

Intérêt de l'étude de la base du crâne en anthropologie médico-légale.

I. Le *foramen magnum*

Philippe LEFÈVRE, Caroline POLET, Alexandra BOUCHERIE,
François BEAUTHIER & Jean-Pol BEAUTHIER

Résumé

Le *foramen magnum* (FM), structure particulière de la base du crâne par sa robustesse et sa position anatomique privilégiée, constitue une structure protégée en cas de fragmentation de la tête dans diverses circonstances (explosion, incendie, conflits armés et violences interpersonnelles). Dans ces situations particulières, le FM peut présenter un intérêt en anthropologie médico-légale. Si le FM a été largement étudié, son utilisation en médecine légale était quelque peu tombée en désuétude. Il était donc intéressant de revoir quelles étaient, *in fine*, les diverses possibilités d'utilisation du FM, leurs résultats et leurs précisions dans le domaine spécifique de la médecine légale. La conception de cet article repose sur une révision bibliographique non exhaustive des méthodes utilisant le FM et applicables en anthropologie médico-légale. Cette révision comporte une soixantaine d'articles, sur des populations du XVIIIe au XXIe siècle issues d'Europe, d'Afrique, d'Amérique et d'Asie.

Si les formes du FM furent répertoriées selon le sexe ou les populations, les résultats obtenus furent très variables avec une reproductibilité relativement faible. La forme « ovale large » semble la plus fréquente chez les deux sexes. Outre les mensurations classiques de longueur, largeur, circonférence et aire du FM, certains auteurs y ont associé des mensurations des condyles occipitaux. Les différentes fonctions discriminantes permettent actuellement de classer* correctement entre 70 et 85 % les sexes et les origines biogéographiques des échantillons de contrôle. Peu d'études portent sur l'estimation du sexe chez les immatures dans cette région du crâne. Les fonctions discriminantes disponibles ont permis un taux moyen de classification globale correcte qui atteint 76 %. Ce résultat reste néanmoins problématique car les équations ne sont basées que sur un nombre très limité d'individus. La sénescence ne semble pas affecter, indépendamment du sexe, les variables morphométriques de la base du crâne. Les corrélations entre les mensurations du FM et la stature se révèlent aussi très faibles. La seule constante retrouvée dans toutes ces études consiste en la différence significative des mensurations du FM qui sont plus grandes chez les individus masculins que féminins. L'utilisation des mensurations du FM en tant qu'indicateur du dimorphisme sexuel ou de l'origine biogéographique peut donc se limiter à des crânes fragmentés et/ou incomplets et lorsqu'aucune autre méthode plus efficace ne peut être appliquée (estimation du sexe selon les caractéristiques morphologiques et anthropométriques de l'os coxal, de la tête osseuse ou encore des pièces osseuses de type long).

Mots-clés : anthropologie forensique, *foramen magnum*, morphométrie, estimation du sexe, origine biogéographique, stature, sénescence

Abstract

The foramen magnum (FM) constitutes a naturally protected structure, due its peculiar architecture and anatomical position, that can be less altered in case of head fragmentation induced by diverse circumstances (e.g., explosion, fire, armed conflict, and interpersonal violence). In such situations, FM may be of interest in forensic anthropology. If the FM has been largely

* Dans cet article, nous distinguons « classer » et « classifier ». Classer désigne le fait de ranger des sujets dans des classes ou catégories préalablement définies en fonction des caractéristiques et variables qui les décrivent (Bellanger & Tomassone, 2014 ; Husson *et al.*, 2018). Le terme pourcentage de classement fait référence aux résultats obtenus dans l'échantillon d'apprentissage, ce qui correspond à la phase de développement des modèles prédictifs (et non à la phase de validation). Classifier, par contre, renvoie au fait de déterminer ou rechercher des classes sans que celles-ci soient prédéfinies (Bellanger & Tomassone, 2014 ; Husson *et al.*, 2018). Dans cette publication, les pourcentages de classification font référence à ceux obtenus dans les échantillons d'apprentissage après validation croisée ou dans un autre échantillon totalement indépendant.

examined, its utility in forensic contexts has fallen somewhat into disuse. Consequently, it appears interesting to revise what are the possibilities, in fine, brought by the FM in terms of biological profiling, the results and the accuracies obtained and their adequacy to forensic medicine. This paper aims to offer a revised non-exhaustive referencing of the methods that use FM in forensic cases. This reviewing is composed of about sixty publications that examined this structure among populations from 18th to the 21st century in Europe, Africa, America, and Asia. If the morphology of the FM was characterized by geometric figures according to sex or population, the results obtained were very variable with a relatively low reproducibility. The 'wide oval' shape appears to be the most common in both sexes. Additionally, some authors investigate the FM through classic measurements (of length, width, circumference, and area) and associated them to the variables of the occipital condyles. Discriminant functions that were established on both structures, in adult individuals, allow a correct assignment, in controlled samples, between 70 and 85% for sexual diagnosis or biogeographic origin estimation. On the contrary, very few studies used the FM to develop sex estimation method for juveniles. The correct classification obtained reached 76%, but it remains unreliable due to the restricted number of identified individuals examined. It is also important to note that ageing process does not appear to affect the morphometry of the cranial base. Moreover, correlations between FM measurements and stature were found to be very weak. The only consensual observation that was made in all the reviewed studies is the significant difference between measurements of FM by sex: males constantly showed larger ones than females. In a nutshell, due to these various issues, the use of FM morphometry as an indicator of sexual dimorphism or ancestry must consequently be limited to fragmented and/or incomplete crania and when no other method can be applied.

Keywords: forensic anthropology, foramen magnum, morphometry, sex estimation, ancestry, stature, ageing

1. INTRODUCTION

Cet article présente un état de la question non exhaustif sur le *foramen magnum* (FM), une structure crânienne essentielle en anthropologie médico-légale. Il s'agit d'une première contribution consacrée à la base du crâne. Une seconde publication sera dédiée au processus mastoïde.

Après un bref rappel de son anatomie, cette synthèse traite de la variabilité morphologique du FM, des mesures fréquemment relevées et des méthodes appliquées pour estimer le sexe et l'origine biogéographique des individus. Sont également abordées l'évolution séculaire de ses dimensions et les limites de son utilisation dans l'établissement du profil biologique.

En raison de sa position anatomique particulière, de la masse importante de tissus mous qui la protège et de sa robustesse, la région occipitale du FM est parfois la seule partie du bloc crânio-facial qui subsiste en contexte archéologique et médico-légal, notamment lorsque le viscéro-crâne ainsi que la calvaria sont détruits. De telles situations peuvent se rencontrer dans les cas d'incendie, d'explosion, voire de catastrophes de masse, de conflits armés ou de terrorisme (Gapert *et al.*, 2013 ; Bolz *et al.*, 2020).

De plus, le FM atteint sa taille adulte relativement tôt (fusion complète des éléments constitutifs vers 5-7 ans ; Scheuer et Black, 2000, p. 58) et ne répond pas aux modifications significatives

des caractères sexuels secondaires (Haijun *et al.*, 2021). Aucun muscle n'agit sur sa forme et sa taille, sa fonction principale étant de livrer passage à un certain nombre de structures anatomiques.

De nombreuses études ont été consacrées à la base du crâne et particulièrement au FM afin d'estimer le sexe, l'origine biogéographique, l'âge ou encore la stature. Les performances de ces méthodes sont variées. Précisons également que les mêmes variables métriques ont été mesurées soit sur des crânes secs soit sur des CT scans. Ce fait complique la comparaison des fonctions discriminantes qui en découlent (Gapert *et al.*, 2009 ; Gunay & Altinkok, 2000 ; Teixeira, 1982 ; Krogman & İşcan, 1986 ; Wani *et al.*, 2021 ; Gocmen Mas *et al.*, 2018 ; Zdilla *et al.*, 2017 ; Tambawala *et al.*, 2016).

2. ANATOMIE TOPOGRAPHIQUE DU FORAMEN MAGNUM

À la naissance, l'os occipital est constitué de quatre formations osseuses qui circonscrivent le FM : une partie antérieure (le basi-occipital), deux parties latérales de part et d'autre du FM (les exoccipitaux¹) et une partie postérieure (future écaïlle occipitale) - elle-même séparée chez le fœtus, en supra-occipital et interpariétal (Bories, 1996 ; fig. 1).

¹ Ce terme désigne les deux condyles occipitaux chez les mammifères et les amphibiens.

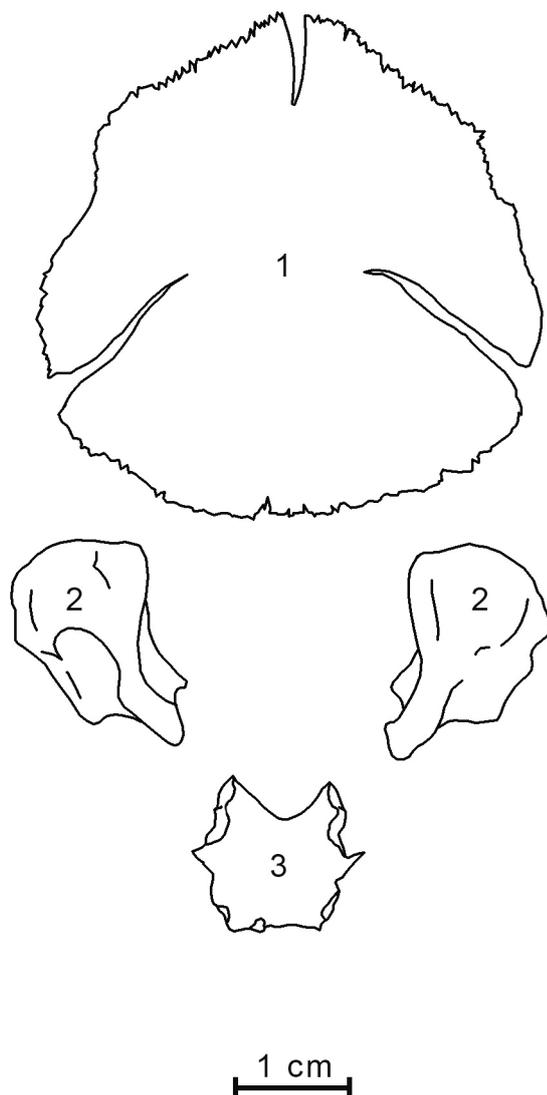


Fig. 1 – Os occipital humain à la naissance (dessin : Anne-Marie Wittek, ADIA). 1. Écaille occipitale ; 2. Parties latérales (exoccipitales) ; 3. Partie antérieure (basi-occipital).

Le FM est le lieu de passage de la moelle allongée (bulbe rachidien en ancienne nomenclature) accompagnée latéralement par les artères et les veines vertébrales, les racines du nerf accessoire (NC XI) ainsi que les méninges.

3. MORPHOMÉTRIE DU FORAMEN MAGNUM

Les variables métriques du FM sont soit relevées directement sur l'os sec (ostéométrie traditionnelle), soit virtuellement sur des CT-scans. Les mensurations habituellement prises sont rassemblées dans le tableau 1 et la figure 2.

Différentes méthodes permettent d'estimer l'aire du foramen magnum (AFM) comme :

- celle de Radinsky (1967) reprise et popularisée par Routal *et al.* (1984)

$$AFM = \frac{1}{4} \pi IFM LFM$$

- celle de Teixeira (1982)

$$AFM = \pi \{ (LFM + IFM) / 4 \}^2$$

Mentionnons également une méthode de calcul de l'aire fondée sur le principe de Cavalieri (Gocmen Mas *et al.*, 2018). Dans ce principe, une surface est constituée d'une juxtaposition de lignes parallèles. Dans le cas d'un disque, ces lignes parallèles sont des arcs de cercles concentriques (fig. 3).

Gocmen Mas *et al.*, 2018 ont comparé ces trois méthodes d'estimation sur 150 crânes de sexe inconnu d'une population contemporaine du Département d'Anatomie de l'Université Dokuz Eylül (Turquie). Ils n'ont observé aucune différence significative entre les aires ni d'effet significatif de la forme (arrondie ou ovale).

Mensurations	Acronymes	Définitions	Acquisition	Références
Longueur du FM (diamètre sagittal ; diamètre antéro-postérieur)	LFM	La plus grande distance mesurée sagittalement du bord antérieur du FM (basion) à son bord postérieur (opisthion)	Pied à coulisse	M7 de Martin (1928, p. 627)
Largeur du FM (diamètre transversal ; diamètre latéral)	IFM	La plus grande distance prise entre les bords latéraux du FM et perpendiculaire à la LFM. Cette mesure peut également se prendre dans la partie la plus concave des bords latéraux du FM	Pied à coulisse	M16 de Martin (1928, p. 630)
Indice du FM	IFM/LFM ou 100 X IFM/LFM			Martin (1928, p. 654) Burdan <i>et al.</i> (2012)
Circonférence du FM (périmètre)	CFM	Mesure prise à l'intérieur du FM en longeant l'ensemble de son contour	Mètre ruban	Gapert <i>et al.</i> (2009)
Aire du FM (surface)	AFM	Surface circonscrite par le contour du FM	Calculée selon différentes formules géométriques ou mesurée à l'aide de logiciels informatiques	Radinsky (1967) ; Routal (1984) Teixeira, (1982) ; Catalina-Herrera, 1987 ; Gapert <i>et al.</i> , (2009)

Tableau 1 – Mesures du *foramen magnum*.

