

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	7
PRÉAMBULE	9
I) ANATOMIE MANDIBULAIRE.....	9
II) LA MANDIBULE EN ANTHROPOBIOLOGIE	14
1. La mandibule en paléoanthropologie.....	14
2. La mandibule en tant qu'outil d'identification	16
3. Origine et évolution du dimorphisme sexuel mandibulaire	16
III) CONSIDÉRATIONS MÉTHODOLOGIQUES.....	21
1. La morphométrie traditionnelle	23
2. La morphométrie géométrique	27
3. Avantages de l'exploitation de données tomodensitométriques	39
TRAVAUX	43
PREMIÈRE PARTIE - APPORT DE LA MANDIBULE DANS LA DIAGNOSE SEXUELLE DE L'EXTRÉMITÉ CÉPHALIQUE	
I) LE DIMORPHISME SEXUEL DE L'EXTREMITE CEPHALIQUE	45
II) CONTEXTE	53
III) MATÉRIEL.....	55
IV) MÉTHODES	57
V) RÉSULTATS.....	66
VI) DISCUSSION	73
DEUXIÈME PARTIE - ÉVOLUTION DE LA MORPHOLOGIE MANDIBULAIRE AVEC LE VIEILLISSEMENT ET LA PERTE DENTAIRE.....	
I) CONTEXTE	79
II) MATÉRIEL.....	82
III) MÉTHODES	84
IV) RÉSULTATS.....	95
V) DISCUSSION	127
SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES	141
I) SYNTHÈSE DES RÉSULTATS.....	141
II) PERSPECTIVES.....	144
1. Applications en anthropologie et médecine légale	144
2. Applications chirurgicales	153
CONCLUSION.....	161
RÉFÉRENCES	163
ANNEXE	183

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 Anatomie osseuse mandibulaire.	10
Figure 2 Zones d'insertion musculaire sur le corps et les branches montantes mandibulaires.	13
Figure 3 Évolution de la morphologie crânienne et mandibulaire des homininés.	15
Figure 4 Évolution de la morphologie mandibulaire avec l'âge.	21
Figure 5 Recueil direct de mensurations crâniennes à l'aide d'un compas.	23
Figure 6 Mesure de la distance bizygomatique sur une acquisition tomodensitométrique crânienne.	24
Figure 7 Étapes de l'Analyse Procruste Généralisée.	30
Figure 8 Illustration des résidus Procrustes suite à une Analyse Procruste Généralisée.	31
Figure 9 Représentation sous la forme de silhouettes filaires des formes moyennes crânio-faciales des individus masculins et féminins d'une population australienne.	37
Figure 10 Méthode de Walker pour l'estimation sexuelle à partir de traits crânio-faciaux et mandibulaires.	47
Figure 11 Analyse métrique du dimorphisme sexuel mandibulaire à partir d'examen CBCT.	51
Figure 12 Histogramme représentant la distribution des 120 individus de l'échantillon.	56
Figure 13 Schéma du crâne en vue latérale et caudale illustrant le positionnement des landmarks crâniens et faciaux.	59
Figure 14 Schéma de la mandibule en vue latérale illustrant le positionnement des landmarks mandibulaires.	60
Figure 15 Placement des landmarks mandibulaires sur le logiciel OsiriX Medical Imaging software.	61
Figure 16 Analyse en Composantes Principales du crâne et de la mandibule..	70
Figure 17 Analyse en Composantes Principales du crâne (gauche) et de la mandibule (droite) de façon isolée.	71
Figure 18 Placement des landmarks mandibulaires sur le logiciel Horos DICOM Viewer.	86
Figure 19 Reconstruction volumique de la segmentation mandibulaire.	87
Figure 20 Représentation schématique de l'indice d'Eichner.	93
Figure 21 Analyse en Composantes Principales de l'effet de l'âge sur la morphologie mandibulaire : échantillon complet.	102
Figure 22 Analyse en Composantes Principales de l'effet de l'âge sur la conformation mandibulaire pour les individus masculins et féminins.	103
Figure 23 Taux de vieillissement mandibulaire pour les hommes et les femmes.	105
Figure 24 Vue de profil des variations morphologiques mandibulaires avec le vieillissement.	106
Figure 25 Vue antérieure des variations morphologiques mandibulaires avec le vieillissement.	107
Figure 26 Superposition des consensus des matrices osseuses mandibulaires pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) : vue de profil.	109
Figure 27 Superposition des consensus des matrices osseuses mandibulaires pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) : vue de face..	110
Figure 28 Illustration des trois groupes selon le degré d'édentement.	111

Figure 29 Répartition de l'analyse des composantes principales des formes mandibulaires (bleu pour masculin et rouge pour féminin) de chaque groupe. _____	114
Figure 30 Variation de la forme mandibulaire du sexe féminin vers le sexe masculin en vue de face : Groupe A (a), Groupe B (b) Groupe C (c). _____	115
Figure 31 Variation de la forme mandibulaire du sexe féminin vers le sexe masculin vue de profil. Groupe A (a), Groupe B (b) Groupe C (c). _____	115
Figure 32 Boxplot de la distribution de l'âge selon le degré de perte de calage dentaire (indice d'Eichner A, B et C) pour chaque sexe. _____	117
Figure 33 Boxplot de la répartition du volume mandibulaire selon le degré de perte de calage dentaire (indice d'Eichner A, B et C) pour chaque sexe. _____	119
Figure 34 Analyse en Composantes Principales de la conformation mandibulaire pour chaque groupe d'indice d'Eichner. _____	121
Figure 35 a) diagramme de la répartition des tailles centroïdes selon l'indice d'Eichner ; (b) taille centroïde entre chaque indice d'Eichner. _____	121
Figure 36 Superposition des consensus des matrices osseuses mandibulaires pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) pour chaque indice d'Eichner. _____	123
Figure 37 Variation des conformations mandibulaires féminines (a, b) et masculines (c, d) entre les indices d'Eichner A (en rouge) et C (en bleu). _____	124
Figure 38 Exemple de reconstruction faciale à partir d'un crâne sec. _____	151
Figure 39 Chirurgie de féminisation mandibulaire. _____	154
Figure 40 Simulation chirurgicale pré-opératoire d'une chirurgie orthognathique bimaxillaire. _____	155
Figure 41 Planification chirurgicale virtuelle de l'éxérèse d'un myxome odontogène mandibulaire gauche (en haut, à gauche) et simulation de la reconstruction mandibulaire par lambeau de fibula (en haut, à droite). _____	157
Figure 42 Développement d'une péri-implantite après plusieurs années de port d'une prothèse complète supra-implantaire mandibulaire. _____	158

