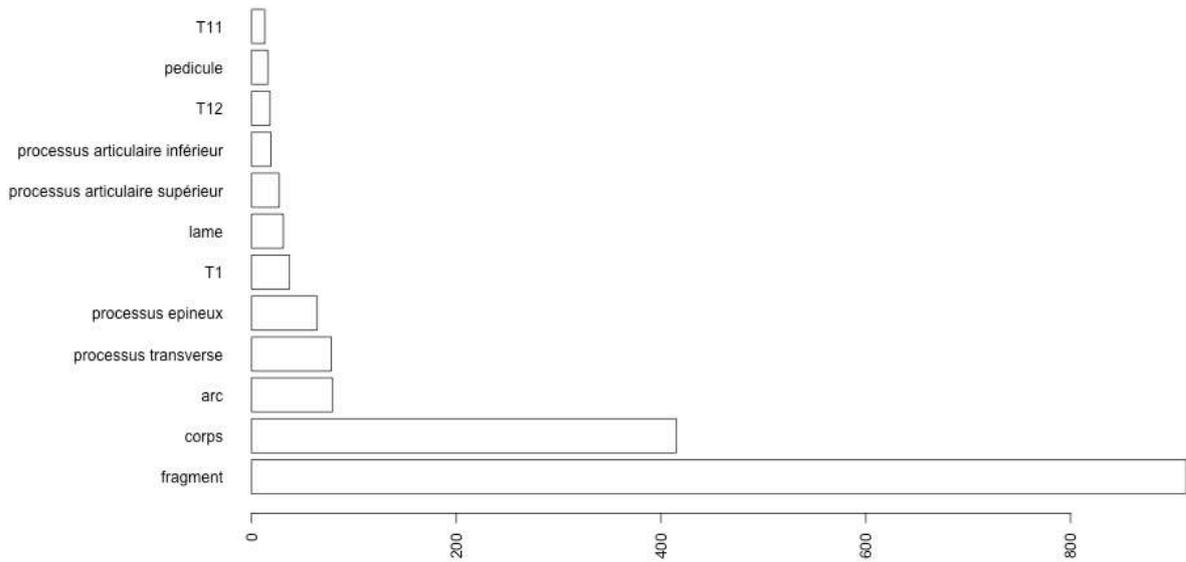


Figure 27 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt des vertèbres thoraciques. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

Vertèbres lombaires, parties les plus représentées (Cumes)

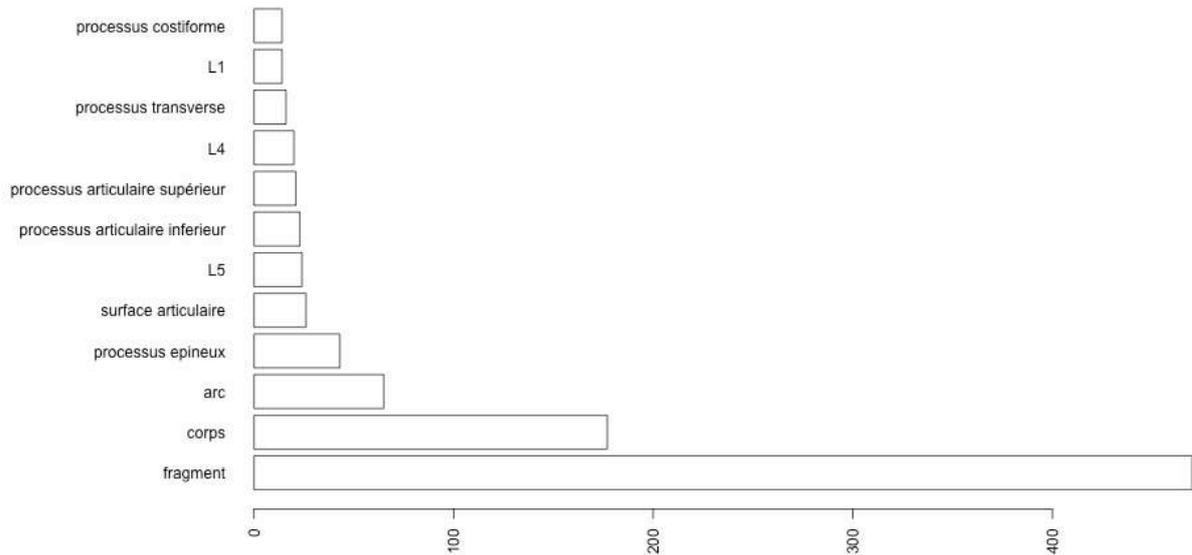
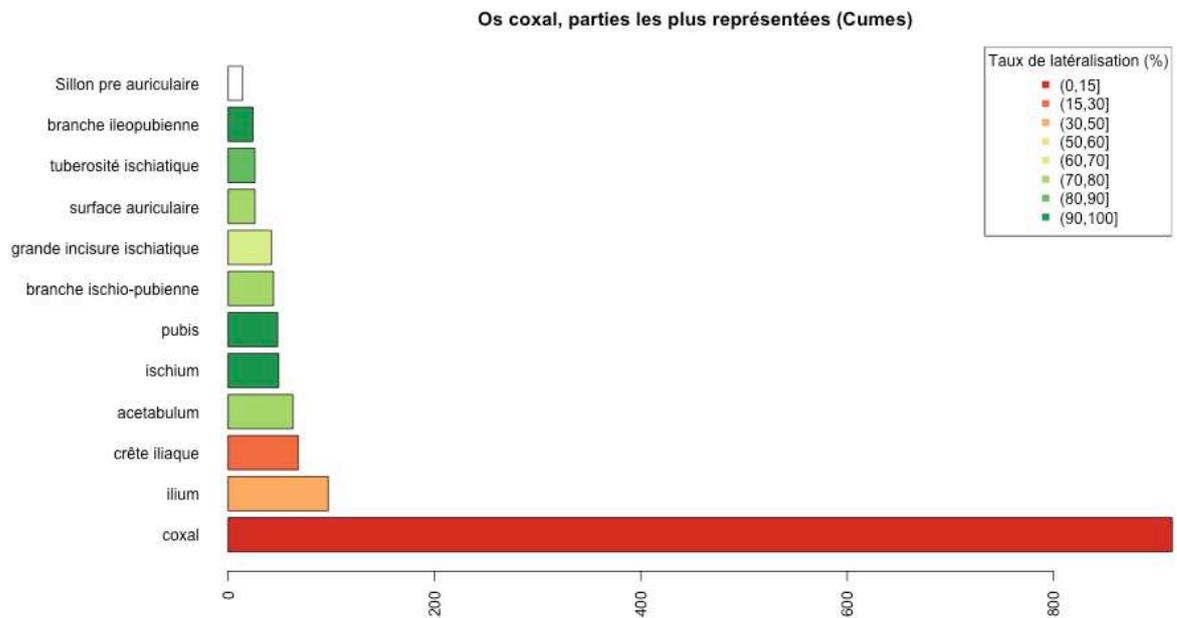
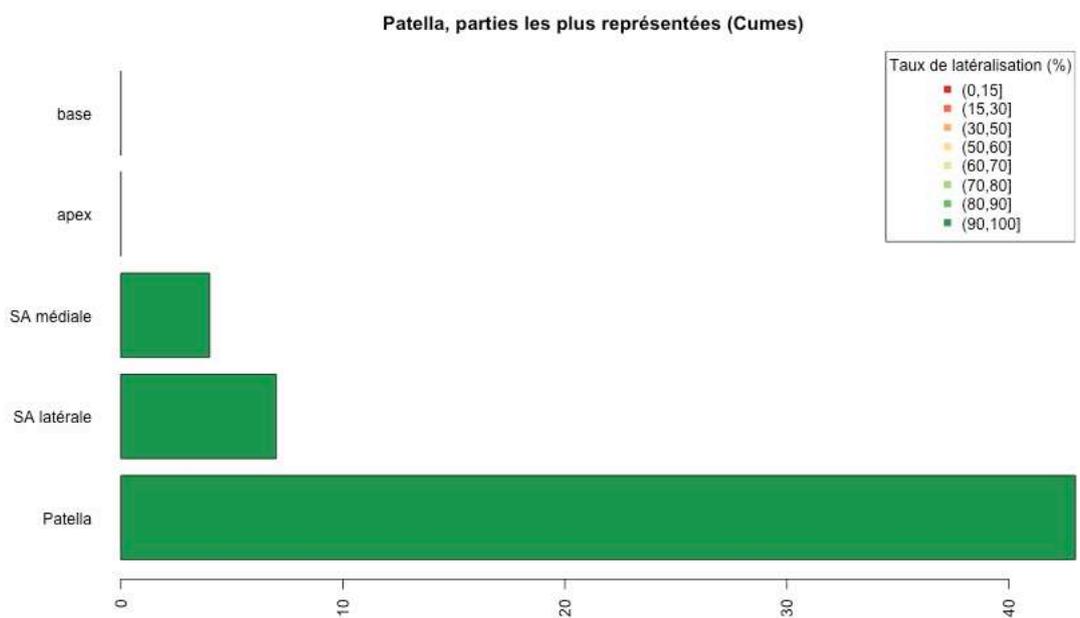


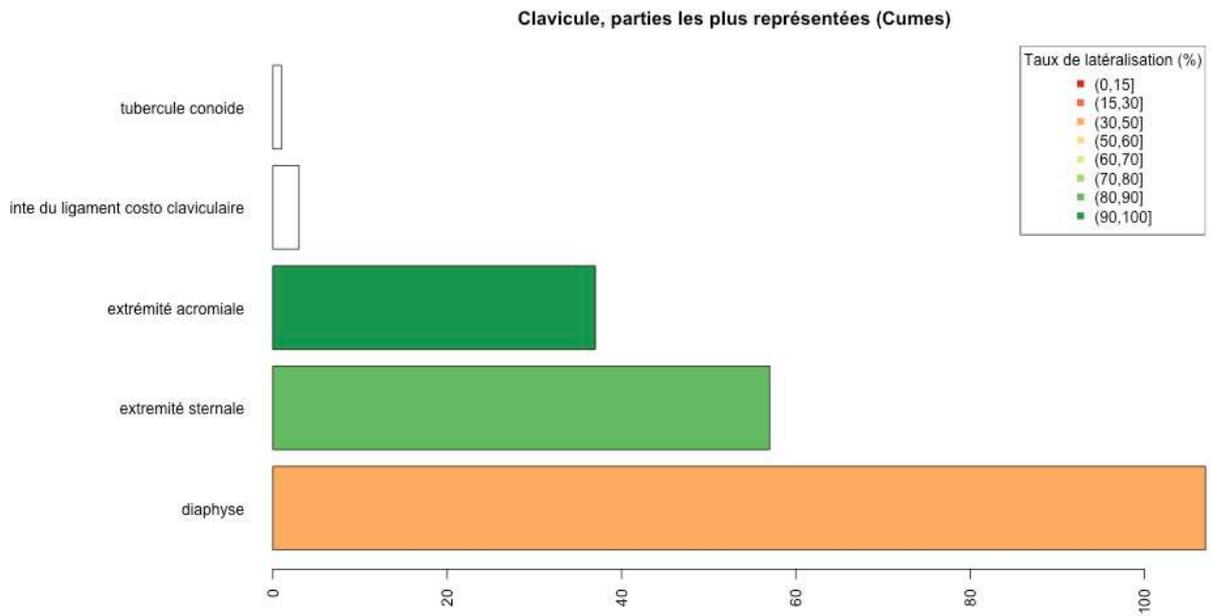
Figure 28 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt des vertèbres lombaires. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



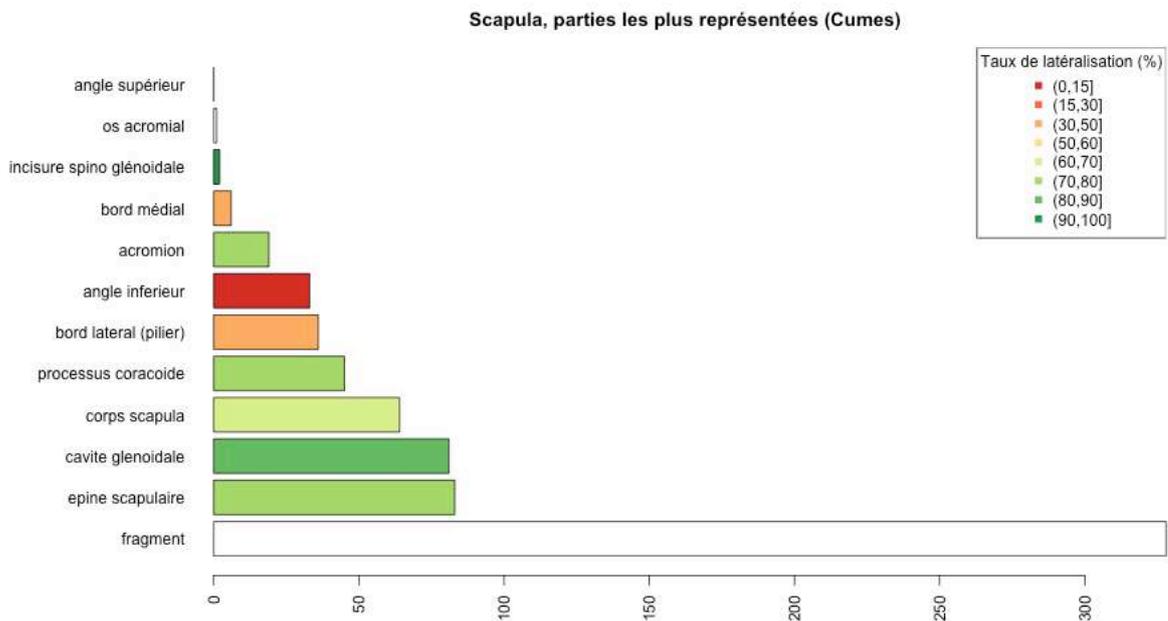
**Figure 29 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os coxal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 30 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la patella. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 31 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la clavicule. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées



**Figure 32 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la scapula. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

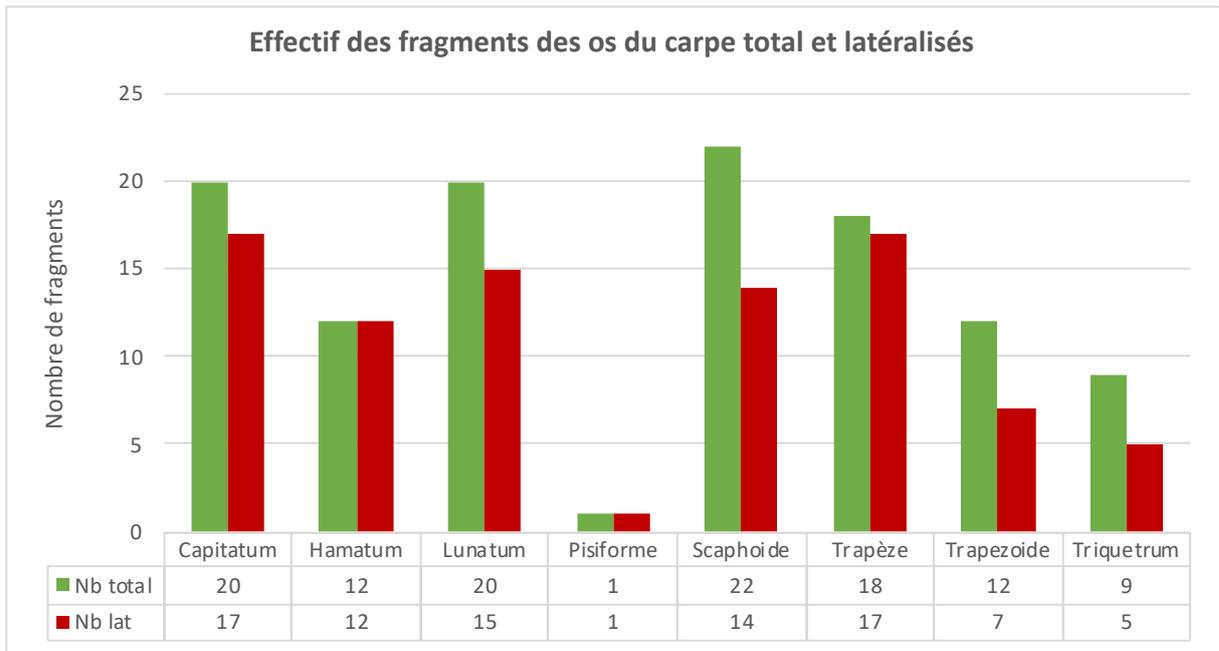


Figure 33 : histogramme comparatif des effectifs des fragments des os du carpe identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge).

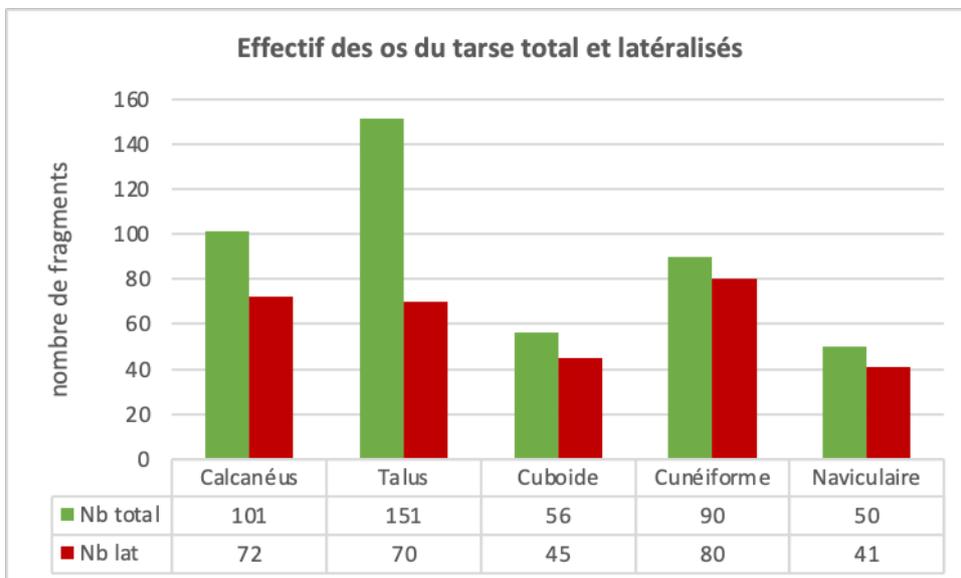


Figure 34 : Histogramme comparatif des effectifs des fragments des os du tarse identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge).

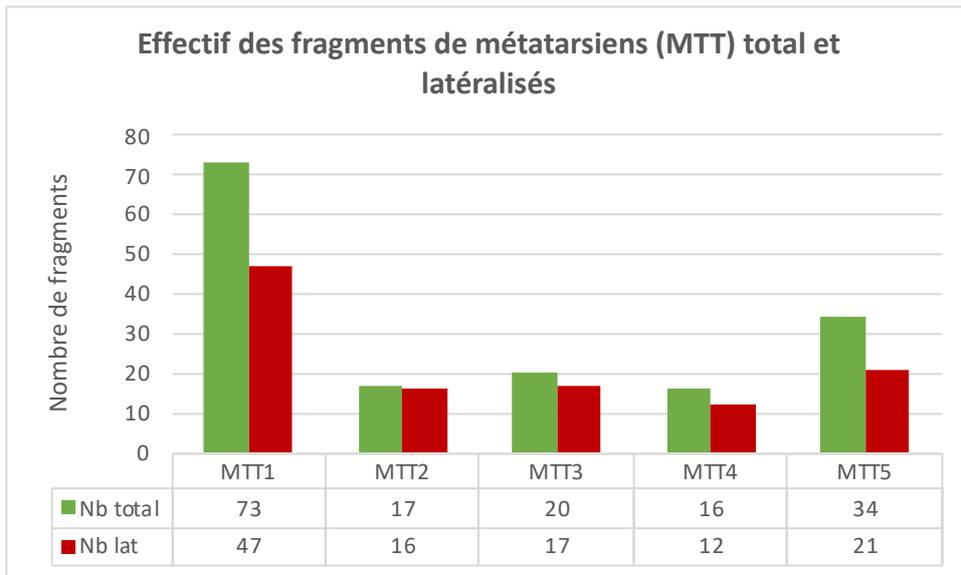


Figure 35 : histogramme comparatif des effectifs des fragments de métatarsiens, identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge).

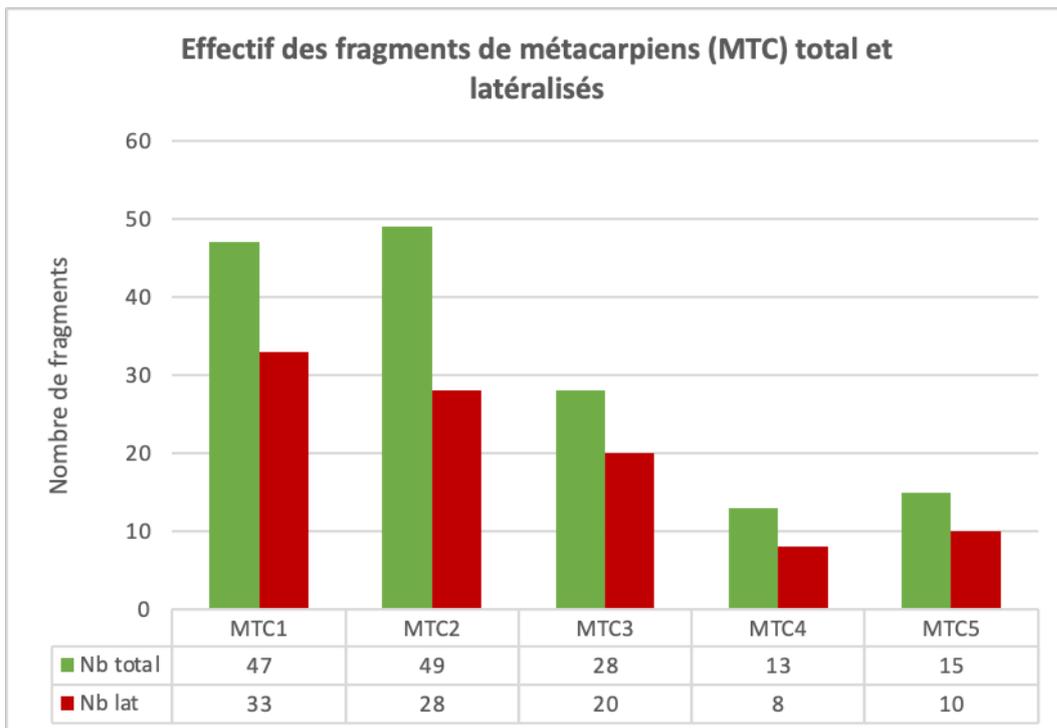
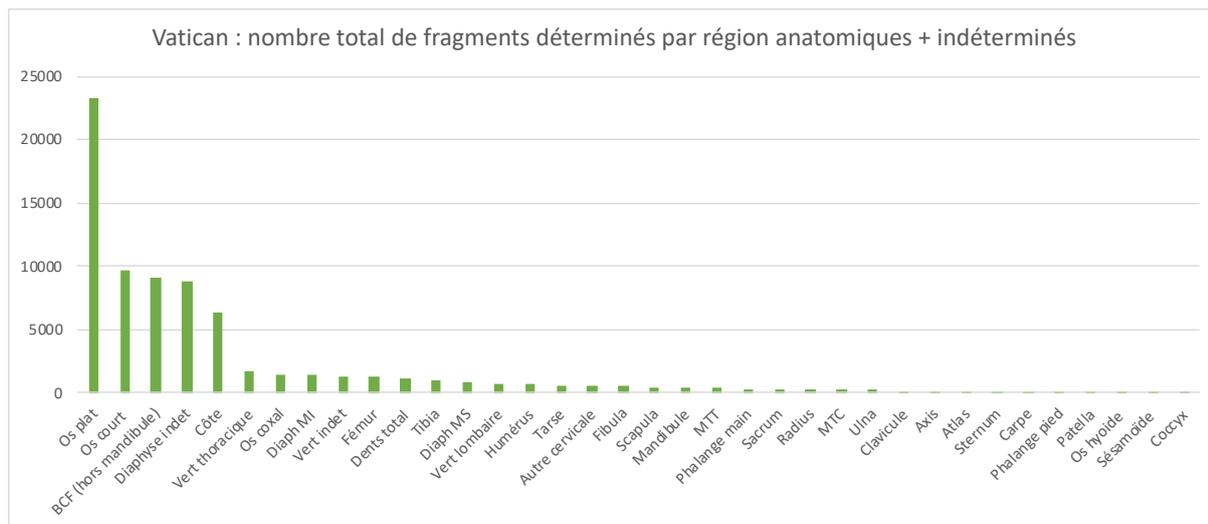
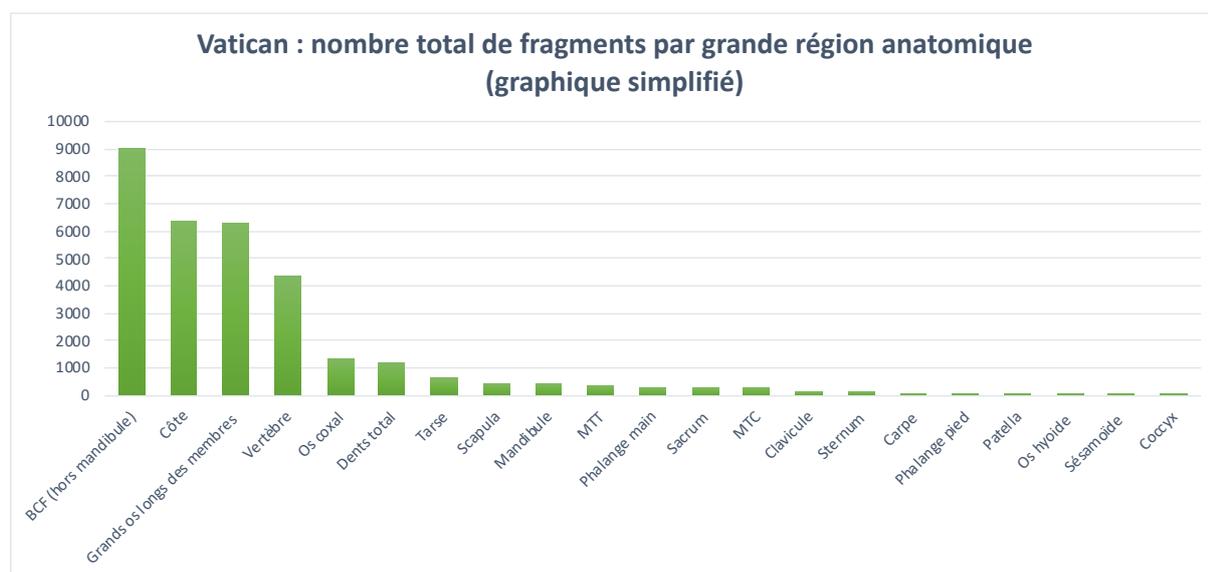


Figure 36 : histogramme comparatif des effectifs des fragments de métacarpiens identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge).

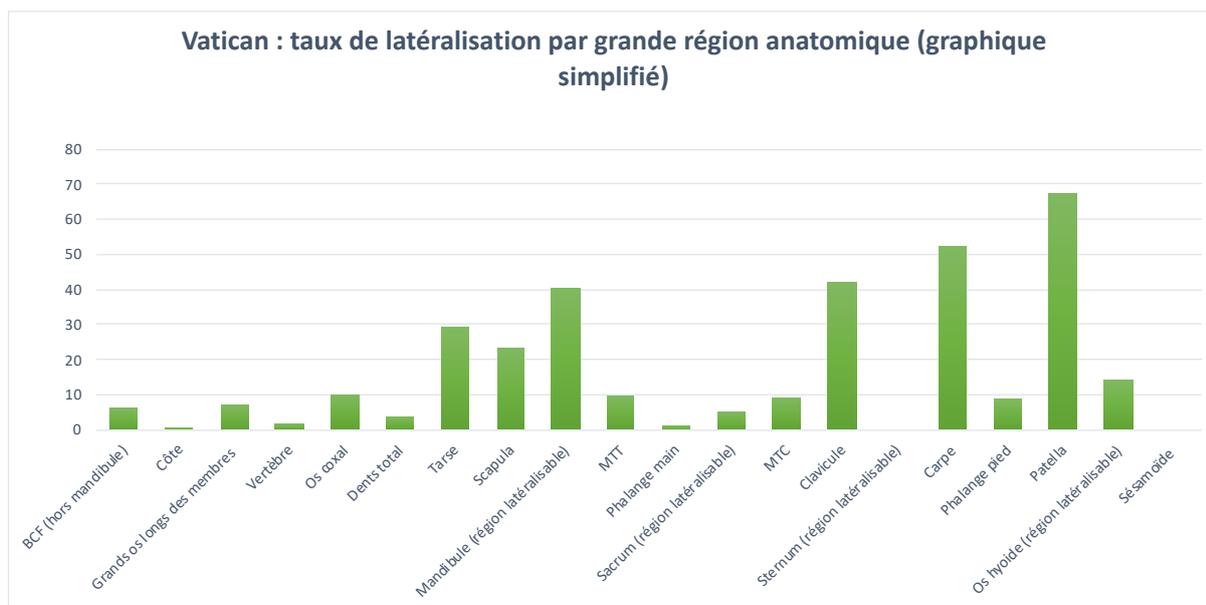
**Annexe 6b** : Ensemble des résultats (tables et figures) relatif à la détermination anatomique, ayant permis de réaliser les bilans globaux des fragments d'intérêts et les comparaisons entre les sites. Résultats concernant la nécropole de Santa Rosa au Vatican.