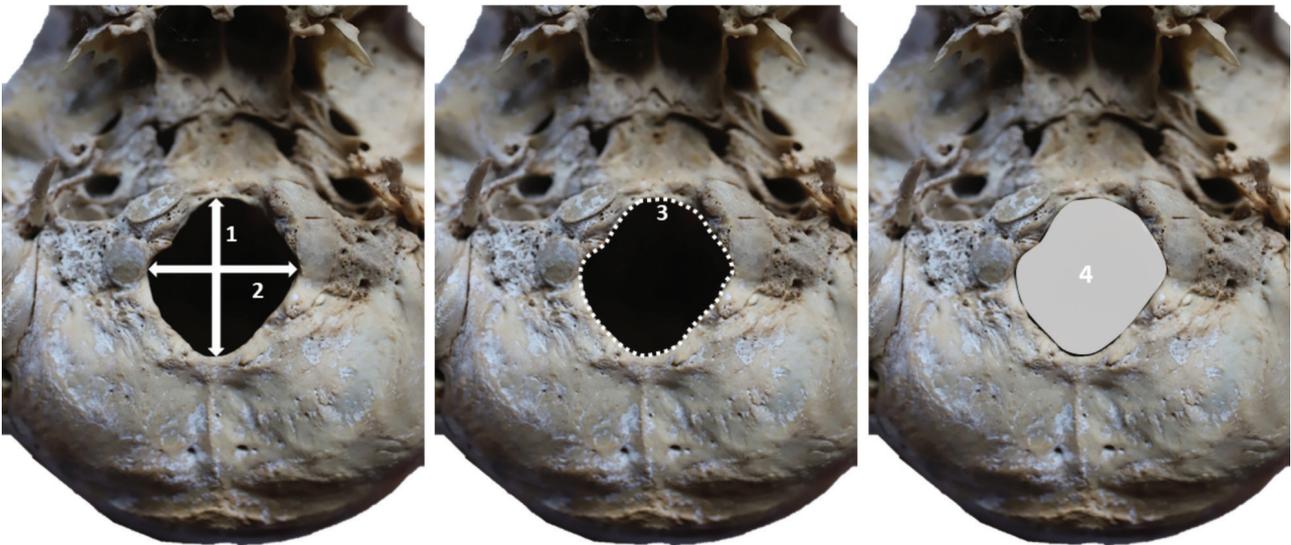


Fig. 2 – Vue inférieure de la base du crâne – Mesurations du FM.

1 = LFM (longueur du FM), 2 = IFM (largeur du FM), 3 = CFM (circonférence) du FM, 4 = AFM (aire du FM).

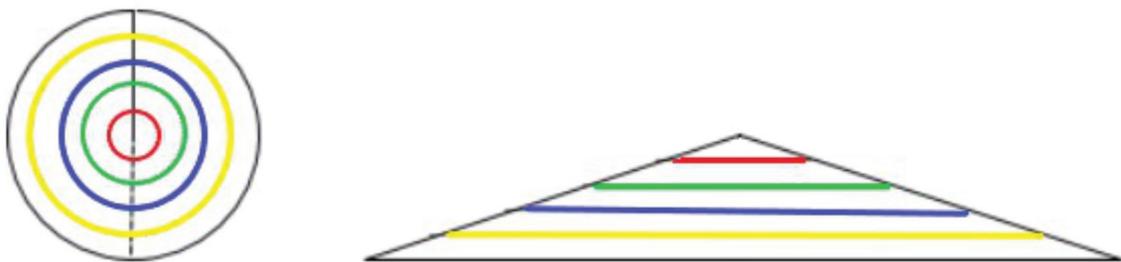


Fig. 3 – Principe de Cavalieri qui considère qu'une surface peut être représentée par une série de lignes et que son aire est la somme des longueurs de toutes ces lignes. Pour calculer l'aire d'un disque de rayon r , on prend donc en compte tous les cercles concentriques de rayons $\leq r$. Si on les déroule, on obtient un triangle isocèle de base $b = 2\pi r$ (la circonférence du disque initial), et de hauteur $h = r$ (le rayon du disque initial). L'aire de ce triangle est alors de $b \times h \div 2 = 2\pi r \times r \div 2 = \pi r^2$ (<http://elijdx.canalblog.com/archives/2013/10/13/28180385.html>).

À ces méthodes, s'ajoute également celle de Gapert *et al.* (2009) qui considèrent le foramen comme circulaire et estiment son rayon (r) à partir de son périmètre. Dans ce cas, AFM (AreaCirc) = πr^2 .

4. TYPOLOGIE DE FORME DU FORAMEN MAGNUM

La revue de la littérature indique que les formes du FM sont relativement variables. Elles sont classées sur la base de la morphologie du contour du foramen (méthodes qualitatives, Tabl. 2) ou de ses dimensions (méthodes métriques).

Le développement de formes particulières du FM peut s'expliquer par l'ossification au cours de la croissance, de reliquats crâniens primaires reliant les divers points d'ossification endochondrale à différents endroits (Govsa *et al.*, 2011). La forme irrégulière du FM peut être accentuée par des anomalies du développement de l'os et des tissus mous à la jonction crânio-vertébrale (occipitalisation de l'atlas, hypoplasie de l'atlas, invagination basilaire) (Chethan *et al.*, 2012).

Garcia *et al.* (2011) concluent que la « définition de la forme du FM est « observateur dépendante » et que la reproductibilité n'est pas très bonne. »

Auteurs	Catégories morphologiques	
	N	Description
Zaïdi et Dayal (1988)	5	Rond, ovale, hexagonal, pentagonal et irrégulier
Gosva <i>et al.</i> (2011) Chethan <i>et al.</i> (2012)	8	idem + « en forme d'œuf » + tétragonal + en deux demi-cercles fusionnés
Richards et Jabbour (2011) (Fig. 4)	8	Circulaire, semi circulaire, en forme de cœur, ovale large, ovale bi-arrondi, ovale allongé ventralement, ovale à deux pointes et ovale convergent dorsalement

Tableau 2 – Typologie de forme du *foramen magnum*.

Martin (1928, p. 654) se base sur les valeurs de l'indice du FM ($100 * IFM/LFM$, Tabl. 1) pour classer les *foramina* en :

- étroits si l'indice est $\leq 81,9$;
- moyens s'il vaut entre 82,0 et 85,9 ;
- larges s'il est $\geq 86,0$.

Buridan *et al.* (2012) utilisent l'indice (IFM/LFM) pour classer les FM en « type rond » qui est défini par un quotient variant entre 0,9 et 1,1, en « type ovale longitudinal » et « type ovale transversal » qui se caractérisent respectivement par une valeur supérieure ou inférieure aux bornes de cet intervalle.

5. DIMORPHISME SEXUEL DE FORME ET DE DIMENSION DU FM

De nombreuses études ont porté sur le dimorphisme sexuel de la forme du FM.

Citons Buridan *et al.* (2012) qui ont étudié les différents types de forme du FM collectés lors d'exams cliniques (CT scans) réalisés dans une population de 313 sujets européens vivants âgés de 20 à 30 ans (171 sujets féminins : $24,17 \pm 2,78$ ans et 142 sujets masculins : $24,53 \pm 2,99$ ans) (Tabl. 3).

Toutes les formes de FM de la classification de Richards et Jabbour (2011) (Fig. 4) (classification définie sur un assemblage archéologique daté du XVI-XX^e siècle et d'individus contemporains du XXI^e siècle) sont rencontrées dans

cette étude avec cependant une prédominance de la forme ovale chez les hommes et chez les femmes. Buridan *et al.* (2012) ne relèvent pas de différence significative dans les différents types de formes de FM selon le sexe biologique. Au sein de chacun des sexes, aucune forme (ovale ou ronde) n'est non plus significativement plus fréquente.

Akay *et al.* (2017) ont étudié la forme du FM sur un échantillon de 190 sujets vivants (102 ♀ et 88 ♂ âgés de 17 à 81 ans) issus d'une population turque suivant la méthode d'imagerie du « cone beam » (CBCT scan)². La forme la plus fréquente chez les femmes est la forme ronde tandis que chez les hommes, c'est la forme hexagonale. Il n'existe toutefois pas de différence significative entre les sexes ($\chi^2=9,648$; $p=0,209$).

L'étude de Zdilla *et al.* (2017) réalisée sur 124 crânes de sexe connu (63 ♀ et 61 ♂) de la collection Samuel George Morton (XIX^e s.) University of Pennsylvania Museum of Archaeology and Anthropology (Africains, Européens, Asiatiques et Américains) arrivait à la même conclusion (fonction discriminante : procrustes distances = 0,00082 ; Mahalanobis distance = 2,363 ; Hotelling's T-square = 148,07 ; $P>0,999$).

² Le Cone Beam ou CBCT (pour Cone Beam Computed Tomography) est une technique de tomographie basée sur l'analyse numérique de l'absorption d'un faisceau conique (cone beam) de rayons X. Il est particulièrement adapté à l'examen du système dento-maxillaire.