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Critères morphologiques du dimorphisme sexuel du crâne et de la face d'après Quatrehomme (2015). _____	46
Tableau 2 Critères morphologiques du dimorphisme sexuel de la mandibule d'après Quatrehomme (2015). _____	50
Tableau 3 Composition de la population d'étude ($n = 120$). _____	55
Tableau 4 Définition et typologie des landmarks crâniens et faciaux. 8 landmarks sont médians et 13 bilatéraux. _____	58
Tableau 5 Définition et typologie des landmarks mandibulaires. 4 landmarks sont médians et 5 sont bilatéraux. _____	59
Tableau 6 Paramètres crâniométriques employés pour la diagnose sexuelle. _____	63
Tableau 7 Résultats de l'analyse univariée : valeurs moyennes des mesures crâniennes et mandibulaires pour les individus masculins et féminins et ratio de dimorphisme sexuel pour chaque paramètre mesuré (LG ratio). _____	67
Tableau 8 Modèles discriminants pour les deux sexes et les trois groupes d'âge. _____	69
Tableau 9 Analyse des variations de conformation du crâne et de la mandibule et fonction de l'âge et du sexe. _____	72
Tableau 10 Composition de l'échantillon. _____	83
Tableau 11 Définition des landmarks mandibulaires. _____	85
Tableau 12 Distances et angles utilisés pour l'analyse métrique. _____	89
Tableau 13 Valeur moyenne des mesures linéaires et angulaires selon les groupes d'âge. Leur variation et dimorphisme sexuel (DS) associé sont exprimés en pourcentage. _____	96
Tableau 14 Résultat de la régression linéaire entre le volume mandibulaire et âge. _____	96
Tableau 15 Effet de l'âge sur la conformation mandibulaire des individus féminins et masculins. L'échantillon est divisé en groupes de 10 ans ($n = 20$). _____	98
Tableau 16 Effet de l'âge sur la conformation mandibulaire des individus féminins et masculins. L'échantillon est divisé en groupes de 20 ans ($n = 40$). _____	98
Tableau 17 Comparaison par paires de groupes d'âge de 5 ans pour les individus masculins et féminins. L'échantillon est divisé en 8 groupes ($n = 10$). _____	99
Tableau 18 Comparaison par paires de groupes d'âge de 10 ans pour les individus masculins et féminins. L'échantillon est divisé en 4 groupes ($n = 20$). _____	99
Tableau 19 Composition des groupes d'âge selon un seuil établi à 55, 60 et 65 ans. _____	100
Tableau 20 Changements de conformation mandibulaire liés au vieillissement pour les individus masculins et féminins. _____	101
Tableau 21 Distances Procrustes entre sexes et groupes d'âge. _____	104
Tableau 22 Effet de l'âge, du sexe et interaction entre sexe, âge et taille sur la conformation mandibulaire pour l'ensemble de l'échantillon ($n = 160$). _____	108

Tableau 23 Analyse du dimorphisme sexuel de conformation pour l'échantillon complet ($n = 160$) et tests de permutation entre les sexes par groupe d'âge (jeunes vs. vieux). _____	108
Tableau 24 Précision de l'estimation sexuelle à partir de la conformation mandibulaire des 2 groupes d'âge. _____	110
Tableau 25 Composition des groupes selon le degré d'édentement. _____	111
Tableau 26 Mesures linéaires et angulaires moyennes en fonction du sexe dans chaque groupe. _____	112
Tableau 27 Variation des mesures linéaires intergroupe en pourcentage. _____	113
Tableau 28 Comparaison de l'analyse multivariée des formes mandibulaires des 3 groupes. _____	114
Tableau 29 Résultat de l'analyse linéaire discriminante pour chaque groupe. _____	116
Tableau 30 Composition des groupes selon l'Indice d'Eichner. _____	117
Tableau 31 Mesures linéaires et angulaires moyennes et leur variation ^a (%) selon l'indice d'Eichner pour chaque sexe. _____	118
Tableau 32 Effet du sexe et de l'indice d'Eichner sur le volume mandibulaire. _____	120
Tableau 33 Pourcentage de dimorphisme sexuel et variation des volumes moyens mandibulaires (en mm ³) pour chaque indice d'Eichner. _____	120
Tableau 34 Comparaison de l'analyse multivariée des formes mandibulaires des 3 indices d'Eichner. _____	122
Tableau 35 Variation du taux de dimorphisme sexuel de trois traits mandibulaires selon l'indice d'Eichner. _____	125
Tableau 36 Fonctions discriminantes pour l'estimation sexuelle et taux de classement après correction pour chaque indice d'Eichner. _____	125
Tableau 37 Fonctions discriminantes pour l'estimation sexuelle et taux de classement après correction en prenant en compte les trois mesures les plus dimorphiques pour chaque indice d'Eichner. _____	126

INTRODUCTION

En anthropologie médico-légale, l'identification d'un individu repose sur l'élaboration d'un profil biologique visant à déterminer son sexe, âge, stature et affinité populationnelle. L'estimation du sexe constitue l'un des quatre piliers et la première étape du processus d'identification. Elle est essentielle à la construction du profil biologique puisque les méthodes d'estimation de l'âge, de l'ascendance et de la stature sont dépendantes de cette évaluation (Kimmerle et al., 2008; Lopez-Capp et al., 2018).

Au cours du processus de décomposition, les interactions du corps humain avec la faune et flore environnantes entraînent des altérations des tissus mous et du squelette pouvant impacter le processus d'identification. Du fait de cette dégradation corporelle post-mortem, le recours aux nouvelles technologies d'analyse ADN peut être limité, et le processus d'identification repose souvent sur l'analyse des structures osseuses, en particulier le bassin et le crâne.

Le bassin est considéré comme l'os présentant le dimorphisme sexuel le plus marqué et est par conséquent utilisé en première intention comme indicateur du sexe d'un sujet. Il présente un taux de précision supérieur à 90%, tant avec des méthodes morphologiques, basées sur l'appréciation visuelle (Bruzek, 2002; Phenice, 1969), qu'avec des méthodes morphométriques (Murail et al., 2005). Cependant, du fait de sa fragilité, sa conservation post-mortem est inconstante, et dépasse rarement 30% (Scheuer, 2002; Waldron, 1987).

L'extrémité céphalique, comprenant le crâne, le massif facial et la mandibule est, quant à elle, la deuxième structure osseuse la plus dimorphique du corps humain (Bigoni et al., 2010; Quatrehomme, 2015). Lorsque le bassin est dégradé ou que l'extrémité céphalique est séparée du squelette post-crânien au décours de processus taphonomiques, le crâne, le massif facial et la mandibule peuvent être utilisés pour l'estimation sexuelle puisque ces structures osseuses sont généralement bien conservées en contexte archéologique (Novotny et al., 1993).

La mandibule est le seul os mobile du complexe crâno-facial et une pièce centrale de ce dernier. Elle présente un rôle fonctionnel dans la mastication et la phonation et, par conséquent, un rôle relationnel et esthétique. Cette structure est particulièrement intéressante pour la diagnose sexuelle puisqu'elle présente non seulement des caractères sexuels marqués, mais car il s'agit de l'os le plus résistant de l'extrémité céphalique, capable de résister au processus de décomposition et de conserver sa forme en post-mortem (Franklin et al., 2008; Hu et al., 2006; Steyn & İşcan, 1998). Or l'articulation temporo-

mandibulaire étant la première articulation dégradée lors du processus de décomposition, il est fréquent que la mandibule soit la première structure anatomique découverte ou, au contraire, qu'elle soit absente du site du fait de l'exposition du corps à différentes conditions environnementales (Milroy, 1999; Peyre, 2004).