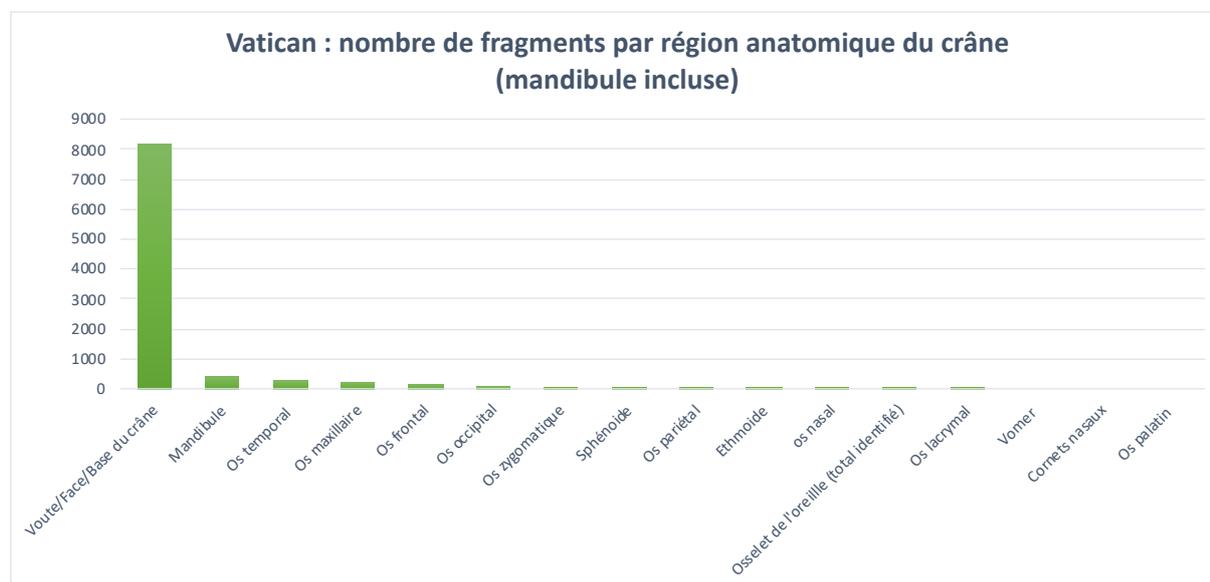
**Figure 1 : nombre de fragments « identifiés » appartenant à chaque région anatomique. Les fragments « non identifiés » sont classés comme « indéterminés » et sont distribués selon des critères morphologiques dans les catégories « os plats » ; « os courts » et « diaphyses indéterminées ».**



**Figure 2 : représentation simplifiée des effectifs par grandes régions anatomiques. Les fragments non identifiés de façon précise ont été exclus. Tous les fragments appartenant à l'humérus, au radius, à l'ulna, au fémur, au tibia et à la fibula ainsi que les fragments classés « diaphyses membres sup. » et « diaphyses membres inf. » ont été regroupés dans la catégorie « grands os longs des membres ». L'atlas, l'axis, les autres vertèbres cervicales, les vertèbres thoraciques et lombaires ont été regroupés dans la catégorie « Vertèbres ».**



**Figure 3 : représentation simplifiée des taux de latéralisation par grandes régions anatomiques. Les fragments indéterminés ont été exclus. Il s'agit des mêmes régions anatomiques que celles représentées sur la figure 2 et dont l'ordre a été respecté : de gauche à droite les effectifs des fragments sont décroissants.**



**Figure 4 : effectif des fragments crâniens par région anatomique. Les fragments non identifiés de façon précise sont classés dans la catégorie « Voute/face/base ».**

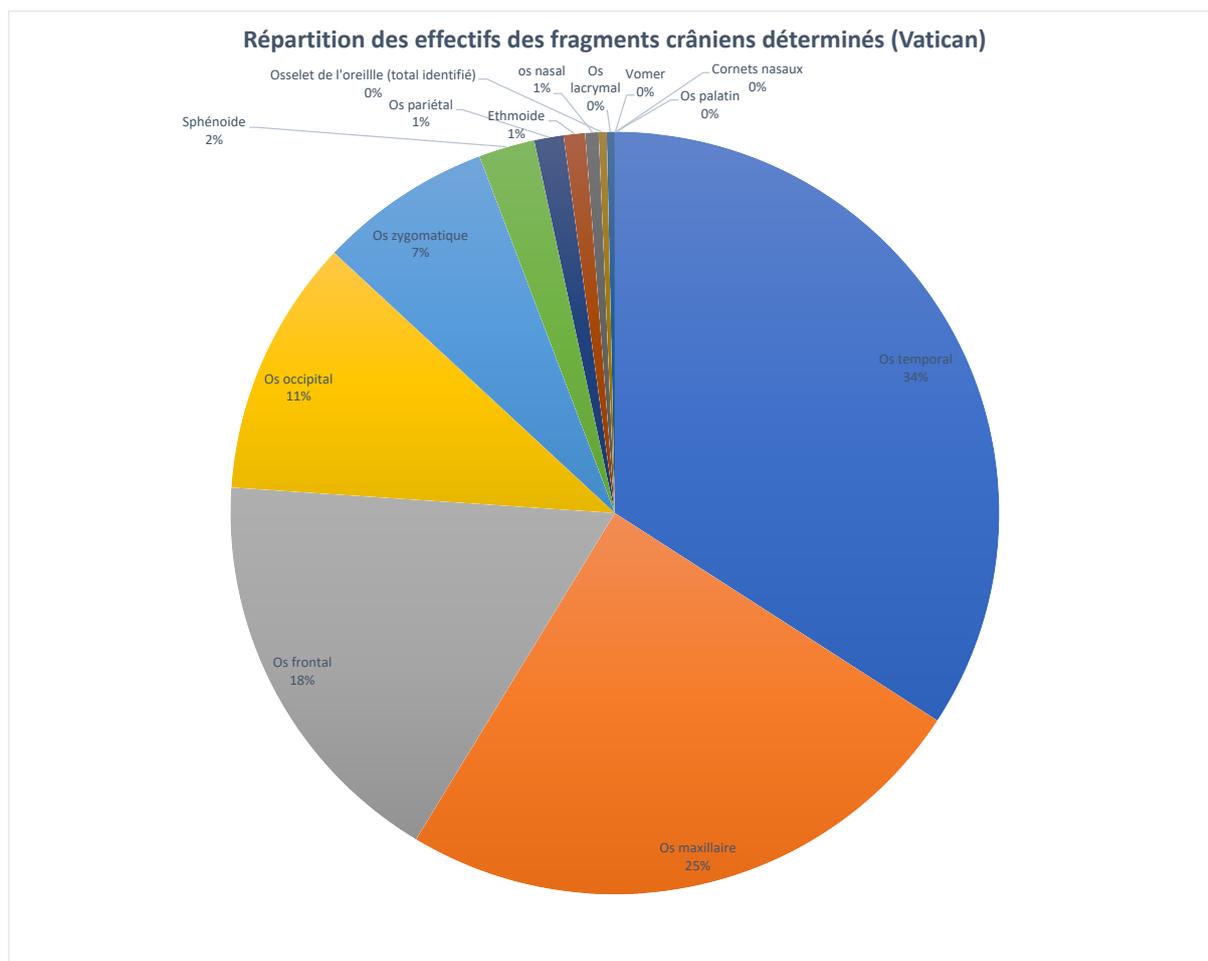


Figure 5 : répartition des effectifs des fragments crâniens déterminés de façon précise, mandibule incluse.

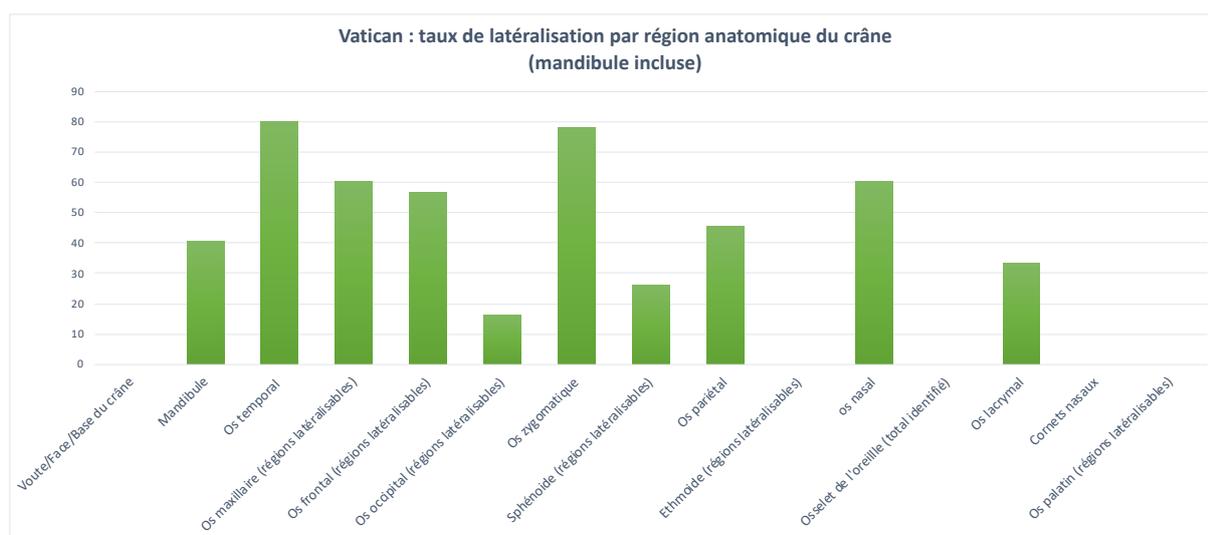
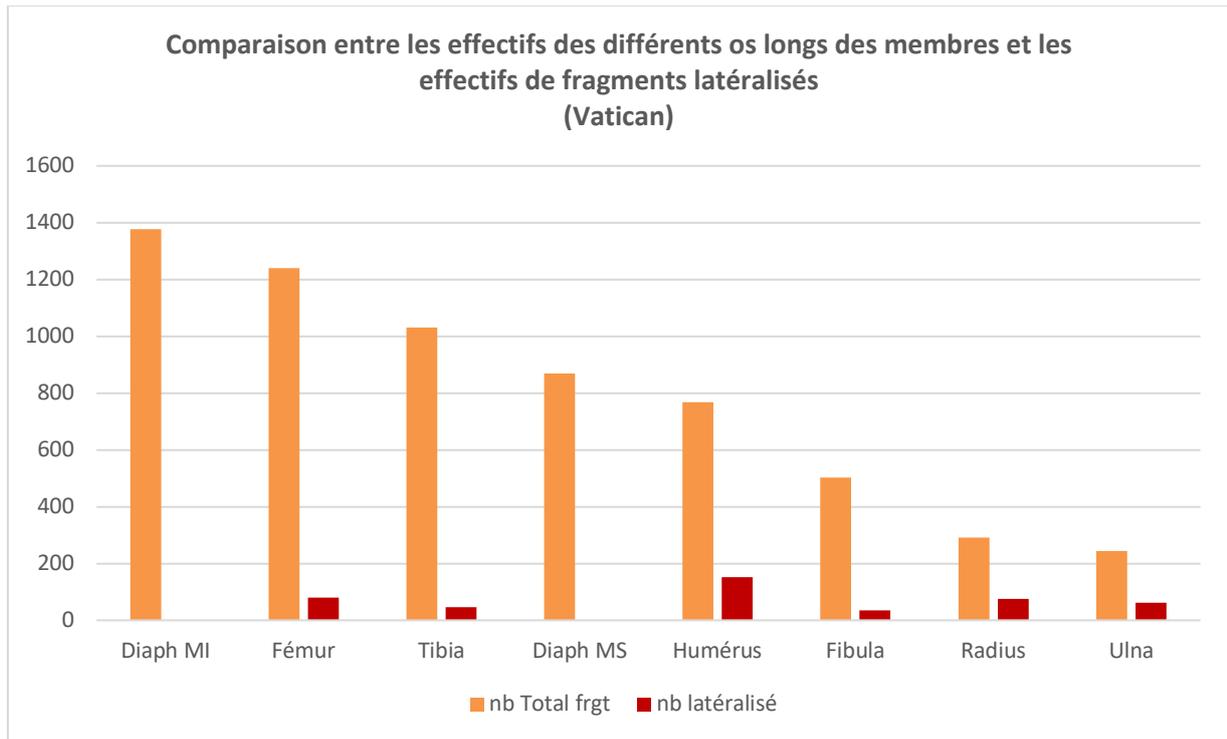
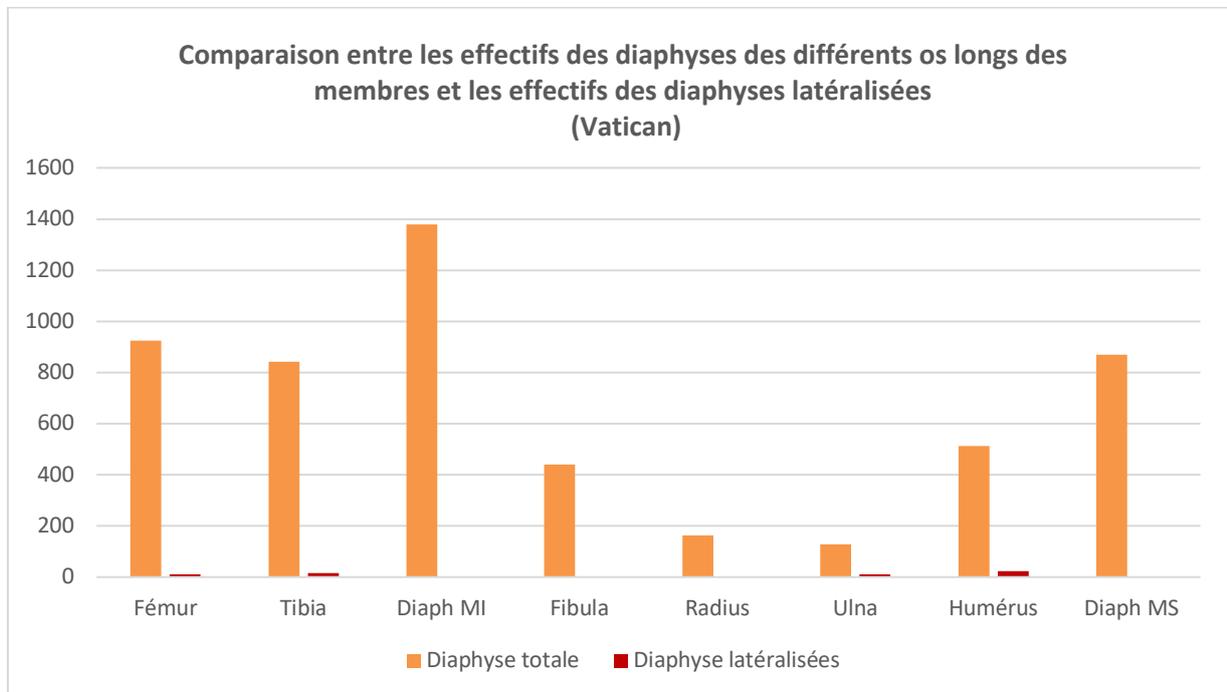


Figure 6 : taux de latéralisation des fragments crâniens par région anatomique, version corrigée. Seuls les os nasaux retrouvés isolés ont été pris en compte pour le calcul du taux de latéralisation. Les fragments non identifiés de façon précise sont classés dans la catégorie « Voute/face/base ».



**Figure 7:** histogramme comparatif entre le nombre total de fragments identifiés d'os longs des membres et le nombre de fragments latéralisés pour chacune de ces régions anatomiques.



**Figure 8 :** histogramme comparatif entre le nombre total de fragments identifiés des diaphyses d'os longs des membres et le nombre de fragments latéralisés pour chacune d'entre elles.

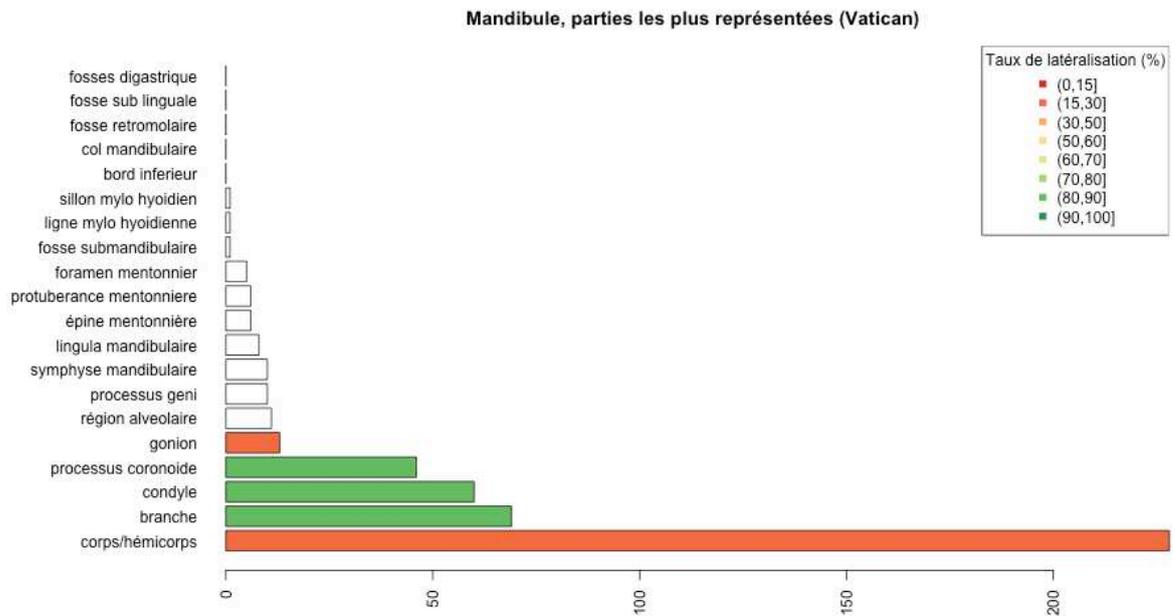


Figure 9 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la mandibule. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

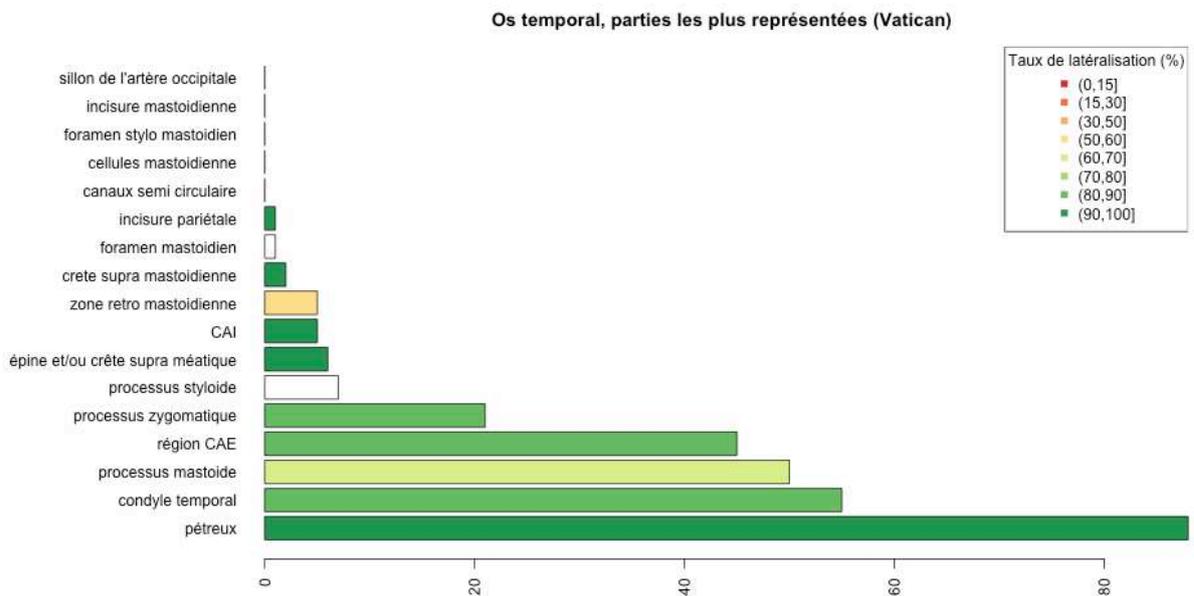


Figure 10 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os temporal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

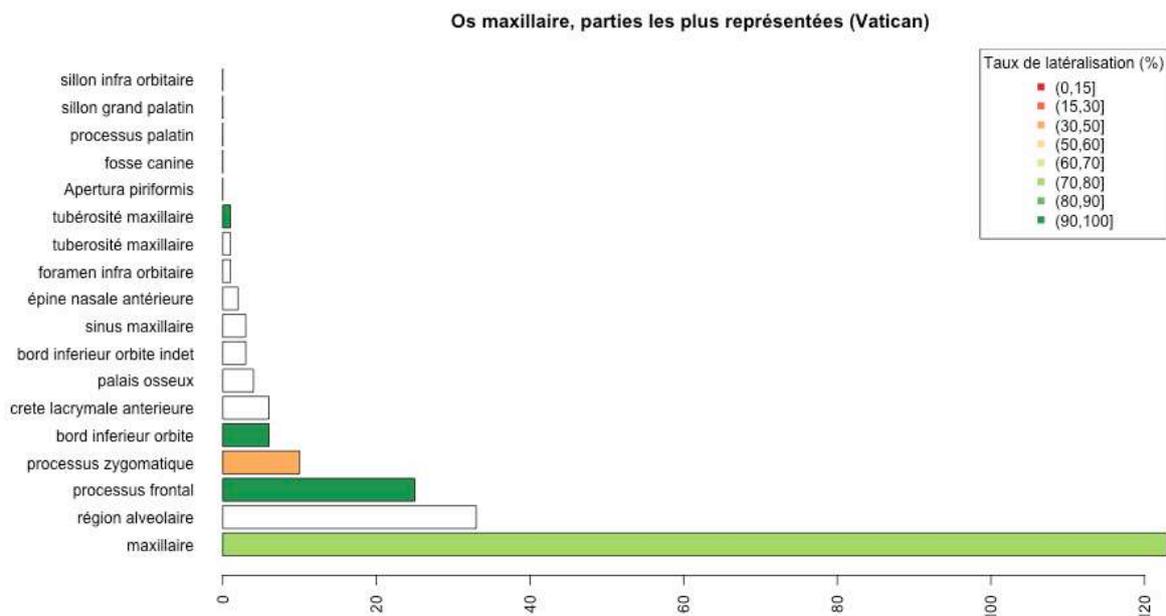


Figure 11 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os maxillaire. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

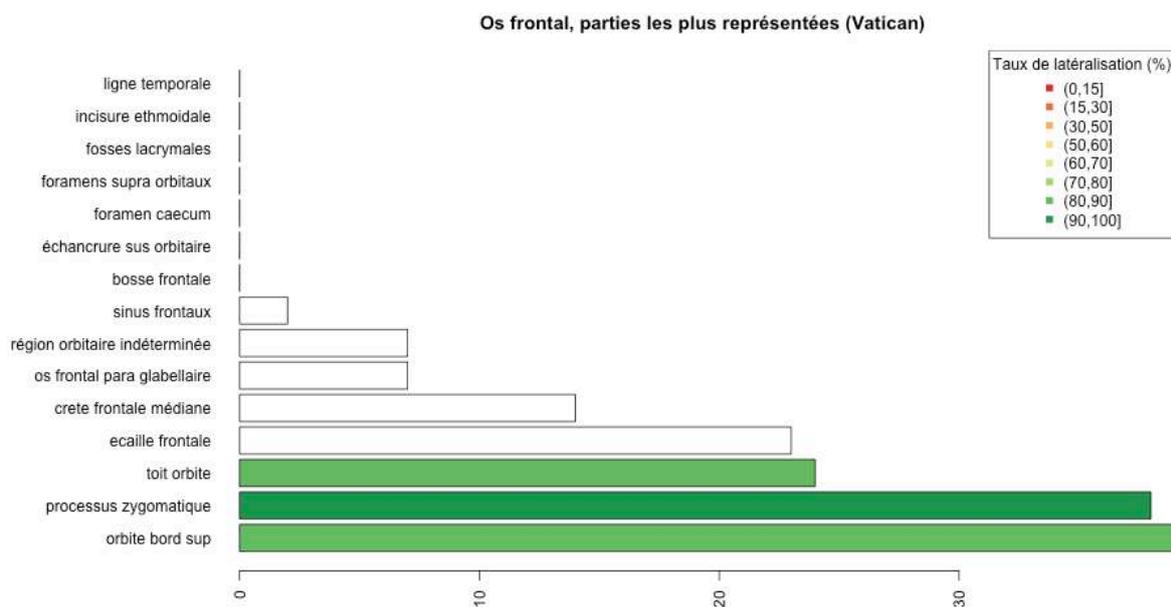
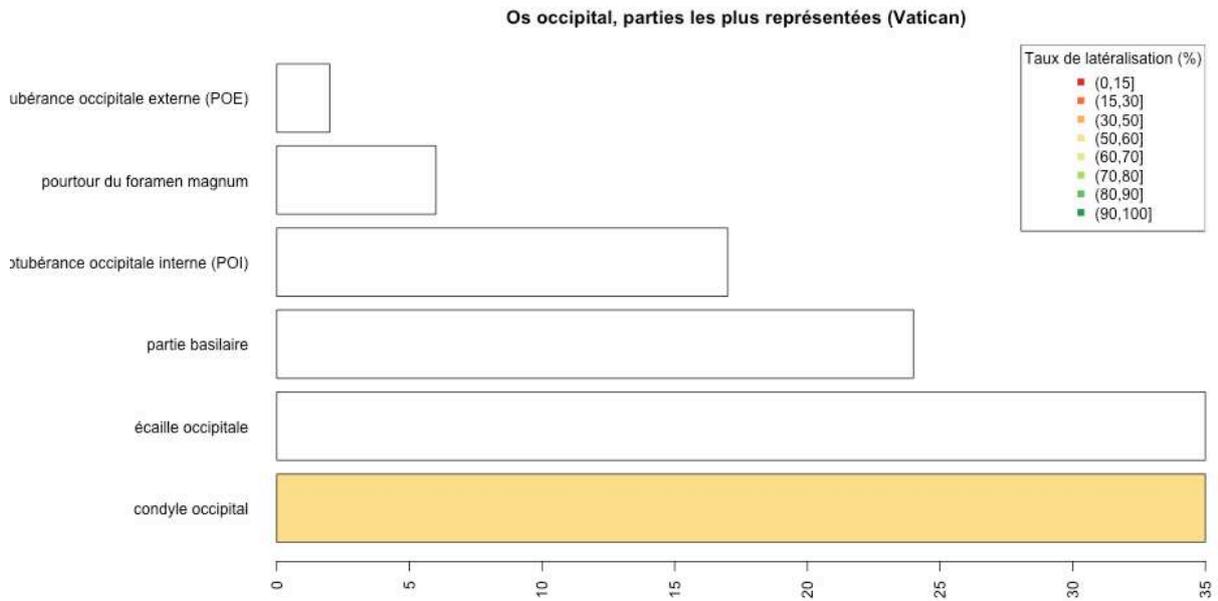
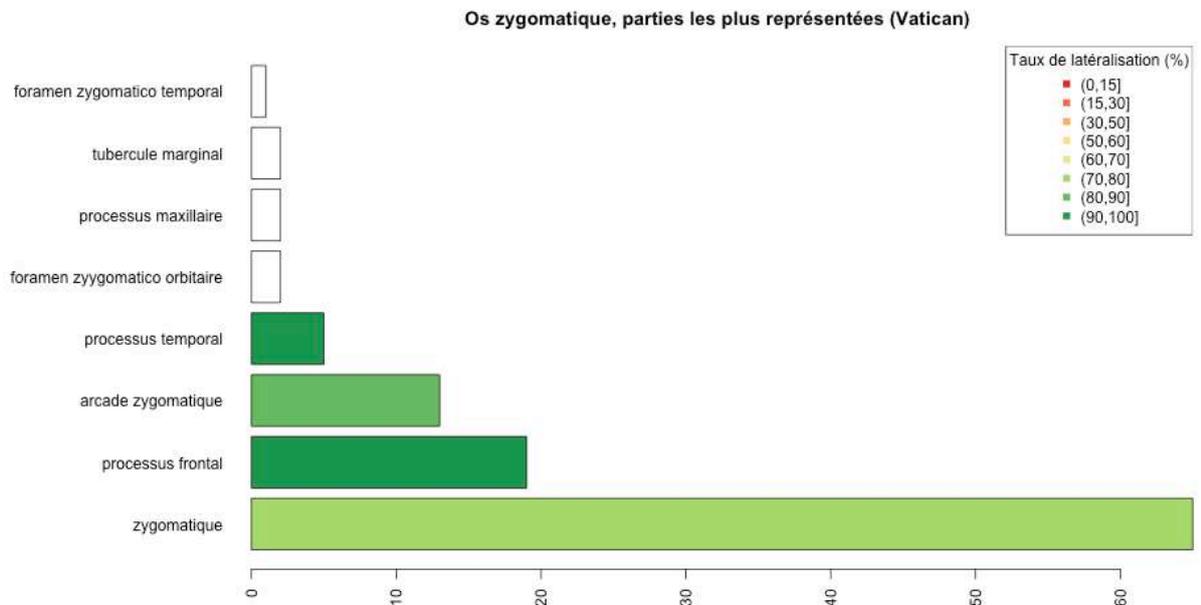