Origine biogéographique	Auteurs et échantillon	N	Mensurations (moyenne ± écart-type)							
			LFM (mm)		IFM (mm)		CFM (mm)		AFM (mm ²)	
			♂	♀	♂	♀	♂	♀	♂	♀
Européens	Catalina-Herrera (1987) crânes espagnols d'un musée d'anatomie	74 ♂ et 26 ♀	36,2 ± 2,60	34,30 ± 2,04	31,1 ± 2,60	29,6 ± 1,53	/	/	888,4 (Routal)	801,0 (Routal)
	Wescott et Moore-Jansen (2001) collection Terry et Hamann-Todd	201 ♂ et 203 ♀	36,7 ± 2,5	34,6 ± 2,3	31,6 ± 2,4	29,8 ± 2,0	/	/	/	/
	Gruber <i>et al.</i> (2009) crânes suisses de sexe connu	28 ♂ et 21 ♀	37,1 ± 2,7	35,8 ± 3,5	32,4 ± 2,4	31,0 ± 2,8	/	/	/	/
	Gapert <i>et al.</i> (2009) collection St. Bride's Church de Londres	82 ♂ et 76 ♀	35,91 ± 2,41	34,71 ± 1,91	30,51 ± 1,77	29,36 ± 1,96	99,07 ± 5,97	95,65 ± 5,36	862,4 ± 94,79 (Routal) 868,95 ± 96,36 (Teixeira) 783,82 ± 94,47 (AreaCirc)	801,78 ± 85,43 (Routal) 808,14 ± 85,40 (Teixeira) 730,28 ± 82,59 (AreaCirc)
	Burdan <i>et al.</i> (2012) CT scans patients polonais	142 ♂ et 171 ♀	37,06 ± 3,07	35,47 ± 2,6	32,98 ± 2,78	30,95 ± 2,71	/	/	877,4 ± 131,64 (méthode de calcul non précisée)	781,57 ± 93,74 (méthode de calcul non précisée)
	Macaluso (2011) Collection de G. Olivier du MNHN de Paris	36 ♀ et 32 ♂	35,38 ± 2,27	34,90 ± 2,26	30,72 ± 2,11	29,40 ± 2,63	98,90 ± 4,85	97,06 ± 5,64	854,80 ± 93,79 (Routal) 860,27 ± 94,54 (Teixeira) 780,22 ± 76,43 (AreaCirc)	807,86 ± 107,58 (Routal) 815,13 ± 106,29 (Teixeira) 752,10 ± 88,16 (AreaCirc)
	Bolz <i>et al.</i> (2020) CT scans de cadavres allemands	99 ♀ et 99 ♂	39,13 ± 2,29	36,52 ± 1,97	33,19 ± 2,64	31,17 ± 1,88	112,19 ± 7,00	104,62 ± 5,35	959,13 ± 126,40 (mesurée numériquement)	835,93 ± 88,53 (mesurée numériquement)
Africains	Wescott et Moore-Jansen (2001) Collection Terry et Hamann-Todd	67 ♂ et 66 ♀	36,0 ± 2,9	34,8 ± 2,5	29,8 ± 2,3	28,4 ± 2,3	/	/	/	/
	Ukoha (2011) crânes de diverses universités du Nigéria	90 ♂ et 10 ♀	36,26 ± 2,3	34,39 ± 3,88	30,09 ± 2,5	28,16 ± 1,99	/	/	857,30 (AreaCirc)	760,94 (AreaCirc)
	Abdelaziz <i>et al.</i> (2020) CT scans patients soudanais	30 ♂ et 20 ♀	37,41 ± 3,57	35,80 ± 2,88	30,93 ± 2,95	28,80 ± 1,96	/	/	/	/
	Abo El-Atta <i>et al.</i> (2020) CT scans patients égyptiens	163 ♂ et 204 ♀	36,8 ± 3,3	35,7 ± 3,3	31,5 ± 2,6	29,9 ± 2,7	/	/	912 ± 134 (mesurée numériquement)	843 ± 142 (mesurée numériquement)
Asiatiques	Murshed <i>et al.</i> (2003) CT scans patients turcs	57 ♂ et 53 ♀	37,2 ± 3,43	34,6 ± 3,16	31,6 ± 2,99	29,3 ± 2,99	/	/	931,7 ± 144,29 (mesurée numériquement)	795,0 ± 144,29 (mesurée numériquement)
	Uthman <i>et al.</i> (2012) CT scans patients irakiens	43 ♂ et 45 ♀	34,9 ± 2	32,9 ± 2	29,5 ± 2,5	27,3 ± 2,2	99,3 ± 6,2	92,6 ± 6,5	765,2 ± 98 (mesurée numériquement)	670,2 ± 93,7 (mesurée numériquement)
	Samara <i>et al.</i> (2017) CT scans patients jordaniens	125 ♂ et 122 ♀	35,8 ± 3,0	34,4 ± 3,1	30,3 ± 2,3	28,3 ± 2,3	/	/	/	/
	Akay <i>et al.</i> (2017) CT scans patients turcs	88 ♂ et 102 ♀	36,43 ± 2,32	34,66 ± 2,31	31,26 ± 2,41	29,78 ± 2,05	107,94 ± 6,46	102,67 ± 6,14	/	/
	Vinutha <i>et al.</i> (2018) CT scans patients indiens	110 ♂ et 90 ♀	35,96 ± 3,75	33,83 ± 3,51	30,38 ± 2,84	27,98 ± 2,53	124,87 ± 10,49	116,6 ± 9,67	799,29 ± 134,05 (mesurée numériquement)	697,77 ± 116,63 (mesurée numériquement)
Sud-américains	Espinoza <i>et al.</i> (2011) CT scans patients chiliens	50 ♂ et 50 ♀	37,4 ± 3,3	35,6 ± 3,0	31,9 ± 2,6	30,1 ± 2,4	/	/	877 ± 125 (mesurée numériquement)	798 ± 115 (mesurée numériquement)
	Lopez-Capp <i>et al.</i> (2018) collection de l'Institute of Teaching and Research in Forensic Sciences, Brésil	53 ♂ et 47 ♀	32,36 ± 3,26	30,79 ± 3,3	33,7 ± 3,2	32,09 ± 3,04	/	/	861,41 ± 128,75 (Teixeira) 856,32 ± 129,2 (Routal)	779,41 ± 95,66 (Teixeira) 774,15 ± 96,03 (Routal)

Tableau 3 – Mensurations du FM selon le sexe des groupes d'individus de différentes origines biogéographiques. Les études qui comportent des tests statistiques de comparaison sont en grisé. Les différences significatives sont en gras.

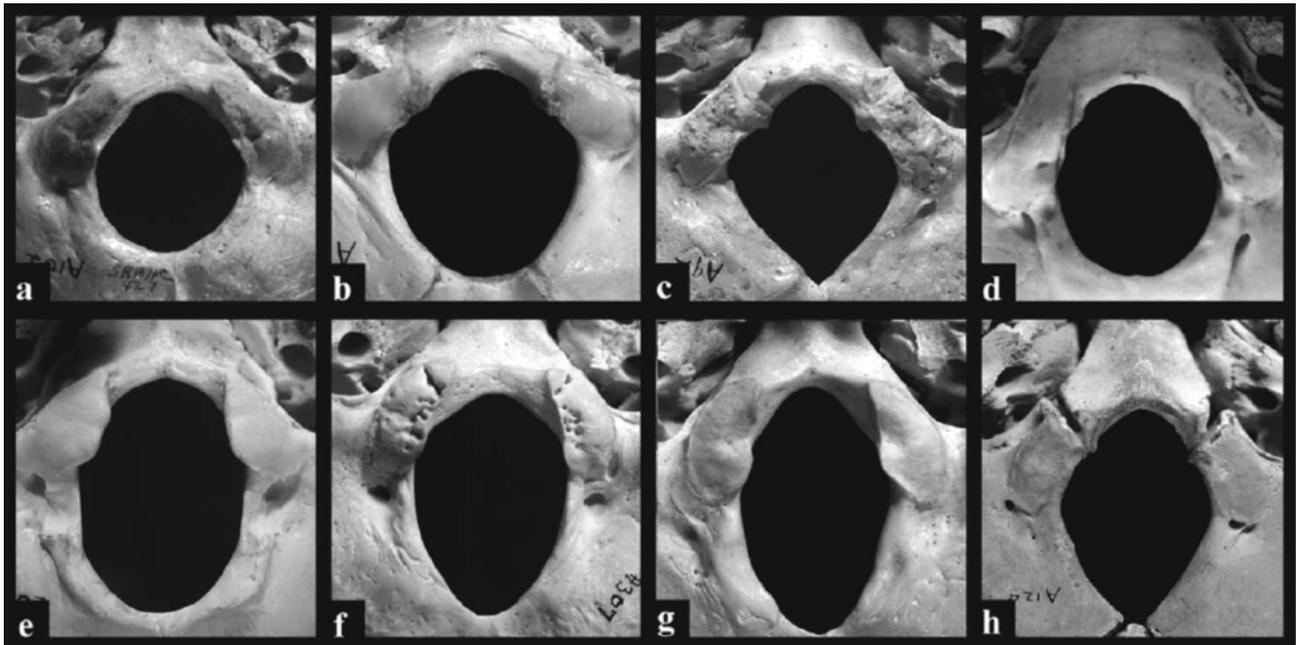


Fig. 4 – Classification des formes de FM selon Richards et Jabbour (2011) : a. circulaire, b. semi-circulaire, c. en forme de cœur, d. ovale large, e. ovale bi-arrondi, f. ovale allongé ventralement, g. ovale à deux pointes et h. ovale convergent dorsalement.

De nombreux travaux ont aussi porté sur le dimorphisme sexuel des dimensions du FM. Le tableau 3 rassemble les mensurations (longueur, largeur, périmètre et aire) relevées sur divers échantillons masculins et féminins d'origine européenne, africaine, asiatique et américaine.

Tous les auteurs observent des différences significatives entre les hommes et les femmes en ce qui concerne les variables CFM et AFM sauf Macaluso (2011). À l'exception des études réalisées sur des échantillons de petits effectifs comme ceux de Macaluso (2011) (n=68) et Abdelaziz *et al.* (2020) (n=50), la même tendance a été relevée pour la LFM. La IFM semble moins discriminante étant donné que même des recherches portant sur un nombre conséquent de sujets comme celles de Gruber *et al.* (2009), Burdan *et al.* (2012) et Ukoha (2011) ne relèvent pas de différence significative entre les deux sexes. Dans l'étude de Burdan *et al.* (2012), une différence significative apparaît néanmoins entre les sexes pour les valeurs de LFM, IFM et AFM au sein des formes ovale et ronde. De plus, les variables linéaires du FM sont significativement plus grandes pour les hommes ayant un FM de forme ronde. Les valeurs sont également plus élevées pour la LFM et la IFM des FM de forme ronde en comparaison aux FM de type « ovale longitudinal » dans les deux sexes.

Dans une étude rétrospective portant sur 200 CT scans de crânes (110 ♂ et 90 ♀), Vinutha *et al.* (2018) obtiennent un indice FM plus grand chez les hommes ($85,01 \pm 8,67$) que chez les femmes ($83,17 \pm 7,78$) mais la différence entre ces indices est non significative ($p > 0,05$).

Les différences de dimensions du FM entre les deux sexes sont moins importantes que celles observées pour les dimensions des os longs et de l'os coxal. Il est probable que la maturation osseuse différenciée et plus précoce du crâne par rapport au squelette postcrânien joue un rôle dans le niveau de différence entre ces éléments osseux (Burdan *et al.*, 2012). Le fait qu'il s'agisse d'une structure relativement restreinte en termes de taille (vu son rôle architectural) et que son type d'ossification (membraneuse) diffère de celle des pièces osseuses de type long pourraient aussi intervenir.

Burdan *et al.* (2012) ont aussi montré que les corrélations entre les LFM et IFM chez les hommes et les femmes sont faibles ($r_{\text{♂}} = 0,41$ et $r_{\text{♀}} = 0,34$) mais significatives ($p < 0,0001$). Entre la IFM et la longueur du crâne (mesure de Martin n° 1, 1928 : 625), les corrélations sont très faibles ($r_{\text{♂}} = 0,16$ et $R_{\text{♀}} = 0,22$) ; elles ne sont pas significatives chez les hommes ($p = 0,0519$) mais bien chez les femmes ($p = 0,0037$). Une même tendance est

relevée entre l'AFM et l'aire du crâne³ ($r_{\text{♂}} = 0,12$ avec $p=0,14$ et $r_{\text{♀}} = 0,15$ avec $p=0,039$). Entre les LFM et LC, les corrélations sont très faibles et non significatives ($r_{\text{♂}} = 0,15$; $p=0,074$ et $r_{\text{♀}} = -0,0006$; $p=0,99$).

6. LIMITES, MESURE DE LA VARIABILITÉ ET ERREURS INTRA- ET INTER-OBSERVATEURS DE LA BASE DU CRÂNE

En biométrie, il est crucial que les variables relevées soient répétables et reproductibles.

Cet aspect a été investigué par Gapert & Last (2005) sur vingt crânes de sexe et d'origine biogéographique inconnus d'une collection ostéologique de l'Université de Dublin. Douze mesures ont été prises dont dix ont été définies par Routal (1984) et Holland (1986a) (LMC, IMC, DmC, DMC, IBiC ; LFM, IFM, CFM, LPBa et DF) (voir Tabl. 1 et 6 pour les définitions). Deux nouvelles mesures ont été ajoutées :

- la hauteur des condyles occipitaux (HC) : mesure prise du plancher du canal du nerf hypoglosse à la convexité maximum de la surface articulaire du condyle ;
- la distance entre les orifices externes des canaux des nerfs hypoglosses (DH_y) : distance prise entre les parois médiales des canaux.

Dans un premier temps, une prise unique des 12 mesures fut enregistrée pour les 20 crânes par un observateur ; le coefficient de variation (CV) fut calculé pour chaque mesure afin de servir d'index démontrant l'importance de variation entre les crânes. Cette première séquence permet le calcul de la moyenne et l'étendue des valeurs pour chaque mesure. Elle mentionne également l'erreur standard de la moyenne ainsi que certaines particularités des mesures. Ainsi, LPBa est difficilement mesurable en cas d'oblitération de la synchondrose sphéno-occipitale (75 % des cas) et d'absence du *foramen condylaire* (60 % des cas).

Dans un deuxième temps, un observateur relève 20 fois le set des 12 mesures sur trois crânes (SK2, SK16, SK20) sur différents jours afin d'enregistrer l'erreur intra-observateur. Le CV représente l'indicateur d'erreur dans

le processus de mesure. Cette erreur est une combinaison d'erreur intra-observateur, d'erreur de randomisation et d'erreur due à l'ambiguïté des repères anatomiques. Plus les variations de l'observateur sont proches de la variation trouvée entre les 20 crânes, moins la mesure en question sera sélectionnée pour une future estimation (estimation du sexe par exemple). Dans cette étude, les mesures les plus favorables furent : IBiC, DH_y, IMC et LMC.

Enfin, dans un troisième temps, l'erreur inter-observateur a été évaluée à partir de 12 mesures relevées par dix observateurs sur un seul crâne (SK02). Le CV indique l'erreur inter-observateur en plus de l'erreur inhérente à la caractéristique mesurée. Il montre que les mesures les plus reproductibles étaient : IBiC, DH_y, IMC et LMC.

Il est à noter que dans leur étude, Wescott et Moore-Jansen (2001) ont aussi démontré que certaines mesures sont plus clairement définies que d'autres et ainsi peuvent être reproduites plus précisément par une multitude d'observateurs. Selon ces auteurs :

- LFM, IFM et DH_y sont aisément reproductibles car ce sont des variables simples et directes ;
- LMC et IMC le sont moins car leurs définitions sont moins précises.