Comme toute structure du système squelettique, la mandibule est un os soumis à des phénomènes de remodelage osseux tout au long de la vie, sous l'influence de plusieurs facteurs. Parmi ces facteurs, le vieillissement et la perte dentaire semblent avoir un effet significatif sur la morphologie mandibulaire (Mağat & Özcan, 2018; Parr et al., 2017; Shaw et al., 2010). Par conséquent, nous pouvons supposer que ces altérations morphologiques causées par le vieillissement et l'édentement peuvent avoir un impact sur le dimorphisme sexuel mandibulaire et la précision de la diagnose sexuelle.

À travers ce travail, nous avons souhaité aborder deux problématiques :

- analyser la contribution de la mandibule à l'estimation sexuelle de l'extrémité céphalique, afin de déterminer si son absence a un impact sur la précision de la diagnose sexuelle,
- étudier les changements morphologiques mandibulaires induits par le vieillissement et la perte dentaire et évaluer leur impact sur l'estimation du sexe.

Pour ce faire, nous avons constitué une base de données d'examens tridimensionnels crânio-faciaux et employé des méthodes métriques ainsi que la morphométrie géométrique pour l'étude du dimorphisme sexuel squelettique et des changements morphologiques.

PRÉAMBULE

I) ANATOMIE MANDIBULAIRE

La mandibule est un os impair et médian formant le squelette de l'étage inférieur de la face. Il est composé d'une partie horizontale, le corps mandibulaire, et de deux parties verticales, les branches montantes mandibulaires, qui s'élèvent aux deux extrémités postérieures du corps. Seul os mobile du massif facial, il s'articule avec les deux os temporaux à travers l'articulation temporo-mandibulaire et avec l'os maxillaire par l'intermédiaire des arcades dentaires (Netter, 2011).

La mandibule est issue du premier arc branchial ou arc mandibulaire. Elle se forme par la fusion des deux bourgeons mandibulaires au niveau de la ligne médiane entre les 4^e et 10^e semaines de vie intra utérine. Au sein du bourgeon mandibulaire, le cartilage de Meckel sert de guide à l'ossification secondaire mandibulaire, de type endochondrale. Ceci résulte en une enveloppe externe d'os cortical compact recouvrant un os spongieux de plus faible densité. Les deux hémimandibules se soudent au niveau symphysaire médian après la naissance, aux alentours du 3^e mois (Rouvière & Delmas, 1985).

Le corps

Le corps, arciforme, présente une face externe convexe, une face interne concave, un bord supérieur ou alvéolaire et un bord inférieur ou basilaire (Netter, 2011; Rouvière & Delmas, 1985).

Sur la **face externe** on observe, sur la ligne médiane, une crête verticale, stigmate de la soudure des deux hémimandibules, qui se termine en bas, sur le sommet d'une saillie triangulaire : l'éminence mentonnière. De chaque côté de celle-ci naît la ligne oblique externe, traversant en diagonale le corps mandibulaire vers le haut et l'arrière, pour rejoindre le bord antérieur de la branche montante. Elle donne insertion aux muscles triangulaire des lèvres, carré du menton et peaucier. À environ 30 mm de part et d'autre de la symphyse mentonnière se situe le foramen mentonnier, orifice d'où émerge le pédicule mentonnier.

La **face interne** mandibulaire présente de part et d'autre de la ligne médiane des reliefs osseux : les apophyses geni. Les apophyses geni supérieures donnent insertion aux muscles génio-glosses, les deux inférieures donnant aux muscles génio-hyoïdiens. Depuis les apophyses geni, la ligne oblique interne ou ligne mylo-hyoïdienne monte obliquement sur la face interne du corps mandibulaire pour rejoindre la partie moyenne de la branche montante, en arrière et en dessous de la troisième molaire. Elle

constitue la zone d'insertion du muscle mylo-hyoïdien. Cette ligne divise la face interne de la mandibule en deux parties : la partie supérieure ou buccale, marquée par la fossette sublinguale située latéralement aux apophyses geni, et la partie inférieure ou cervicale où l'on observe la fossette sous-maxillaire. Le sillon mylo-hyoïdien, parcouru par le nerf et vaisseaux du même nom, chemine de façon parallèle et caudale à la ligne mylo-hyoïdienne.

Le **bord supérieur** ou alvéolaire est creusé d'alvéoles : cavités destinées à accueillir les racines dentaires.

Le **bord inférieur** ou basilaire, est épais, arrondi et mousse. Il présente, de chaque côté de la symphyse une dépression ovalaire appelée fossette digastrique recevant l'insertion du ventre antérieur du muscle du même nom (**Figure 1**).