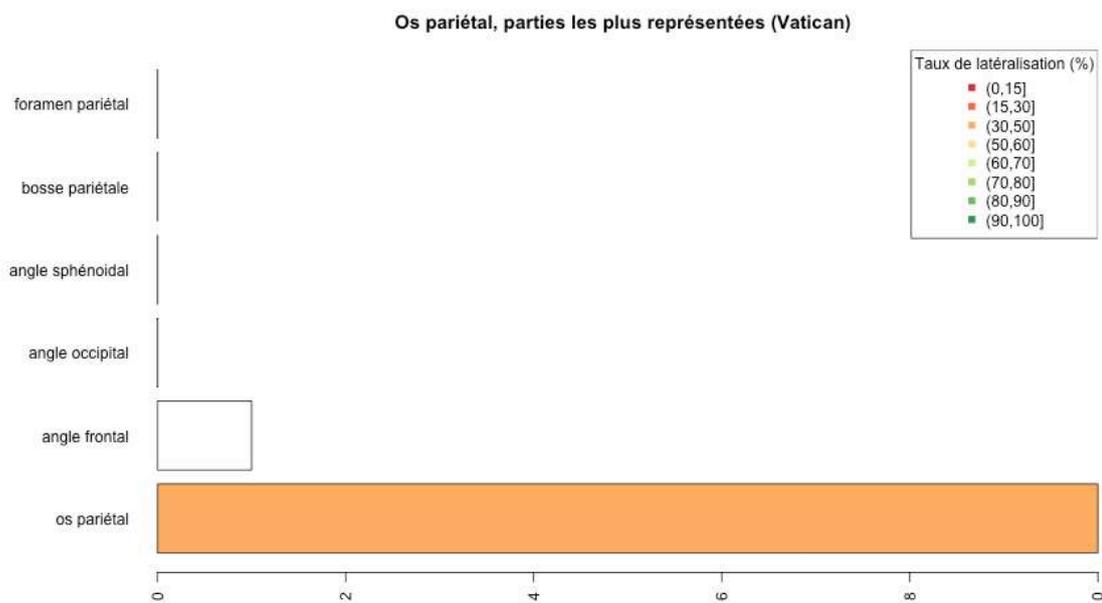
Figure 12 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os frontal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



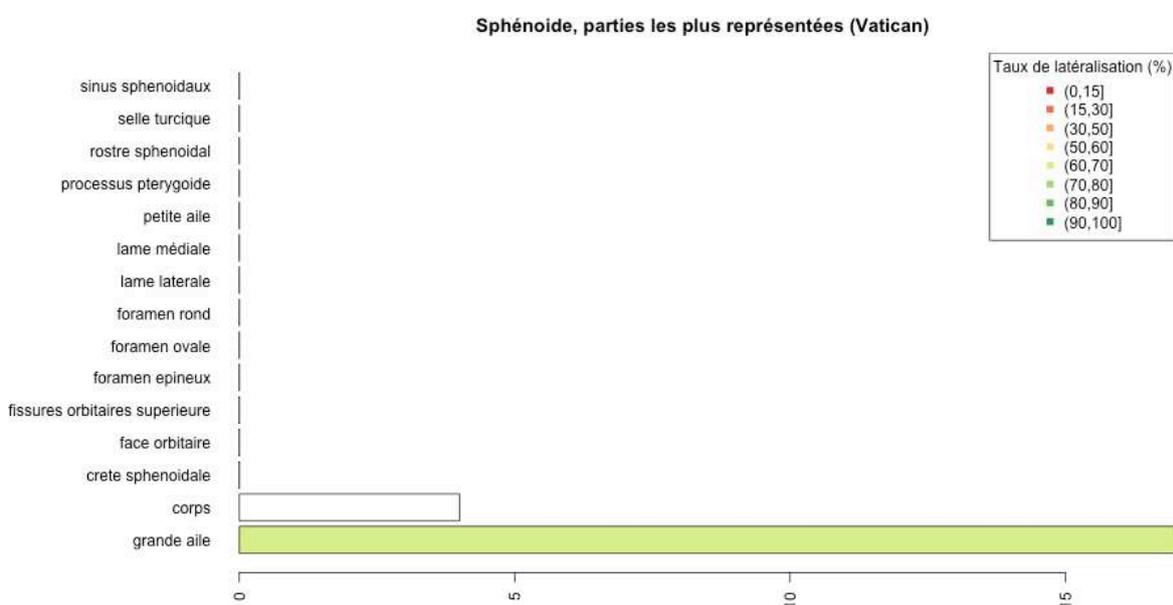
**Figure 13 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os occipital. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



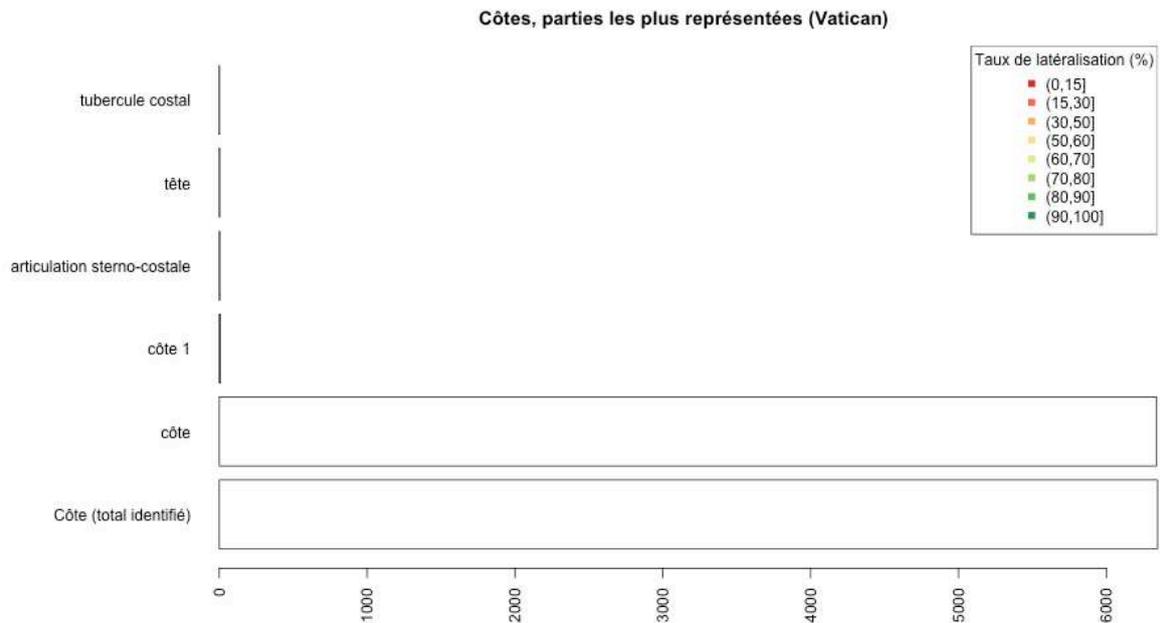
**Figure 14 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os zygomatique. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



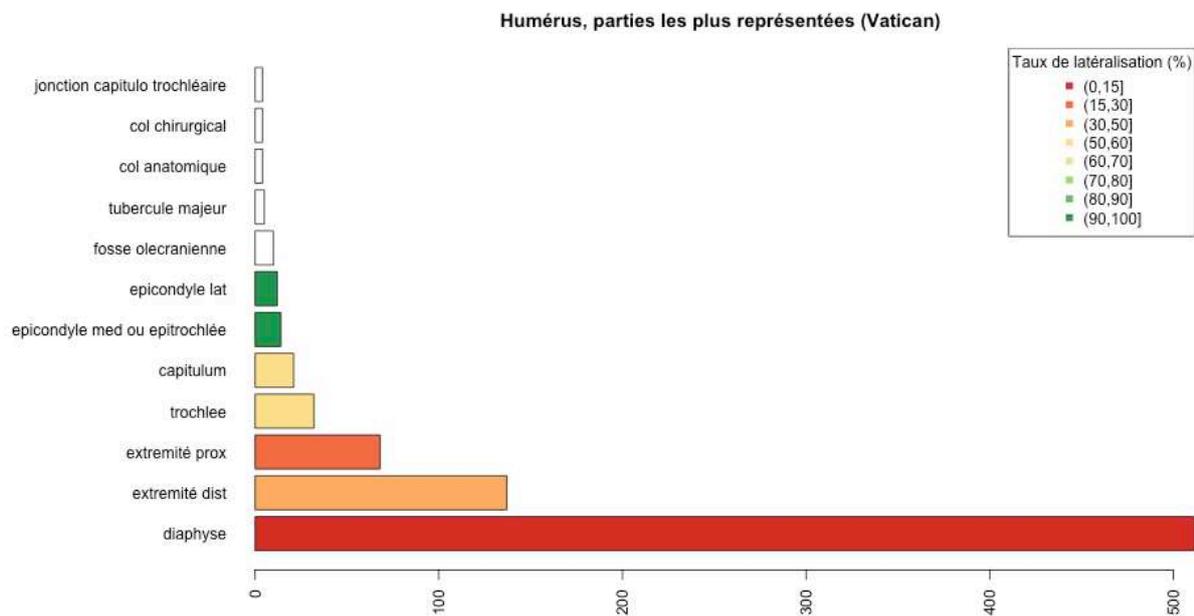
**Figure 15 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os pariétal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 16 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os sphénoïde. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 17 :** effectif total des fragments de côtes. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 18 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'humérus. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

Radius, parties les plus représentées (Vatican)

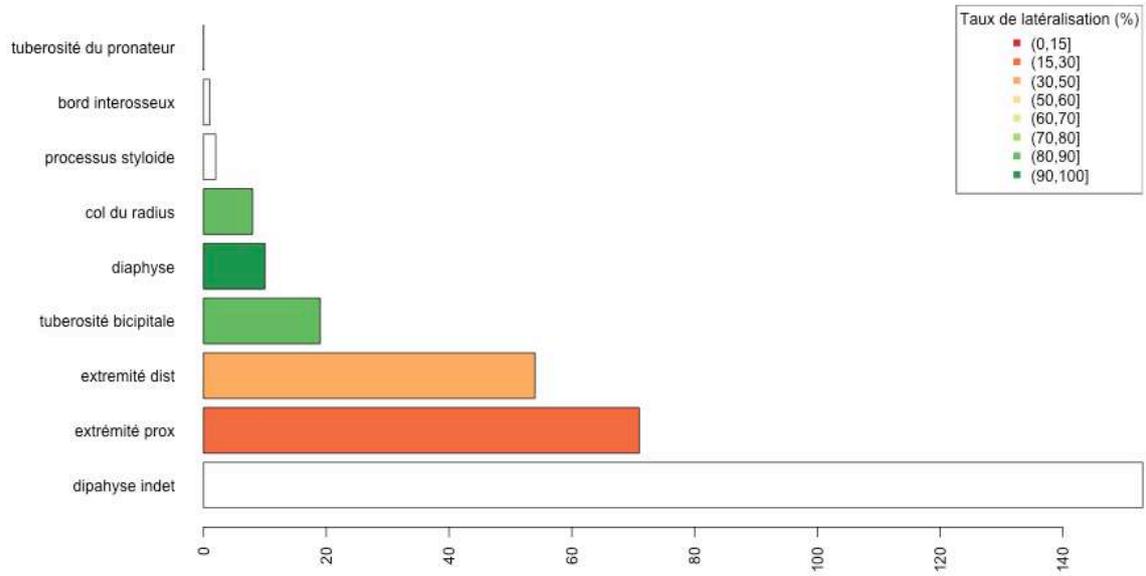


Figure 19 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt du radius. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

Ulna, parties les plus représentées (Vatican)

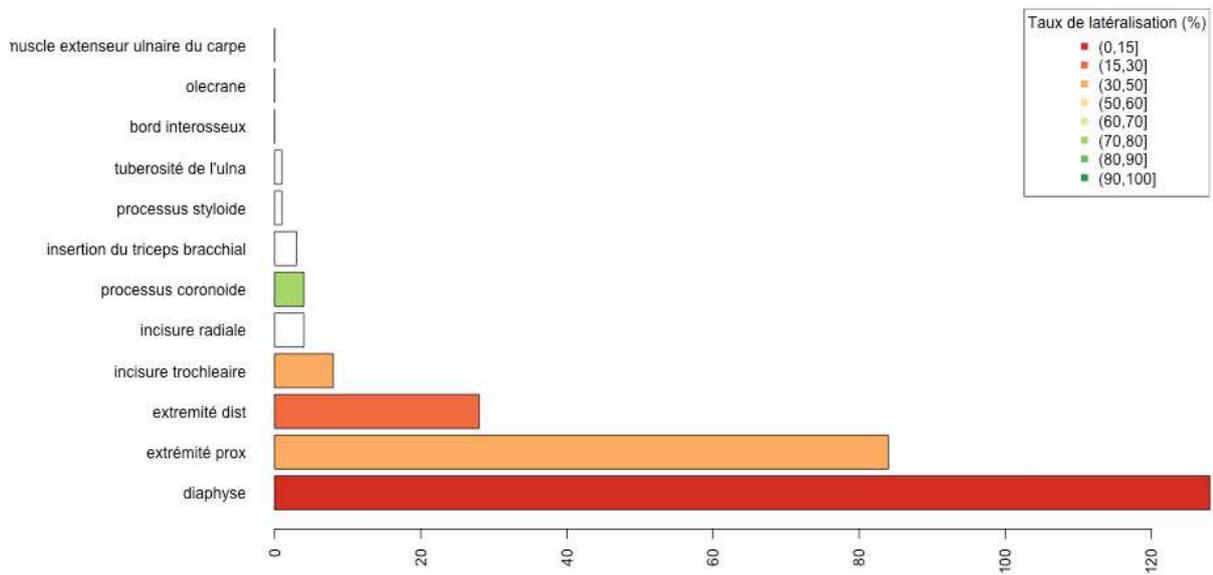
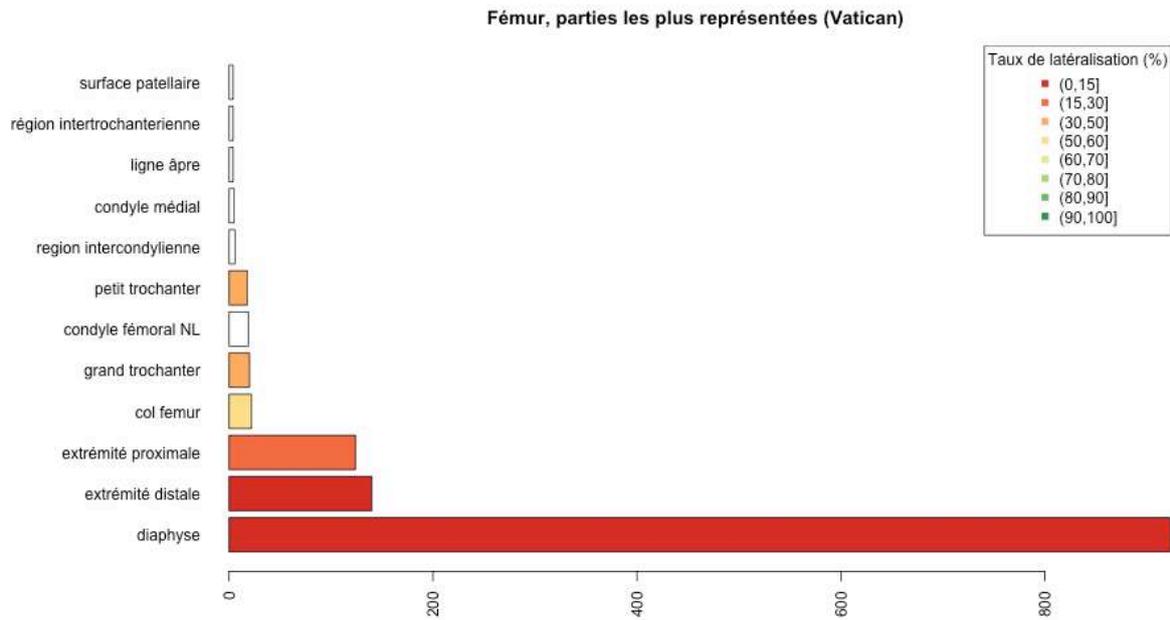
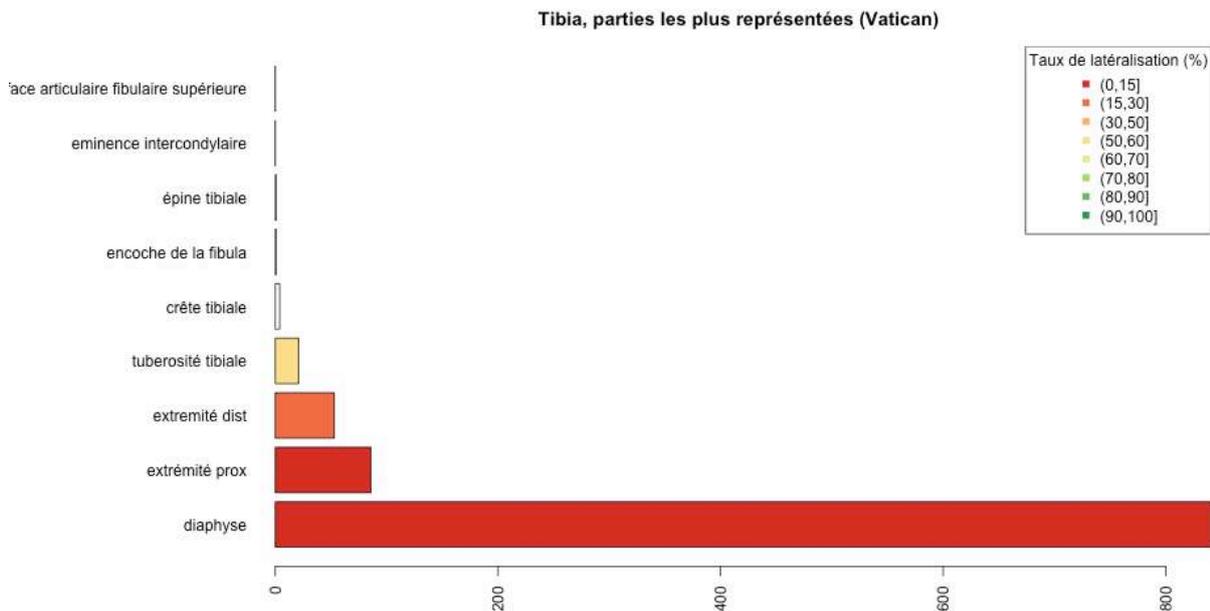


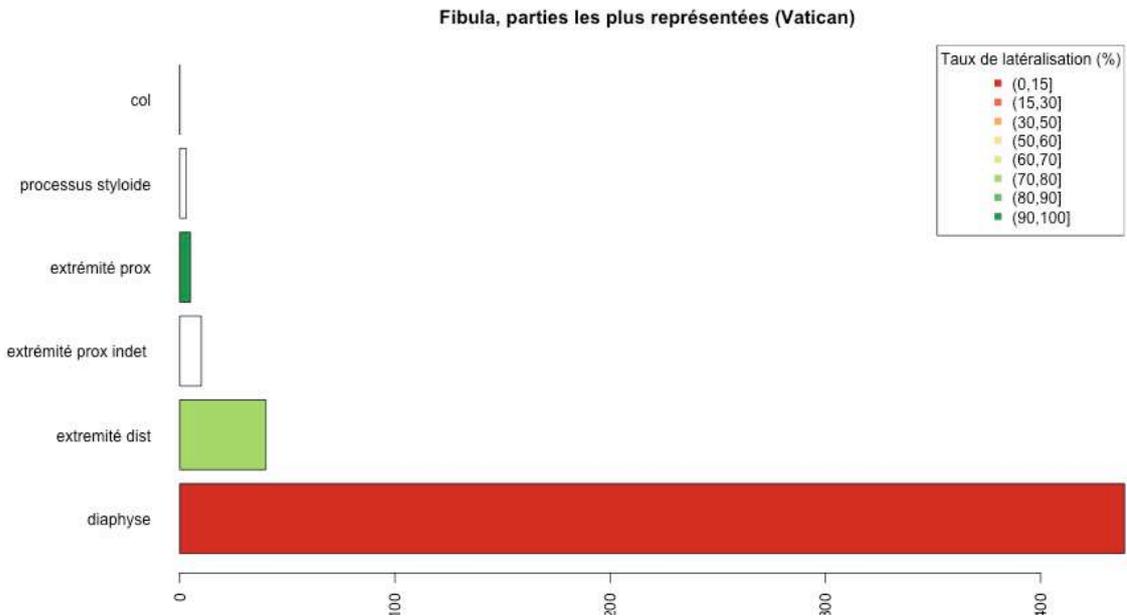
Figure 20 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'ulna. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



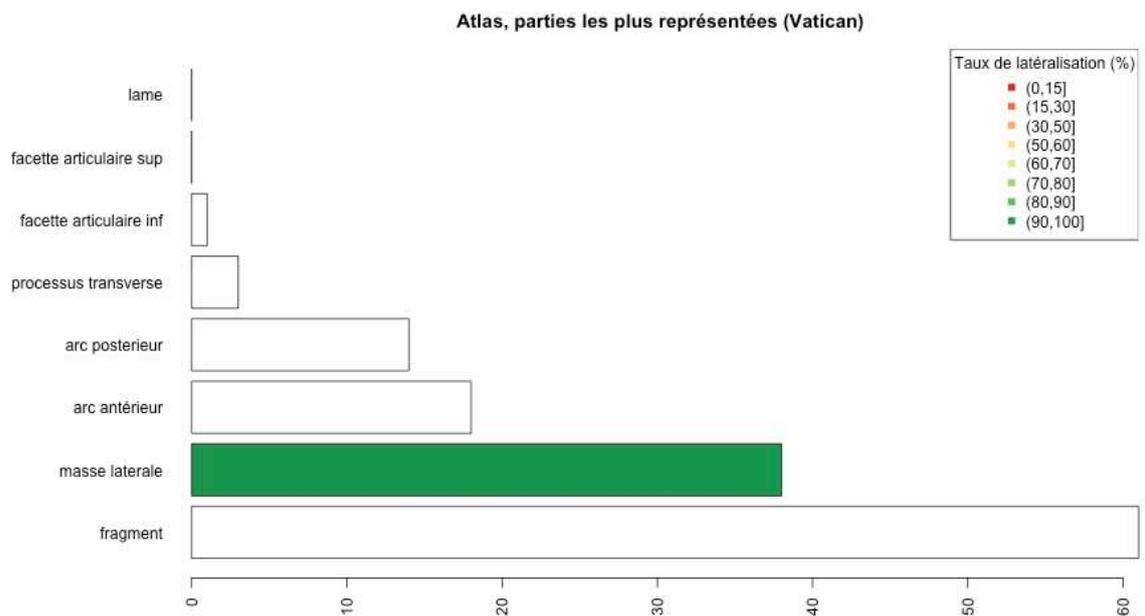
**Figure 21 :** effectif total des fragments de fémur. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 22 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt du tibia. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 23 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la fibula. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 24 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'atlas. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

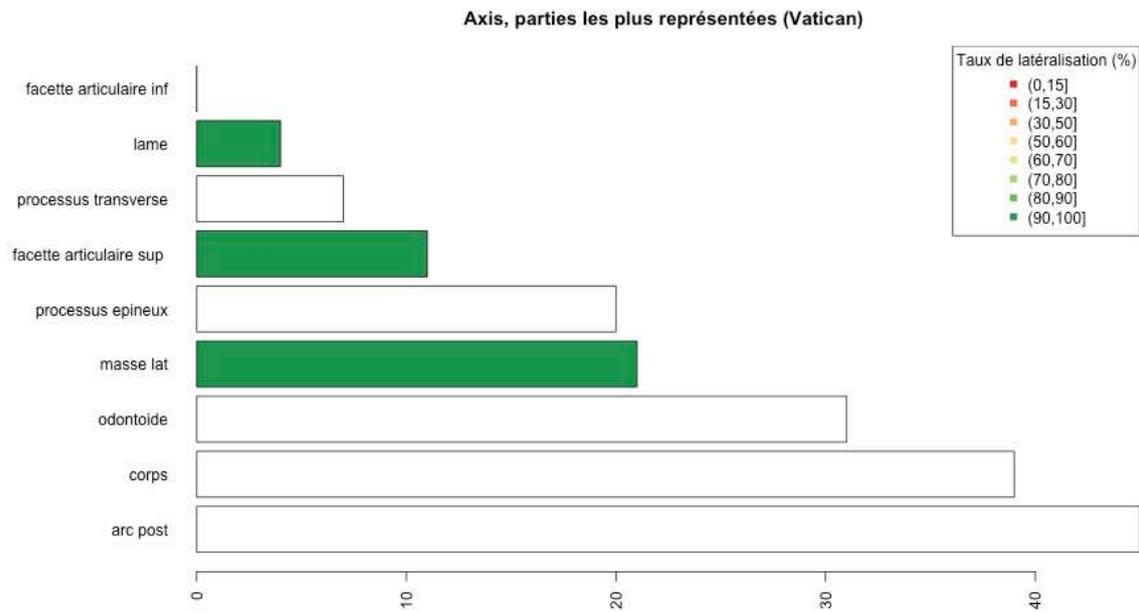


Figure 25 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'axis. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

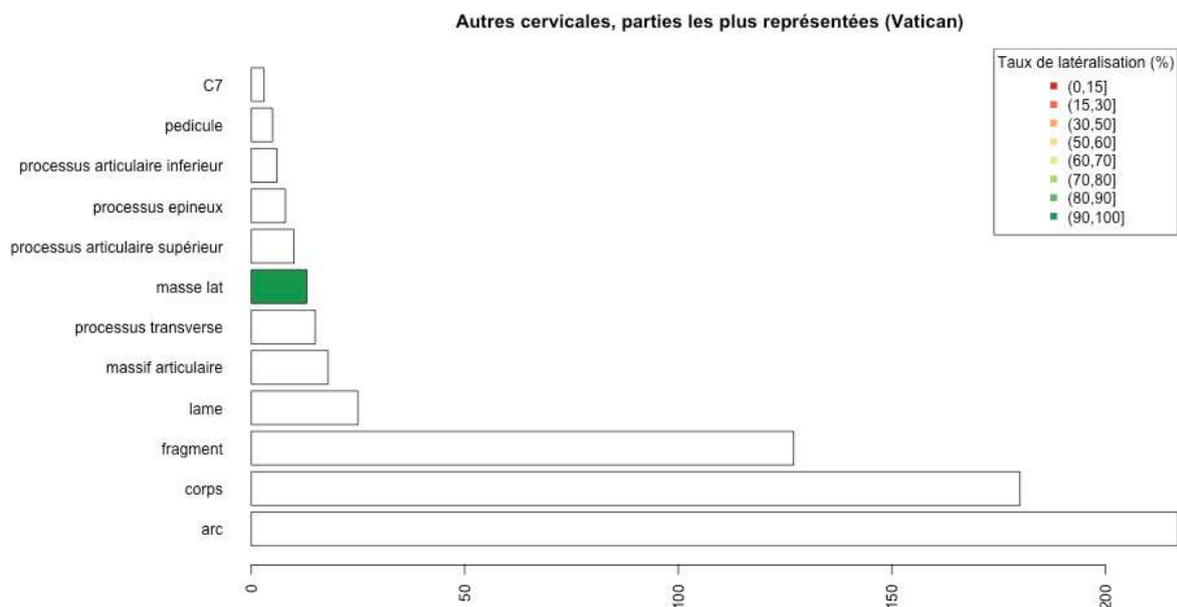


Figure 26 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt des vertèbres cervicales (hors atlas et axis). Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