Les raisons évoquées pour cette imprécision sont le repérage difficile des bords (notamment le bord postérieur) des condyles, l'érosion et l'usure des surfaces articulaires ou encore les déformations dues à l'arthrose.

7. LE FORAMEN MAGNUM ET L'ESTIMATION DU SEXE ET DE L'ORIGINE BIOGÉOGRAPHIQUE

Le panorama présenté dans ce chapitre n'est pas exhaustif. Il présente des exemples d'approches univariées, puis multivariées (par ordre chronologique) qui sont basées sur des mesures prises sur des os secs et sur des CT-scans.

Les méthodes d'estimation du sexe et de l'origine biogéographique à partir du FM se fondent sur la comparaison des mensurations observées avec des intervalles de variation (basés sur la moyenne et l'écart-type) ou sur l'application de fonctions discriminantes (FD).

³ L'aire du crâne (AC) est considérée comme une surface elliptique et se calcule comme suit : $AC = \pi a b$ avec $a = \frac{1}{2}$ longueur du crâne et $b = \frac{1}{2}$ largeur du crâne.

	FD n°					
	1	2	3	4	5	6
LMC	-0,0189	-0,0305	-0,06324	-0,03446	-0,06457	
IMC	-0,07219	-0,10954	-0,09864	-0,11513	-0,11894	
LFM	-0,05192	-0,05171		-0,05705		-0,06214
IFM	-0,01273	-0,01864				-0,04587
DF	0,00441					
DmC	-0,03492					
IBiC	-0,02534					
DMC	0,01887					
LPba	-0,03485		-0,02891			
constante	5,98	5,01	4,03	4,8	3,51	4,14
moyenne ♀	0,2426	0,298	0,3316	0,3009	0,3449	0,3624
valeur seuil	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
moyenne ♂	0,7571	0,7018	0,6683	0,6989	0,655	0,6374
prédictions correctes 1 (%)	90	79	79	77	76	71
prédictions correctes 2 (%)	85	85	70	85	80	70

Tableau 4 – Fonctions discriminantes (FD) pour estimer le sexe s'appuyant sur des mesures du FM et de la région condyloire de l'os occipital (voir définition des mesures Tabl. 1 et 6) proposées par Holland (1986a). Le taux de prédictions correctes 1 a été calculé sur des individus de l'échantillon étudié ; le taux de prédictions correctes 2 a été calculé à partir de crânes non utilisés dans la formulation de ses équations.

Ces dernières sont du type :

$$FD = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + b$$

Avec a = coefficient discriminant ; x_n = variables discriminantes ; b = constante.

Si la valeur obtenue est supérieure au point discriminant (valeur seuil), le sexe sera masculin. Si elle est inférieure, il sera féminin.

Teixeira en 1982, a étudié la possibilité de différencier les sexes selon la taille du FM. Cette recherche, effectuée sur 40 crânes adultes d'origine brésilienne, s'attachait notamment à la mesure de l'AFM (voir chap. 3). Une AFM supérieure ou égale à 964 mm² était plutôt de tendance masculine, une AFM inférieure ou égale à 804 mm² était considérée comme féminine. Entre ces deux valeurs, l'individu était classé comme indéterminé.

Routal (1984), en se basant uniquement sur les simples dimensions du FM de trois collections médicales d'un échantillon indien a estimé avec 100% d'exactitude le dimorphisme sexuel des individus de l'échantillon.

Holland (1986a et b) a publié plusieurs FD afin d'estimer le sexe (Tabl. 4) et l'origine biogéographique (Tabl. 5). Outre les mesures de la longueur et la largeur du FM, huit mesures de la région condyloire de l'os occipital ont été ajoutées (Fig. 5 et Tabl. 6). L'avantage de cette méthode par rapport à celle développée par Giles et Elliot (1964) est que le sexe et l'appartenance biogéographique pouvaient être estimés en employant un crâne fragmenté. Basé sur un échantillon de crânes d'origine biogéographique différente (européenne et africaine) de la Terry Collection,

	FD n°				
	1	2	3	4	5
LMC	-0,0224		0,0095	-0,042	
IMC				0,0806	0,0239
DmC	0,0345	0,0338	0,0347		
BiC	-0,0236	-0,0329	-0,0063		-0,0536
DMC	-0,0161	-0,0159	-0,0428		
LFM				0,0284	
IFM	-0,0185	-0,02	-0,0201	-0,065	
LBH	0,0777	0,0756			0,0712
constante	0,669	0,706	2,87	1,48	0,425
valeur seuil	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
prédictions correctes 1 (%)	86	82	72	70	80
prédictions correctes 2 (%)	90	85	75	75	80

Tableau 5 – Fonctions discriminantes pour estimer l'origine biogéographique basées sur des mesures du FM et de la région condyloire de l'os occipital (voir définition des mesures Tabl. 1 et 6) proposées par Holland (1986b). Un score inférieur à la valeur seuil (0,5) classe l'individu en POE (personne d'origine européenne) tandis qu'un score supérieur le classe en POA (personne d'origine africaine.) Le taux de prédictions correctes 1 a été calculé sur des individus de l'échantillon étudié ; le taux de prédictions correctes 2 a été calculé à partir de crânes non utilisés dans la formulation de ses équations.

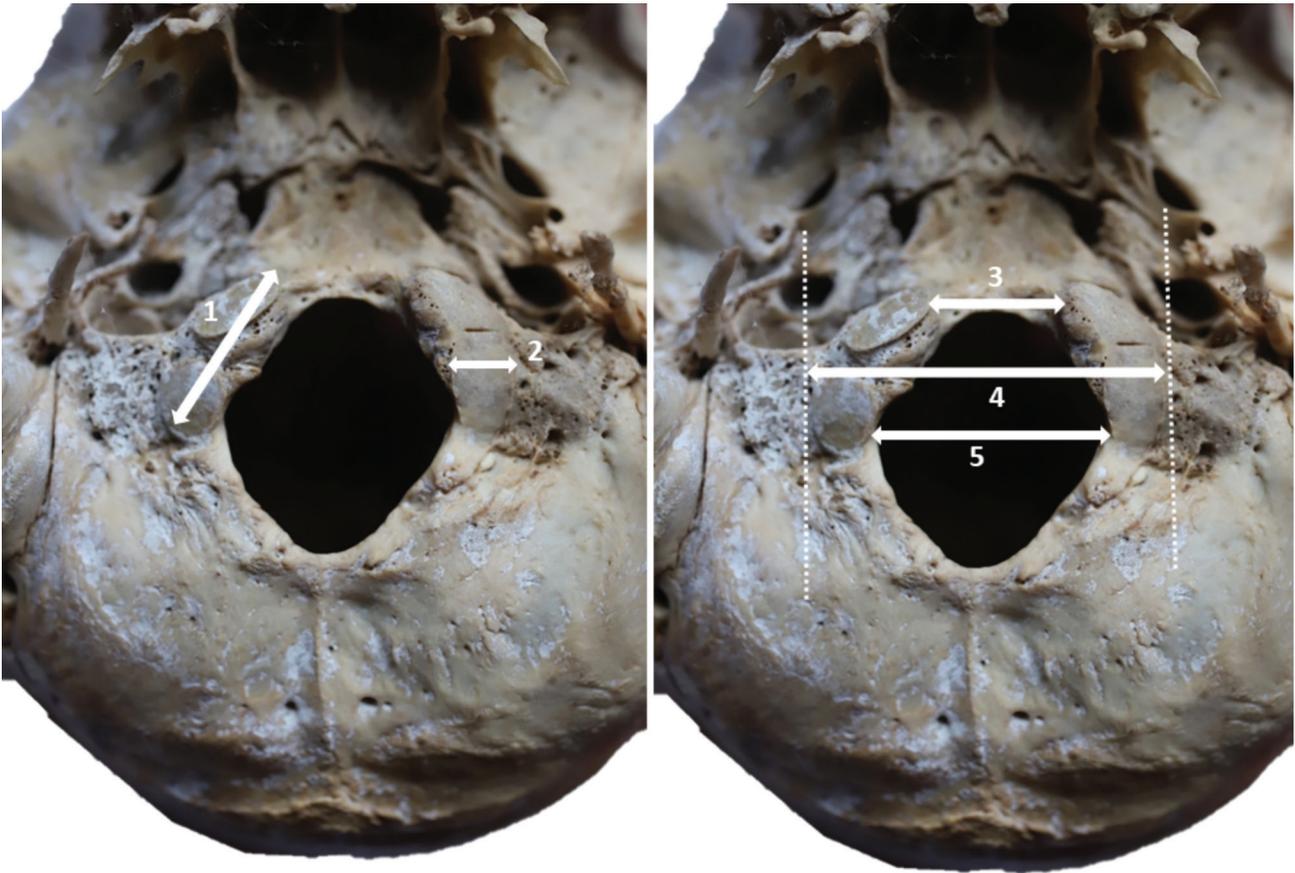


Fig. 5 – Vue inférieure de la base du crâne – Mensurations de la région condyloïde.

1 = LMC (longueur max. du condyle occipital), 2 = ICM (largeur max. du condyle occipital), 3 = DmC (distance minimum intercondyloïde), 4 = IBiC (distance entre les bords latéraux des condyles occipitaux), 5 = DMC (distance maximum intercondyloïde).

Holland (1986a) a trouvé que les mesures de l'os occipital pouvaient correctement classer le sexe d'un individu avec une exactitude variant de 71 à 90 % (Tabl. 4). Sur un échantillon test de crânes non utilisés dans la formulation de ses équations, il observe que le sexe était correctement classé dans 70 à 85 % des cas. Holland (1986b) a aussi démontré que l'origine biogéographique pouvait être estimée correctement avec 70 à 86 % d'exactitude en utilisant des variables de l'os occipital (Tabl. 5).

Dans un article publié en 2001, Wescott et Moore-Jansen ont étudié les crânes de 389 individus d'origine européenne et 133 individus d'origine africaine des Collections Terry et Hamann-Todd, individus âgés de 20 à 80 ans. Les dimensions chez les hommes sont significativement supérieures à celles des femmes (Tabl. 2). Le dimorphisme sexuel est plus marqué chez les personnes d'origine européenne (POE) que chez les personnes d'origine africaine (POA).

Les mesures relevées sur l'ensemble des individus masculins et féminins des POE sont supérieures à celle des POA (sauf pour IMC et LBH). Les POE possèdent des condyles plus étroits mais plus longs et des dimensions intercondyloïdes plus larges. Les POE ont un FM plutôt de forme arrondie. La statistique lambda de Wilks concernant l'hypothèse d'absence d'effet général de la collection, de l'âge, du sexe et de l'origine biogéographique (Manova) est rejetée pour les deux dernières variables ($p = 0,0001$) mais pas pour les deux premières. Donc, bien que les dimensions de la base du crâne montrent des différences significatives pour le sexe et l'origine biogéographique, il n'y a d'interaction significative « sexe-appartenance biogéographique » pour aucune variable. De même, malgré l'existence de différences selon l'appartenance biogéographique de l'os occipital, le modèle du dimorphisme sexuel ne diffère pas significativement entre les deux populations.

Mesures	Acronymes	Définitions
Longueur maximum des condyles occipitaux	LMC	Distance entre le point le plus antérieur au point le plus postérieur de la surface articulaire du condyle
Largeur maximum des condyles occipitaux	IMC	Distance entre les points les plus latéraux de la surface articulaire du condyle (mesure prise perpendiculairement à l'axe de la longueur)
Distance maximum intercondyloire	DMC	Distance maximum entre les bords internes des surfaces articulaires des condyles
Distance minimum intercondyloire	DmC	Distance minimum entre les bords internes des surfaces articulaires des condyles
Distance entre les bords latéraux des condyles occipitaux	IBiC	Distance entre les points les plus latéraux des surfaces articulaires des condyles
Longueur du processus basilaire	LPBa	Distance entre le point le plus antérieur du bord interne du FM – dans le plan sagittal – au milieu de la synchondrose sphéno-occipitale
Distance <i>interforamina</i>	DF	Distance entre les deux foramina condyloires pris au milieu des foramina
Distance entre le basion et l'hormion	LBH	Distance entre le basion et l'hormion (point de rencontre entre le vomer et l'os sphénoïde)

Tableau 6 – Mesures de la région condyloire de l'os occipital.

L'analyse (sélection pas à pas) apportant un maximum de discrimination retient pour :

- le sexe : LFM, DmC, LMC, LBH et IMC (corrélation canonique : 0,292) ;
- l'origine biogéographique : inclusion de six variables (corrélation canonique : 0,248) avec IBiC et LBH fournissant la plus grande variation.