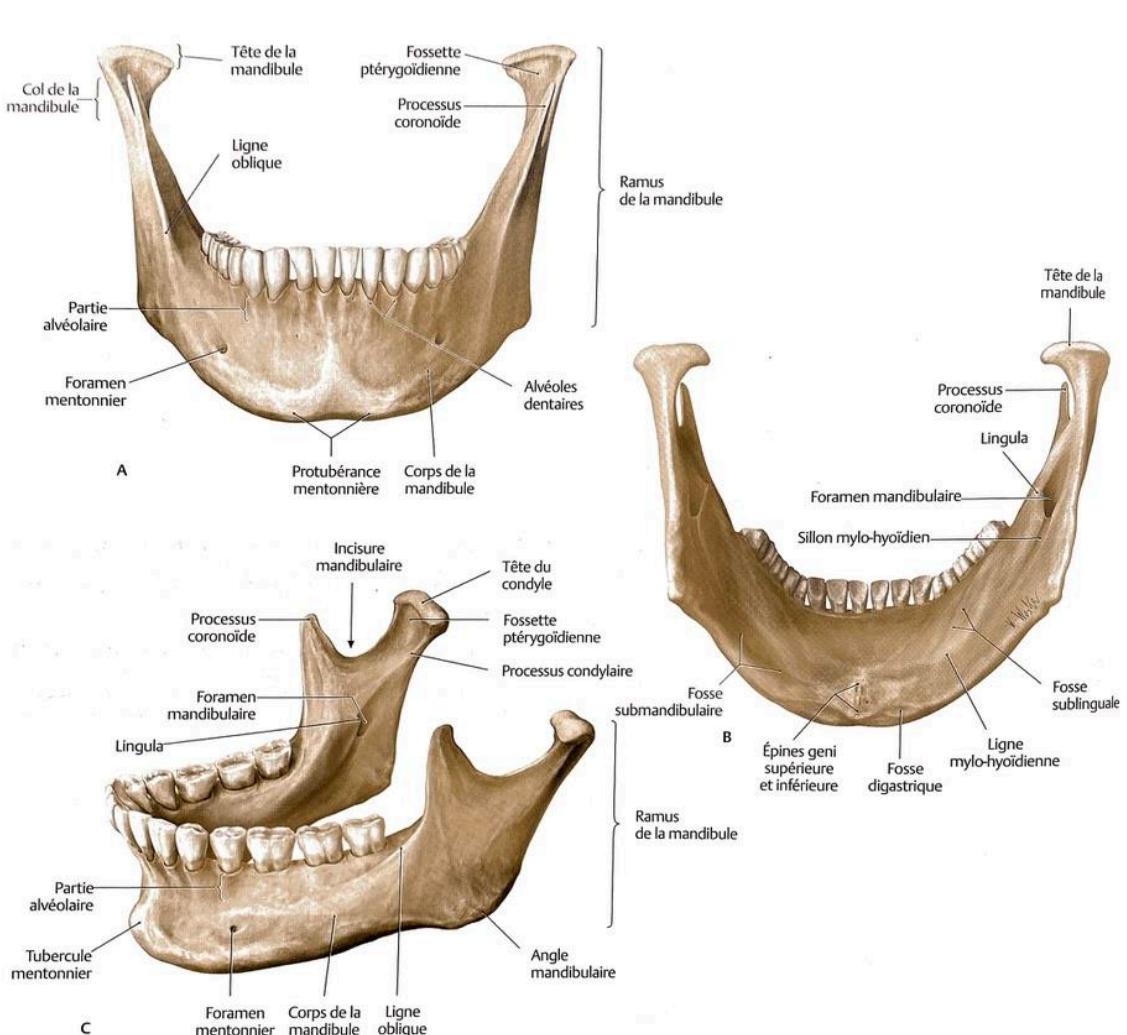


Figure 1 Anatomie osseuse mandibulaire (Baker et al., 2011).

Les branches montantes

Les branches montantes mandibulaires sont rectangulaires, allongées de haut en bas. Elles présentent deux faces et quatre bords (Netter, 2011; Rouvière & Delmas, 1985).

La **face externe** présente dans sa partie inférieure des lignes rugueuses, obliques en bas et en arrière, sur lesquelles s'insère le muscle masséter. Elles s'accentuent à proximité de l'angle mandibulaire qui peut paraître éversé et attiré vers le haut par la traction des muscles.

La **face interne** présente au niveau de l'angle des séries de rugosités répondant à l'insertion du muscle ptérygoïdien médial. À la partie moyenne de cette face se trouve l'orifice d'entrée du canal alvéolaire inférieur, dans lequel cheminent les vaisseaux et nerf alvéolaire inférieurs. Il est limité, en avant, par une saillie osseuse triangulaire : la lingula mandibulaire ou épine de Spix, sur laquelle s'insère le ligament sphéno-mandibulaire.

Le **bord antérieur**, mince, légèrement concave en avant, est en continuité avec le bord antérieur de l'apophyse coronoïde en haut, et avec la ligne oblique interne au niveau inférieur. Sur ce bord on observe le relief osseux de la crête temporale et de la crête buccinatrice, zones d'insertion musculaire des muscles homonymes.

Le **bord postérieur** est épais, légèrement concave en arrière et s'élargit en haut pour former la face postérieure du condyle.

Le **bord inférieur** se poursuit en avant avec le bord inférieur du corps mandibulaire. L'angle mandibulaire ou gonion constitue la zone de jonction du corps et de la branche montante. Il est souvent creusé dans sa partie antérieure d'une concavité correspondant à l'empreinte de l'artère faciale.

Le **bord supérieur** présente deux reliefs : le condyle, en postérieur, et le processus coronoïde en avant. Ces structures sont séparées par une large échancrure : l'échancrure sigmoïde ou incisure mandibulaire.

Le condyle est une éminence oblongue, dont le grand axe est dirigé de d'avant en arrière et de dehors en dedans. Sa face antérieure est marquée par la fossette d'insertion du muscle ptérygoïdien latéral. Sa face supérieure, correspondant à la partie articulaire, présente un versant antérieur convexe et un versant postérieur aplati, s'articulant avec l'os temporal. Le condyle est relié à la branche montante par une partie rétrécie : le col du condyle.

L'apophyse coronoïde est une lame osseuse triangulaire, présentant, sur sa face interne, la crête d'insertion du muscle temporal.

L'échancrure sigmoïde sépare l'apophyse coronoïde du condyle. Elle donne passage aux vaisseaux et nerfs massétérins (**Figure 1**).

Insertions musculaires

Le corps et les branches mandibulaires reçoivent les insertions de divers muscles masticateurs (**Figure 2**).

Au niveau du corps de la mandibule s'insèrent :

- les muscles de la houppe du menton, triangulaire des lèvres, et carré du menton sur la face antérieure
- les muscles génio-glosse, génio-hyoidien, mylo-hyoidien et constricteur supérieur du pharynx sur la face postérieure
- le muscle buccinateur sur le bord supérieur
- les muscles digastrique et peaucier du cou sur le bord inférieur

Au niveau des branches montantes de la mandibule s'insèrent :

- le muscle masséter sur la face externe
- le muscle ptérygoïdien médial sur la face interne
- le muscle ptérygoïdien latéral sur le col du condyle
- le muscle temporal sur le processus coronoïde

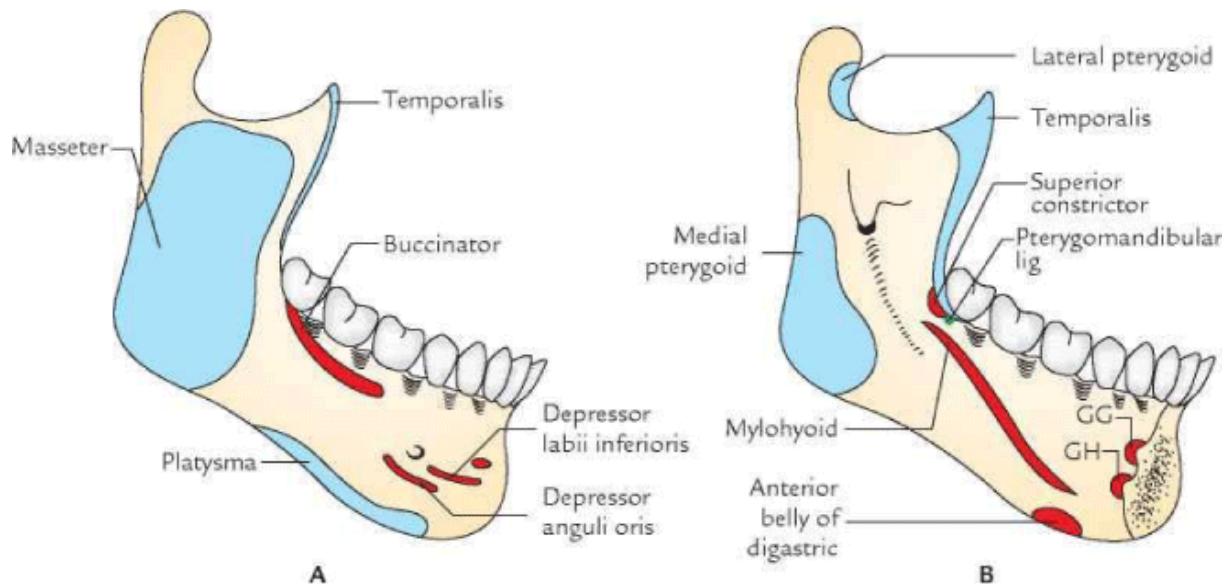


Figure 2 Zones d'insertion musculaire sur le corps et les branches montantes mandibulaires (Al-Rawee et al., 2020).