### Vertèbres thoraciques, parties les plus représentées (Vatican)

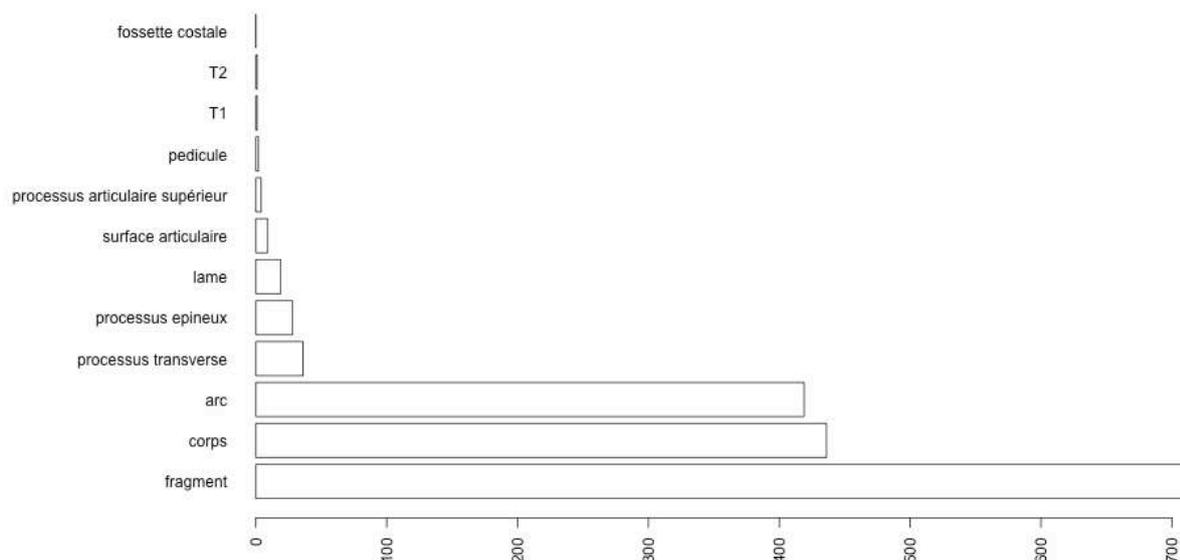


Figure 27 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt des vertèbres thoraciques). Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

### Vertèbres lombaires, parties les plus représentées (Vatican)

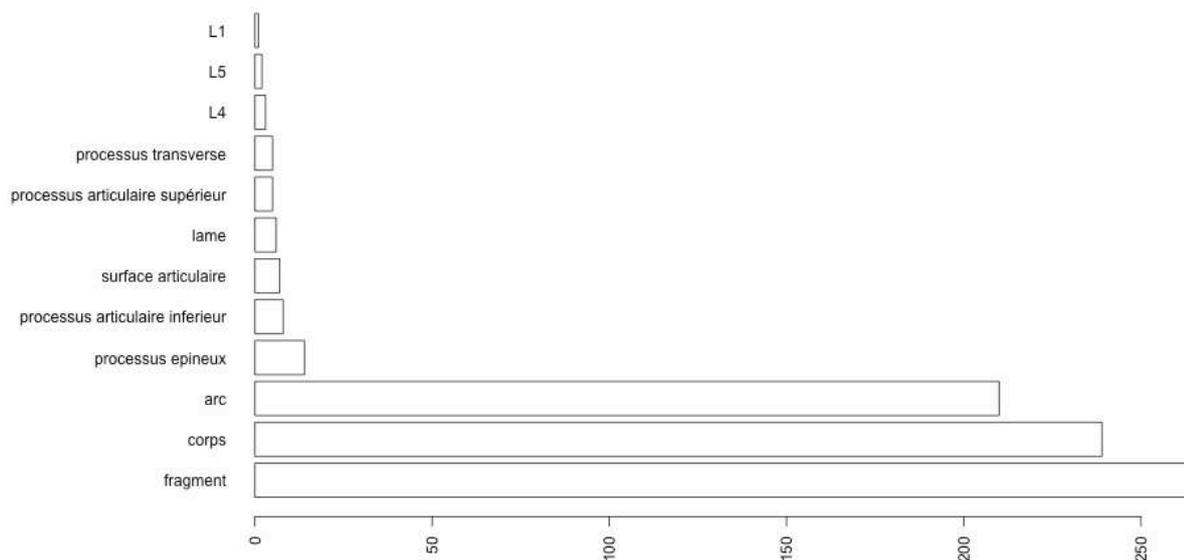
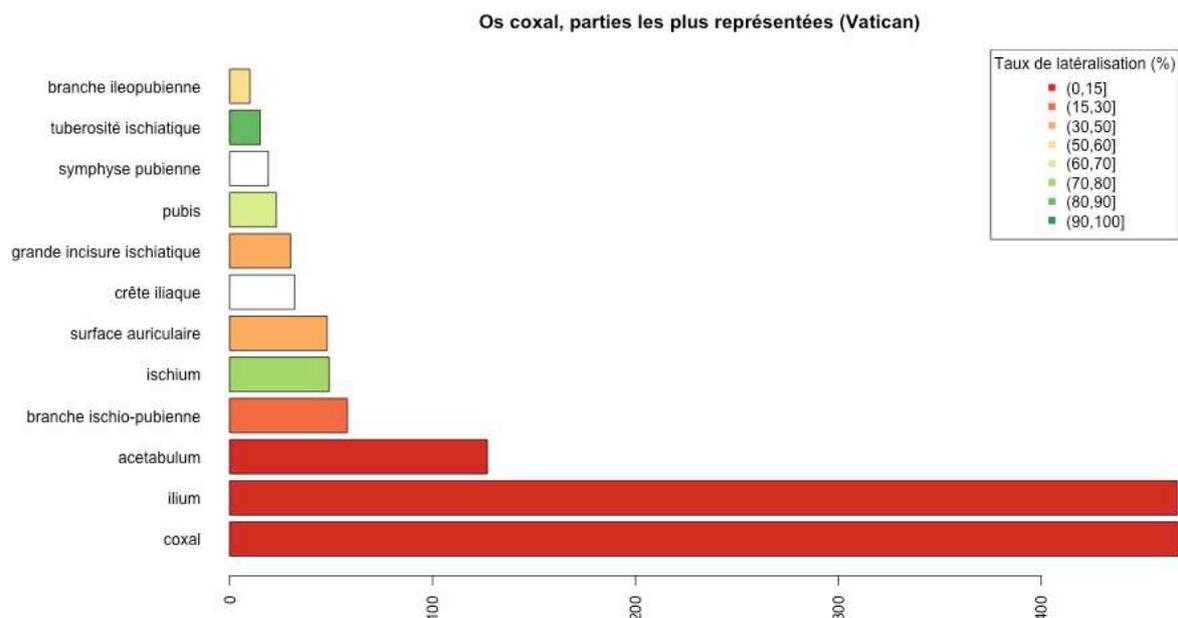
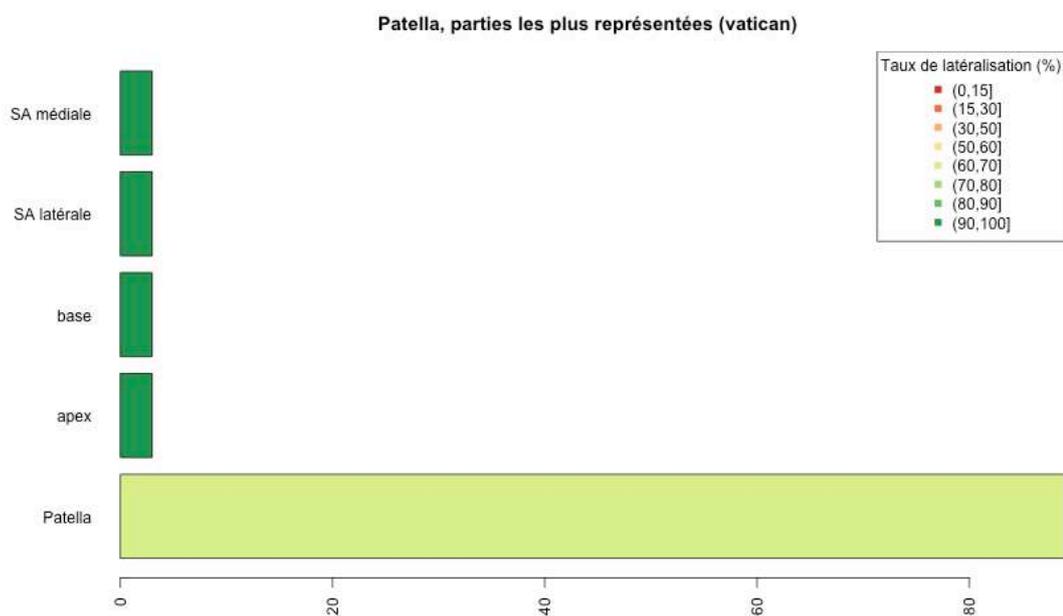


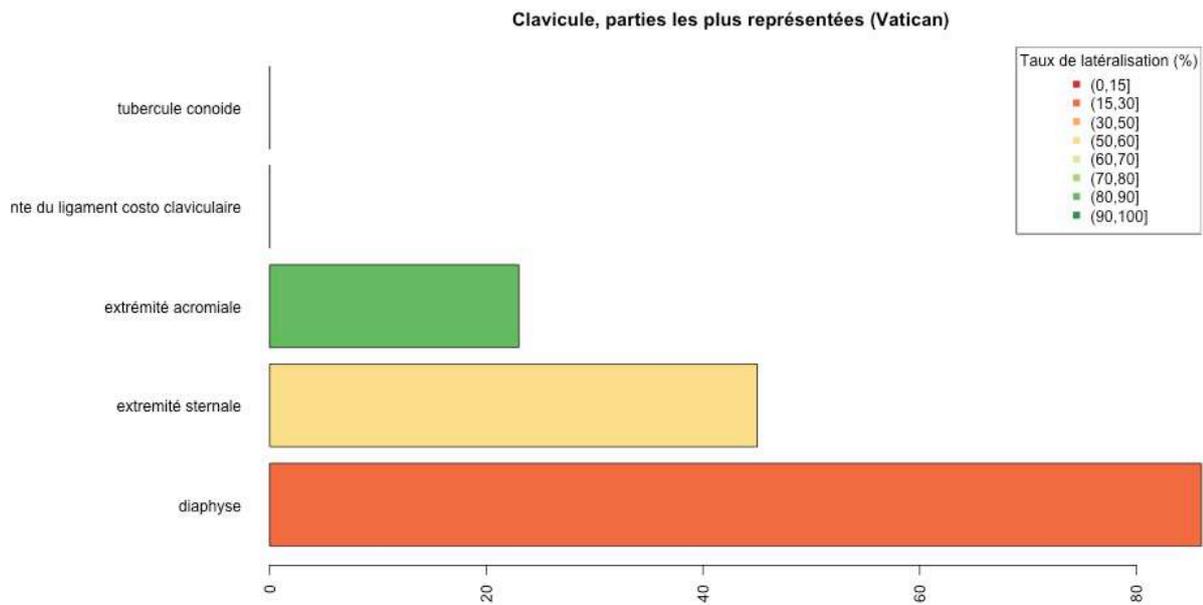
Figure 28 : effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt des vertèbres lombaires. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



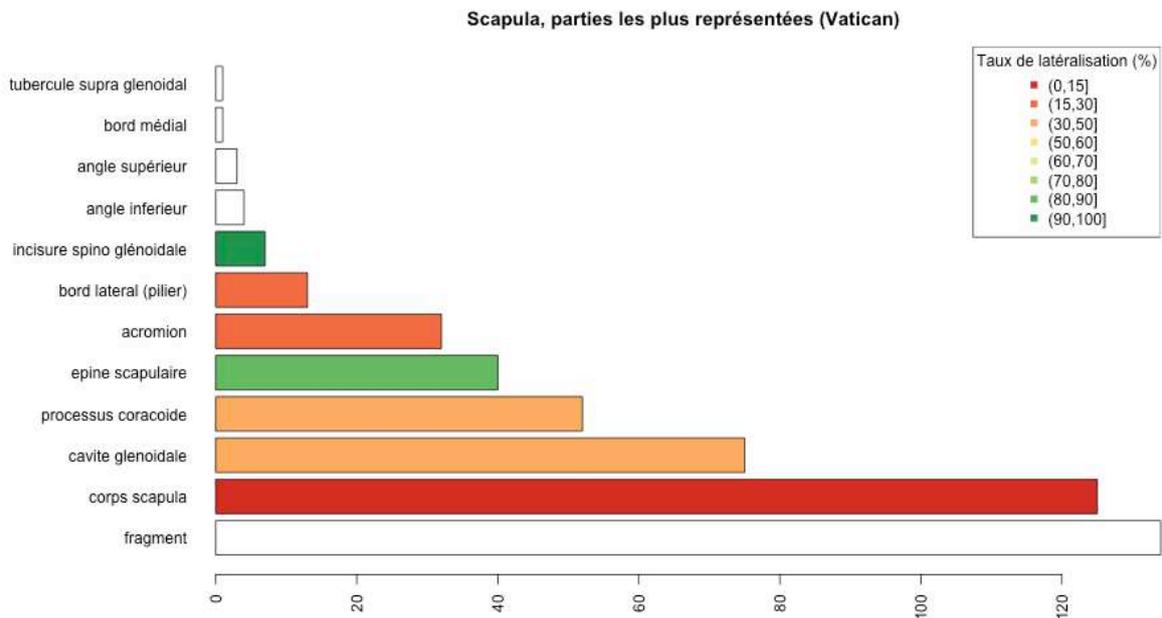
**Figure 29 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de l'os coxal. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 30 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la patella. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 31 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la clavicule. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.



**Figure 32 :** effectif total des fragments associés à chaque région anatomique d'intérêt de la scapula. Le taux de latéralisation (en %) est indiqué par une échelle de couleurs s'étendant du vert (90-100 %) au rouge (0-15 %). Les zones non colorées de l'histogramme correspondent aux régions non latéralisables ou non latéralisées.

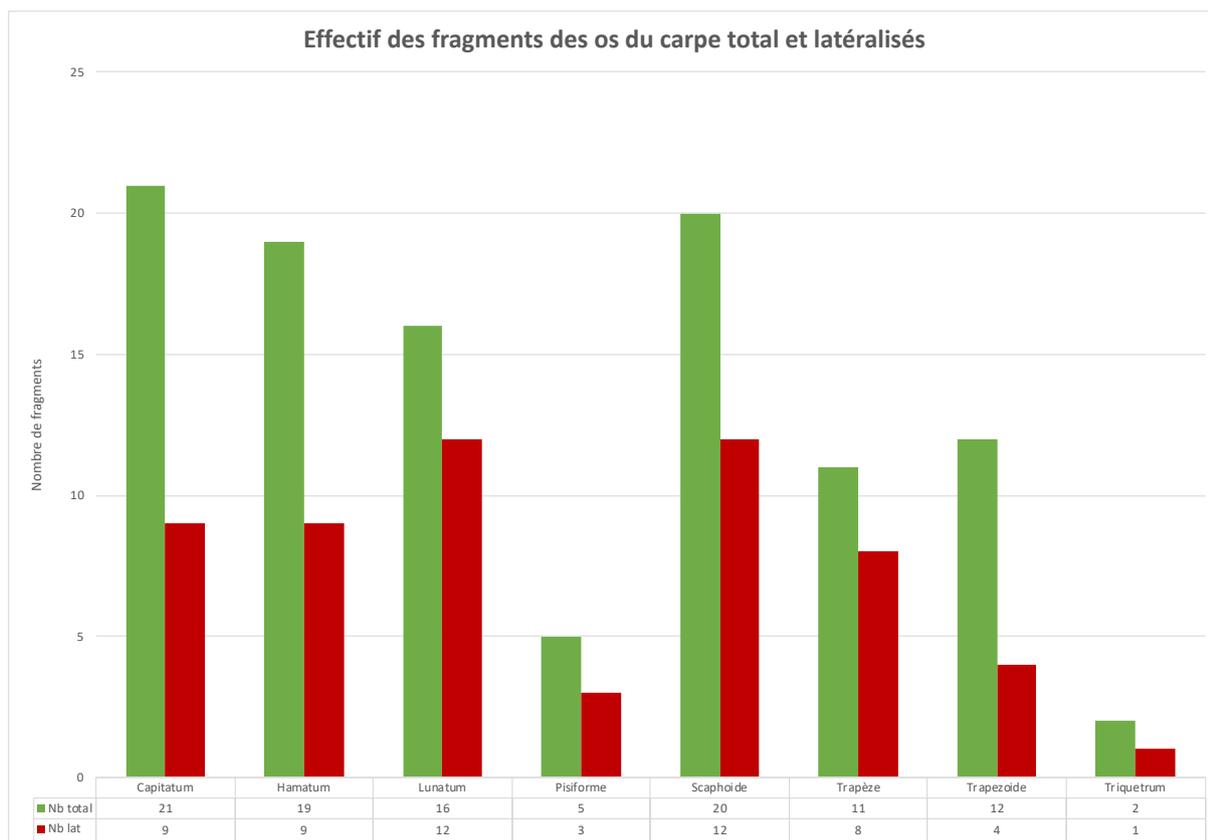


Figure 33 : histogramme comparatif des effectifs des fragments des os du carpe identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge).

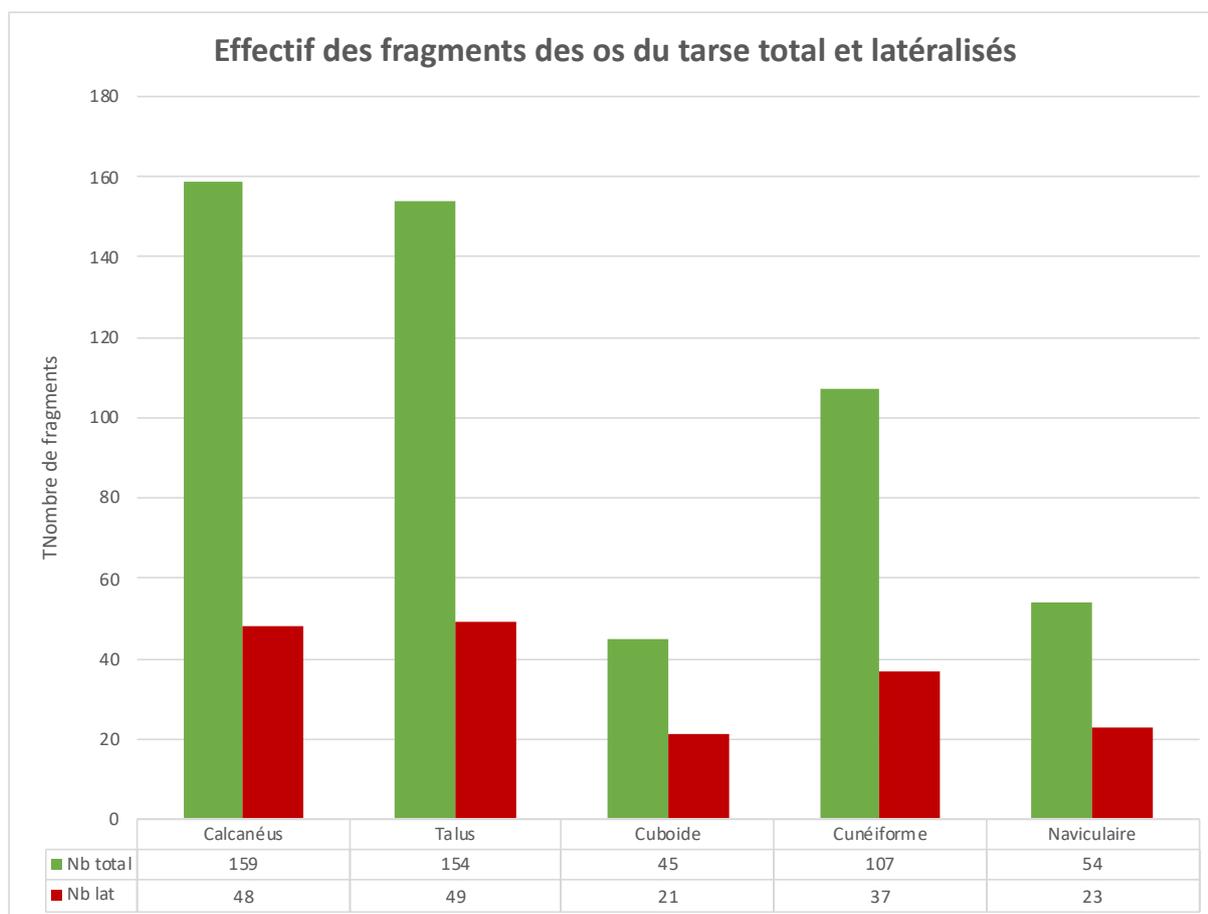


Figure 34 : histogramme comparatif des effectifs des fragments des os du tarse identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge).

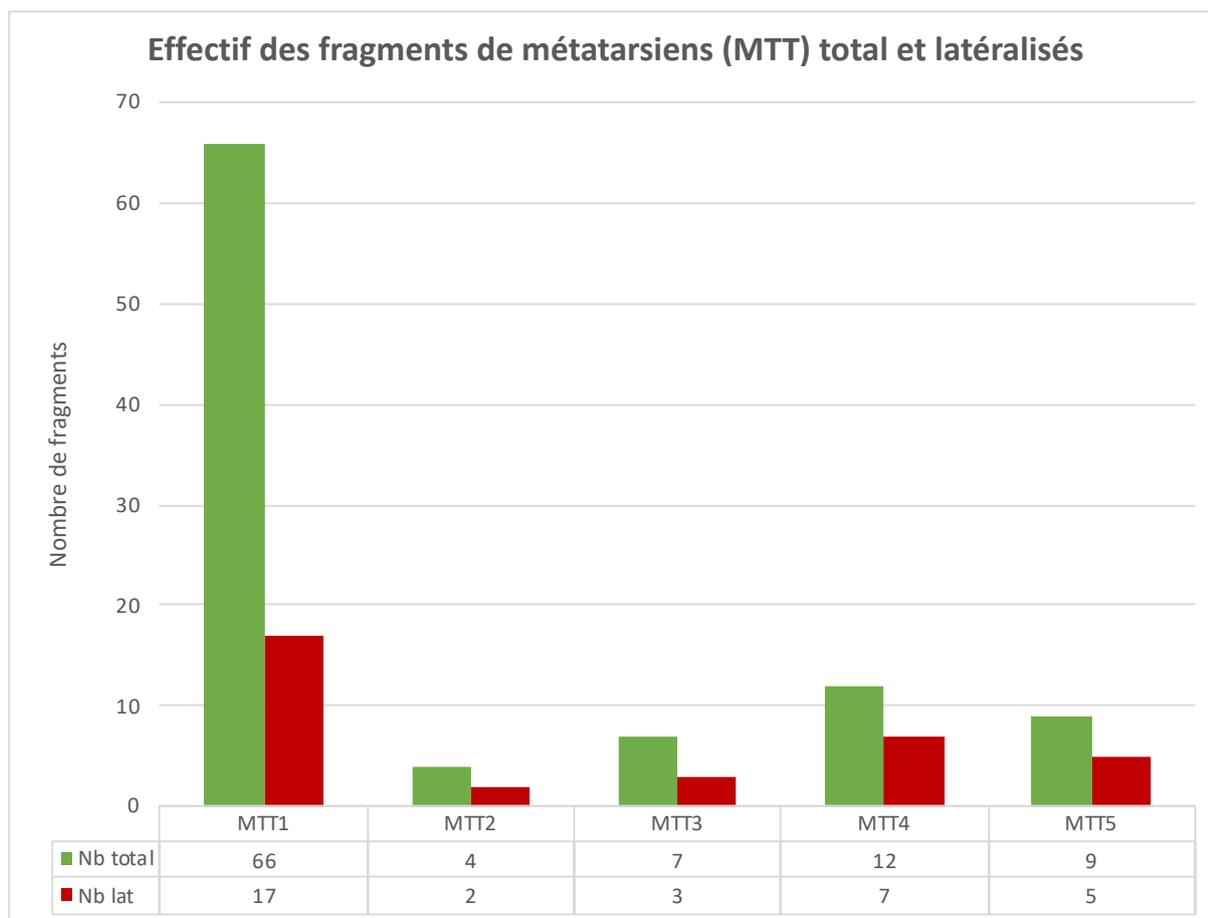


Figure 35 : histogramme comparatif des effectifs des fragments de métatarsiens, identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge).

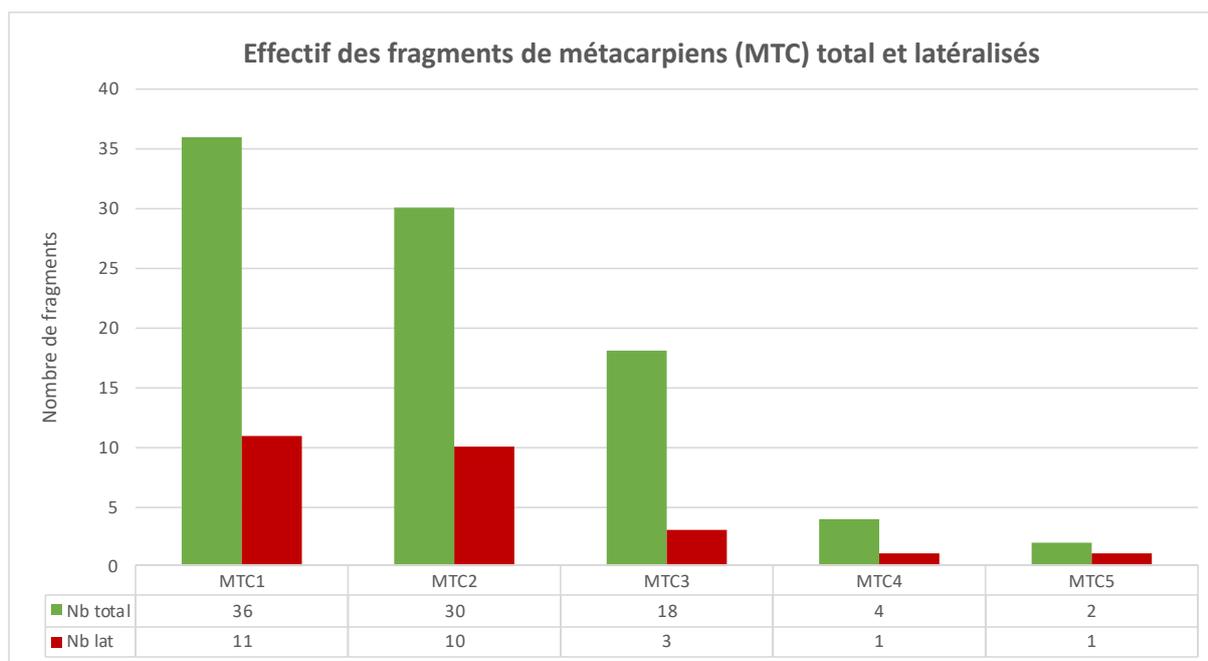


Figure 36 : histogramme comparatif des effectifs des fragments de métacarpiens identifiés (en vert) et latéralisés (en rouge).

**Annexe 7** : publication (Du Fayet de la Tour A, Couture C, Paraf F, Duday H. 2023. Hyperostosis frontalis interna: A new perspective in burned individuals' analysis for determining age and sex from archeo-anthropological and medicolegal contexts. *International Journal of Osteoarchaeology* **33**: 114–127).

**RESEARCH ARTICLE**

# Hyperostosis frontalis interna: A new perspective in burned individuals' analysis for determining age and sex from archeo-anthropological and medicolegal contexts

Anaïs Du Fayet de la Tour<sup>1,2</sup>  | Christine Couture<sup>1</sup> | François Paraf<sup>2</sup> | Henri Duday<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univ. Bordeaux, CNRS, MC, PACEA, UMR 5199, Pessac, F-33615, France

<sup>2</sup>Service de médecine-légale, CHU Dupuytren, Limoges, France

**Correspondence**

Anaïs Du Fayet de la Tour, Univ. Bordeaux, CNRS, MC, PACEA, UMR 5199, F-33615, Pessac, France.  
Email: [anaïs.dufayetdelatour@chu-limoges.fr](mailto:anaïs.dufayetdelatour@chu-limoges.fr)

**Abstract**

Hyperostosis frontalis interna (HFI) is a benign bone lesion, which is asymptomatic for the most part and is manifested by the accretion of bone on the endocranial surface of the frontal bone.

This type of lesion has been discussed in a multitude of publications since the 19th century. Although a consensus has yet to be reached as to its etiology, it would seem generally accepted that hormones play a role, which would explain the high frequency of this disorder among older and postmenopausal women.

The objective of this study is to demonstrate the benefit of HFI diagnosis for identifying individuals (estimating their age and determining their sex) in the archeo-anthropological analysis of ancient cremation burial sites and in medicolegal investigations on burned human remains.

Our sample consisted of 82 cremated individuals from the Roman Porta Nocera necropolis in Pompeii (1st century BC–1st century AD). After excluding juveniles under 15 years of age, as HFI primarily affects adult individuals, our sample was reduced to 71 individuals, and the prevalence of HFI was 15.5% ( $n = 11$ ). A statistically significant difference is observed between women and men, and no individuals previously identified as male displayed HFI. Furthermore, 90.9% of the individuals displayed degenerative conditions in conjunction with HFI, showing a highly significant correlation of this lesion with signs of aging (chi-square 9.365;  $p = 0.01$ ). Finally, this disorder boosted diagnostic performance in respect of determining sex, increasing the number of biologically sexed individuals from 46.5% to 53.5%. Therefore, we propose that the HFI diagnosis offers genuine added value in the identification of burned human remains.