Les valeurs faibles des corrélations canoniques indiquent que la plus grande partie de la variation de l'os occipital n'est pas due au sexe ou à l'origine biogéographique. Pour les tests de validation croisée, le pourcentage d'hommes et de femmes correctement classifiés est seulement de 76 % (les femmes étant souvent mieux classées que les hommes). Il en est de même pour l'origine biogéographique (75 % d'exactitude). Proportionnellement, davantage de POE sont correctement classées que les POA en ce qui concerne le sexe et l'origine biogéographique. Si les POE montrent un dimorphisme sexuel supérieur aux POA dans la région condyloire, c'est dû au fait que les POE ont une stature plus élevée que les POA - les femmes d'origine européenne et les hommes d'origine africaine représentent les groupes les plus proches. Cette situation est problématique en cas d'estimation du sexe sur un squelette dont l'appartenance biogéographique est inconnue telle que rencontrée en

contexte médico-légal dans le cas, notamment, de catastrophes de masse et d'accidents aériens ou nautiques impliquant plusieurs nationalités [nafrage du *Herald of Free Enterprise* (1987), crash de l'Airbus A320 (1992), crash du vol MH17 (2014), accident routier du tunnel du Mont-Blanc (1999), explosion de l'usine AZF (2005), attentats de Paris (2015), de Bruxelles et de Nice (2016), tsunami (Thaïlande 2004)].

Il est donc nécessaire pour ce genre d'expertise d'estimer préalablement l'origine biogéographique avant l'estimation du sexe et d'utiliser des modèles différents selon l'origine européenne ou africaine. Si l'origine biogéographique d'un individu est inconnue, l'utilisation d'un modèle unique d'estimation risque de déboucher sur une classification erronée du sexe de l'individu. Il sera nécessaire d'estimer le sexe à partir d'autres éléments ostéologiques.

Wescott et Moore-Jansen (2001) ont également testé les équations de régressions multiples de Holland pour le sexe (Holland, 1986a) et l'origine biogéographique (Holland, 1986b). Les résultats sont les suivants :

- le sexe fut classé correctement avec 73, 71, 68, 72, 65 et 68 % d'exactitude respectivement avec les équations de 1 à 6 (Tabl. 4) ;
- pour l'origine biogéographique, seule

l'équation 4 de Holland (1986b, Tabl. 5) fut testée car c'était le seul modèle qui n'incluait pas la IMC, DMC et LPBa. L'équation de régression multiple assigne une classification correcte avec 61 % d'exactitude (les POA furent classées à 78 % ; les POE avec seulement 56 %!).

Rappelons qu'Holland avait classé correctement l'origine biogéographique avec 70 % d'exactitude mais il n'avait pas réparti ses résultats selon les origines biogéographiques.

Les mesures de la base du crâne n'estiment donc que modérément le sexe et l'origine biogéographique.

Les dégradations causées par la taphonomie dans la région occipitale ainsi que les changements séculaires (Manthey *et al.*, 2017 ; Langley & Jantz, 2020) observés sur le crâne peuvent réduire le pourcentage de classification et la précision des modèles de Holland.

Gapert *et al.* (2009) se sont également intéressés à l'estimation du sexe à partir du FM sur une collection des XVIII^e et XIX^e siècles (collection documentée de St Bride's Church – Londres ; Tabl. 2). L'échantillon comportait 158 squelettes d'adultes (82 hommes – âgés de 52,5 ± 18,5 ans ; 76 femmes – âgées de 55,3 ± 18,2 ans). Les mesures prises sont : la LFM, la IFM, la CFM et l'aire du FM (AFM). Comme dans les études précédentes, les valeurs des variables mesurées sont significativement différentes entre les hommes et les femmes ($p < 0,001$). Gapert *et al.* proposent 11 FD (Tabl. 7) : six sont basées sur une seule variable, quatre nécessitent deux variables et une fait appel à trois variables (fonction 9). Cette dernière se calcule de la manière suivante :

$$FD9 = 0,32 (IFM) - 0,142 (CFM) + 0,014 (AFM - AreaCirc) - 6,626$$

Point discriminant = - 0,012, le centroïde « hommes » est 0,313 et le centroïde « femmes » est -0,337.

FD n°	Variable	Coefficient	Centroïde groupe ♂	Centroïde groupe ♀	Valeur seuil	Prédictions correctes ♂ (%)	Prédictions correctes ♀ (%)	Moyenne prédictions correctes (%)
1	IFM	0,536	0,298	-0,321	-0,0115	67,1	64,5	65,8
	constante	-16,071						
2	AFM (Teixeira)	0,011	0,321	-0,346	-0,0125	67,1	63,2	65,2
	constante	-9,202						
3	CFM	0,176	0,289	-0,312	-0,0115	67,1	61,8	64,6
	constante	-17,138						
4	AFM (Routal)	0,011	0,323	-0,348	-0,0125	65,9	63,2	64,6
	constante	-9,216						
5	AFM (AreaCirc)	0,011	0,29	-0,312	-0,011	65,9	63,2	64,6
	constante	-8,522						
6	LFM	0,459	0,265	-0,286	-0,0105	63,4	56,6	60,1
	constante	-16,205						
7	IFM	0,317	0,312	-0,337	-0,0125	70,7	69,7	70,3
	constante	-17,562						
8	WFM	0,316	0,313	-0,337	-0,012	69,5	69,7	69,6
	constante	-13,503						
9	IFM	0,32	0,313	-0,337	-0,012	68,3	69,7	69
	CFM	-0,142						
	AFM (AreaCirc)	0,014						
	constante	-6,626						
10	IFM	0,152	0,324	-0,35	-0,013	67,1	67,1	67,1
	constante	-11,443						
11	IFM	0,114	0,324	-0,35	-0,013	67,1	67,1	67,1
	constante	-10,867						

Tableau 7 – Fonctions discriminantes (FD) pour estimer le sexe s'appuyant sur des mesures du FM proposées par Gapert *et al.* (2009).

La classification correcte attendue pour cette fonction est de 68,3 % pour les hommes et 69,7% pour les femmes. Il faut noter que les FD univariées ont montré une capacité moindre à classer correctement les crânes masculins et féminins en comparaison aux résultats obtenus par les FD multivariées. La variable la plus fiable pour l'estimation du sexe est la IFM (65,8 %) suivie par l'AFM (mesurée selon l'équation de Teixeira) (65,2 %) et le CFM (64,6 %). La meilleure combinaison de variables concerne FD 7 (IFM + CFM ; 70,3 %) puis FD 10 (IFM + AFM ; 69,6%) et FD 9 (IFM + CFM + AFM ; 69 %).

Comme l'avaient déjà relevé Westcott et Moore-Jansen (2001), il est nécessaire de connaître la population d'origine du crâne à expertiser afin de choisir une méthode d'analyse basée sur les données de cette population ou du moins une population ayant une expression similaire du dimorphisme sexuel et des variables anthropométriques générales

En 2011, Macaluso a repris les différentes mesures du FM et des condyles occipitaux ainsi que les équations du calcul de l'AFM publiées par Gapert *et al.* (2009). La méthodologie est appliquée sur un échantillon de 68 individus (36 ♀ et 32 ♂) âgés de 30 à 70 ans et issus de la collection de G. Olivier du MNH à Paris. À nouveau, l'auteur constate que les valeurs des variables mesurées sont plus élevées chez les hommes (Tabl. 2). Des différences significatives sont seulement relevées pour la IFM, la LMC, la IMC droits et gauches, les LBiC et DmC (voir Tabl. 1 et 6 pour les définitions). Les sujets féminins présentent une variabilité plus grande pour les mesures du FM tandis que, pour les hommes, la variabilité est plus importante pour les diamètres condyliens et les distances

intercondyliennes. L'analyse par FD pas-à-pas, montre que ce sont les mesures réalisées au niveau des condyles qui permettent la meilleure discrimination des sexes (66% de précision ; ♂ = 71,4% ; ♀ = 60%) avec cependant un pourcentage de biais dû au sexe de 11,4%. Les variables du FM ne donnent pas de résultats satisfaisants.

Le niveau de dimorphisme sexuel semble peu élevé dans cette collection, ce qui peut s'expliquer par des variations de grandeurs importantes des différentes mesures chez les deux sexes ; il existe donc un « *overlapping* » marqué pour la plupart des variables entre les deux sexes. Dès lors, l'analyse ostéométrique de la base du crâne ne peut être considérée comme une méthode suffisamment fiable (classement entre 70 et 80% de réussite) pour déterminer le sexe au sein de cette population spécifique.

Afin de mieux adapter les différentes méthodes d'estimation des variables et par là, l'estimation du sexe à une population spécifique, Lopez-Capp *et al.* (2018) ont établi des tables de références par une approche statistique innovante. Ces auteurs ont relevé quatre variables du FM (LFM, IFM et AFM { M_1 = Teixeira et M_2 = Routal}) dans un échantillon de 100 individus (âge moyen de 57,03 ± 19,07 ans ; étendue de 18 à 104 ans) comportant 53 hommes (âge moyen : 54,15 ± 18,95 ans) et de 47 femmes (âge moyen : 60,28 ± 18,89 ans). Cet échantillon est issu d'une collection ostéologique documentée du XX^e siècle de l'*Institute of Teaching and Research in Forensic Sciences* (Brésil). Pour estimer le sexe, les valeurs mesurées sont introduites dans les équations pour les hommes et les femmes. Le produit le plus grand indique le sexe (voir exemples Tabl. 8).

Exemple 1 : LFM = 33,22 mm et IFM = 36,29 mm

Pour les hommes : - 114,89 + (3,48 × 33,22) + (3,439 × 36,29) = 125,56

Pour les femmes : - 104,30 + (3,312 × 33,22) + (3,275 × 36,29) = 124,57

Le **produit le plus élevé** indique le sexe ; dans ce cas sexe **masculin** avec une probabilité de 64 %.

Exemple 2 : LFM = 31,51 mm, IFM = 28,12 mm et M_1 = 698,17 mm²

Pour les hommes : - 9038,531 + (544,087 × 31,51) + (540,939 × 28,12) + (- 20,621 × 698,17) = 8919,89

Pour les femmes : - 9008,5 + (543,333 × 31,51) + (540,193 × 28,12) + (- 20,599 × 698,17) = 8920,55

Le **produit le plus élevé** indique le sexe ; dans ce cas sexe **féminin** avec une probabilité de 66,0 % et de 71,7% pour le sexe **masculin**.

Tableau 8 – Exemples d'application de la méthode de Lopez-Capp *et al.* (2018).

FD n°	Variable	Coefficient	Centroïde groupe ♂	Centroïde groupe ♀	Valeur seuil	Prédictions correctes (%) ♂	Prédictions correctes (%) ♀	Moyenne prédictions correctes (%)
1	LFM	0,496	0,503	-0,48	0,012	74,4	64,4	69,3
	constante	-16,826						
2	IFM	0,42	0,457	-0,437	0,01	69,8	66,7	68,2
	constante	-11,912						
3	CFM	0,158	0,536	-0,512	0,012	72,1	62,2	67
	constante	-15,109						
4	AFM	0,01	0,507	-0,484	0,012	76,7	62,2	69,3
	constante	-7,478						
5	LFM	0,1366	0,823	-0,787	0,018	90,7	73,3	81,8
	IFM	0,0786						
	CFM	0,1656						
	AFM	20,0086						
	constante	212,273						

Tableau 9 – Fonctions discriminantes (FD) pour estimer le sexe s'appuyant sur des mesures du FM proposées par Uthman *et al.* (2012).

Une différence statistique significative existe entre les deux aires calculées selon les deux formules M_1 et M_2 ($p < 0,001$) ; cette différence se retrouve entre les mesures des variables des deux sexes comme nous l'avons déjà rencontré à de nombreuses occasions dans la littérature (Tabl. 2). Toutes les moyennes de ces mesures sont plus élevées chez les hommes. Les FD univariées donnent un taux d'exactitude variant entre 56 et 62 %. Les analyses multivariées augmentent cette précision entre 60 et 65 %. L'équation multivariée qui aboutit au pourcentage d'exactitude le plus important est celle basée sur l'association de LFM, IFM et M_1 qui fournissait déjà le meilleur résultat dans l'étude de Gapert *et al.* (2009).

Dans l'analyse discriminante, les scores discriminants sont calculés en utilisant la moyenne des scores des groupes centroïdes des hommes et des femmes (Gapert *et al.*, 2009). Les courbes du « Receiver Operating Characteristic » (ROC)⁴ furent employées afin de développer une table de référence pour la population brésilienne à l'aide des quatre variables du FM. Dans cette table, les auteurs fournissent, pour les deux sexes, les valeurs des variables en fonction des pourcentages de classification correcte (70, 80, 90 et 95 %) ; le point discriminant étant calculé sur la moyenne des valeurs moyennes des sexes (Saini *et al.*, 2011). L'analyse « ROC » montre que M_2 est

la variable de prédiction la plus performante pour estimer le sexe (AUC⁵ = 0,693), suivie par M_1 (AUC = 0,691), IFM (AUC = 0,633) et LFM (AUC = 0,627).