Vascularisation et innervation

La vascularisation de la mandibule est assurée d'une part par le périoste et les muscles environnents, et d'autre part par l'artère alvéolaire inférieure. La vascularisation du périoste est sous la dépendance de l'artère faciale et sa branche collatérale sous mentale, ainsi que par l'artère linguale et sa branche terminale sublinguale. L'artère alvéolaire inférieure, branche de l'artère maxillaire, assure la vascularisation postérieure mandibulaire ainsi que la vascularisation symphysaire par ses branches terminales, les artères incisives.

L'innervation de la mandibule est, quant à elle, sous la dépendance de la troisième branche du nerf trijumeau : le nerf alvéolaire inférieur.

II) LA MANDIBULE EN ANTHROPOBIOLOGIE

1. La mandibule en paléoanthropologie

Le complexe crâño-facial et la mandibule sont des structures particulièrement utiles dans le domaine de la paléoanthropologie. En effet, le squelette crâño-facial et les arcades dentaires sont les éléments prépondérants du registre fossile des primates et des hominins et, par conséquent, les liens taxonomiques et évolutifs entre espèces sont définis principalement par la morphologie crânienne et mandibulaire. La mandibule a donc été largement utilisée dans de nombreux sujets de recherche anthropologique.

Elle a été employée, notamment, comme spécimen-type pour diverses espèces d'hominins tels que *Australopithecus afarensis* (Leakey et al., 1976), *Paranthropus crassidens* (Broom, 1948), *Homo ergaster* (Groves & Mazak, 1975), et *Homo heidelbergensis* (Schoetensack, 1908), constituant ainsi le référentiel sur lequel la description et le nom de ces nouvelles espèces sont basés.

La mandibule est également le reflet de l'évolution morphologique des hominins, englobant les australopithèques et les espèces du genre *Homo*. Étant donné que la diminution du prognathisme facial représente l'un des traits les plus caractéristiques de l'évolution humaine moderne et que ces changements sont particulièrement marqués au niveau de l'étage inférieur de la face (Lieberman et al., 2002), l'étude des changements morphologiques mandibulaires représente un élément clé en recherche évolutive (Polanski, 2011).

Ainsi, depuis les premiers hominins, la mandibule a subi des changements morphologiques majeurs, avec une diminution de la longueur du corps mandibulaire, de la protrusion de l'arcade dentée mandibulaire, de la largeur ramique, de la force musculaire et masticatrice et donc de la robustesse mandibulaire globale (**Figure 3**) (Raia et al., 2018). D'un point de vue dentaire, l'arcade mandibulaire s'est élargie et raccourcie, tandis qu'une réduction de la taille des incisives, des canines ainsi que des reliefs cuspidés molaires s'est opérée (Raia et al., 2018). Ces évolutions morphologiques se poursuivent à ce jour au sein de la population moderne, puisqu'une diminution marquée de la taille et de l'épaisseur mandibulaire d'*Homo sapiens* peut être observée depuis la période Néolithique (Li et al., 2012).

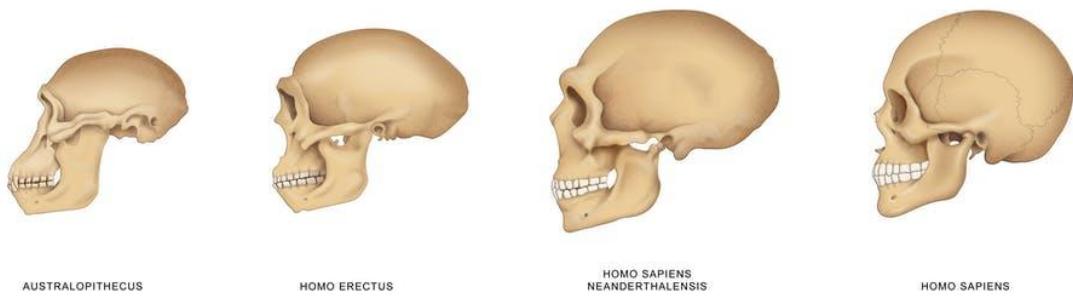


Figure 3 Évolution de la morphologie crânienne et mandibulaire des hominins (www.shutterstock.com).

Pour la majorité des auteurs, l'évolution de la morphologie mandibulaire est le fait d'adaptations alimentaires, en particulier la transition vers une alimentation plus molle résultant de changements majeurs tels que les évolutions technologiques, la maîtrise du feu ou le développement de l'agriculture (Raia et al., 2018; Taylor & Vinyard, 2013). Par conséquent, la mandibule et sa denture représentent un outil précieux pour l'investigation des évolutions et adaptations alimentaires depuis les primates aux hominins contemporains (Taylor, 2002; Taylor & Vinyard, 2013; Ungar & Sponheimer, 2011). En effet, ses variations morphologiques, intrinsèquement liés à la fonction des muscles masticateurs, sont le reflet des conditions environnementales à une période donnée (Cramon-Taubadel, 2011).

L'étude de la biomécanique et de la force musculaire mandibulaire chez les primates et les hominins ainsi que de la micro-usure dentaire permet donc d'appréhender le régime alimentaire de ces espèces et, par conséquent, de comprendre dans quel environnement naturel, social et culturel elles évoluaient (Hylander, 1979, 1985; Hylander & Johnson, 1994; Nicholson & Harvati, 2006; Taylor & Vinyard, 2013; Ungar & Sponheimer, 2011).

Enfin, pour certains auteurs, la mandibule peut être le témoin de l'origine et de l'évolution du langage. En effet, l'application de forces musculaires de faible intensité à une haute fréquence, caractéristiques du langage parlé, auraient entraîné une augmentation de l'épaisseur d'os cortical au niveau des zones d'insertion des muscles impliqués dans la production de la parole (Daegling, 2012). Ainsi, la morphologie symphysaire et sa densité osseuse pourraient être employées comme indicateurs anatomiques de l'acquisition de la parole.

2. La mandibule en tant qu'outil d'identification

La mandibule peut être employée comme outil d'identification d'un individu dans des contextes archéologiques et médico-légaux, en particulier pour l'estimation de l'appartenance à une population, de l'âge au décès ou du sexe d'un individu.

En effet, chaque population présente des traits squelettiques caractéristiques, qui se reflètent sur la morphologie mandibulaire. L'étude de la taille et de la conformation mandibulaire peut être utilisée pour identifier l'appartenance à une population et l'élaboration de formules pour l'estimation de l'origine d'un individu (İşcan & Steyn, 1999).

La mandibule peut également être employée pour estimer l'âge d'un individu, en particulier chez l'enfant et l'adolescent. En effet, le processus de croissance mandibulaire est un phénomène bien connu, et les changements morphologiques que subit la mandibule de la naissance à l'âge adulte ainsi que l'évolution des dentures temporaire et permanente sont des indicateurs de l'âge biologique. L'analyse physique ou radiologique de la taille, de la morphologie et surtout du statut dentaire mandibulaires sont donc employés pour évaluer l'âge d'un individu (Pelin et al., 2018; Rai et al., 2008). À partir de l'âge adulte, la morphologie mandibulaire se stabilise et l'estimation de l'âge repose davantage sur des caractéristiques dentaires ou histologiques (Mathew et al., 2013; Mohite et al., 2011).