**KEYWORDS**

age estimation, burned bones, hyperostosis frontalis interna, identification, sex determination

## 1 | INTRODUCTION

When a fire-damaged body or skeletal remains are discovered, particularly in cases of extreme burning or cremation, conventional identification methods are not always suitable, and caution needs to be

taken (Fairgrieve, 2008; Quatrehomme, 2015). Heat causes structural changes in bone tissue: morphological, metrical, chemical, molecular, and histological (Grevin, 2004, 2005; Schultz et al., 2008; Shipman et al., 1984; Symes et al., 2008). All these changes can impede medicolegal identification or archeo-anthropological analysis. In an

archeological context, the human remains contained in cremation graves have long been neglected because of the effects to the bones from the processes of being burnt like fragmentation or distortion (Grevin, 1990). In reality, the analysis of burnt human remains, even if incomplete, is possible and provides information in understanding the burial practices of past populations (Arnaud & Arnaud, 1980; Depierre, 2013; Duday et al., 1990; Gejvall, 1969; Janssens, 1979; McKinley, 2000, 2004). Many authors have argued that techniques used for sexing unburned skeletal remains are also applicable to cremated individuals (Correia & Beattie, 2002; Geber et al., 2017; Lara et al., 2015; Rubini et al., 1997; Wahl, 2008). Fairgrieve (2008) highlights limitations, due to bone shrinkage, warping, and heat-induced fractures.

In terms of determining the sex, for example, the hip bones, which are normally informative, are often fragmented, warped, and unmeasurable, and secondary sexual characteristics are difficult to observe. Some authors have suggested methods specially adapted to burnt bones: Gejvall (1969) proposed metric standards based on skull thickness; humeral head diameter; and femoral, humeral, and radial diaphyseal thickness. More recently, Cavazzuti et al. (2019) proposed cutoff points for osteometric sexing in archeological populations. The weight of burned remains to discriminate between sexes has also been studied (Van Deest et al., 2011). Concerning the estimation of age at death, the preservation of regions, such as the auricular surface or the pubic symphysis, is not always sufficient to provide reliable indications. Absolonova et al. (2013) highlighted that burning-induced microstructural changes are similar to age-related changes and developed new regression equations for unburned bones, bones burned at 700°C, and at 800°C.

Despite these advances, it seems appropriate to look at other criteria potentially capable of providing information on the biological profile of burned individuals.

A number of authors have shown the value of using hyperostosis frontalis interna (HFI) in the evaluation of these two criteria, which are the sex and the age at death of the individuals (Belcastro et al., 2006; Cvetković et al., 2019; Devriendt et al., 2005; Henschen, 1949; May, Peled, Dar, Cohen, et al., 2011; Moore, 1955; Ortner, 2003; Western & Bekvalac, 2017).

## 1.1 | Pathophysiology of HFI

HFI refers to a benign bone lesion, asymptomatic in most cases, which develops on the inner table of the frontal bone. It never involves the external cortical bone and generally remains confined to the frontal bone. It can develop as small, isolated nodules or bilaterally and symmetrically to the midline in the most advanced cases (Hershkovitz et al., 1999). HFI prevalence varies depending on the studies, but most of the time, the populations studied, the detection methods, or the period also vary. In some of them, the cases were found to exceed 30%. Moore (1936) and Grollman and Rousseau (1944) conducted their studies on hospital patients using X-rays. The prevalence in Moore (1936) is 3.5% in a series of 6050 patients, and the prevalence

in Grollman and Rousseau (1944) is 4.1% in a series of 1620 patients. Hershkovitz et al. (1999) studied different series of skulls: 1706 modern skulls from the Hamann-Todd and Terry human osteological collections (20th century) and 2019 pre-19th century skulls from central Europe, Amerindian, and eastern Mediterranean. They were also able to include 72 dissected cadavers in their sample in order to observe the relationship of HFI to the brain and meninges and to perform histological analysis. The prevalence in this sample was 12.8%. In addition, Mulhern et al. (2006), analyzing an archeological sample from Pueblo Bonito (Chaco Canyon, New Mexico), calculated a prevalence of 32.4%.

Although its etiology remains a subject of debate, it is generally accepted that HFI is the result of a hormonal imbalance, modulating the production and effect of calcitropic hormones to promote calcium retention at remineralization sites (Belcastro et al., 2006; Calame, 1951; Hershkovitz et al., 1999; Laffranchi et al., 2021; Richter, 1939; Rühli et al., 2004). Overexposure to estrogens during the individual's lifetime (Hershkovitz et al., 1999) and an increase in androgen levels in women (Fulton et al., 1990; Kollin & Fehér, 1986; Western & Bekvalac, 2017) have been reported as predisposing factors. In addition, the lesion is reported to be observed more frequently in the post-menopausal period, with a reported incidence of between 40% and 60% (Burgener & Korman, 2011).

## 1.2 | Aim and objective

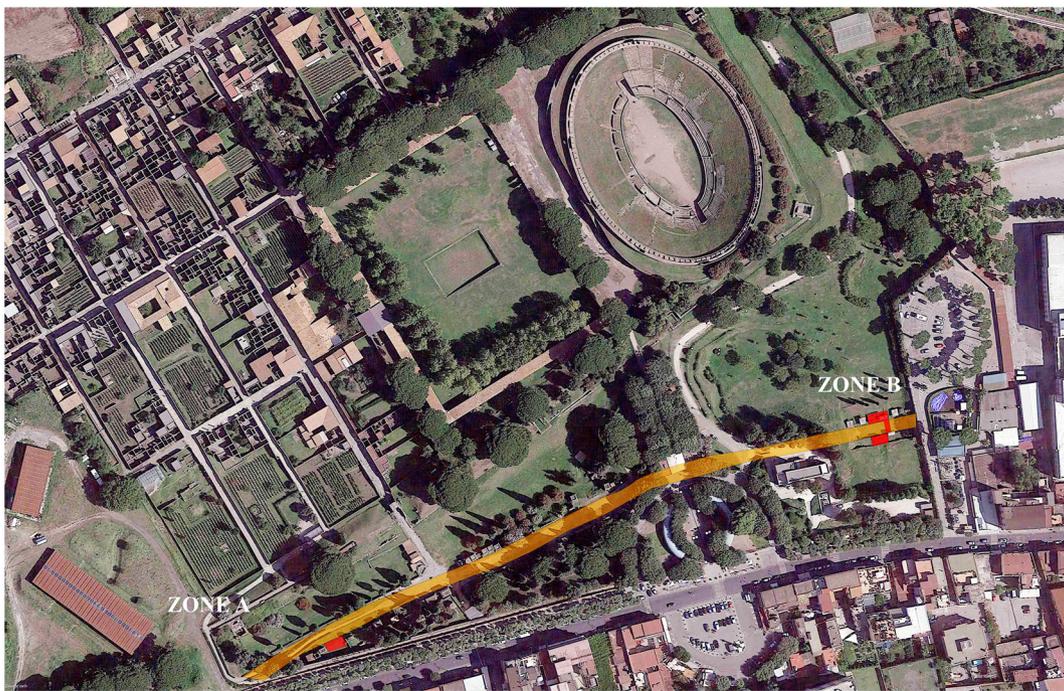
HFI has not hitherto been used in the analysis of burned human remains, and this study sought to demonstrate the possibility of using the diagnosis of HFI for determining the sex and age of burned individuals. Archeological cremated remains from the site of Porta Nocera in Pompeii were selected to enable having a large sample size.

## 2 | MATERIALS AND METHODS

The Porta Nocera necropolis in Pompeii (Figure 1) was revealed between 1952 and 1958 as part of an operation aimed at clearing the debris that had accumulated to the south of the ancient city after two centuries of excavations and the ash released by Mount Vesuvius, which had covered the entire necropolis following the eruption in 79 AD. Since 2003, it has been the subject of a study program led by W. Van Andringa and H. Duday, as part of a program coordinated by *Ecole française de Rome* and *Parco Archeologico di Pompeii*.

The urns studied are exceptionally well-preserved due to their burial under the ash of Mount Vesuvius for close to 20 centuries, protecting them from taphonomic changes and disturbances, linked, for example, to water infiltration or the effect of burrowing animals.

The fragmentation patterns, bone appearance, and lack of sediment provide conditions quite comparable to those applicable to burned remains found in current forensic cases, which in most cases are discovered quickly before taphonomic processes occur (Beauthier, 2008; Quatrehomme, 2015).



**FIGURE 1** General view of Porta Nocera, featuring the two excavated areas. From Van Andringa et al. (2016) [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]

In this study, we included 83 burial structures: a first set of 56 tombs from the western sector of the necropolis excavated during the first research program of Porta Nocera (2003–2007) and 27 tombs from the “Fondo Pacifico” sector, located to the east from the excavations still in progress. We have selected them because the human remains obtained from these tombs have already benefited from an anthropological study by H. Duday and his collaborators. Some of the results from these anthropological analyses have been published in Van Andringa et al. (2013), and others are still unedited and are resulting from laboratory data and excavations reports by H. Duday, W. Van Andringa and collaborators.

Regarding the anthropological study, the fragmented state of the bones and the fire damage did not allow the use of all the standard identification techniques for each of the urns. Sometimes a combination of methods was necessary. The whole analysis protocol is detailed in Van Andringa et al. (2013; p 6–16). The key points were as follows:

- Determination of the minimum number of individuals. Some graves may contain the remains of several individuals. The presence of more than one individual was confirmed by the identification of doublets (hence the importance of lateralizing the fragments), an incompatibility of age, or more rarely, an incompatibility of size or pathological indicators.
- Determination of the sex of the individuals. It concerns only adult or subadult individuals. As the coxal bone is the only one that gives a satisfactory determination score (above 95%) in particular by observing conformation of the auricular surface, the greater sciatic notch, the composite arch, and the pubic region (Bruzek, 1991), it

was preferentially used for sex determination. Archeological data (epitaphs and stelae types) could also be used in some cases.

- Estimation of age at death of the individuals. Given the archeological origin of the material studied, the exact age of the individuals was rarely available (only two individuals in our sample whose epitaphs mentioned the age). The estimation of the age at death of burnt bones was based on the methods usually used on unburnt skeletons (stage of bone and tooth maturation in immature individuals) and methods based on the relief of the auricular and symphyseal surfaces of the coxal bone for adults (Brooks & Suchey, 1990; Lovejoy et al., 1985; Schmitt, 2002, 2005). As an accurate estimate was not possible, especially in adults, following assessment for age estimation, the individuals were placed into age groups for greater reliability: juveniles (<15 years), young adults (16–29 years), middle adults (30–59 years), and older adults (>60 years).
- Detection of bone and tooth pathology and signs of aging. Senescence and pathology are inextricably linked (Crubézy & Crubézy-Ibanez, 1993). For each individual, all the pathological elements were recorded. For the purpose of this study, the criteria of senescence and signs of degenerative conditions were also specifically considered. These could be bone or dental damages. The main bone disorders were divided into two groups of lesions: those that occur on the articular surface called osteoarthritis and those that are located around the ligament or tendon insertions called enthesopathies. For more clarity and to facilitate the analysis, the number of locations of these different lesions has made it possible to classify individuals into: Grade 0 (no involvement), Grade 1 (discrete lesion, one location), Grade 2 (moderate involvement, at least two

locations), and Grade 3 (severe involvement, at least four locations).

- Visual evaluation of robustness of the bones. On unburned skeletons, the robustness is based on the calculation of the perimeter of the bone over its maximum length. In cremated skeletons, this osteometric data is impossible to obtain due to fragmentation. Robustness is therefore assessed visually based on both the observation of muscle or ligament insertion areas and the thickness of the cortical bone. All the individuals are classified as “gracile,” “robust,” “very robust,” or “indeterminate.” They were classified as indeterminate when the general condition of the fragments did not allow the observation of sufficient areas of interest.
- Analysis of cremation characteristics. The color of the bones ranged from brown ochre to white and included charcoal black and bluish gray, indicating that the cremation temperatures were very high. The bone color change with increasing heat exposure is a macroscopic alteration linked to chemical and physical changes in bone structure (Bonucci & Graziani, 1975; Ellingham et al., 2015; Fairgrieve, 2008; Shipman et al., 1984): Black color results from the combustion of the organic components of collagen and carbon, and gray and white are the outcomes of continued combustion that alters crystalline structure (Bennett-Devlin & Herrmann, 2012). Very often on skull fragments, a split was observed between the internal cortical bone and the external cortical bone at the diploe. Splintering and delamination are characteristic thermal fractures. These fractures are characterized by the splitting away of cortical bone layers from cancellous bone, the separation of the inner and outer tables of cranial bone (Symes et al., 2008).
- Taphonomic analysis. Analysis of all processes that may have occurred since the deposit in the tomb.
- Analysis of weight and fragmentation data. The total mass of each deposit was measured, as well as the mass of an identified fragment from each anatomical region. These measurements made it possible to calculate the percentage representation of the different anatomical segments as well as the overall fragment determination rate (mass of bones whose anatomical origin was known over the total mass of fragments). The fragmentation degree was also assessed by calculating the average weight of the fragments (except for shards).

The HFI data in this study came from new observations on the material undertaken during the 2019 research program. Firstly, all cranial fragments were examined to determine whether parts of the frontal bone could be identified. Then, in each tomb in which frontal bones were detected, we macroscopically examined all frontal bones, for any indication of the bone changes identified as an indicator of HFI. Due to the fragmented state of the bones, it was not necessary to carry out radiography for making a diagnosis for HFI, which is needed if the cranium is complete. If bone changes were present, we conducted a macroscopic description, and we rated its severity according to the classification proposed by Hershkovitz et al. (1999). This classification includes five grades of severity

ranked from A to E, depending on the extent of frontal bone involvement. The features characterizing each stage of HFI are described in Figure 2. Type E was deliberately excluded from our study because it is related to soft tissue involvement. Soft tissue damage sometimes found on forensic cases cannot be observed on bone fragments.

## 2.1 | Sample composition (Figure 3)

The sample was initially composed of 83 individuals from 83 burial structures of cremations—the inhumation tombs in Porta Nocera concerned only young children (under the age of 2). In the Roman period, young subjects who died mainly in the perinatal period were often buried outside the burial space reserved for older children or adults (Van Andringa et al., 2013); as we worked on burnt bones, they were excluded from the analysis. Of these 83 individuals, one was excluded due to the absence of identified frontal bones, which finally provides us 82 individuals. All the frontal bones displayed signs of carbonization.

Among the 82 individuals, 11 were identified following assessment for age estimation as juveniles (age at death less than 15 years): They were therefore excluded.

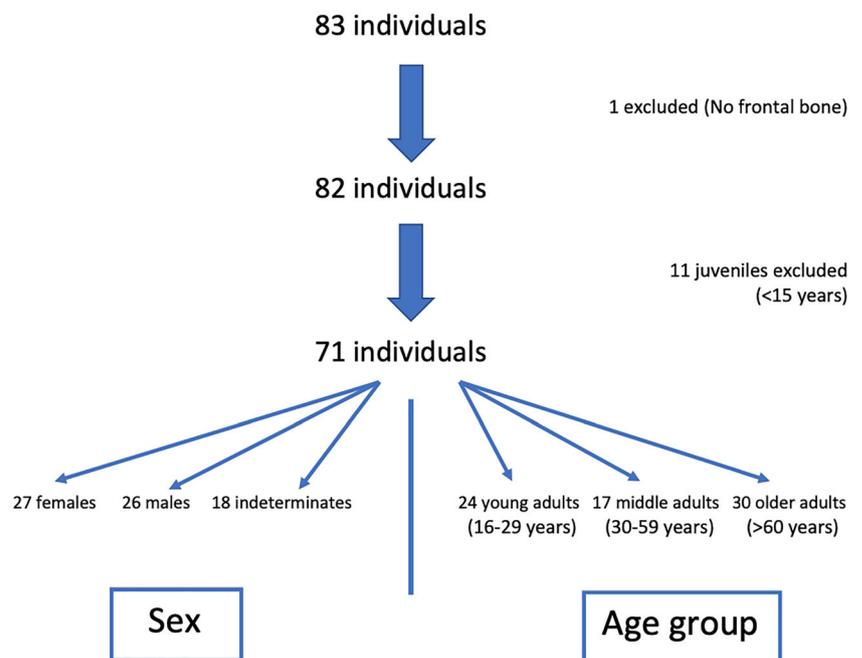
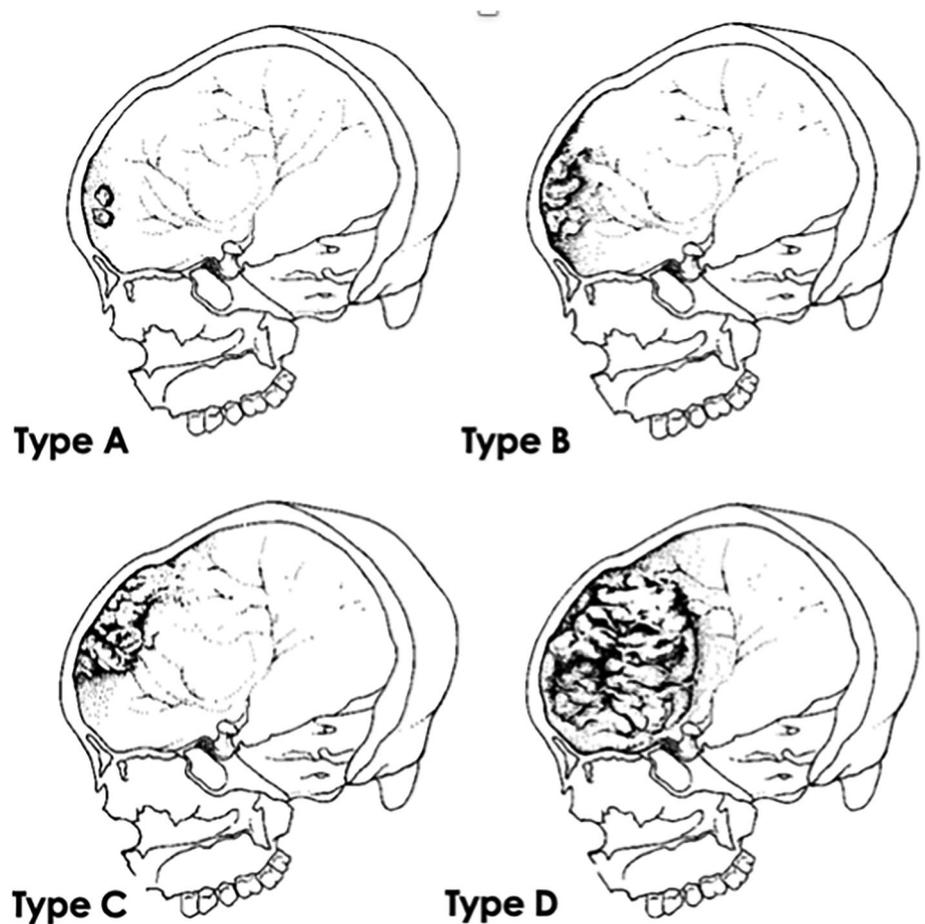
For the 71 individuals assessed to be adults or over 15 years, a definite sex determination was firstly obtained in 74.6% of cases ( $n = 53$ ): 27 individuals were classified as female, 26 individuals were classified as male, and 18 individuals were classified as indeterminate sex. This very high sex determination rate for burned human remains is explained by several factors:

- A low rate of bone fragmentation allowed observation of the coxal bones (33 individuals could be classified in this way, representing 46.5% of the total sample).
- Five tombs (four from the western sector and one from the eastern sector) bore an epitaph giving the subject's name and sex (Figure 4).
- The shape of columella-type steles was differentiating in some cases, with female steles ( $n = 5$ ) showing a hair bun at the back of the head (Figure 5) and male steles having none ( $n = 4$ ) (Duday & Van Andringa, 2013; Van Andringa et al., 2013).

With regard to age at death, the composition of the sample is as follows: 24 young adults (33.8%), 17 middle adults (23.9%), and 30 older adults (42.3%).

All of the anthropological data and HFI observations were recorded in spreadsheet software. Descriptive statistical analyses were conducted with XLSTAT © software to present the characteristics and describe the sample. The set of variables of qualitative types was then analyzed with the software BiostaTGV—Réseau Sentinelles ©, using the chi-square test, Yates' correction for chi-square tests, and Fisher's exact test due to the small sample size (Schwartz, 1963). A  $p$ -value of less than 0.05 was considered significant, and a  $p$ -value was considered highly significant when it was less than 0.01.

**FIGURE 2** Schematic representation of the four types of hyperostosis frontalis interna according to Hershkovitz et al. (1999). Type A single or multiple isolated bony elevations less than 10 mm in diameter located on the endocranial surface of the frontal bone; Type B nodular bony formations occupying less than 25% of the frontal bone; and Type C nodular bony formations occupying up to 50% of the frontal bone. Type D continuous nodular bony overgrowth involving over 50% of the frontal endocranium. Type E (not shown): severe hyperostosis frontalis interna with soft tissue expansion voluntarily disregarded in this study, which only related to bone remains



**FIGURE 3** Flow chart of the study sample [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]

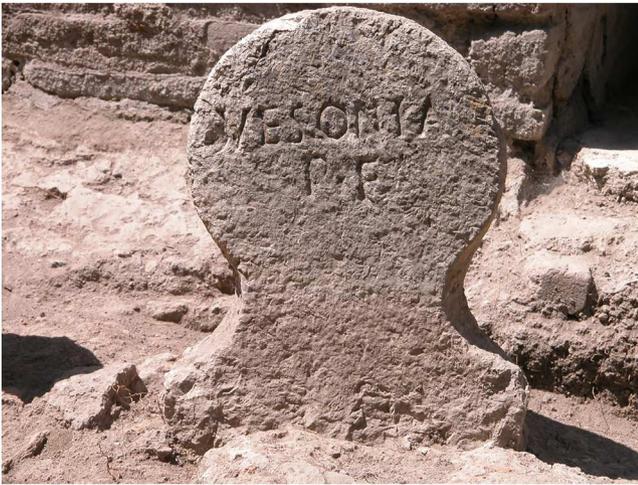
### 3 | RESULTS

#### 3.1 | General comments

HFI was diagnosed in 11 individuals out of the sample of 71, representing a 15.5% prevalence of the lesion in this cohort: Six were

female, and five were of indeterminate sex. None of the individuals assessed as male had bone changes indicative of HFI.

The lesions observed on all of the fragments had a similar presentation, in the form of a bony, fibrous, or nodular apposition affecting the endocranial surface of the frontal bone. Where observable, due to the fragmentation, HFI was located on anterior fragments of the



**FIGURE 4** Pompeii, necropolis of Porta Nocera, Enclosure 23. Funerary stele of the adult woman Vesonina, Publius' daughter. [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]



**FIGURE 5** Image from the Porta Nocera excavation site, Tomb 8 of Enclosure 23 showing a female stele characterized by the presence of a “hair bun” [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]

frontal bone bilaterally and more or less symmetrically on either side of the midline ridge and the superior sagittal sulcus. There was no evidence of parietal or other cranial bone involvement. No external cortical bone invasion was noted, but diploe damage was observed in several cases. All of the changes observed on the fragments followed

the pattern of bone changes associated with HFI according to Hershkovitz criteria (Hershkovitz et al., 1999) and were therefore recorded as a diagnosis of HFI.

The new-formed bone could take on either a continuous appearance or the appearance of tiny bulges or isolated nodules. The cases of HFI observed were identified and graded following the classification of Hershkovitz (Hershkovitz et al., 1999): Four individuals exhibited changes categorized as Type A, five individuals exhibited changes categorized as Type B, and two individuals exhibited changes categorized as Type C or D (due to fragmentation was not possible to differentiate between the categorized changes for these two types). The photographs shown in Figure 6 give some examples of the different potential appearances of HFI found in this project.

### 3.2 | Analytical statistics

- HFI and biological sex (Table 1)

If only individuals whose sex was determined are considered, a statistically significant difference is observed between females (6 cases out of 27) and males (0 cases out of 26), whether using Fisher's exact test ( $p = 0.0229$ ) or factorial probabilities ( $p = 0.0258$ ). Yates' correction of the chi-square value is 4.4898 ( $p = 0.03$ ) above the significance level at  $p = 0.05$ . However, if we consider all the individuals, the presence of HFI in five individuals whose sex is undetermined introduces a non-negligible bias to be considered.

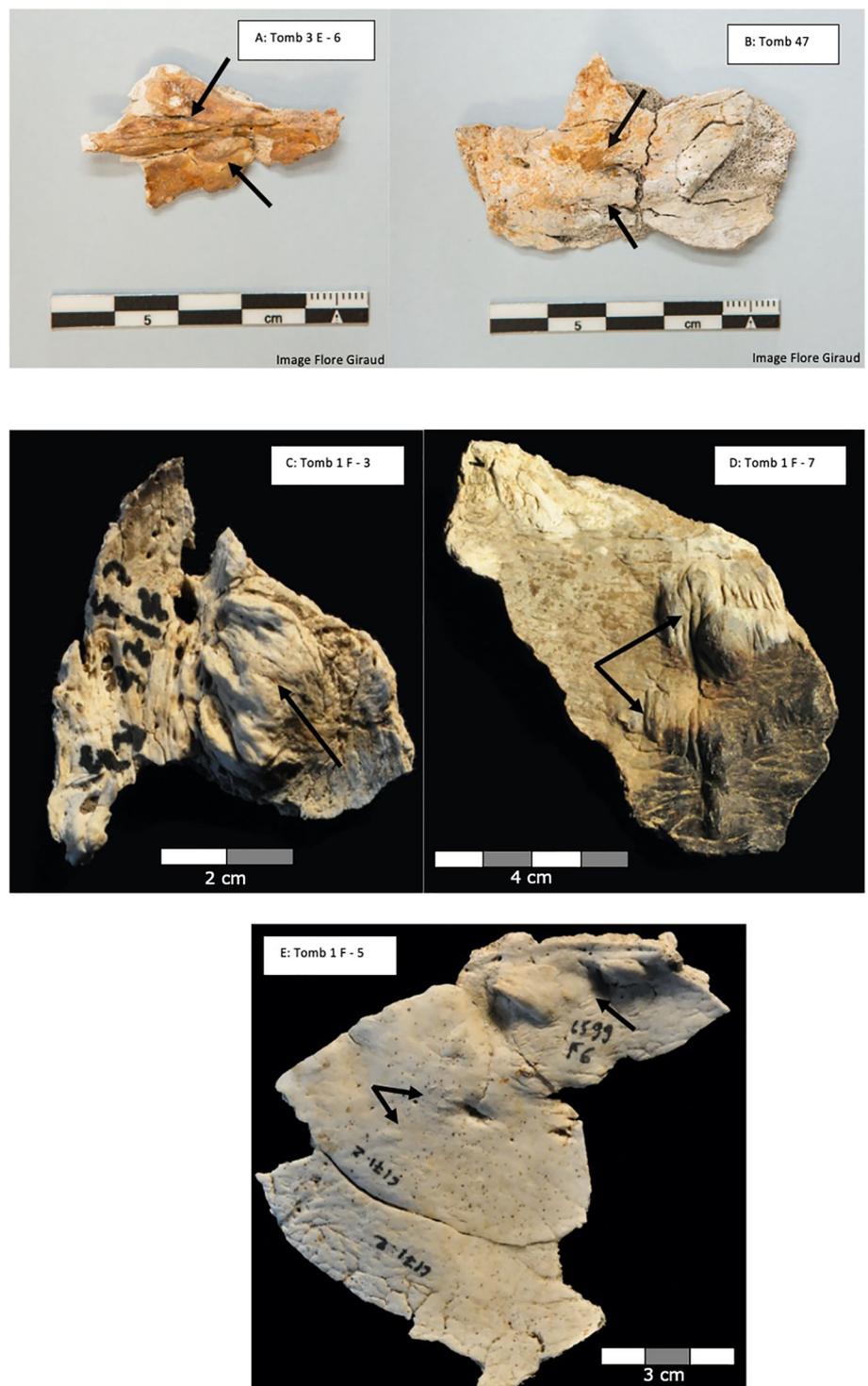
- HFI and robustness of the bones (Table 2)

As gracile skeletons have often been associated with the female sex (Dastugue & Torre, 1966; Durić et al., 2005), we looked for a link between robustness/gracefulness characteristics of the bones, sex estimation, and HFI lesions. Of the 11 individuals displaying signs of HFI (female and indeterminate sex), six had a gracile skeleton (representing 54.5%), four had a robust skeleton (representing 36.4%), and one skeleton was not characterized. Although gracile skeletons seem predominantly associated with HFI, these results are not significant ( $p = 0.12$ ).