Certains auteurs ont associé des variables des dimensions de la tête aux variables classiques relevées sur le FM. En 2012, Uthman *et al.* ont ainsi étudié les CT scans hélicoïdaux d'un échantillon de 88 sujets (43 ♂ et 45 ♀ âgés de 20 à 49,9 ans) d'origine irakienne. Les diverses variables du FM (LFM, IFM, CFM et AFM) furent mesurées numériquement et associées à la circonférence et la longueur de la tête (à l'aide d'un logiciel du CT scan avec comme référence l'euryon). Comme de coutume, les valeurs des variables sont plus grandes chez les hommes (Tabl. 2) et toutes les mesures sont significativement corrélées entre elles ($p < 0,01$). La corrélation la plus importante entre CFM et AFM se rencontre tant chez les hommes ($r = 0,95$) que chez les femmes ($r = 0,97$). Les corrélations les plus faibles se situent entre les IFM et LFM (chez les hommes : $r = 0,44$; chez les femmes : $r = 0,77$). Les mensurations de la tête ne montrent aucune corrélation avec les mesures des variables du FM pour les deux sexes. Uthman *et al.* (2012) proposent six FD basées sur des mesures du FM (Tabl. 9). La CFM est la variable la plus discriminante suivie par l'AFM. En prenant en compte toutes les mensurations du FM dans le modèle de régression (fonction n°5), l'exactitude atteint 81,8 %.

⁴ La ROC (Receiver Operating Characteristic Curve) est une analyse statistique qui mesure la performance discriminante de tests diagnostiques ou prédictifs (Choi, 1998 ; Park *et al.*, 2004).

⁵ L'AUC (Area under ROC curve), ou aire sous la courbe, est une mesure de la performance d'un paramètre à distinguer deux groupes.

L'étude récente de Bolz *et al.* (2020) a examiné les CT scans de 99 hommes et 99 femmes âgés de 18 à 95 ans provenant d'autopsies médico-légales. Les mesures habituelles (LFM, IFM, CFM et AFM) ont été relevées suivant le système MPR images⁶ utilisant le logiciel *OsiriX imaging* qui calcule automatiquement les deux dernières variables. Ces auteurs proposent 15 FD dont la valeur seuil est 0 (Tabl. 10). Une valeur négative indique une estimation du sexe féminine. Pour chaque formule, le pourcentage de prédictions correctes est plus haut pour les crânes féminins que pour les crânes masculins. Une valeur « biais du sexe » exprimée en % est fournie. Elle décrit la grandeur de la distorsion entre les femmes et les hommes pour chaque fonction. La formule 13 avec une combinaison de 3 variables qui est caractérisée par 74,2 % d'exactitude et un biais sexe de -3,1 % est la plus fiable.

Bolz *et al.* (2020) ont également remarqué que les valeurs moyennes des différentes variables fluctuaient fortement suivant les différentes populations (Tabl. 2). Les valeurs les plus élevées se retrouvent dans les populations suisse, australienne et allemande ; les plus basses dans les populations d'Inde et d'Iraq (Routal *et al.* 1984 ; Uthman *et al.* 2012 ; Westcott et Moore-Jansen 2001). Les valeurs moyennes de LFM, IFM et CFM diffèrent de 4 à 5 mm entre ces populations, ce qui représente une différence plus grande qu'entre les individus de deux sexes d'une même population. Il est donc nécessaire de développer des standards « *population dependant* » adaptés à chaque population concernée (Lopez-Capp *et al.*, 2018).

Gruber *et al.* (2009 et 2013) ont néanmoins constaté que les dimensions du FM sont relativement semblables pour la plupart des populations étudiées actuellement. Dès lors, les mensurations du FM ne seraient pas de bons indices pour estimer l'appartenance biogéographique.

8. DIMORPHISME SEXUEL CHEZ LES IMMATURES

Bien que de nombreuses études ont examiné les modalités du développement ontogéniques de l'os occipital (Coqueugniot *et al.*, 2002 ; Niel

et al., 2019), en particulier celui du *foramen magnum*, ainsi que l'utilité de cet élément osseux pour l'estimation de l'âge au décès des sujets immatures (Redfield, 1970 ; Cardoso *et al.*, 2013 ; Niel *et al.*, 2022), très rares sont les travaux qui ont exploré l'intérêt de la base du crâne pour la diagnose sexuelle de ces sujets juvéniles (Haijun *et al.*, 2021).

En 2010, Veroni et collaborateurs ont étudié 36 crânes de sujets immatures (17 garçons et 19 filles) de la collection identifiée de Lisbonne. Ces derniers étaient répartis en 11 classes d'âge allant de 8 à 19 ans. Cinq mensurations ont été prises : LFM, IFM, LMC, IMC et IBiC (voir Tabl. 1 et 6 pour les définitions). Les corrélations entre l'âge et les différentes variables n'étaient pas significatives et s'étendaient de $r = -0,117$ (LMC gauche) à $r = 0,247$ (IFM). Toutes les dimensions étaient plus grandes pour les sujets de sexe masculin mais seules les LFM ($p = 0,027$), IFM ($p = 0,049$) et IMC gauche ($p = 0,049$), étaient significativement différentes. La fonction discriminante, établie à partir de ces trois variables pour le sexe biologique, a permis d'atteindre une classification correcte de 75,8 %. Ces résultats observés pour l'échantillon composé d'individus immatures âgés de plus de 8 ans sont relativement similaires aux résultats obtenus chez les adultes tant pour le dimorphisme sexuel que pour le pourcentage de classifications correctes. Il faut cependant rester prudent car le nombre de sujets dans chaque classe d'âge était relativement faible (entre 1 à 3 individus). De plus, aucune validation croisée n'a été effectuée au sein de l'échantillon, ni sur un autre échantillon indépendant. Boucherie (2023) a récemment développé une approche similaire au sein d'un corpus immature identifié d'Europe de l'Ouest. Des différences significatives ont été démontrées entre les sexes pour certaines mesures prises au niveau des condyles occipitaux au sein du groupe prépubère (6-13 ans) et pour des variables métriques des condyles occipitaux et du processus mastoïde au sein du groupe pubère (14-19 ans). En revanche, étant donné la taille réduite des effectifs, il n'a pas été possible dans cette étude d'établir de modèles prédictifs en fonction de ces classes d'âge. Utilisant les outils de la morphométrie géométrique, Niel *a.*, en outre, récemment montré dans son étude doctorale menée sur un échantillon de fœtus et d'enfants contemporains âgés de moins de deux ans que la conformation des *pars basilaris* des filles et des garçons ne divergeait pas (Niel, 2019).

⁶ Le système MPR (*multiplanar reconstruction*) images utilise les différentes coupes tomodensitométriques pour créer des images dans d'autres plans, qui n'ont pas été acquises directement pendant le processus d'imagerie.

FD n°	Variable	Coefficient	Centroïde groupe ♂	Centroïde groupe ♀	Valeur seuil	Prédictions correctes ♂ (%)	Prédictions correctes ♀ (%)	Moyenne prédictions correctes (%)	Biais du sexe (%)
1	LFM	0,469	0,611	-0,611	0	70,7	72,7	71,7	-2
	constante	-17,724							
2	IFM	0,436	0,439	-0,439	0	59,6	70,7	65,2	-11,1
	constante	-14,027							
3	CFM	0,161	0,608	-0,608	0	68,7	78,8	73,7	-10,1
	constante	-17,403							
4	AFM	0,009	0,564	-0,564	0	67,7	77,8	72,7	-10,1
	constante	-8,225							
5	LFM	0,383	0,635	-0,635	0	68,7	74,7	71,7	-6
	IFM	0,134							
	constante	-18,825							
6	LFM	0,252	0,636	-0,636	0	71,7	76,8	74,2	-5,1
	CFM	0,081							
	constante	-18,318							
7	LFM	0,330	0,626	-0,626	0	69,7	74,7	72,2	-5
	AFM	0,003							
	constante	-15,317							
8	IFM	-0,118	0,615	-0,615	0	71,7	77,8	74,7	-6,1
	CFM	0,194							
	constante	-17,227							
9	IFM	-0,115	0,570	-0,570	0	66,7	74,7	70,7	-8
	AFM	0,011							
	constante	-6,296							
10	CFM	0,244	0,614	-0,614	0	70,7	76,8	73,7	-6,1
	AFM	-0,005							
	constante	-21,931							
11	LFM	0,307	0,637	-0,637	0	69,7	74,7	72,2	-5
	IFM	0,070							
	CFM	0,044							
	constante	-18,61							
12	LFM	0,443	0,637	-0,637	0	69,7	74,7	72,2	-5
	IFM	0,203							
	AFM	-0,002							
	constante	-21,160							
13	LFM	0,239	0,638	-0,638	0	72,7	75,8	74,2	-3,1
	CFM	0,141							
	AFM	-0,003							
	constante	-21,302							
14	IFM	-0,089	0,618	-0,618	0	71,7	74,7	73,2	-3,1
	CFM	0,239							
	AFM	-0,003							
	constante	-20,166							
15	LFM	0,341	0,643	-0,643	0	69,7	74,7	72,2	-3
	IFM	0,141							
	CFM	0,105							
	AFM	-0,006							
	constante	-23,844							

Tableau 10 – Fonctions discriminantes (FD) pour estimer le sexe biologique s'appuyant sur des mesures du FM proposées par Bolz *et al.* (2020).

9. LE FORAMEN MAGNUM ET L'EFFET DE L'ÂGE CHEZ L'ADULTE

Les modifications de la morphométrie du squelette durant l'âge adulte et l'âge avancé peuvent être dues à différents facteurs (hormonaux, maladies dégénératives, déficiences nutritionnelles) et se révéler « populations dépendantes » (Gruber *et al.*, 2009 ; Gapert *et al.*, 2013).

Gapert *et al.* (2013) se sont intéressés à l'importance des effets possibles de l'âge sur les variables morphométriques de la base du crâne.

L'étude a été conduite sur un échantillon adulte de 69 crânes de sexe masculin ($52,4 \pm 18,4$ ans) et 69 crânes féminins ($54,1 \pm 18,5$ ans) de la collection documentée de St Bride's Church – Londres). Les variables suivantes ont été mesurées : LMC, IMC, DmC, DMC, LBiC, LFM, IFM, AFM (voir Tabl. 1 et 6 pour les définitions) et la distance entre les orifices externes des canaux hypoglosses (DH_y). Le sexe a un effet sur ces variables ($p = 0,026$) mais l'interaction âge*sexe ne montre pas un effet significatif ($p = 0,813$). De plus, l'âge n'a pas d'effet significatif sur l'ensemble de l'échantillon ($p = 0,971$) ou sur l'échantillon par sexe ($\text{♂} : p = 0,861 ; \text{♀} : p = 0,567$). Un test t comparant les différentes variables dans deux groupes d'âge {< 50 ans (gr. 1) et > 50 ans (gr. 2)} ne révèle aucune différence significative. En revanche, le dimorphisme sexuel dans le gr. 2 est plus prononcé que dans le gr. 1. Aucune corrélation entre l'âge et les variables n'est exprimée sur l'ensemble de l'échantillon. Il existe toutefois une légère diminution des valeurs du LBiC avec l'âge chez les sujets féminins et de DmC chez les hommes du gr. 2. Pour l'échantillon masculin, la LMC droite est corrélée significativement avec l'âge ; en revanche, pour l'échantillon féminin, aucune variable (FM et condyles occipitaux) n'est corrélée avec l'âge. Le test t appliqué à un échantillon indépendant ne démontre pas d'effet de l'âge sur les variables de la région du FM.

Le meilleur taux de prédiction obtenu par FD dans le gr. 2 (> 50 ans) comparé au gr. 1 (< 50 ans) est dû principalement à une augmentation de prédiction correcte avec l'âge dans l'échantillon féminin. Cette constatation est primordiale car l'opinion générale selon laquelle une masculinisation du crâne féminin se développe avec l'âge, ne s'étend pas à la région du FM. C'est l'effet contraire qui se produit dans cette région de la base du crâne ; la séparation entre les sexes est plus nette dans le gr. 2 que dans le gr. 1.

L'étude d'Akay *et al.* (2017) portant sur 190 sujets ($\text{♂} : 53,7\%$ et $\text{♀} : 46,3\%$) âgés de 17 à 81 ans et classés en cinq groupes d'âges (17-25 ; 26-35 ; 36-45 ; 46-55 et >56) a montré qu'il n'existait pas de différence significative entre ces groupes pour toutes les variables mesurées (LFM, IFM, CFM). Cette absence de différence a aussi été observée entre les groupes d'âges au sein de l'échantillon masculin et de l'échantillon féminin.