Enfin, une des applications les plus développées est l'estimation du sexe de populations humaines modernes et contemporaines à partir de la mandibule (Giles, 1964). Cette dernière application est au cœur de ce travail et sera détaillée dans les parties suivantes.

3. Origine et évolution du dimorphisme sexuel mandibulaire

Le dimorphisme sexuel est l'ensemble des différences morphologiques existant entre les individus mâles et femelles d'une même espèce. Il peut être plus ou moins exprimé selon les espèces et peut varier au sein d'une même espèce selon l'âge et les populations.

L'estimation du sexe d'un individu à partir de la mandibule se base sur différents caractères qui ont tendance à différer entre les individus masculins et féminins. Parmi ces caractères dimorphiques, la robustesse de l'os mandibulaire est l'élément le plus étudié dans la littérature (Piquet, 1956).

Origine du dimorphisme sexuel mandibulaire

Le dimorphisme sexuel mandibulaire se met en place au cours de la période pubertaire. Deux principaux facteurs conditionnent l'établissement de ce dernier : des facteurs hormonaux et des facteurs biomécaniques (Oettlé et al., 2005).

Le dimorphisme sexuel de taille découle de différences dans le profil de croissance des individus féminins et masculins au cours de la période pré-pubertaire et pubertaire (Saini et al., 2011). En effet, les individus masculins présentent un pic pubertaire plus tardif et une période de croissance plus longue et intense (Loth & Henneberg, 1996; Rogers, 2005). La mandibule est le dernier os de l'extrémité céphalique à cesser sa croissance, ce qui la rend particulièrement sensible à la poussée de croissance pubertaire (Rogers, 2005).

À ces facteurs hormonaux viennent s'associer des facteurs locaux, biomécaniques, qui vont jouer sur la forme des éléments osseux. En effet, la morphologie crânio-faciale se dessine par le remodelage successif que subissent les structures osseuses au cours de leur croissance (Enlow, 1966; Loth & Henneberg, 2001). Le développement de forces musculaires, en particulier au cours de la puberté, modèle la forme du crâne et de la mandibule et conduit à la formation de crêtes et reliefs osseux au niveau des zones d'insertion musculaire (Bejdová et al., 2018; Sella-Tunis et al., 2018). Du fait d'une musculature plus développée et d'une force masticatoire accrue, les individus masculins ont tendance à présenter un système squelettique plus robuste. Au niveau crânio-facial, ces forces musculaires, notamment masticatrices, entraînent des variations morphologiques au niveau des zones d'insertion musculaire telles que l'arcade zygomatique et la crête supramastoïdienne (Franklin et al., 2006). Au niveau mandibulaire, l'angle goniaque (Rosas & Bastir, 2002; Steyn & Işcan, 1998) et la région ramique (Loth & Henneberg, 1996, 2001) sont les zones les plus remaniées. En effet, dans sa forme juvénile, le ramus présente une forme rectiligne pour les deux sexes. À la fin de l'adolescence, en revanche, sous l'effet des altérations de taille, force et angulation des muscles masséter et ptérygoïdien médial, une adaptation fonctionnelle de la morphologie ramique est observée chez les hommes, sous la forme d'une courbure du bord postérieur du ramus (Loth & Henneberg, 1996).

L'hypertrophie musculaire observée chez les hommes se traduit également par des zones d'insertion musculaire plus marquées et des dimensions crâniennes plus importantes (Franklin et al., 2006; Rogers, 2005; Rosas & Bastir, 2002). La largeur de l'arcade zygomatique est notamment supérieure chez les individus masculins sous l'action des muscles masséter et temporal (Nidugala et al., 2013). De

la même façon, le grand nombre d'insertions musculaires situées sur la mandibule en font l'os le plus robuste de l'extrémité céphalique (Bejdová et al., 2018).

Les zones présentant le dimorphisme sexuel le plus marqué sont celles subissant les changements morphologiques de taille et le remodelage osseux les plus intenses au cours de la croissance, en particulier le ramus et le condyle mandibulaires (Franklin et al., 2008; Humphrey et al., 1999). Néanmoins, presque tous les sites de dépôt ou de résorption osseuse mandibulaires semblent avoir le potentiel de devenir sexuellement dimorphiques (Humphrey et al., 1999).

Pour certains auteurs, c'est l'influence hormonale sur la musculature masculine pendant la puberté qui est responsable de l'ampleur des différences morphologiques observées entre les sexes (Loth & Henneberg, 1996), tandis que d'autres avancent une origine plutôt biomécanique, liée à l'action des muscles masticateurs (Oettlé et al., 2005; Saini et al., 2011).

Une autre théorie place la clé du dimorphisme sexuel de l'extrémité céphalique au niveau de la région pharyngée (Alarcón et al., 2016; Rosas & Bastir, 2002). Elle se base sur les différences entre les sexes en termes de besoins énergétiques. En effet, les besoins musculaires et énergétiques des hommes étant supérieurs à ceux des femmes, ils exigent une plus grande capacité respiratoire et absorption d'air. Ceci se traduit par une augmentation de la taille des cavités naso et oropharyngées. Cette expansion des voies aériennes supérieures chez l'homme est à l'origine d'une augmentation de la taille du crâne, de la face et de la mandibule ainsi que de variations morphologiques de l'étage moyen de la face qui se répercutent sur la mandibule. Rosas et Bastir (2002) ont constaté également que l'augmentation de la taille du complexe crâno-facial s'accompagne de variations plus marquées au niveau de l'étage inférieur de la face et donc de la mandibule.

Le plus probable est que le dimorphisme sexuel observé au niveau de l'extrémité céphalique résulte d'une combinaison de tous ces mécanismes et qu'il puisse être amené à varier sous l'influence de facteurs locaux, environnementaux ou génétiques (Franklin et al., 2005).

En effet, malgré le rôle indéniable de facteurs hormonaux dans l'établissement du dimorphisme sexuel crâno-facial, en particulier chez les individus masculins, plus soumis à un contrôle hormonal lors pic pubertaire (Bejdová et al., 2013), le développement squelettique est également dépendant de facteurs environnementaux tels que l'alimentation. Lorsque ces derniers agissent au cours de la période pubertaire, ils peuvent affecter la mise en place des différences morphologiques entre les sexes et altérer l'expression du dimorphisme sexuel. Les individus masculins semblent particulièrement sensibles à l'influence de facteurs alimentaires puisque la précision de l'estimation sexuelle diminue

chez les hommes ayant souffert de malnutrition au cours de la puberté (Bejdová et al., 2013; Bejdová et al., 2018; Saini & Saini, 2016).

Évolution du dimorphisme sexuel mandibulaire

Depuis le pléistocène, la morphologie crânio-faciale n'a cessé d'évoluer sous l'effet de facteurs génétiques et environnementaux. La répartition géographique, le climat, mais surtout l'alimentation ont induit des adaptations fonctionnelles squelettiques et fait émerger des différences morphologiques entre espèces et populations (Nicholson & Harvati, 2006). En parallèle de l'évolution de la morphologie mandibulaire, le dimorphisme sexuel a également évolué. En effet, la diminution de la robustesse mandibulaire, de par sa taille et ses reliefs osseux, a eu pour conséquence une diminution de l'expression des caractères sexuels. *Homo neanderthalensis* et *Homo sapiens* sont ainsi les espèces présentant le plus faible degré de dimorphisme sexuel parmi les primates (Raia et al., 2018).