Furthermore, it is worth noting that 19 of the 27 individuals recognized as female had a gracile skeleton, whereas five had a robust skeleton, and the last three had a robustness that could not be characterized (non-observable); conversely, the vast majority of individuals recognized as male had a robust (23 cases) or even very robust (one case) skeleton, plus one non-characterized skeleton and one gracile. Of the individuals of indeterminate sex ( $n = 18$ ), three were gracile, 13 were robust, one was very robust, and one was not characterized.

When doing a chi-square test based only on the 46 individuals where a sex estimation was possible in association with an evaluation of characteristics for gracile or robust, the value of 28.640 is highly significant ( $p < 0.0001$ ). Therefore, it is clear that, in this series, males were considerably more robust than females. However, it is worth noting that five females had a skeleton classified as robust, which

**FIGURE 6** Different types of hyperostosis frontalis interna (HFI) disorder at Porta Nocera, macroscopic observations. Image A symmetrical fibrous flows on either side of the midline; the lesion has split under the effect of fire at the diploe; image B HFI in the form of simple irregular thickening of the inner surface of the frontal bone; images C and D show a more severe disorder with an appearance that is both fibrous and nodular; and image E features a bonded reassembly of three frontal bone fragments from the same individuals, two of which displayed HFI lesions, providing better visualization of the extent of the lesion. The single arrow indicates an area of well-developed hyperostosis and identifiable HFI. The double arrow indicates much earlier lesions, not to be confused with the normal speckled appearance of the bone. [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]



demonstrates the risk associated with basing sex determination solely on this criterion. The robustness/gracefulness criterion appears to be a good observation to make for sex estimation but cannot be used as a sexing method alone.

- HFI and age at death (Table 3)

Firstly, we differentiated between three main age groups: young adults aged 16–29 (24 individuals, no cases of HFI), middle adults aged 30–59 (17 individuals, 1 case of HFI), and older adults over

60 (30 individuals, 10 cases of HFI). It's important to note that the first age group can be defined based on objective criteria (stages of maturation and synostosis of ossification centers), whereas the other two are more difficult to differentiate, such that the separation is primarily based on degenerative lesions (see below). These lesions may have a relatively early onset (fourth decade) or, on the contrary, be completely absent even in older individuals. For this reason, we chose to categorize these individuals in a single age group (middle adults + older adults) in order to analyze the association with HFI with more reliability. The comparison shows a highly significant difference at the

	With HFI		Without HFI		Total	
	n	%	n	%	n	%
Female (N = 27)	6	8.4	21	29.5	27	39.4
Male (N = 26)	0	0	26	36.6	26	36.6
Indeterminate (N = 18)	5	7	13	18.3	18	25.3
Total (N = 71)	11	15.5	60	84.5	71	100
Total without indeterminate (N = 53)	6	11.3	45	84.9	53	100
Yates chi2						4.4898
Factorial probabilities						0.0258
Fisher's exact test						0.0229

**TABLE 1** Distribution of hyperostosis frontalis interna (HFI) according to the individuals' sex (*n* represents absolute frequencies, and % represents relative frequencies)

**TABLE 2** Distribution of hyperostosis frontalis interna (HFI) according to individuals' robustness (*n* represents absolute frequencies, and % represents relative frequencies)

Robustness	Female				Indeterminate				Male				Total	
	With HFI		Without HFI		With HFI		Without HFI		With HFI		Without HFI			
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Gracile (N = 22)	4	5.6	15	21.1	2	2.8	1	1.4	0	0	1	1.4	22	31
Robust (N = 42)	1	1.4	4	5.6	3	4.2	10	14.1	0	0	23	32.4	42	59.2
Very robust (N = 2)	0	0	0	0	0	0	1	1.4	0	0	1	1.4	2	2.8
Indeterminate (N = 5)	1	1.4	3	4.2	0	0	1	1.4	0	0	1	1.4	5	7
Total (N = 71)	6	8.5	22	31	5	7	13	18.3	0	0	26	36.6	71	100
Total without indeterminate (N = 49)	5	10.2	19	38.8	--	--	--	--	0	0	25	51	49	100
Chi <sup>2</sup>														28.640

**TABLE 3** Distribution of hyperostosis frontalis interna (HFI) according to the individuals' age groups (*n* represents absolute frequencies, and % represents relative frequencies)

Age	With HFI		Without HFI		Total	
	n	%	n	%	n	%
Young adult (N = 24)	0	0	24	33.8	24	33.8
Middle adult (N = 17)	1	1.4	16	22.5	17	23.9
Older adult (N = 30)	10	14.1	20	28.2	30	42.3
Total (N = 71)	11	15.5	60	84.5	71	100
Yates chi <sup>2</sup>						4.979
Factorial probabilities						0.013604
Fisher's exact test						0.012048

level  $p = 0.012048$  with Fisher's exact test and  $0.01360$  with the factorial probability calculation. Yates' corrected chi-square is  $4.979$ , which is significant at the  $p = 0.05$  level.

- HFI and degenerative disease (Table 4)

Insofar, as we had no direct data in respect of the individual's age at death (except for the very two juveniles' cases where the epitaph clearly also mentions the age of the individual), we examined the

**TABLE 4** Distribution of hyperostosis frontalis interna (HFI) according to the presence of degenerative diseases (*n* represents absolute frequencies, and % represents relative frequencies); the degenerative conditions (osteoarthritis and enthesopathies) are rated from Grade 0 to Grade 3 according to disease severity: Grade 0 (no involvement), Grade 1 (discrete lesion, one location), Grade 2 (moderate involvement, at least two locations), and Grade 3 (severe involvement, at least four locations)

Degenerative disease	With HFI		Without HFI		Total	
	n	%	n	%	n	%
Grade 0 (N = 31)	1	1.4	30	42.3	31	43.7
Grade 1 (N = 5)	0	0	5	7	5	7
Grade 2 (N = 9)	1	1.4	8	11.2	9	12.7
Grade 3 (N = 26)	9	12.7	17	23.9	26	36.6
Total (N = 71)	11	15.5	60	84.5	71	100
Chi <sup>2</sup>						9365

possibility of a correlation between HFI and the presence of signs generally considered as indications of aging (osteoarthritis or enthesopathy-type). Of the 11 individuals manifesting HFI bony changes, 9.1% displayed "no lesions" or "discrete lesion" (one case), whereas 90.9% displayed "moderate involvement" (one case) or "severe involvement" (nine cases); in individuals not displaying HFI-

type lesions, these percentages were 58.3% and 41.6%, respectively. The difference is highly significant (chi-square 9.365,  $p = 0.01$ ) and allows us to affirm the correlation between the presence of HFI and the presence of degenerative disease.

- HFI and total burned bone weight

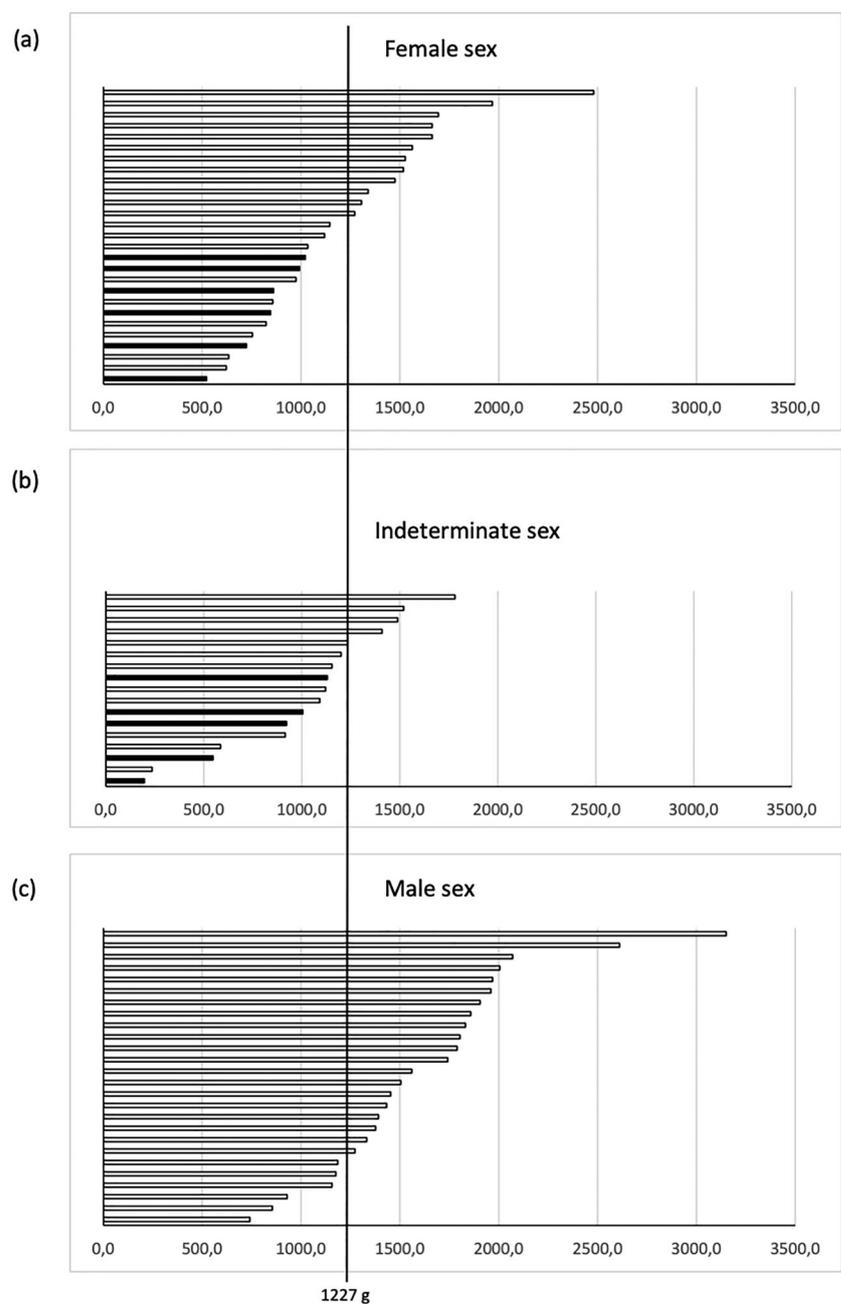
The anthropological study of cremations from the Porta Nocera necropolis detected extensive skeleton demineralization in a significant number of women in the older adult's category (Van Andringa et al., 2013).

In order to clarify this observation with more specific data, we considered the total weight of the burned human bones found in each

of the tombs. Three histograms were constructed to provide a visual representation of the weight data for the individuals assessed as female, male, and indeterminate sex (Figure 7). We also considered the minimum weight recorded by McKinley (1227 g.) for an adult skeleton, who has conducted studies in modern crematoria with a clearly archeological purpose (McKinley, 1993, 1994).

On the histograms presented in Figure 7, individuals with HFI are indicated in black. It can be seen very clearly that all are located in the left-hand part of the diagrams with values of less than 1227 g and in some cases well below this value.

Two tombs had extremely low values (SP 1D-1, 196.2 g and Tomb 18, 235.2 g). These extremely low values are explained by a very partial collection of bone remains collected from the pyre after



**FIGURE 7** Total weight of burned human bones found in each of the tombs. Figure 7 (a) for individuals recognized as female based on the hip bone, epitaph, and any “hair bun”; Figure 7 (b) for individuals of indeterminate sex; and Figure 7 (c) for male individuals. The minimum weight for an adult skeleton recorded by McKinley (1994) represents 1227 g. Those recorded with hyperostosis frontalis interna (HFI) shown in black. The horizontal axis represents the weight of bones in grams.

the cremation (Duday in Van Andringa et al., 2013). For both individuals from these tombs, an important imbalance in the representation of the different anatomical regions was observed: In SP 1D-1, the cranial elements were overrepresented, whereas they were underrepresented in Tomb 18. It is therefore impossible to draw conclusions for these two cases.

Considering the other individuals manifesting HFI bony changes, the total burned bone weight was always low or very low, but the distribution among the head, torso, and upper and lower limbs was markedly more balanced, which suggests a general process resulting in skeleton weight reduction rather than incomplete burned fragment collection.

Of these 11 individuals with HFI, all those whose sex could be determined (six individuals) were female, and a very large majority showed signs of advanced degenerative disease (10 individuals out of 11) and were therefore relatively advanced in age. It has been shown that age-related hormonal changes can lead to demineralization of the skeleton, and this phenomenon is exacerbated in postmenopausal women (Desoutter et al., 2012). This data is also found in the weight analysis of remains from modern crematoria (Depierre, 2013).

The low total mass of bone fragments from individuals with HFI could suggest a general demineralization phenomenon resulting from this postmenopausal hormonal imbalance.

## 4 | DISCUSSION

### 4.1 | HFI diagnosis after cremation

When subjected to heat, the skull displays great variations of fragmentation (Depierre, 2013). The different parts of the vault can separate along the sutures, a split can appear between the inner table and the outer table at the diploe, and the cortical bone can also become warped. The frontal bone is easy to identify due to several anatomical regions: the frontal midline ridge, the frontal sinuses, the glabella, the orbital roof, or orbital margins (White et al., 2016). Despite the known warping or fragmentation effects, heat has little impact on our ability to recognize this bone: The abovementioned anatomical regions are still very recognizable. In this sample, the degree of fragmentation is relatively low with an average weight of the fragments (except for a shard) of 0.89 g. Indeed, despite the stigmata of cremation, we identified the frontal bone in 98.8% of cases. HFI was diagnosed with a prevalence of 15.49% (11 of the 71 individuals) and was not affected by heat (HFI consists in a bone deposit of the same chemical composition as normal bone). In the case of cremated remains, a direct diagnosis of HFI was therefore solely based on preservation and the possibility of observing the inner surface of the frontal bone. However, it is necessary to understand the pathological processes and to be able to follow the bone analysis criteria to distinguish the changes in HFI. With minimum practice, to learn to perform this diagnosis properly, this assessment is inexpensive and reproducible, without any prior sample preparation. Moreover, as heat exposure generally

results in rupture of the cranial vault, this merely facilitates the observation of this criterion, without using invasive, cutting, or imaging techniques (However, additional tests, such as X-ray or CT scan, could be beneficial in identifying early signs of HFI). Direct diagnosis is simple and reliable: The morphology of the lesion and its staging mean that it is easy to rule out differential diagnoses of other osteocondensation disorders (Ognard et al., 2016).

### 4.2 | Prevalence of HFI

Some studies have demonstrated that HFI might be a characteristic of a recent onset associated with modern-day lifestyles: industrialization and link with obesity (Western & Bekvalac, 2017), diet (May, Peled, Dar, Abbas, & Hershkovitz, 2011), increased life expectancy (Armélagos & Chrisman, 1988), changes in the age of onset of menstruation and menopause, hormonal disorders, or increase in phytoestrogens (Antón, 1997; Cvrcek, 2013; Hershkovitz et al., 1999; May, Peled, Dar, Abbas, & Hershkovitz, 2011; Rühli et al., 2004). If the archeological and modern data are compared, there has been little documentation of HFI in ancient populations (Hajdu et al., 2009), and its prevalence would appear to be relatively lower (Barber et al., 1997). However, there would appear to be some exceptions: the findings of Lazer (1996, 2009) in Pompeii, where HFI was observed with a prevalence of 11.9% (43 cases of 360 adult skulls—examined through the foramen magnum and direct observation on incomplete specimen—displayed HFI in a population sample of Pompeian victims of the eruption of Vesuvius in 79 AD. Classification of the degree of bony involvement was based on the system proposed by Henschen, 1949). Two key questions can then be asked: Has the frequency of onset of HFI among modern-day populations actually increased, or could there be an information bias in ancient populations? Many of the publications discussing past populations are case reports and describe isolated cases of one or more individuals, without actually carrying out an epidemiological analysis (Antón, 1997; Armélagos & Chrisman, 1988; Bebel-Nowak & Golijewskaja, 2015; Devriendt et al., 2004; Garralda et al., 2014; Glab et al., 2006; Marlet, 1974; Nowakowski & Kwiatkowska, 2005; Shahin et al., 2013).

The high prevalence of HFI in our sample obtained from an ancient population follows a similar pattern of findings from Lazer (1996, 2009). The frequency observed is also similar to the findings of Marlet (1974) and Hershkovitz et al. (1999) (prevalence of 11.5% and 12.8%, respectively). Although there is some discord in the literature, it is important to account for the fact that the sample composition and detection methods of HFI can give rise to clear variations in the prevalence of this characteristic in a population.

Western and Bekvalac (2019) studied the relationship between HFI, lifestyle, and socioeconomic background in a large project involving a sample of over 2000 individuals from several archeological sites in England, covering the medieval and postmedieval periods. A similar project on a large-scale multicenter study of the Roman and pre-Roman population would seem appropriate in the future.

### 4.3 | Added value of HFI in terms of identifying individuals

The archeo-anthropological study of our population in Porta Nocera allowed us to determine the sex in 74.6% of cases (53 individuals whose sex was determined of 71 individuals over 15 years old), due to exceptional preservation conditions (determination rate of bone fragments 80.6%), even though the stigma of cremation did not always allow the usual method of identification to be applied to unburned skeletons. This resulted in 25.4% of individuals of indeterminate sex (18 individuals among our sample of 71 individuals over 15 years old). This percentage could represent a non-negligible bias in the analysis of an association between HFI and sex. Therefore, in our medical thesis work, we chose to observe in parallel with this study; two other types of present-day cohorts (based on radiology and autopsies) were investigated to ascertain if they could confirm a genuine link between HFI and the female sex. A hospital cohort of 221 patients who underwent a CT scan at Limoges University Hospital and a sample of 147 deceased individuals autopsied at the Limoges Medico-Legal Institute were included.

All data accessed for the study complied with ethical standards. The first cohort is a random selection of individuals who underwent brain scans between December 2019 and April 2020: 119 women and 111 men aged 18 to 97 were included. The second cohort is a sample of 45 women and 92 men who underwent autopsy between November 2018 and January 2019. In the case of autopsy patients, additional permission from the judicial authorities was obtained. (The entire protocol is described in detail in our thesis manuscript; Du Fayet de la Tour, 2020).

The results obtained demonstrated a significant link between the bony changes and the female sex and a positive predictive value of over 90% in respect of HFI for detecting the female sex in both cases. Therefore, these studies confirmed the data obtained by May et al. (2010), who examined the possibility of using HFI to estimate the sex and age of skeletons. However, it is important to specify that HFI is not exclusive to females. It can be found in males, but its incidence is extremely low, and the disorder is less severe (Hershkovitz et al., 1999; Nikolić et al., 2010). Male cases observed are frequently associated with or the result of tumoral disease or androgen deprivation therapy (e.g., physical or chemical castration). The study by (May et al., 2010) demonstrated that antiandrogen use could induce the development of this lesion in males regardless of age.

Based on the premise that there was a link between HFI and the female sex (antiandrogen use being excluded in our ancient population sample and we did not find any mention of castration in our population in Pompeii: Castration was prohibited by *Lex Cornelia de Sullae sicariis et veneficis*, Roman Criminal law in 81 BC), we tried to observe whether the use of this criterion could be of interest in terms of identifying the individuals at Porta Nocera. After a reexamination of the skeleton to detect any tumoral diseases liable to bias the results, the individuals whose sex was initially indeterminate and who had HFI were therefore reclassified as female. Using this criterion, we were, therefore, able to obtain the sex of five more individuals.

In this way, the number of “sexed” females increased from 27 to 32, representing 45.1% of the total sample of individuals over 15 years of age. The total percentage of “sexed” individuals (female + male) is therefore  $32 + 26 = 58$ , representing 81.7% of the sample (a 7.1% gain); the number of individuals of indeterminate sex is  $18 - 5 = 13$ , representing 18.3%.

Moreover, if we exclude the “archeological sex” data and limit the analysis to the individuals whose sex has been determined on purely biological criteria, to which we add the five individuals of undetermined sex who have an HFI, the gain is considerable. In our sample, the number of females increases from 17 to 22 (+29.4%), and the percentage of sexed individuals (male + female) increases from 33 (46.5%) to 38 (53.5%).

Regarding the age at death estimation, HFI makes an interesting but more limited contribution. Indeed, it provides indications, as its observation is significantly associated with older adults, but it is not possible to be more accurate. From a physiopathological viewpoint, there is a link between the onset of the lesion and menopausal changes (Barber et al., 1997; Hershkovitz et al., 1999; Marlet, 1974; Moore, 1955). Menopause generally occurs in women around 50 years of age, with 80% of women reaching menopause between 45 and 55 years of age (Tamborini, 2014). Therefore, the age can be retained as a threshold value, but the idea of being able to define age groups according to the severity grade was abandoned due to the specific nature of the lesion, which may not progress or occur at an advanced stage (Hershkovitz et al., 1999). Moreover, an age of 50 years could be retained only for the modern population, and indeed, the age of menarche and menopause could be slightly different in the populations of the past (Papadimitriou, 2016).

## 5 | LIMITATIONS OF THE STUDY

As mentioned in the discussion, there are several biases or limitations in this study related to the method itself or the sample analyzed.

Regarding the method, it is important to specify that this technique only allows the sex of female individuals to be given and therefore may potentially lead to an imbalance in the estimated sex ratio.

Furthermore, this sample is not perfect, and the percentage of individuals of undetermined sex also leads to uncertainty in the conclusions. It would be interesting to be able to analyze a large sample of formally identified burnt bone in order to remove these uncertainties.

## 6 | CONCLUSIONS

From carrying out a literature review (relating to osteoarcheology and forensic aspects), HFI has not previously been described on burned bone. Although cremation leaves many marks (splitting, warping, and fractures) (Christensen, 2002; Depierre, 2013; Gejvall, 1969; Grevin, 2005; Shipman et al., 1984; Ubelaker, 1989), the study showed that this lesion of bone tissue is not impacted by the effect of

flames or high temperatures. The age or sex indications potentially obtained from observations and diagnoses of HFI are, as such, key from an archeo-anthropological or medicolegal viewpoint: in the field of demographic data in archeology or in the forensic context of reconstructive identification. The high prevalence of the lesion observed in Pompeii confirms its presence in populations in ancient times, although questions remain as to its physiopathology and mode of onset. Are the findings obtained in Pompeii reproducible in other necropolises? Does the population of Pompeii have specific characteristics? A larger-scale multicenter study with a larger sample of burned bones would be of interest to observe whether this criterion can be applied widely on both archeological and forensic sample or if the onset of HFI stems from specific conditions or lifestyles. In addition, a study of formally identified burnt remains (e.g., study of crematorium remains) would be interesting to eliminate the uncertainty associated with archeological material and the bias of the indeterminate.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Professor William Van Andringa (École Pratique des Hautes Études, UMR 8546 CNRS ENS-Paris AOrOc, Université PSL, and Institut Universitaire de France) and the entire research team of Porta Nocera, as well as the Ecole Française de Rome and the Parco Archeologico di Pompei, for facilitating this work.

This research benefited from the scientific framework of the University of Bordeaux's IdEx "Investments for the Future" program/GPR "Human Past".

## CONFLICT OF INTEREST

Authors declare that they have no competing interests.

## DATA AVAILABILITY STATEMENT

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

## ORCID

Anais Du Fayet de la Tour  <https://orcid.org/0000-0001-5317-8046>

## REFERENCES

- Absolonova, K., Veleminsky, P., Dobisíková, M., Beran, M., & Zocova, J. (2013). Histological estimation of age at death from the compact bone of burned and unburned human ribs. *Journal of Forensic Sciences*, 58. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2012.02303>
- Antón, S. C. (1997). Endocranial hyperostosis in Sangiran 2, Gibraltar 1, and Shanidar 5. *American Journal of Physical Anthropology*, 102, 111–122. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-8644\(199701\)102:1<111::AID-AJPA9>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-8644(199701)102:1<111::AID-AJPA9>3.0.CO;2-3)
- Armélagos, G. J., & Chrisman, O. D. (1988). Hyperostosis frontalis interna: A Nubian case. *American Journal of Physical Anthropology*, 76, 25–28. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330760103>
- Arnaud, G., & Arnaud, S. (1980). *Etudes des os brûlés: recherches méthodologiques. L'archéologie en Provence, Alpes, Côte d'Azur. Lettre d'information*, n° 3–4 (–37, 38). CNRS-CRA.
- Barber, G., Watt, I., & Rogers, J. (1997). A comparison of radiological and palaeopathological diagnostic criteria for hyperostosis frontalis interna. *International Journal of Osteoarchaeology*, 7, 157–164. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1212\(199703\)7:2<157::AID-OA331>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1212(199703)7:2<157::AID-OA331>3.0.CO;2-8)
- Beauthier, J.-P. (2008). *Traité de médecine légale* (p. 2008). De Boeck et Larcier.
- Bebel-Nowak, A., & Golijewskaja, A. (2015). A case of hyperostosis frontalis interna from Deir el-Bahari, Egypt. *Bioarchaeology of the Near East*, 9, 45–54.
- Belcastro, M. G., Facchini, F., & Rastelli, E. (2006). Hyperostosis frontalis interna and sex identification of two skeletons from the early middle ages necropolis of Vicenne-Campochiaro (Molise, Italy). *International Journal of Osteoarchaeology*, 16(6), 506–516. <https://doi.org/10.1002/oa.851>
- Bennett-Devlin, J., & Herrmann, N. P. (2012). *Taphonomy of fire in forensic anthropology: An introduction* (pp. 307–322). CRC Press.
- Bonucci, E., & Graziani, G. (1975). Comparative thermogravimetric, x-ray diffraction and electron microscope investigations of burnt bones from recent, ancient and prehistoric age. *Atti della Accademia Nazionale Dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali. Rendiconti*, 59(6), 517–532.
- Brooks, S., & Suchey, J. M. (1990). Skeletal age determination based on the os pubis: A comparison of the Ascadi-Nemeskeri and Suchey-Brooks methods. *Human Evolution*, 5, 227–238. <https://doi.org/10.1007/BF02437238>
- Bruzek, J. (1991). *Fiabilité des procédés de détermination du sexe à partir de l'os coxal: implications à l'étude du dimorphisme sexuel de l'homme fossile*. Thèse de doctorat. Muséum national d'histoire naturelle; p. 533.
- Burgener, F. A., & Korman, M. (2011). *Bone and joint disorders*. Thieme; p. 416.
- Calame, A. (1951). *Le syndrome de Morgagni-Morel: étude anatomo-clinique: hyperostose frontale interne, adiposité, virilisme et troubles neuro-psychiques*. Institute de Pathologie de Genève. Masson.
- Cavazzuti, C., Bresadola, B., d'Innocenzo, C., Interlando, S., & Sperduti, A. (2019). Towards a new osteometric method for sexing ancient cremated human remains. Analysis of late bronze age and iron age samples from Italy with gendered grave goods. *PLOS One*, 14(1), e0209423. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209423>
- Christensen, A. M. (2002). Experiments in the combustibility of the human body. *Journal of Forensic Sciences*, 47, 466–470.
- Correia, P., & Beattie, O. (2002). A critical look at methods for recovering, evaluating, and interpreting cremated human remains. In W. D. Haglund & M. H. Sorg (Eds.), *Advances in forensic taphonomy method, theory, and archaeological perspectives* (Vol. 22, p. 16). <https://doi.org/10.1201/9781420058352.ch22>
- Crubézy, E., & Crubézy-Ibanez, E. (1993). Evaluation of diagnostic criteria for hyperostotic diseases on a series of skeletons. *Epidemiological implications. Revue du Rhumatisme (Ed Française)*, 60(1), 586–590.
- Cvetković, D., Nikolić, S., Brković, V., & Živković, V. (2019). Hyperostosis frontalis interna as an age-related phenomenon—Differences between males and females and possible use in identification. *Science & Justice*, 59, 172–176. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2018.09.005>
- Cvrcek, T. (2013). Wages, prices, and living standards in the Habsburg empire, 1827–1910. *The Journal of Economic History*, 73, 1–37. <https://doi.org/10.1017/S0022050713000016>
- Dastugue, J., & Torre, S. (1966). Les sépultures d'Ifs. Étude anthropologique. *Annales de Normandie*, 16, 323–332. <https://doi.org/10.3406/annor.1966.6776>
- Depierre, G. (2013). *Crémation et archéologie: nouvelles alternatives méthodologiques en ostéologie humaine*. Edition universitaire de Dijon. 654 p
- Desoutter, J., Mentaverri, R., Brazier, M., & Kamel, S. (2012). Le remodelage osseux normal et pathologique. *Revue Francophone Des Laboratoires*, 2012, 33–42. [https://doi.org/10.1016/S1773-035X\(12\)71733-1](https://doi.org/10.1016/S1773-035X(12)71733-1)
- Devriendt, W., Piercecchi-Marti, M.-D., Adalian, P., Sanvoisin, A., Dutour, O., & Leonetti, G. (2005). Hyperostosis frontalis interna:

- Forensic issues. *Journal of Forensic Sciences*, 50(1), JFS2004173–JFS2004174.
- Devriendt, W., Piercecchi-Marti, M.-D., Ardagna, Y., Mahieu, E., Hershkovitz, I., Signoli, M., & Dutour, O. (2004). Two neolithic cases of hyperostosis frontalis interna. presented at the. *International Journal of Osteoarchaeology*, 14(5), 414–418. <https://doi.org/10.1002/oa.721>
- Du Fayet de la Tour, A. (2020). *Diagnostic de l'hyperostose frontale interne : nouvelles perspectives dans l'identification des corps carbonisés*, thèse d'exercice (Vol. 2020). Limoges, Université de Limoges. <http://aurore.unilim.fr/ori-oi-search/notice/view/unilim-ori-113395>
- Duday, H., Courtaud, P., Crubézy, É., Sellier, P., & Tillier, A.-M. (1990). L'Anthropologie « de terrain » : Reconnaissance et interprétation des gestes funéraires. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 2, 29–49. <https://doi.org/10.3406/bmsap.1990.1740>
- Duday, H., & Van Andringa, W. (2013). Des formes et du temps de la mémoire dans une nécropole de Pompéi. *Les Nouvelles de l'archéologie*, 132, 48–54. <https://doi.org/10.4000/nda.2075>
- Durić, M., Rakocević, Z., & Donić, D. (2005). The reliability of sex determination of skeletons from forensic context in the Balkans. *Forensic Science International*, 147, 159–164. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2004.09.111>
- Ellingham, S. T. D., Thompson, T. J. U., Islam, M., & Taylor, G. (2015). Estimating temperature exposure of burnt bone—A methodological review. *Science & Justice*, 55, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2014.12.002>
- Fairgrieve, S. (2008). *Forensic cremation: Recovery and analysis*. Boca Raton. 224p
- Fulton, J. D., Shand, J., Ritchie, D., & McGhee, J. (1990). Hyperostosis frontalis interna, acromegaly and hyperprolactinaemia. *Postgraduate Medical Journal*, 66, 16–19. <https://doi.org/10.1136/pgmj.66.771.16>
- Garralda, M. D., Maureille, B., & Vandermeersch, B. (2014). Hyperostosis frontalis interna in a Neandertal from Marillac (Charente, France). *Journal of Human Evolution*, 67, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2013.12.003>
- Geber, J., Hensey, R., Meehan, P., Moore, S., & Kador, T. (2017). Facilitating transitions: Postmortem processing of the dead at the Carrowkeel passage tomb complex, Ireland (3500–3000 cal. B.C.). *Bioarchaeology International*, 1, 35–51. <https://doi.org/10.5744/bi.2017.1001>
- Gejvall, N.-G. (1969). Cremations. In *Science in archaeology* (pp. 468–479). Thames and Hudson.
- Glab, H., Szostek, K., & Kaczanowski, K. (2006). Hyperostosis frontalis interna, a genetic disease?: Two medieval cases from southern Poland. *Homo*, 57, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2005.08.001>
- Grevin, G. (1990). La fouille en laboratoire des sépultures à incinération : son apport à l'archéologie. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 2, 67–74. <https://doi.org/10.3406/bmsap.1990.1744>
- Grevin, G. (2004). L'Ethnologie au secours des archéologues. *L'étude Des crémations Sur bûchers*, *Archéologia*, 408, 44–51.
- Grevin, G. (2005). La Crémation sur bûcher dans l'Antiquité à la lumière de l'ethno-archéologie. *Khéma*, 30, 15–20.
- Grollman, A., & Rousseau, J. P. (1944). Metabolic craniopathy : A clinical and roentgenologic study of so-called hyperostosis frontalis interna. *Journal of the American Medical Association*, 126, 213–217. <https://doi.org/10.1001/jama.1944.02850390011004>
- Hajdu, T., Fóthi, E., Bernert, Z., Molnár, E., Lovász, G., Kořvári, I., Köhler, K., & Marcsik, A. (2009). Appearance of hyperostosis frontalis interna in some osteoarchaeological series from Hungary. *Homo*, 60, 185–205. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2008.07.004>
- Henschen, F. (1949). *Morgagni's syndrome. Hyperostosis frontalis interna, Virilismus, Obesitas*. Oliver and Boyd; p. 172.
- Hershkovitz, I., Greenwald, C., Rothschild, B. M., Latimer, B., Dutour, O., Jellema, L. M., & Wish-Baratz, S. (1999). Hyperostosis frontalis interna: An anthropological perspective. *American Journal of Physical Anthropology*, 109, 303–325. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-8644\(199907\)109:3<303::AID-AJPA3>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-8644(199907)109:3<303::AID-AJPA3>3.0.CO;2-I)
- Janssens, P. (1979). L'étude anthropologique et paléopathologique des restes de crémation. Difficultés et possibilités. *Les Chercheurs de la Wallonie*, 25, 363–372.
- Kollin, E., & Fehér, T. (1986). Androgens, bone mineral content and hyperostosis frontalis interna in pre-menopausal women. *Experimental and Clinical Endocrinology*, 87, 211–214. <https://doi.org/10.1055/s-0029-1210546>
- Laffranchi, Z., Milella, M., Lombardo, P., Langer, R., & Löscher, S. (2021). Co-occurrence of malignant neoplasm and hyperostosis frontalis interna in an iron age individual from Münsingen-rain (Switzerland): A multi-diagnostic study. *International Journal of Paleopathology*, 32, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ijpp.2020.10.008>
- Lara, M., Paz, V., Lewis, H., & Solheim, W. II (2015). Bone modifications in an early Holocene cremation burial from Palawan, Philippines. *International Journal of Osteoarchaeology*, 25, 637–652. <https://doi.org/10.1002/oa.2326>
- Lazer, E. (1996). Revealing secrets of a lost city. *Medical Journal of Australia*, 165, 620–623. <https://doi.org/10.5694/j.1326-5377.1996.tb138666.x>
- Lazer, E. (2009). *Resurrecting Pompeii*. Routledge; p. 386. <https://doi.org/10.4324/9780203885161>
- Lovejoy, C. O., Meindl, R. S., Prysbeck, T. R., & Mensforth, R. P. (1985). Chronological metamorphosis of the auricular surface of the ilium: A new method for the determination of adult skeletal age at death. *American Journal of Physical Anthropology*, 68, 15–28. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330680103>
- Marlet, J. J. (1974). Development of cranial hyperostosis. A radiological approach to a process. *Radiologia Clinica et Biologica*, 43, 473–482.
- May, H., Peled, N., Dar, G., Abbas, J., & Hershkovitz, I. (2011). Hyperostosis frontalis interna: What does it tell us about our health? *American Journal of Human Biology: The Official Journal of the Human Biology Council*, 23, 392–397. <https://doi.org/10.1002/ajhb.21156>
- May, H., Peled, N., Dar, G., Cohen, H., Abbas, J., Medlej, B., & Hershkovitz, I. (2011). Hyperostosis frontalis interna: Criteria for sexing and aging a skeleton. *International Journal of Legal Medicine*, 125, 669–673. <https://doi.org/10.1007/s00414-010-0497-6>
- May, H., Peled, N., Dar, G., Hay, O., Abbas, J., Masharawi, Y., & Hershkovitz, I. (2010). Identifying and classifying hyperostosis frontalis interna via computerized tomography. *Anatomical Record (Hoboken, N.J.)*, 293(12), 2007–2011. <https://doi.org/10.1002/ar.21274>
- McKinley, J. I. (1993). Bone fragment size and weights of bone from modern British cremations and the implications for the interpretation of archaeological cremations. *International Journal of Osteoarchaeology*, 3(4), 283–287. <https://doi.org/10.1002/oa.1390030406>
- McKinley, J. I. (1994). Bone fragment size in British cremation burials and its implications for pyre technology and ritual. *Journal of Archaeological Science*, 21, 339–342. <https://doi.org/10.1006/jasc.1994.1033>
- McKinley, J. I. (2000). The analysis of cremated bone. In M. Cox & S. Mays (Eds.). *Human osteology in archaeology and forensic science* (pp. 403–421). Greenwich Medical Media.
- McKinley, J. I. (2004). The human remains and aspects of pyre technology and cremation rituals. In H. E. M. Cool (Ed.). *The Roman cemetery at brougham, Cumbria: Excavations 1966–67, Britannia monograph 21* (pp. 283–310). Society for the Promotion of Roman Studies.
- Moore, S. (1936). Calvarial hyperostosis and the accompanying symptom complex. *Medicine Journal of Nervous and Mental Disease*, 35(5), 975–981. <https://doi.org/10.1001/archneurpsyc.1936.02260050049003>
- Moore, S. (1955). Hyperostosis cranii. *Radiology*, 65, 285. <https://doi.org/10.1148/65.2.285b>
- Mulhern, D. M., Wilczak, C. A., & Dudar, J. C. (2006). Brief communication: Unusual finding at Pueblo Bonito: Multiple cases of hyperostosis frontalis interna. *American Journal of Physical Anthropology*, 130, 480–484. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20396>

- Nikolić, S., Džonić, D., Živković, V., Babić, D., Juković, F., & Djurić, M. (2010). Rate of occurrence, gross appearance, and age relation of hyperostosis frontalis interna in females: A prospective autopsy study. *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, 31(3), 205–207. <https://doi.org/10.1097/PAF.0b013e3181d3dba4>
- Nowakowski, D., & Kwiatkowska, B. (2005). A case of hyperostosis frontalis interna (HFI) in a medieval skeleton from lower Silesia (Poland). *Journal of Paleopathology*, 17(3), 5.
- Ognard, J., Barberot, C., Garetier, M., Abed Rabbo, F., & Ben Salem, D. (2016). Diagnostic des ostéocondensations et des hyperostoses crâniennes. In *Radiologie et imagerie médicale - Musculosquelettique - Neurologique - Maxillofaciale* 2(2). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1879-8551\(15\)63846-5](https://doi.org/10.1016/S1879-8551(15)63846-5)
- Ortner, D. J. (2003). *Identification of pathological conditions in human skeletal remains* (2nd ed.). Academic press; p. 662.
- Papadimitriou, A. (2016). The evolution of the age at menarche from pre-historical to modern times. *Journal of Pediatric and Adolescent Gynecology*, 29, 527–530. <https://doi.org/10.1016/j.jpag.2015.12.002>
- Quatrehomme, G. (2015). *Traité d'anthropologie médico-légale* (1ère édition ed.). de boeck; p. 1862.
- Richter, L. (1939). Zur Hyperostose des Stirnbeins. *Röntgenpraxis*, 11, 651–662. Verlag nicht ermittelbar
- Rubini, M., Licitra, M., & Baleani, M. (1997). A study of cremated human remains from an urn field dating to the final phase of the bronze age, found at “Le caprine” (Guidonia, Rome, Italy 10th–9th century B.C.). *International Journal of Anthropology*, 12, 1–9. <https://doi.org/10.1007/BF02447891>
- Rühli, F. J., Böni, T., & Henneberg, M. (2004). Hyperostosis frontalis interna: Archaeological evidence of possible microevolution of human sex steroids? *Homo: Internationale Zeitschrift Fur Die Vergleichende Forschung am Menschen*, 55, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2004.04.003>
- Schmitt, A. (2002). Estimation de l'âge au décès des adultes: des raisons d'espérer [in French]. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 14, 51–73.
- Schmitt, A. (2005). Une nouvelle méthode pour estimer l'âge au décès des adultes à partir de la surface sacro-pelviennne iliaque. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 17, 89–101. <https://doi.org/10.4000/bmsap.943>
- Schultz, J. J., Warren, M. W., & Krigbaum, J. S. (2008). Analysis of human cremains: gross and chemical methods. In C. W. Schmidt & S. A. Symes (Eds.). *The analysis of burned human remains* (pp. 75–94 viii). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012372510-3.50006-X>
- Schwartz, D. (1963). *Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes*. Flammarion; p. 296.
- Shahin, A. A., Alhoseiny, S., & Aldali, M. (2013). Hyperostosis frontalis interna: An Egyptian case referred to the second dynasty (2890–2650BC) from Tarkhan-Egypt. *The Egyptian Rheumatologist*, 36, 41–45. <https://doi.org/10.1016/j.ejr.2013.08.002>
- Shipman, P., Foster, G., & Schoeninger, M. (1984). Burnt bones and teeth: An experimental study of color, morphology, crystal structure and shrinkage. *Journal of Archaeological Science*, 11, 307–325. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(84\)90013-X](https://doi.org/10.1016/0305-4403(84)90013-X)
- Symes, S., Rainwater, C., Chapman, E., Gipson, D., & Piper, A. (2008). Patterned thermal destruction of human remains in a forensic setting. In C. W. Schmidt & S. A. Symes (Eds.). *The analysis of burned human remains* (pp. 15–54 i-vi). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012372510-3.50004-6>
- Tamborini, A. (2014). Ménopause: Définitions—Age—Diagnostic. *Genesis*, 180(1). <https://www.revuegenesis.fr/menopause-definitions-age-diagnostic>
- Ubelaker, D. H. (1989). In D. H. Ubelaker (Ed.). *Human skeletal remains, excavation, analysis, interpretation* (2nd ed.). Smithsonian Institute Press.
- Van Andringa W, Creissen T, Duday H, (2016). La nécropole romaine de Porta Nocera à Pompéi : naissance et développement d'un paysage funéraire romain (1er siècle av. J.-C. – 1er siècle apr. J.-C.). *Chronique des activités archéologiques de l'École française de Rome* [En ligne], Les cités vésuviennes, mis en ligne le 21 mars 2016. <http://journals.openedition.org/cefr/1528>, <https://doi.org/10.4000/cefr.1528>
- Van Andringa, W., Duday, H., Lepetz, S., Joly, D., & Lind, T. (2013). *Mourir à Pompéi. Fouille d'un quartier funéraire de la nécropole romaine de Porta Nocera*. Ecole Française de Rome; p. 1451.
- Van Deest, T. L., Murad, T. A., & Bartelink, E. J. (2011). A re-examination of cremains weight: Sex and age variation in a Northern California sample. *Journal of Forensic Sciences*, 56, 344–349. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2010.01658.x>
- Wahl, J. (2008). Investigations on pre-roman and roman cremation remains from southwestern Germany: results, potentialities and limits. In C. W. Schmidt & S. A. Symes (Eds.). *The analysis of burned human remains* (pp. 145–161). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012372510-3.50011-3>
- Western, A. G., & Bekvalac, J. J. (2017). Hyperostosis frontalis interna in female historic skeletal populations: Age, sex hormones and the impact of industrialization. *American Journal of Physical Anthropology*, 162, 501–515. <https://doi.org/10.1002/ajpa.23133>
- Western, A. G., & Bekvalac, J. J. (2019). *Manufactured bodies : The impact of industrialisation on London health*. Books; p. 272.
- White, T., Black, M., & Folkens, P. (2016). *Traité d'ostéologie humaine* (1ère édition ed.). De Boeck supérieur; p. 720.

**How to cite this article:** Du Fayet de la Tour, A., Couture, C., Paraf, F., & Duday, H. (2022). Hyperostosis frontalis interna: A new perspective in burned individuals' analysis for determining age and sex from archeo-anthropological and medicolegal contexts. *International Journal of Osteoarchaeology*, 1–14. <https://doi.org/10.1002/oa.3181>

**Annexe 8** : fiches méthodologiques

- Méthodologie pour la levée de corps
- Méthodologie d'analyse

## 1. INTRODUCTION

Toute découverte de fragments d'os brûlés, implique une évaluation par un spécialiste (médecin légiste ou anthropologue). Il incombe aux primo-intervenants de supposer que les fragments sont des restes humains, jusqu'à preuve du contraire.

Fréquemment, lors de la découverte d'os ou de fragments osseux, des photographies sont réalisées et adressées au médecin légiste ou à l'anthropologue afin de statuer sur l'origine humaine ou non des restes. L'action du feu rendant très délicat le processus d'identification, une évaluation sur place est préférable dans la majorité des cas de découverte d'os brûlés. Par ailleurs, si l'origine humaine est avérée une levée de squelette s'imposera de fait.

⇒ **L'objectif de ce guide est de couvrir les principaux aspects de la récupération sur le terrain.**

Il n'existe pas de protocole universel de levée de squelette, nous proposons ici un guide simplifié, basé sur les méthodes développées par l'archéologie afin d'optimiser le recueil d'informations sur le terrain.

**L'acquisition des données sur le terrain est une étape fondamentale.** Par définition l'acte du prélèvement détruit les preuves. L'enregistrement des données aura donc pour objectif de transcrire de façon la plus fiable possible, les informations détruites au fur et à mesure de l'avancement de la levée du squelette. Ce sont ces informations qui constitueront *a posteriori* les éléments de preuves qui permettront de reconstituer les faits.

Plusieurs choix méthodologiques ou techniques devront être faits à différents moments de la levée de squelette. Il sera nécessaire pour cela de s'adapter aux éléments découverts et aux questionnements qu'ils pourront susciter. **À tout moment dans le processus de récupération, un *feed-back* permettra d'adapter les méthodes mises en œuvre** (figure 1).

Le choix des méthodes et du système d'enregistrement dépendra à la fois du contexte et de la nature du lieu. **La politique d'enregistrement des données devra nécessairement être discutée entre les médecins légistes, les personnels d'identifications et les experts anthropologues (si possible), selon les attentes du magistrat en charge du dossier.** Il est essentiel de maximiser le potentiel de récupération des restes et des preuves associées afin de servir les objectifs de l'enquête.

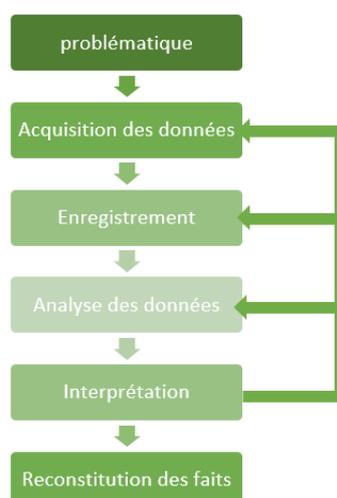


Figure 1 : schéma méthodologique permettant d'aborder une scène de découverte de restes humains brûlés

## 2. MATERIEL NECESSAIRE

L'équipement proposé ici est un équipement de base, minimal. Il pourra être adapté dans certains cas particulier tels que la récupération de restes disséminés sur de vastes zones, les catastrophes de masse, les levées de squelette criminelles, la découverte de restes humains en milieu subaquatique...

- Matériel de protection de la scène de type ruban etc.
- Appareil de photographie numérique ± vidéo
- Matériel simple de topographie : niveau laser, mètre, mire graduées...
- Tamis avec une maille de 1 à 2 mm ou tamis à farine
- Truelles, pinces, pelles à poussière
- Outils en bois
- Kits de prélèvements stériles + gants et masques
- Contenants en papier kraft
- Contenants rigides
- Boîtes à membranes
- Logiciel de photogrammétrie, nous proposons :
  - version payante Metashape (<https://www.agisoft.com/downloads/installer/>)
  - open source MicMac ou Meshroom (<https://alicevision.org/#meshroom> ; <https://micmac.enst.fr/index.php/Presentation>)

## 3. MISE EN SECURITE DU SITE ET DE LA STRUCTURE

La première étape indispensable est de s'assurer de la mise en sécurité du site.

Une prudence accrue doit être de mise sur les lieux d'incendies récents : il peut exister une combustion lente et prolongée de certains matériaux, des structures peuvent avoir été fragilisées par l'action des flammes, dans les véhicules incendiés par exemple, certains points chauds peuvent persister...

**L'examen de la scène et la levée de squelette pourra débuter uniquement après l'autorisation des experts incendies.**

Un équipement de sécurité sera porté si nécessaire : casque, botte de sécurité, combinaison, équipement de protection pulmonaire et oculaire.

Par ailleurs, un entretien avec les pompiers et experts incendies est nécessaire afin de **connaître les perturbations qui incombent à l'extinction des flammes (refroidissement brutal, effondrement de structure, piétinement)**. Ces éléments devront obligatoirement être enregistrés pour l'analyse future.

#### 4. PRESERVATION DE LA SCENE PAR LES ENQUETEURS

Une première évaluation visuelle par les enquêteurs permet de délimiter un large périmètre où pourraient être présents les restes humains et les éléments de preuves.

Afin de limiter le risque de destruction ce périmètre sera délimité par du ruban de scène de crime et les premiers éléments découverts seront repérés. Ce périmètre pourra varier au fur et à mesure du processus de recherche.

#### 5. EXAMEN APPROFONDI DE LA SCENE

Il s'agit d'une **inspection visuelle pour tenter de connaître l'extension de la scène.**

Cette étape doit être réalisée par du personnel expérimenté. Elle dépend de la capacité du chercheur à reconnaître des restes humains : des connaissances de l'anatomie humaine sont vivement souhaitables !

Elle doit être adaptée au contexte et au lieu de découverte.



**Il faut tenir compte du fait que certains matériaux carbonisés (matériaux de constructions, plastiques...) peuvent avoir des structures très similaires à l'os humain brûlés !**

Dans la plupart des cas, une simple inspection visuelle permettra de mettre en évidence les restes humains. Parfois une inspection plus approfondie du lieu est nécessaire.

Si les restes humains sont découverts à l'extérieur, il existe la possibilité de réaliser un schéma de recherche en quadrillage. Des lignes d'individus distants d'environ 1 m. (proximité suffisante pour avoir un chevauchement des champs de vision) parcourant une zone au même rythme en examinant le sol. Une fois que la ligne a parcouru une distance, les individus se placent sur une autre ligne perpendiculaire et reparcourent la même zone sur cette trajectoire perpendiculaire à l'itinéraire précédent, ainsi de suite pour les quatre côtés du carré (figure 2). Cette méthode permet d'examiner visuellement une zone quatre fois, sous deux angles différents.

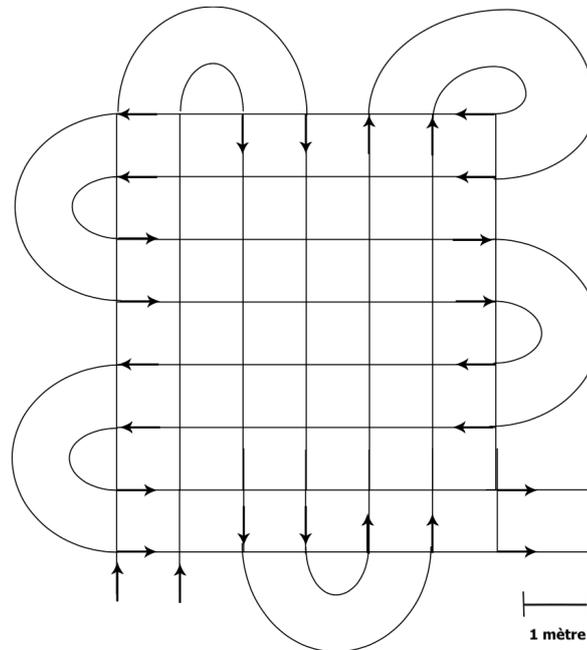


**Si l'on suspecte une tentative de dissimulation ou des restes humains enterrés, il est important de réaliser des sondages de toutes les perturbations du sol, afin de détecter d'éventuels restes enfouis.**

La recherche de situations suspectes doit être systématique.

Il existe également la possibilité de faire appel à des brigades cynophiles avec des chiens détecteurs de cadavres. Ils sont capables de capter l'odeur des os brûlés et de conduire les enquêteurs à des restes humains ayant été enfouis ou immergés.

Enfin, une observation attentive des insectes nécrophages peut parfois conduire directement aux restes humains, dans le cas où il persiste des tissus mous.



*Figure 2 : schéma de recherche en quadrillage. Une flèche symbolise un « chercheur ». Sur ce schéma seulement deux personnes interviennent.*

## **6. DELIMITATION PRECISE DES ZONES CONCERNEES PAR LA PRESENCE DE RESTES HUMAINS**

À l'issue de l'examen approfondi des lieux, une nouvelle délimitation plus précise de la (ou des) zone(s) concernée(s) par la présence de restes humains doit être réalisée. Cette zone sera clairement identifiée (rubalise, marqueurs de preuves).

La localisation et la position des éléments squelettiques seront ajoutés à une cartographie détaillée.

## **7. COUVERTURE PHOTOGRAPHIQUE ± VIDEO**

**Des vues générales et détaillées des zones où l'on soupçonne la présence de restes humains devront être réalisées avant toutes modifications (déplacement des débris ou prélèvement des restes humains).**

Il est important de noter le jour, l'heure de la photographie et l'identité de l'auteur ainsi que l'état d'avancement du dégagement ou de la récupération au moment où a été prise la photo.

## 8. METHODE DE FOUILLE SIMPLIFIEE

Les observations de terrain sont les bases sur lesquelles vont s'appuyer tous les raisonnements ultérieurs. Elles doivent être les plus complètes et précises possible. L'acte de prélèvement est destructeur, si l'enregistrement n'est pas exhaustif, l'information sera perdue.

**Cette étape doit être réalisée dans des conditions d'éclairage optimal et dans la mesure du possible, par du personnel qualifié, possédant des connaissances en ostéologie humaine.**

Elle permettra de préciser la position précise des restes humains. De même tout élément de preuve associé devra être positionné et enregistré.

Il conviendra également de rechercher la présence d'incohérences dans l'état des restes et des objets associés. Pour cela, il est nécessaire de posséder un minimum de connaissances, à la fois sur la dynamique des incendies et les réactions du corps humain à la chaleur. Un travail de collaboration avec des anthropologues et experts incendies est souhaitable à cette étape.

Plusieurs modes de récupération des restes sont possibles.

**✂ Utilisation d'une méthodologie d'enregistrement archéologique afin de pouvoir observer la dispersion des restes dans l'espace**

Cette méthode ne concerne pas uniquement les restes enfouis. Les effondrements de structures par exemple dans les incendies de bâtiments, peuvent impliquer de véritables fouilles en « stratigraphie ». Les scènes de crémation ont tendance à contenir de nombreux débris qui peuvent être superposés. Il est important de prendre en compte cette dimension spatiale dans l'analyse.

L'objectif de l'analyse spatiale est de pouvoir observer la dispersion des objets dans l'espace et ainsi de déterminer les processus générateurs de la dispersion observée : processus initial de dispersion au moment de la fragmentation + processus de mouvement des fragments après la fragmentation. Pour ce faire, il est nécessaire de connaître la situation tridimensionnelle des objets au moment de leur découverte. Une méthode de relevé précise est alors requise. Nous pouvons proposer la méthode suivante fondée sur un relevé photogrammétrique.

À partir d'un ensemble d'images numériques prises de plusieurs points de vue différents et se recouvrant au moins à 60 %, il est possible de reconstruire numériquement un modèle 3D de la scène. Le nombre de photographies dépend de la complexité géométrique de la scène et de sa taille. La résolution des photos dépend du niveau de détail attendu (pour donner un ordre d'idée, entre 60 et 100 photos avec une résolution de 8 millions de pixels ont permis d'obtenir des modèles à un niveau de détail inférieur au millimètre sur des zones planes d'environ 30 m<sup>2</sup>.)

**Ces méthodes permettent :**

- **d'obtenir un modèle tridimensionnel texturé autorisant de travailler sur le modèle,**
- **d'extraire des orthophotographies, des modèles numériques de terrain, ou encore des coupes et sections.**

Afin de mettre à l'échelle ce modèle tridimensionnel et de l'orienter dans l'espace, il est nécessaire d'utiliser des repères qui seront présents sur les modèles. **Pour une scène simple, il est possible d'utiliser des mètres ou des mires graduées permettant la mise à l'échelle.** Afin de s'assurer de l'horizontalité du plan, il est possible d'employer un niveau pour placer les mètres sur un plan horizontal.

Pour des scènes plus complexes, nécessitant plusieurs passes de prélèvements et donc une série de relevés successifs, il est nécessaire de placer des repères fixes qui resteront en place tout au long du processus de prélèvement. Comme ces repères seront présents sur tous les modèles 3D calculés, il sera possible de les assembler et donc de confronter les informations en volume. Ces repères peuvent être de simples clous, **placés à une distance connue et mis à la même altitude** à l'aide d'une nivelle par exemple.

#### **La mise en place d'un carroyage est possible pour aider le relevé.**

La taille des carrés sera arbitrairement définie et dépendra de la taille de la scène à analyser. Il faudra être prudent lors de l'implantation du carroyage, afin de ne pas risquer de détériorer des restes humains ou autres éléments de preuves. La grille de carroyage sera orientée à partir du nord magnétique. La mise en place d'un quadrillage de la scène, délimité par des ficelles permet une excellente aide visuelle pour se repérer.

**La fouille pour la récupération des fragments et des objets se fera par décapages successifs. La fouille autour des fragments d'os se fera généralement à l'aide d'outil en bois,** moins dense que l'os, ils risquent moins de l'endommager. Après le dégagement, les éléments osseux ou autres objets de preuves pourront être situés et enregistrés dans les trois plans de l'espace.

Au fur et à mesure que les éléments de preuve sont identifiés dans le carré, ils doivent être photographiés in situ avec et sans échelle.

#### **✂ Prélèvement en bloc**

Les lieux confinés, les endroits clos ne nécessitent pas forcément la mise en place d'une grille pour la récupération, parfois, si les structures sont réduites, un prélèvement en bloc est possible suivi d'une fouille en laboratoire.

Lors de la fouille un prélèvement par passe de 2 cm environ, associé à une couverture photographique permettra de ne pas perdre d'informations concernant l'organisation des restes osseux.