Par ailleurs, l'âge ne semble pas avoir un effet apparent sur l'estimation du dimorphisme sexuel, ce que corrobore l'étude de Williams (1987) réalisée sur un échantillon archéologique⁷.

10. ÉVOLUTION SÉCULAIRE DES DIMENSIONS DU FORAMEN MAGNUM ET CORRÉLATION AVEC LA STATURE

Dès lors que la taille de l'encéphale et celle du corps ont changé au fil du temps, il paraissait utile de se questionner sur une éventuelle influence séculaire sur les dimensions du FM.

Pour répondre à cette question, Gruber *et al.* (2009) se sont intéressés au FM dans un échantillon constitué d'individus originaires d'Europe centrale couvrant une période s'étalant du Pléistocène tardif aux temps modernes⁸. Les sujets ont été groupés en trois catégories d'âge : 20-39 ans ; 40-59 ans et 60-80 ans. Les mesures de 111 LFM et de 110 IFM ont été réalisées. La moyenne des LFM est significativement supérieure à la moyenne des IFM ($p < 0,001$) ce qui correspond à une forme ovale. L'étude ne révèle pas de dimorphisme sexuel significatif (LFM : $p = 0,55$; IFM : $p = 0,08$) ; bien que les mesures des femmes soient en moyenne inférieures à celles des hommes. La corrélation entre LFM et IFM est faible ($r = 0,34$) mais significative ($p < 0,001$). La corrélation avec l'âge est faible et non significative (LFM : $r = 0,22$; IFM : $r = 0,10$). La corrélation entre les mesures du FM et la stature (représentée par la longueur du fémur) est significative pour le LFM ($r = 0,28$) ($p = 0,007$) et la IFM ($r = 0,25$) ($p = 0,019$) mais reste limitée. Ainsi, ces dimensions ne doivent pas être

⁷ Précisons toutefois que le sexe biologique de ces individus archéologiques a été établi à partir de la morphologie du bassin et du crâne. La valeur de ce résultat reste de ce fait moindre car il ne s'agit pas d'une collection documentée (âge et sexe connus).

⁸ Cet échantillon ne comportait pas d'individu de l'âge du Fer ni de la période romaine à cause de la pratique majoritaire de la crémation.

utilisées comme variables prédictives robustes pour l'estimation de la stature comme déjà démontré par Röthig en 1971.

Les modifications de la LFM au cours du temps ne sont pas très claires entre les divers groupes des périodes historiques et une modification séculaire ne peut donc être envisagée pour cette mensuration. La IFM ne présente aucune différence significative entre les différents groupes historiques. Un léger élargissement de la IFM au cours du temps pourrait être supposé. Avec un échantillon d'effectif plus élevé, la modification séculaire des dimensions du FM serait tout au plus relativement faible ! Toute modification séculaire des dimensions et de la taille du FM est donc à considérer avec prudence.

Le dimorphisme sexuel du FM n'est quasiment pas en relation avec la stature (Röthig, 1971 ; Burdan *et al.*, 2012) ni avec les dimensions du canal vertébral (Hasue *et al.*, 1983 ; Kikuchi *et al.*, 1984 ; Fox et Wilczynski, 1986).

Abdelaziz *et al.*, ont étudié en 2020 les caractéristiques du FM par CT scan (*Multislices helicoidal CT scanner*) sur une population soudanaise en y associant certaines mesures de la base du crâne et la stature. L'échantillon était composé de 50 patients (60% d'hommes et 40% de femmes) dont l'âge moyen était de $49,24 \pm 19,69$ ans. La stature moyenne était de $165,66 \pm 7,9$ cm avec une variation de 145 à 180 cm. Les mesures relevées numériquement par le logiciel étaient : LFM, IFM, AFM ainsi que la largeur de la base du crâne (mesurée à la racine des processus zygomatiques en un point situé dans la partie la plus concave) et la longueur de la base du crâne mesurée comme la distance entre l'opistocranion et la droite déterminant la largeur de la base. Ces auteurs n'ont pas constaté de différence significative de la LFM entre les sexes mais elle l'est pour la IFM (Tabl. 2). La corrélation entre la LFM et la longueur de la base du crâne est très faible ($r = 0,177$) ainsi qu'avec la stature ($r = 0,023$) ; la corrélation entre la stature et la longueur de la base du crâne est de 0,044. Toutes ces corrélations sont relativement faibles et montrent que la stature n'a donc finalement que peu d'influence sur les dimensions du FM.

11. CONCLUSIONS

À l'analyse de cette revue non exhaustive de l'utilité du FM et de sa région pour estimer certaines variables biologiques, nous constatons, tout

d'abord, une disparité des résultats qui peut être due à une approche méthodologique différente, à la taille de l'échantillon, à son origine chronologique (archéologique vs moderne), à la reproductibilité des méthodes et aux méthodes statistiques mises en œuvre. Ceci limite nécessairement les comparaisons entre études.

Les formes de FM les plus courantes dans la littérature sont rondes ou ovales mais toutes se retrouvent selon des pourcentages variables dans la plupart des populations.

L'influence de l'origine biogéographique reste peu ou pas significative lors de l'étude des variables du FM. Par contre, à partir des mêmes variables étudiées, et concernant le dimorphisme sexuel, la classification correcte – dans la grande majorité des études – plafonne à 75-80 %. (Tabl. 5, 7 et 8). Notons néanmoins que Routil *et al.* (1984) auraient correctement classé 100% des individus étudiés, tandis qu'Agarwal *et al.* (2021), en utilisant la régression logistique associée à la courbe ROC, obtiennent une classification correcte, atteignant 92,70%. Mentionnons également que ce pourcentage varie d'un sexe à l'autre. Il faut avant tout garder à l'esprit que si la tête osseuse et l'os coxal sont présents, l'estimation correcte du sexe passe à 98%. L'os coxal seul - ou l'os coxal associé aux os longs - peut permettre d'obtenir une estimation correcte de plus de 95% (Bruzek, 2002 ; Murail *et al.*, 2005 ; Bruzek *et al.*, 2017). Les os longs seuls présentent un taux d'individu correctement classés variant de 80 à 90% (Krogman & İşcan, 1986).

Il ressort également de cette revue de la littérature que la relation entre le FM et l'âge ou la stature est très faible voire inexistante. Cependant, l'effet « âge » devrait être étudié sur des individus issus de populations contemporaines afin de prendre en compte d'éventuelles évolutions séculaires (Gapert *et al.*, 2013).

La seule constante retrouvée mais attendue dans l'ensemble des études examinées, est le dimorphisme sexuel significatif (mais non systématique !) des mensurations qui sont supérieures chez l'homme.

C'est pourquoi, à la lumière des études les plus récentes, il est nécessaire de connaître la population d'origine du crâne à examiner ou du moins une population ayant une expression similaire du dimorphisme sexuel et des variables anthropométriques générales.

Une nouvelle orientation de recherche intéressante, eu égard au nombre infime (moins d'une quinzaine) d'études consacrées à ce sujet, serait d'approfondir le dimorphisme sexuel des variables de la base du crâne à partir d'échantillons adultes plus conséquents ainsi que d'exploiter ces variables chez des immatures (Boucherie et al., 2021 ; Boucherie, 2023).

Les méthodes relatives au FM et à son environnement anatomique ne sont donc à utiliser qu'en cas de crâne incomplet ou fragmenté. Si la tête osseuse est entière, cette méthode ne vient que confirmer l'étude morphométrique plus complète effectuée par d'autres méthodes plus performantes et plus indiquées sur l'ensemble du crâne (Jantz & Ousley, 2005 ; Walker, 2008 ; Garvin et al., 2014).

En conclusion, cette revue de l'état de l'art sur les applications du FM en anthropologie indique que les méthodes doivent être employées avec précaution pour estimer le sexe et l'origine biogéographique d'un individu et plus particulièrement dans un contexte médico-légal.

En effet, la tâche de l'expert en médecine légale (et/ou en anthropologie médico-légale), au service de la justice, est non seulement de déterminer la cause du décès, mais également d'aboutir à l'identification des restes humains. Cette identification est toujours comparative et s'appuie sur diverses disciplines qui ont ce but commun, allant de l'examen morphologique à la comparaison via l'ADN en passant par l'odontologie.

Face à des fragments osseux ou à des pièces osseuses limitées, l'expert doit tenter d'obtenir le maximum d'informations à partir de ce dont il dispose. C'est ainsi que l'examen d'une base du crâne reste primordial dès lors que cette structure est souvent très résistante à la destruction naturelle ou non. Il peut aussi s'avérer utile dans l'appariement de pièces osseuses d'une même personne.

Ceci renforce une fois de plus, l'intérêt de la morphométrie du *foramen magnum*, malgré les difficultés et les imprécisions rencontrées.

Remerciements

Les auteurs remercient Anne-Marie-Wittek (ADIA) pour la réalisation du dessin d'os occipital.

Bibliographie

- ABDELAZIZ I., ALGHAMDI S. S., HAROUN A., YOUSEF M., TAJALDEEN A., ALJONDI R., ALGHAMDI S. & ZIDAN M., 2020. Characterization of the foramen magnum in a Sudanese population using computed tomography. *International Journal of Biomedicine*, **10** (3) : 221-225.
- ABO EL-ATTA H. M., ABDEL-RAHMAN R. H., EL-HAWARY G. & ABO EL-AL-ATTA. H. M., 2020. Sexual dimorphism of foramen magnum: An Egyptian study. *Egyptian Journal of Forensic Sciences*, **10** (1), 12 p.
- AGARWAL H. K., SETIA P. S. & PANDEY S., 2021. Virtual determination of sex: Estimating cut off value of digital metric traits of foramen magnum on three-dimensional computed tomography with receiver operating characteristic and logistic regression analysis. *Journal of Forensic Science and Medicine*, **7** : 1-8.
- AKAY G., GÜNGÖR K. & PEKER İ., 2017. Morphometric analysis of the foramen magnum using cone beam computed tomography. *Turkish Journal of Medical Sciences*, **47** : 1715-1722.
- BELLANGER L. & TOMASSONE R., 2014. *Exploration de données et méthodes statistiques*. Éditions Ellipses, Paris, 479 p.
- BOLZ S., GAPERT R., HARTWIG S., TSOKOS M. & OESTERHELWEG L., 2020. Evaluation of foramen magnum sexual dimorphism in a modern documented German population using post-mortem computed tomography. *Forensic Imaging*, **21** : 200352 (7 pages).
- BORIES J., 1996. *Le crâne humain. Ostéologie – Anatomie radiologique*. Ed. Springer-Verlag, Paris, 272 p.
- BOUCHERIE A. (2023). *Analyse du dimorphisme sexuel de variables métriques crâniennes : intérêts archéo-anthropologiques et forensiques*. Thèse de doctorat en archéologie, ULB, 715 p.
- BOUCHERIE A., POLET C., LEFÈVRE P. & VERCAUTEREN M., 2021. Sexing the bony labyrinth: A morphological investigation in a subadult and adult Belgian identified sample. *Journal of Forensic Sciences*, **66** (3) : 808-820.
- BRUZEK J., 2002. A method for visual determination of sex, Using the human hip bone. *American Journal of Physical Anthropology*, **117** (2) : 157-168.