Plus récemment, la révolution industrielle, au XVIII^e siècle, a eu un impact considérable sur l'anatomie de l'extrémité céphalique, avec l'émergence de différences morphologiques entre populations selon le degré d'industrialisation des pays, ainsi que de différences au sein d'une population selon le niveau socio-économique des individus (Bejdová et al., 2018). Jantz et Meadows Jantz (2000) décrivent notamment une augmentation de la taille de la voûte crânienne, une diminution de la taille de la face mais surtout des altérations de la conformation de l'ensemble du squelette crânio-facial. Ces modifications ont probablement lieu pendant l'enfance et l'adolescence, période à laquelle les facteurs environnementaux peuvent influer sur la croissance osseuse (Jantz & Meadows Jantz, 2000). La vitesse des changements morphologiques crânio-faciaux est élevée, et paraît s'accélérer depuis le début du XX^e siècle. İşcan et al. (1995) ont étudié l'évolution de la taille du squelette crânio-facial de la population japonaise au cours de la première moitié du XX^e siècle. Ils ont constaté une augmentation significative des valeurs métriques de la population féminine, tandis que la taille des hommes semble rester stable. Ceci conduit à une baisse du dimorphisme sexuel de taille observé dans la population japonaise contemporaine (İşcan et al., 1995).

Divers facteurs peuvent expliquer l'accélération du rythme des changements observés dans la population contemporaine par rapport à leurs ancêtres : la nutrition, les variations culturelles et les variations climatiques (Bejdová et al., 2013; İşcan et al., 1995; Nicholson & Harvati, 2006). De plus, l'impact de ces facteurs environnementaux sur la taille corporelle des individus peut être différent pour les femmes et les hommes. Les variations de taille mandibulaire chez les femmes, par exemple, semblent plus dépendantes des conditions environnementales et climatiques (Bejdová et al., 2013).

Les modifications morphologiques observées sont corrélées à une augmentation du dimorphisme sexuel de taille mandibulaire entre le IX^e et le XXI^e siècles (Bejdová et al., 2013). Ceci peut être expliqué par le fait que le degré d'expression du dimorphisme sexuel est le reflet de l'environnement, de la qualité et de l'abondance des aliments, et qu'il est donc plus important lorsque la population présente de bonnes conditions de vie (Saini et al., 2011). Néanmoins, les différences de conformation mandibulaire sont plus marquées entre des populations de périodes différentes qu'entre hommes et femmes de la même époque, ce qui sous-entend que les conditions environnementales et le patrimoine génétique peuvent avoir une plus grande influence sur la conformation mandibulaire que le sexe (Bejdová et al., 2013).

Ces observations suggèrent que le dimorphisme sexuel mandibulaire a tendance à évoluer dans le temps, non seulement à l'échelle d'une population mais aussi au cours de la vie d'un individu.

En effet, à la naissance, des différences de conformation mandibulaire peuvent être observées entre les sexes. Celles-ci se maintiennent jusqu'à l'âge de 4 - 6 ans (Coquerelle et al., 2011; Loth & Henneberg, 2001). Le dimorphisme sexuel s'estompe par la suite durant l'enfance et la pré-adolescence pour ré-émerger aux alentours de 14 ans, au cours de la période pubertaire (Coquerelle et al., 2011; Fan et al., 2019). À ce stade, des différences de conformation et de taille apparaissent entre individus masculins et féminins, et ces changements se poursuivent jusqu'à la fin de la croissance mandibulaire, qui marque la mise en place du dimorphisme sexuel adulte. Le profil de croissance crâno-faciale et la typologie faciale verticale qui en résulte (méso, dolicho ou brachyfacial) impactent directement la nature du dimorphisme sexuel mandibulaire (Alarcón et al., 2016).

En revanche, il est probable que le dimorphisme sexuel adulte ne soit pas figé chez l'adulte, mais qu'il varie au gré des changements induits par l'âge, la génétique et l'environnement sur la morphologie mandibulaire (**Figure 4**). Pour Loth et Henneberg (1996), une altération de la fonction manducatrice, suite à un édentement postérieur mandibulaire par exemple, entraîne une modification de la morphologie ramique et une diminution de la précision de la diagnose sexuelle.

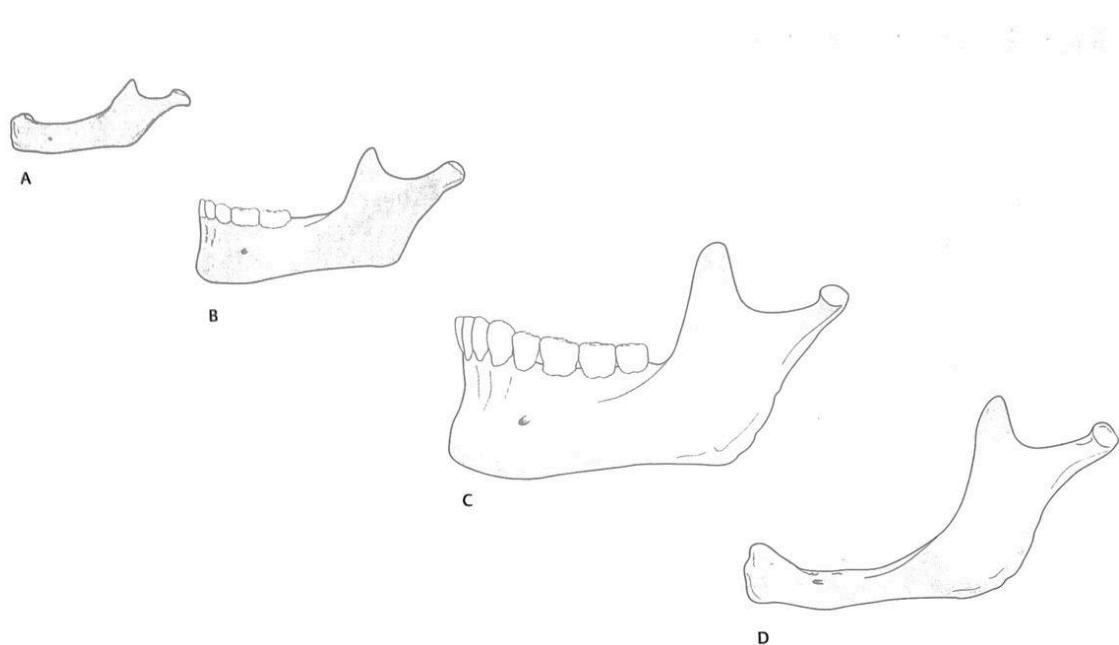


Figure 4 Évolution de la morphologie mandibulaire avec l'âge. A) À la naissance la mandibule est édentée, l'os alvéolaire n'est pas encore formé, le ramus est court. B) Chez l'enfant, l'arcade mandibulaire comporte les dents temporaires mais l'étage alvéolaire est encore peu développé. C) Chez l'adulte, l'os alvéolaire atteint son développement complet, le ramus se verticalise. D) Chez le sujet âgé, l'édentement s'accompagne d'une résorption de l'os alvéolaire (Baker et al., 2011).