Un examen tomodensitométrique pourra être réalisé au préalable.

## **9. PROCESSUS DE PRELEVEMENT / RECUPERATION DES RESTES OSSEUX**

Après avoir relevé la position des éléments dans les trois plans de l'espace et effectué l'enregistrement photographique associé à une brève fiche de description, les os pourront être prélevés.

L'enlèvement des gros fragments se fera à la main. Pour la récupération, il existe la possibilité d'utiliser des pinces ou des brosses souples, afin de retirer délicatement les débris déposés sur les fragments d'os brûlés.

Les parties intactes du corps seront enlevées en bloc et conservées dans des contenants appropriés.

Si la taille des fragments rend l'enlèvement manuel peu pratique, l'utilisation d'outils habituellement utilisés en archéologie (outils en bois, pinceau, pelle à poussière) pourra permettre de les collecter pour un tri ultérieur.

Le matériel récupéré sera placé dans des contenants appropriés.

De façon préférentielle, un pré-tri des éléments sera réalisé. **Si plusieurs individus sont détectés, ils seront conditionnés séparément.**

De même, **si possible les régions anatomiques pourront être conditionnées séparément et par côté.** On peut proposer idéalement le système suivant, pour chaque passe de démontage :

- Bloc crânio-facial, mandibule ;
- Dents isolées ;
- Os hyoïde, osselet de l'oreille, cartilages ;
- Sternum ;
- Rachis ;
- Côtes droite / gauche ;
- Ceinture scapulaire droite / gauche (scapula-clavicule) ;
- Membre supérieur droit / gauche (humérus, ulna, radius) ;
- Main droite / gauche (carpes, métacarpes, phalanges) ;
- Ceinture pelvienne (os coxaux, sacrum, coccyx) ;
- Membre inférieur droit / gauche (fémur, tibia, fibula)
- Pied droit / gauche (tarses, métatarses, phalanges)
- Fragments indéterminés.

**Il faudra éviter de placer des os brûlés humides dans des contenants hermétiques. Préférez des sacs en papier kraft, permettant à l'humidité de s'échapper progressivement et de résister à la formation de moisissure.**

Les petits objets friables et fragiles pourront être stockés dans des petits flacons de prélèvement contenant un support stérile et souple ou des boîtes à membrane.

Chaque contenant saisi sera scellé et recevra un numéro qui devra être enregistré.

Lors de la prise de photographies, il peut être intéressant d'identifier sur la fiche le numéro de l'élément ou du scellé.

De même à cette étape il conviendra de prélever tout autre élément de preuve associé ainsi que réaliser les différents prélèvements habituels (entomologiques par exemple).

L'étape du prélèvement se fera au maximum dans des conditions stériles.

Un croquis de la répartition des divers éléments peut également être réalisé.

Les sédiments autour des restes humains seront également prélevés afin d'être tamisés, à la recherche de petits fragments d'intérêt (osseux, ballistique...). Lors du prélèvement des sédiments, il sera important de noter les changements de couleur, de nature, de texture et de densité de la terre environnante

L'utilisation de ces techniques permettra par exemple de mettre en évidence le contour d'une fosse creusée pour le dépôt du cadavre.

## 10. TAMISAGE

Un tamisage systématique des sédiments à la recherche de petits fragments osseux d'intérêt ou d'éléments de preuve devra être associé à la récupération des fragments osseux.

Il sera effectué avec petit tamis géologique à la maille de 1 à 2 mm ou à l'aide de petites passoirs à maille fine (passoirs à farine). Afin de limiter le processus de fragmentation secondaire, il sera précautionneux. Possible tamisage à sec en premier pour éliminer les particules fines puis à l'eau dans un second temps (flux léger). Après tamisage à l'eau les fragments devront être séchés à l'air pendant quelques heures.



- **Sur le terrain, il est important de prendre un maximum de notes relatives au déroulement de l'opération (conditions matérielles, moyens mis en œuvre, contraintes et choix effectués).**
- **Les données relatives à la structure sont indispensables : assemblage osseux dans un contenant, affleurant, enterrés...**
- **Si l'assemblage est enterré, une description des données stratigraphiques est importante pour une meilleure compréhension de l'assemblage et la reconstitution des faits.**
- **Des plans de situations ou des plans de secteur pourront être réalisés figurant l'implantation des restes humains sur la scène, la topographie de la scène et la répartition des échantillons prélevés.**
- **Un relevé photographique avec des images verticales pouvant être retravaillées directement sur ordinateur et des photographies documentaires avec échelles sont indispensables.**

## 11. CAS PARTICULIERS

### 11.1 Restes brûlés en milieu subaquatiques.

L'idée de retrouver des restes brûlés dans l'eau peut paraître saugrenue. Les auteurs d'homicides qui usent de la carbonisation à des fins de dissimulation, découvrent parfois que des restes humains ne brûlent pas entièrement. Ayant besoin d'un plan B, ils les jettent à l'eau. Tout comme les recherches pédestres, une recherche systématique dans l'eau devrait être menée, en cas de disparition de restes humains.

Pour employer ce type de recherche, les plongeurs doivent être formés afin de minimiser la perturbation des sédiments au fond de l'eau. Le sens du courant et la turbidité de l'eau sont des facteurs à prendre en compte.

### **11.2 Catastrophe de masse**

La recherche des restes dans ce type de contexte nécessite une stratégie coordonnée.

Il est recommandé de faire appel à une brigade canine pour la mise au jour des restes.

De même, dans ce contexte, l'utilisation d'un système de cartographie des restes est essentiel.

Une équipe pluridisciplinaire de médecins légistes, anthropologues et odontologiste est indispensable sur le terrain. Elle doit être coordonnée par un expert ayant de l'expérience et une bonne connaissance du matériel brûlé.

**NOTES :**

## 1. TRI DES FRAGMENTS

L'analyse anthropologique débute nécessairement par une opération de tri méthodique des fragments puis de la détermination anatomique de chaque élément osseux.

À cette étape le tamisage doit avoir été réalisé de façon à intégrer les petits fragments récupérés.

## 2. DETERMINATION ANATOMIQUE

L'étape de détermination anatomique doit être la plus précise possible. Toute l'analyse en découlera : dénombrement, identification biologique, analyse spatiale...

**Lors de l'étape de détermination des notes précises doivent être rédigées.** Elles doivent préciser **l'origine anatomique exacte du fragment, sa latéralisation si possible, les stigmates de combustions** (couleur, fissuration, fragmentation, déformation...), **la présence de caractéristiques d'identification (âge, sexe, robustesse), d'élément d'ordre pathologique ou traumatique.**

Lors de cette étape, l'état de fragmentation et de déformation des os rendant complexe la détermination, il est conseillé de s'appuyer sur des ouvrages d'ostéologie ou des ossements de références. Il est toujours judicieux de procéder à des vérifications afin d'éviter toute erreur d'identification susceptible de contribuer à une interprétation erronée ultérieure.

Des fiches de conservation par assemblage et des tableaux récapitulatifs des fragments d'intérêts pourront être remplis afin de faciliter les diverses phases de l'analyse.

Nous proposons l'utilisation de notre tableau récapitulatif des fragments d'intérêts à cette étape de l'enregistrement.

## 3. COMPTAGE ET PESEE DES FRAGMENTS

Pour chaque assemblage osseux, les fragments issus de chaque passes de relevés doivent être comptabilisés (hors esquilles) et pesés, par région anatomique. Les résultats seront enregistrés sur papier dans le dossier relatif à chaque assemblage, puis dans le modèle de tableur établi par Duda et al. (2000).

## 4. DENOMBREMENT DES INDIVIDUS

L'estimation du nombre minimal d'individus sera réalisée à l'issue de la détermination anatomique de l'ensemble des fragments. Il tiendra compte de tous les facteurs d'exclusions potentiels : la latéralisation des fragments, des indicateurs d'âge, de sexe, de robustesse, de l'évaluation des pathologies et des stigmates de crémation.

## **5. ÉVALUATION DU SEXE DES INDIVIDUS**

Les méthodes habituelles pouvant rarement être appliquées en contexte brûlés, une appréciation de l'ensemble des caractéristiques osseuses relative au sexe doit être réalisée.

Un tableau regroupant les fragments d'intérêt dans l'évaluation du sexe pourra être rempli. L'évaluation du sexe se fera suivant un faisceau d'arguments. Si le nombre de critère est trop faible ou que les critères sont discordants, le sexe de l'individu restera classé parmi les indéterminés.

## **6. ESTIMATION DE L'ÂGE AU DECES DES INDIVIDUS**

De même que pour l'évaluation du sexe, les méthodes habituelles du fait de la fragmentation et de la déformation seront rarement appliquées. Nous proposons de remplir un tableau regroupant les fragments d'intérêt dans l'estimation de l'âge et de conclure sur un faisceau d'augment.

Nous proposons l'utilisation de catégories d'âges suffisamment large pour plus de fiabilité.

- groupe 0 → 0 à 1 ans
- *Infans 1* → de 1 à 6 ans
- *Infans 2* → de 7 à 13 ans
- *Juvenis* → de 14 à 19 ans
- Adultes jeunes → de 20 à 29 ans
- Adultes → de 30 à 59 ans
- Adultes agés → supérieur à 60 ans.

## **7. RECUEIL DES INDICATEURS DE PATHOLOGIE ET DE TRAUMATISME**

Un tableau répertoriant chaque élément affecté par une pathologie ou un traumatisme et son degré d'expression peut être rempli afin de retrouver facilement le fragment pour comparaison avec le dossier médical.

Pour les traumatismes noter l'aspect de la lésion (ancien, récent, péri-mortem) peut fournir des indications soit sur l'identification de l'individu (identification comparative avec le dossier médical) soit sur l'évaluation des causes et mécanismes du décès.

## **8. RECHERCHE DES LIAISONS ANATOMIQUES**

Afin de faciliter l'étape de la recherche des liaisons anatomique, un tableau reprenant pour chaque assemblage les fragments d'intérêt doit nécessairement être rempli

✂ Tableaux récapitulatifs des fragments d'intérêt pour l'analyse (en bleu les fragments les plus pertinents chez les immatures et en rose chez les périnataux)

	Dénombrement	Identification biologique			Liaisons	Exclusions	
		Sexe	Âge	Robustesse, pathologie et traumatismes			
<b>Bloc crânio-facial</b>	Voûte indéterminée			- fragments de voûte			
	Os temporal	- région pétreuse - région du conduit auditif externe - processus mastoïde - condyles temporaux - processus zygomatique et région rétro-mastoidienne - écaille temporale - fosse mandibulaire	- processus mastoïde		- fragments de voûte	- région pétreuse - processus zygomatique - processus mastoïde - processus styloïde	- région pétreuse - région du conduit auditif externe
	Os frontal	- processus zygomatique - toit et bord supérieur des orbites - glabella	- glabella - toit des orbites - bords supra-orbitaires - écaille frontale	- écaille frontale	- fragments de voûte	- crête frontale médiane - processus zygomatique - écaille frontale - glabella	- écaille - processus zygomatique - région orbitaire - crête frontale médiane
	Os pariétal				- fragments de voûte		
	Os zygomatique	- os zygomatique globalement - arcade zygomatique	- arcade zygomatique				
	Os sphénoïde	- grandes ailes					
	Os ethmoïde	- processus crista galli					
	Os occipital	- région basilaire - pars lateralis	- Protubérance occipitale externe		- fragments de voûte	- écaille	- région basilaire - protubérance occipitale interne
	Os vomer	- os vomer					
	Maxillaire	- os maxillaire de façon globale - processus frontaux - bord inférieur des orbites				- processus frontal	- os maxillaire de façon globale
	Mandibule	- branche mandibulaire : - processus coronoïde et condyle - symphyse				- branche : condyle et processus coronoïde - corps	- corps - condyle - processus coronoïde - région symphysaire
	Osselet de l'oreille moyenne	- incus et malleus					
Dents			- couronnes - apex racinaires				

# Squelette infra-crânien

	Dénombrement	Identification biologique			Liaisons	Exclusions
		Sexe	Âge	Robustesse, pathologie et traumatismes		
Os hyoïde	- corps					
Cartilages laryngés			Cartilages laryngés			
Rachis	- axis : processus odontoïde et corps de l'axis - atlas : global + surface pour la dent de l'axis - coccyx		- ensemble de rachis	- ensemble de rachis	- atlas et axis - vertèbres cervicales - vertèbres thoraciques	- atlas et axis - vertèbres cervicales - vertèbres thoraciques
Côtes			- extrémité sternale - cartilage costo-sternaux	- ensemble des côtes		
Scapula	- épine - cavité glénoïdale - scapula globale			- acromion - cavité glénoïdale	- processus coracoïde	- épine
Clavicule	- extrémités médiale et latérale - diaphyse		- extrémité sternale			- extrémité sternale
Humérus	- extrémité distale et proximale - extrémité distale de la diaphyse	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- extrémités - diaphyse	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- diaphyse - extrémité distale	- extrémité distale
Radius	- extrémité proximale	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- extrémités - diaphyse	- diaphyse, tubérosité bicipitale - extrémité proximale - extrémité distale		- extrémité proximale
Ulna	- extrémité proximale - diaphyses	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- extrémités - diaphyse	- diaphyse - extrémité proximale, olécrane - extrémité distale	- extrémité proximale - extrémité distale	
Carpe	- tous les os sauf trapézoïde et triquetrum			- os scaphoïde		
Métacarpe	- MTC 3			- métacarpiens	- métacarpiens	
Phalanges des mains					- phalanges des mains	
Os coxal	- ischium	- pubis / lame quadrilatère - branche ischio pubienne - grande incisure ischiatique - surface auriculaire - région pré-auriculaire - sulcus post auriculaire - tubercule pyramidal - ligne arquée pour recherche de l'arc composé	- crête iliaque - symphyse pubienne - surface sacro-pelvienne iliaque - région acétabulaire	- crête iliaque - acétabulum		- ischium
Fémur	- extrémités distale et proximale - épiphyse proximale - extrémité proximale de la diaphyse	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- extrémités - diaphyse	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- extrémité proximale - diaphyse	- extrémité proximale - diaphyse
Patella	- patella			- patella	- patella	
Tibia	- extrémité proximale	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- extrémités - diaphyse	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- diaphyse - extrémité proximale	- diaphyse
Fibula	- extrémités distale et proximale	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- extrémités - diaphyse	- diaphyse - extrémité proximale - extrémité distale	- diaphyse - extrémité distale	- extrémité distale
Tarse	- calcanéus - cuboïde - os cunéiformes			- calcanéus - naviculaire - os cunéiforme	- calcanéus	- talus - calcanéus
Métatarse	- MTT 1			- MTT1	- métatarsiens	- métatarsiens

**✂ Inventaire des restes dentaires**

**Clé de remplissage :**

- 1 : présente, incluse ou en cours de développement
- 2 : présente, développement complet en occlusion
- 3 : absente, perte post-mortem
- 4 : absente, perte ante-mortem
- 5 : absente, pas d'os alvéolaire associé
- 6 : absence congénitale
- 7 : présente mais altéré ou fragmenté rendant l'analyse impossible
- 8 : présente mais inobservable

<b>Dents permanentes</b>		<b>I1</b>	<b>I2</b>	<b>C</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>
<b>Maxillaire</b>	<b>Droite</b>								
<b>Maxillaire</b>	<b>Gauche</b>								
<b>Mandibulaire</b>	<b>Droite</b>								
<b>Mandibulaire</b>	<b>Gauche</b>								

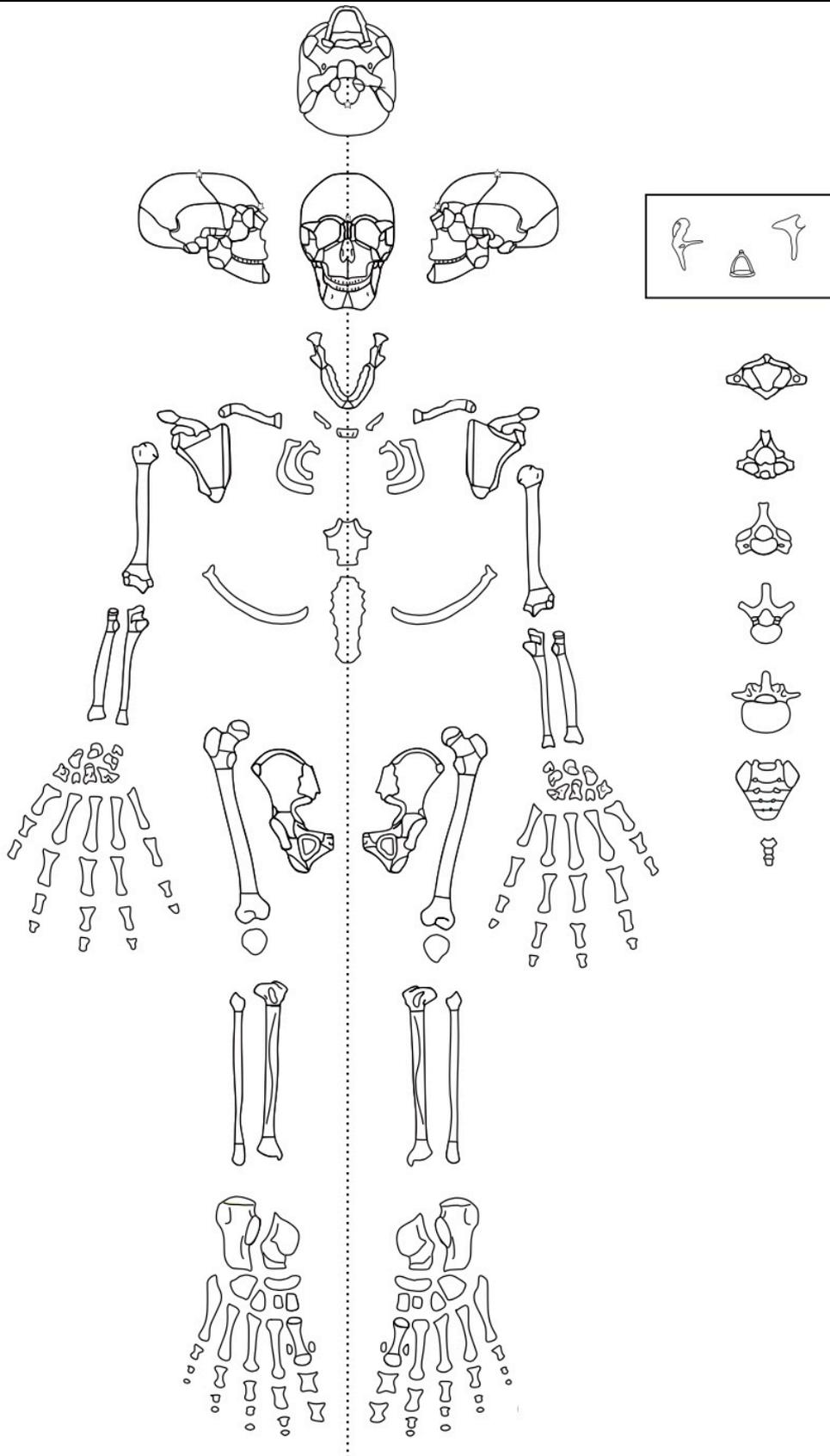
<b>Dents déciduales</b>		<b>I1</b>	<b>I2</b>	<b>C</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>
<b>Maxillaire</b>	<b>Droite</b>					
<b>Maxillaire</b>	<b>Gauche</b>					
<b>Mandibulaire</b>	<b>Droite</b>					
<b>Mandibulaire</b>	<b>Gauche</b>					



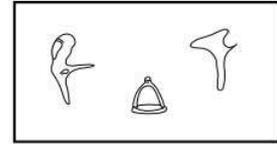
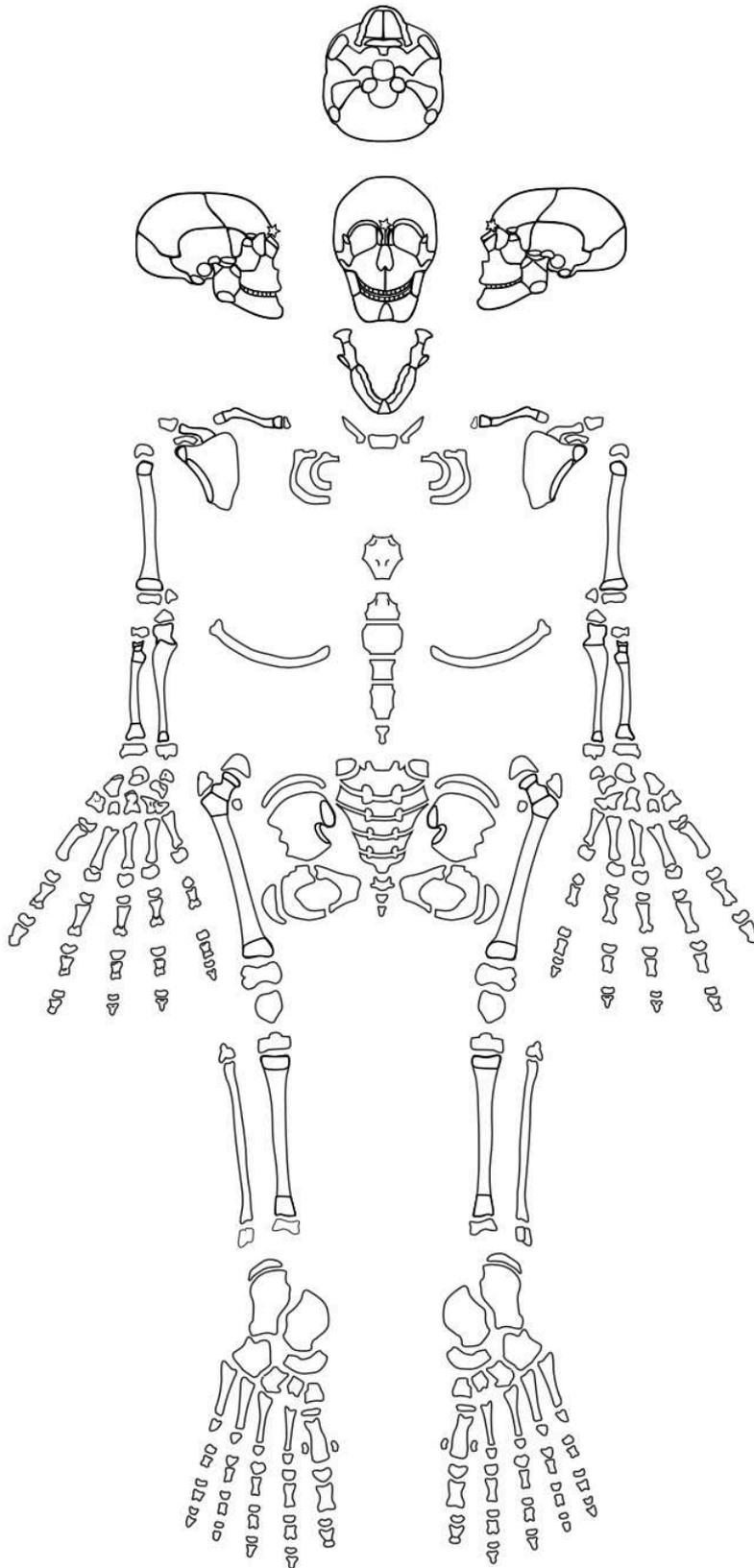




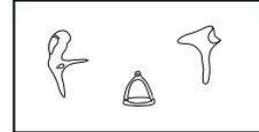
Adultes



Sujets immatures



Sujets périnataux



VERTEBRES	arc droit	corps	arc gauche
C 1			
C 2			
C 3			
C 4			
C 5			
C 6			
C 7			
rang indéterminé			

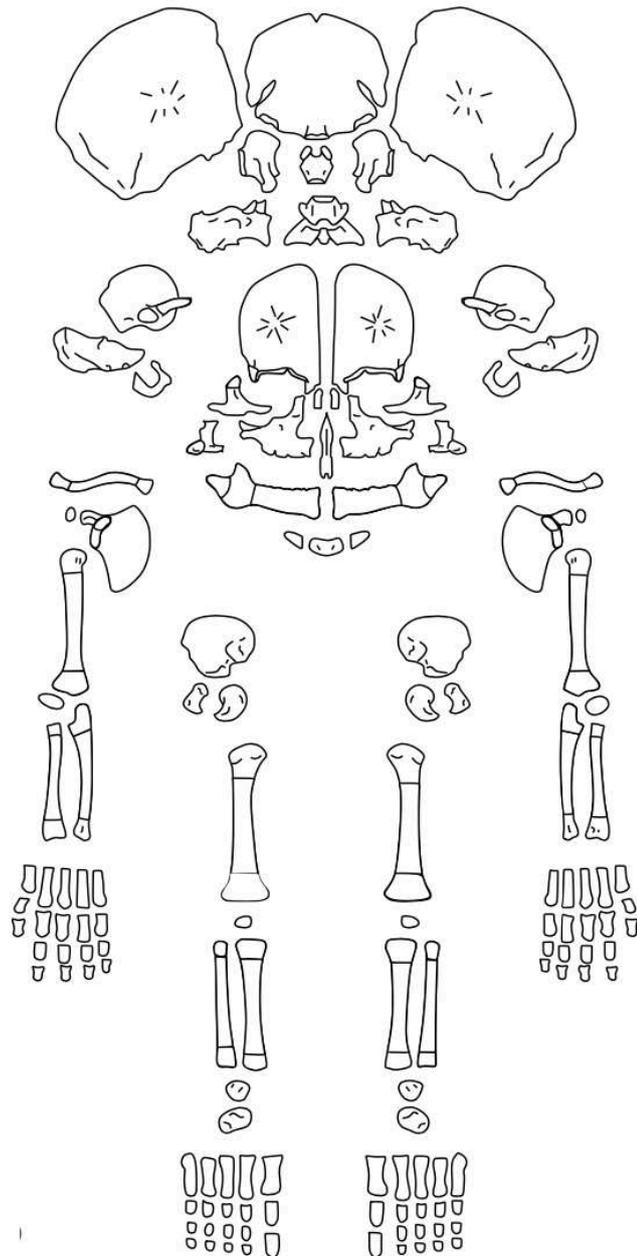
THORACIQUES			
T 1			
T 2			
T 3			
T 4			
T 5			
T 6			
T 7			
T 8			
T 9			
T 10			
T 11			
T 12			
rang indéterminé			

LOMBAIRES			
L 1			
L 2			
L 3			
L 4			
L 5			
rang indéterminé			

SACRÉES	aileron droit	arc droit	corps	arc gauche	aileron gauche
S 1					
S 2					
S 3					
S 4					
S 5					
rang indéterminé					

COTES	droite	gauche
T 1		
T 2		
T 3		
T 4		
T 5		
T 6		
T 7		
T 8		
T 9		
T 10		
T 11		
T 12		
rang indéterminé		
côté indéterminé		

STERNUM	
manubrium	
sternèbres	



**✂ Comptage des fragments**

	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Examineur	Observations
	<b>NOMBRE</b>															
Crâne																NMI :
Mandibule																
Dents sup.																
Dents inf.																Date
Dents indet.																
Os hyoïde																
Osselets oreille																
Cartilage calcifié																
Atlas																
Axis																
Vert. C3-C7																
Vert. thoraciques																
Vert. lombaires																
Vert. indet.																
Sacrum																
Coccyx																
Côtes																
Sternum																
Clavicule																
Scapula																
Humérus																
Radius																
Ulna																
Carpe																
Métacarpe																
Phalanges main																
Diaph. Mb. sup.																
Coxal																
Fémur																
Patella																
Tibia																
Fibula																
Tarse																
Métatarse																
Phalanges pieds																
Sésamoïde																
Diaphyse Mb. inf.																
MTC, MTT, Pm, Pp																
Os plat																
Os court ou épiphyse																
Diaphyses indet.																
Esquilles																
Os animaux brûlés																
Os anim. non brûlés																
Os H/Os animal ?																
Ballistique																
Entomologie																
Autres																

**✂ Masse des fragments**

	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	Examineur	Observations
	<b>MASSE</b>													
Crâne														NMI :
Mandibule														
Dents sup.														
Dents inf.														Date
Dents indet.														
Os hyoïde														
Osselets oreille														
Cartilage calcifié														
Atlas														
Axis														
Vert. C3-C7														
Vert. thoraciques														
Vert. lombaires														
Vert. indet.														
Sacrum														
Coccyx														
Côtes														
Sternum														
Clavicule														
Scapula														
Humérus														
Radius														
Ulna														
Carpe														
Métacarpe														
Phalanges main														
Diaph. Mb. sup.														
Coxal														
Fémur														
Patella														
Tibia														
Fibula														
Tarse														
Métatarse														
Phalanges pieds														
Sésamoïde														
Diaphyse Mb. inf.														
MTC, MTT, Pm, Pp														
Os plat														
Os court ou épiphyse														
Diaphyses indet.														
Esquilles														
Os animaux brûlés														
Os anim. non brûlés														
Os H/Os animal ?														
Ballistique														
Entomologie														
Autres														







**ANALYSE ANTHROPOLOGIQUE**



✂ **Autres notes**