- BRUZEK J., SANTOS F., DUTAILLY B., MURAIL P. & CUNHA E., 2017. Validation and reliability of the sex estimation of the human os coxae using freely available DSP2 software for bioarchaeology and forensic anthropology. *American Journal of Physical Anthropology*, **164** (2) : 440-449.
- BURDAN F., SZUMIŁO J., WALOCHA J., KLEPACZ L., MADEJ B., DWORZAŃSKI W., KLEPACZ R., DWORZAŃSKA A., CZEKAJSKA-CHEHAB E. & DROP A., 2012. Morphology of the foramen magnum in young Eastern European adults. *Folia Morphologica*, **71** (4) : 205-216.
- CARDOSO H.F.V., GOMES J., CAMPANACHO V. & MARINHO L., 2013. Age estimation of immature human skeletal remains using the post-natal development of the occipital bone. *International Journal of Legal Medicine*, **127** (5) : 997-1004.
- CATALINA-HERRERA C. J., 1987. Study of the anatomic metric values of the foramen magnum and its relation to sex. *Acta Anatomica*, **130** : 344-347.
- CHETHAN P., PRAKASH K. G., MURLIMANJU B. V., PRASHANTH K. U., PRABHU L. V., SARALAYA V. V., KRISHNAMURTHY A., SOMESH M.S. & KUMAR C.G., 2012. Morphological analysis and morphometry of the foramen Magnum: An anatomical investigation. *Turkish Neurosurgery*, **22** (4) : 416-419.
- CHOI B. C., 1998. Slopes of a receiver operating characteristic curve and likelihood ratios for a diagnostic test. *American Journal of Epidemiology*, **148** (11) : 1127-1132.
- COQUEUGNIOT H. & LE MINOR J-M., 2002. Fermeture des synchondroses intra-occipitales : implication dans la configuration du foramen magnum. *Comptes Rendus Palevol*, **1** (1) : 35-42.
- DELLINGER J-C. & LE MINOR J-M., 1993-94. Morphologie de la synchondrose basi-exoccipitale au cours de la croissance humaine. *Archives d'Anatomie, d'Histologie et d'Embryologie normales et expérimentales*, **75** : 31-46.
- ESPIÑOZA E. G., AYALA C. P., ORTEGA L. B., COLLIPAL E. L. & SILVA H. M., 2011. Morfometría tomográfica del foramen magno y su relación con el sexo y la etnia mapuche. *Revista ANACEM (Asociación Nacional Científica de Estudiantes de Medicina)*, **5** (1) : 28-31.
- FOX J. H. & WILCZYNSKI W., 1986. Allometry of major CNS divisions: towards a reevaluation of somatic brain-body scaling. *Brain, Behavior and Evolution*, **28** : 157-169.
- GAPERT R., BLACK S. & LAST J., 2009. Sex determination from the foramen magnum: discriminant function analysis in an eighteenth and nineteenth century British sample. *International Journal of Legal Medicine*, **123** : 25-33.
- GAPERT R., BLACK S. & LAST J., 2013. Test of age-related variation in the craniometry of the adult human foramen magnum region: implications for sex determination methods. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, **9** (4) : 478-488.
- GAPERT R. & LAST J., 2005. The adult human occipital bone: measurement variance and observer error. In : ZAKRZEWSKI S. R. & CLEGG M. (éd.), *Proceedings of the Fifth Annual Conference of the British Association for Biological Anthropology and Osteoarchaeology*. BAR International Series. Archaeopress, Oxford : 119-122.
- GARCIA E .E., CARLOS A. P., LEANDRO O. B., ERIKA C. L. & HECTOR S. M., 2011. Tomographic morphometry of the foramen magnum and its relation to sex and Mapuche ethnicity. *Academic Journals Database*, **5** (1) : 28-31.
- GARVIN H.M., SHOLTS S.B. & MOSCAA L.A., 2014. Sexual dimorphism in human cranial trait scores: effects of population, age, and body size. *American Journal of Physical Anthropology*, **154** (2) : 259-269.
- GILES E. & ELLIOT O., 1963. Sex determination by discriminant function analysis of crania. *American Journal of Physical Anthropology*, **21** (1) : 53-68.
- GOCMEZ MAS N., CIRPAN S., AKSU F., YONGUC DEMIRCI G. N., LAFCI FAHRIOGLU S., DURMAZ O. & KARABEKIR S., 2018. The comparison of three methods used for estimating area of foramen magnum. *Journal of Craniofacial Surgery*, **29** (3) : 792-795.
- GOVSA F., OZER M. A., CELIK S. & OZMUTAF N. M., 2011. Three-dimensional anatomic landmarks of the foramen magnum to the craniovertebral junction. *Journal of Craniofacial Surgery*, **22** (3) : 1073-1076.

- GRUBER P., HENNEBERG M., BÖNI T. & RÜHLI F. J., 2009. The variability of human foramen magnum size. *Anatomical Record*, **292** : 1713-1719.
- GÜNAY Y. & ALTINTÖK M., 2000. The value of the size of foramen magnum in sex determination. *Journal of Clinical Forensic Medicine*, **7** (3) : 147-149
- HAIJUN L., HUIMIN C., WANQI D., SHANGBING Y., XIAOYONG X. & BO W., 2021. Anthropometrical Analysis of the foramen magnum in ancient children. *Journal of Craniofacial Surgery*, **32** (3) : 1063-1067.
- HASUE M., KIKUCHI S., SAKUYAMA Y. & ITO T., 1983. Anatomic study of the interrelation between lumbosacral nerve roots and their surrounding tissues. *Spine*, **8** : 55-58.
- HOLLAND T. D., 1986a. Sex determination of fragmentary crania by analysis of the cranial base. *American Journal of Physical Anthropology*, **70** : 203-208.
- HOLLAND T. D., 1986b. Race determination of fragmentary crania by analysis of the cranial base. *Journal of Forensic Sciences*, **31** : 719-725.
- HUSSON F., CORNILLON P-A., GUYADER A., JEGOU N., JOSSE J., KLUTCHNIKOFF N., LE PENNEC E., MATZNER-LOBER E., ROUVIÈRE L. & THIEURMEL B., 2018. *R pour la statistique et la science des données*, Presse Universitaires de Rennes, Rennes, 415 p.
- JANTZ R.L., & OUSLEY S.D., 2005. *FORDISC 3: computerized forensic discriminant function*. Version 3.1, The University of Tennessee, Knoxville, 68 p.
- KIKUCHI S., HASUE M., NISHIYAMA K. & ITO T., 1984. Anatomic and clinical studies of radicular symptoms. *Spine*, **9** : 23-30.
- KROGMAN W. M. & İŞCAN M. Y., 1986. *The human skeleton in forensic medicine*, 2^{ème} éd., Charles C. Thomas Publishing, Springfield (Illinois), 551 p.
- LANGLEY N. R. & JANTZ R. L., 2020. Secular change. In: KLALES A.R. (éd.), *Sex estimation of the human skeleton*. Academic Press, Waltham : 149-169.
- LOPEZ-CAPP T. T., RYNN C., WILKINSON C., SAAVEDRA DE PAIVA L. A., MICHEL-CROSATO E. & HAYE BIAZEVI M. G., 2018. Sexing the cranium from the foramen magnum using discriminant analysis in a Brazilian sample. *Brazilian Dental Journal*, **29** (6) : 592-598.
- MACALUSO Jr P. J., 2011. Metric sex determination from basal region of the occipital bone in a documented French sample. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, **23** : 19-26.
- MANTHEY L., JANTZ R.L., BONHERT M. & JELLINGHAUS K., 2017. Secular change of sexually dimorphic cranial variables in Euro-Americans and Germans. *International Journal of Legal Medicine*, **131** (4) : 113-1118.
- MARTIN R., 1928. *Lehrbuch der Anthropologie in systematischer Darstellung mit besonderer Berücksichtigung der Anthropologischen Methoden, für Studierende, Ärzte und Forschungsreisende*, Zweiter Band: Kraniologie, Osteologie. Gustav Fischer Ed, Jena, 3 vol., 1805 p.
- 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** (3-4) : 167-176.
- MURSHED K. A., ÇIÇEKİBAŞI A. E. & TUNCER I., 2003. Morphometric evaluation of the foramen magnum and variations in its shape: A study on computerized tomographic images of normal adults. *Turkish Journal of Medical Sciences*, **33** : 301-306.
- NIEL M., 2019. *Evaluation et estimation de l'âge de jeunes immatures : apports du couplage de la croissance et de la maturation du squelette et révision d'une méthode biométrique*. Thèse de doctorat en Anthropologie biologique, Aix-Marseille Université, 410 p.
- NIEL M., CHAUMOÎTRE K., CORNY J., LALYS L. & ADALIAN P., 2019. Maturation of the human foetal basioccipital: quantifying shape changes in second and third trimesters using Elliptic Fourier Analysis. *Journal of Anatomy*, **235** : 34-44.
- NIEL M., CHAUMOÎTRE K. & ADALIAN P., 2022. Age-at-death estimation of fetuses and infants in forensic anthropology: a new 'coupling' method to detect biases due to altered growth trajectories. *Biology*, **11** (2) : 200.

- PARK S. H, GOO J. M. & JO C. H., 2004. Receiver operating characteristic (ROC) curve: practical review for radiologists. *Korean Journal of Radiology*, **5** (1): 11-18.
- RADINSKY L., 1967. Relative brain size - A new measure. *Science*, **155** : 836-838.
- REDFIELD A., 1970. A new aid to aging immature skeletons: developments of the occipital bone. *American Journal of Physical Anthropology*, **33** (2): 207-220.
- RICHARDS G.D. & JABBOUR R.S., 2011. Foramen magnum ontogeny in *Homo sapiens*: A functional matrix perspective. *Anatomical Record*, **294** : 199-216.
- RÖTHIG W., 1971. Relationships between body height and diameter of the occipital foramen magnum in the adult. *Anthropologischer Anzeiger*, **33** : 48-51.
- ROUTAL R .R., PAL G. P., BHAGWAT S. S. & TAMANKAR B. P., 1984. Metrical studies with sexual di-morphism in foramen magnum of human crania. *Journal of the Anatomical Society of India*, **2** (33): 85-89.
- SAINI V., SRIVASTAVA R., RAI R. K., SHAMAL S. N., SINGH T. B. & TRIPATHI S.K., 2011. An osteometric study of Northern Indian populations for sexual dimorphism in craniofacial region. *Journal of Forensic Sciences*, **56** : 700-705.
- SAMARA O. A., AMARIN J. Z., BADRAN D. H., AL-KHAYAT O. W., SURADI H. H., SHATARAT A. T., & HADIDI M. T., 2017. Morphometric Analysis of the Foramen Magnum. *International Journal of Morphology*, **35** (4): 1270-1275.
- SCHEUER L. & BLACK S., 2000. *Developmental Juvenile Osteology*. San Diego (USA), Academic Press, 587 p.
- TAMBAWAL S. S., KARJODKAR F. R., SANSARE K., PRAKASH N., DORA A. C. 2016. Sexual dimorphism of foramen magnum using Cone Beam Computed Tomography. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, **44** : 29-34.
- TEIXEIRA W. R. G., 1982. Sex identification utilizing the size of the foramen magnum. *American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, **3** (3): 203-206.
- UKOHA U., EGWU O. A., OKAFOR I. J., ANYABOLU A. E., NDUKWE G. U. & OKPALA I., 2011. Sexual dimorphism in the foramen magnum of Nigerian adult. *International Journal of Biological and Medical Research*, **2** (4): 878-881.
- UTHMAN A. T., AL-RAWI N. H. & AL-TIMIMI J. F., 2012. Evaluation of foramen magnum in gender determination using helical CT scanning. *Dentomaxillofacial Radiology*, **41** : 197-202.
- VERONI A., NIKITOVIC D. & SCHILLACI M. A., 2010. Brief communication: Sexual dimorphism of the juvenile basicranium. *American Journal of Physical Anthropology*, **141** (1): 147-151.
- VINUTHA S. P., SURESH V. & SHUBHA R., 2018. Discriminant function analysis of foramen magnum variables in South Indian Population: A study of computerised tomographic images. *Anatomy Research International*, 2018 : Article ID 205629 (9 pages).
- WALKER P.L., 2008. Sexing skulls using discriminant function analysis of visually assessed traits. *American Journal of Physical Anthropology*, **136** (1): 39-50.
- WANI B.A., NAZIR N., SHEIKH R.A., & JAN T., 2021. Morphometric analysis of foramen magnum in the determination of sex using computed tomography. *Journal of Forensic Science and Medicine*, **7** (1): 9.
- WESCOTT D.J. & MOORE-JANSEN P. H., 2001. Metric variation in the human occipital bone: forensic anthropological applications. *Journal of Forensic Sciences*, **46** : 1159-1163.
- WILLIAMS M. M., 1987. *Sex determination of fragmentary crania by analysis of the cranial base: applications for the study of an Arikara skeletal sample*. Master's Thesis, University of Tennessee, 46 p.
- ZAIDI S. H. & DAYAL S. S., 1988. Variations in the shape of foramen magnum in Indian skulls. *Anatomischer Anzeiger*, **167** : 338-340.
- ZDILLA M. J., RUSSELL M. L., BLISS K. N., MANGUS K. R. & KOONS A. W., 2017. The size and shape of the foramen magnum in man. *Journal of Craniovertebral Junction and Spine*, **8** (3) : 205-221.

Adresses des auteurs

Philippe Lefèvre
François Beauthier
Jean-Pol Beauthier
Laboratoire d'Anatomie, Biomécanique et
Organogenèse (LABO)
Université libre de Bruxelles
Faculté de Médecine CP 619
808, route de Lennik
1070 Bruxelles (Belgique)
philippe.lefevre@ulb.be

Institut médico-légal Hainaut-Namur
Rue Masses Diarbois 112
6043 Charleroi (Belgique)

Caroline Polet
DO Terre et Histoire de la Vie
Institut royal des Sciences naturelles de Belgique
29, rue Vautier
1000 Bruxelles (Belgique)
cpolet@naturalsciences.be

Alexandra Boucherie
Caroline Polet
CREA-Patrimoine
Faculté de Philosophie et Sciences Sociales
Université libre de Bruxelles
50, avenue F. D. Roosevelt
1050 Bruxelles (Belgique)