III) CONSIDÉRATIONS MÉTHODOLOGIQUES

L'analyse des caractéristiques morphologiques des organismes est un des fondements de la recherche biologique, anthropologique et médico-légale.

Jusque dans les années 1990, la comparaison des caractères morphologiques d'individus ou de structures anatomiques reposait sur l'étude qualitative de structures ou l'étude quantitative de caractères mesurables. Ces techniques étaient traditionnellement employées sur des collections ostéologiques.

Trois principales méthodes ont été décrites pour l'estimation du sexe d'un individu à partir du squelette crânio-facial (Quatrehomme, 2015) :

- les méthodes qualitatives
- les méthodes semi-quantitatives
- les méthodes quantitatives

- Méthodes qualitatives

Les méthodes qualitatives sont des méthodes descriptives reposant sur l'appréciation visuelle de caractères morphologiques. La distinction entre les individus féminins et masculins fait appel à des notions de robustesse et de gracilité. De façon générale, on considère que les individus de sexe masculin ont tendance à présenter des os de plus grande taille, des traits plus robustes et des reliefs osseux plus marqués (Quatrehomme, 2015).

- Méthodes semi-quantitatives

Ces méthodes découlent des méthodes qualitatives mais y associent un système de notation ou cotation des caractères étudiés (relief de la glabellule, proéminence du menton) selon leur degré d'expression, d'absent à très marqué. Chaque score est secondairement pondéré selon le degré de dimorphisme attribué à chaque caractère (Ferembach et al., 1979) et des fonctions discriminantes peuvent être établies, à l'aide d'une régression logistique, pour prédire l'appartenance à un sexe (Walker, 2008).

- Méthodes quantitatives

Nous pouvons distinguer deux grandes catégories de méthodes quantitatives utilisées en paléoanthropologie et médecine légale pour l'estimation sexuelle à partir d'une structure anatomique :

- la morphométrie « traditionnelle », qui se base sur l'utilisation de mesures de distances, d'angles, d'aires ou de volumes,
- la morphométrie géométrique, approche plus moderne qui permet l'analyse de formes en deux ou trois dimensions, à partir des coordonnées de points repère.

Notre travail repose sur l'utilisation ces deux méthodes, et en particulier sur l'apport des techniques morphométriques modernes. Leur principe et méthodologie seront détaillés au cours de ce chapitre.

1. La morphométrie traditionnelle

1.1 Principe

Les premières méthodes quantitatives développées sont des méthodes métriques. Ces méthodes reposent sur l'analyse de mesures linéaires et de mesures d'angles, plus rarement sur l'étude de volumes ou d'aires. Des points remarquables sont définis sur la structure étudiée, puis les distances ou les angles qui séparent ces points sont calculés. L'analyse métrique permet donc d'extraire des caractéristiques bidimensionnelles telles que la longueur, largeur ou hauteur d'une structure, ainsi que d'étudier les changements de forme liés à la taille (Giles & Elliot, 1963). Les différences observées entre les mesures des individus masculins et féminins permettent de déterminer les traits les plus discriminants et serviront par la suite à générer des modèles permettant l'estimation du sexe.

La morphométrie traditionnelle a été largement décrite pour la diagnose sexuelle de l'extrémité céphalique. Elle repose essentiellement sur des mesures de distances et d'angles. L'acquisition de ces mesures peut se faire selon différentes méthodes. La première, lorsque l'on étudie des os secs, est le recueil des mensurations à l'aide d'instruments de mesure (pieds à coulisse, compas) directement sur les structures osseuses (**Figure 5**) (Casado, 2017; Dayal et al., 2008; Giles, 1964; Giles & Elliot, 1963; Vinay et al., 2013). Il en découle un certain degré d'imprécision lors du recueil des données ainsi que des problèmes de reproductibilité.



Figure 5 Recueil direct de mensurations crâniennes à l'aide d'un compas (Casado, 2017).

Une alternative est la digitalisation des structures anatomiques à l'aide d'un scanner 3D (Franklin et al., 2005) ou leur acquisition volumique à l'aide d'un CT-scan (Computerized Tomography scan) (Abdel Fatah et al., 2014; Kano et al., 2015) ou d'un CBCT (Cone Beam Computed Tomography) (Dong et al., 2015; Mustafa et al., 2019; Tunis et al., 2017). Il est alors possible de placer sur l'acquisition 3D des points repères (landmarks) servant de base aux mesures métriques (**Figure 6**).

Le protocole de choix et positionnement de ces landmarks sera détaillé dans le chapitre suivant (2. *La morphométrie géométrique*).

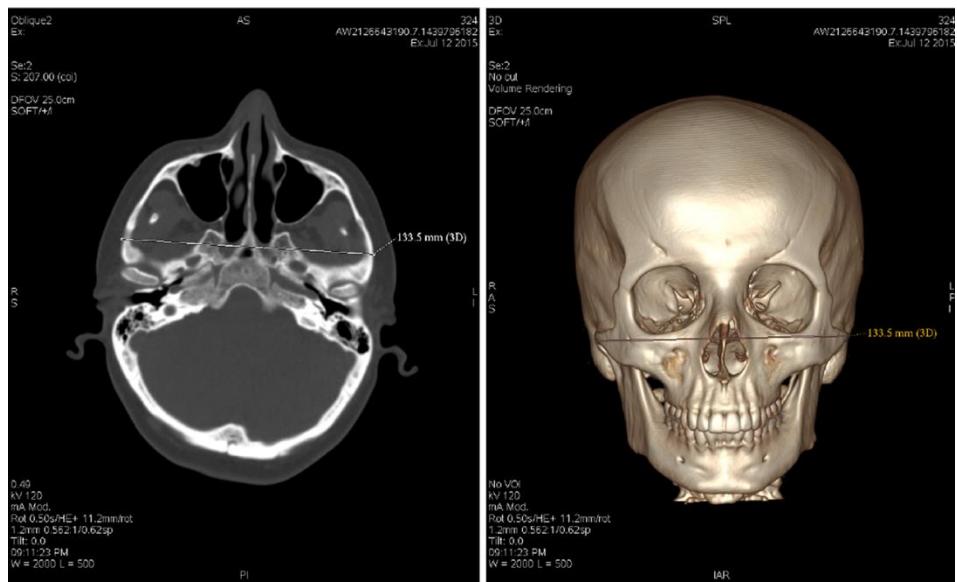


Figure 6 Mesure de la distance bizygomatique sur une acquisition tomodensitométrique crânienne. À gauche : coupe axiale ; à droite : reconstruction volumique tridimensionnelle (Zaafrane et al., 2018).

1.2 Analyses statistiques

Les méthodes morphométriques traditionnelles peuvent reposer sur des mensurations isolées ou, le plus souvent, sur des mesures combinées. Différentes analyses statistiques peuvent être réalisées suite au recueil des données.

Il s'agit majoritairement d'analyses en composantes principales, permettant l'analyse de la variance au sein d'un échantillon et la comparaison de plusieurs individus et plusieurs groupes, ainsi que d'analyses discriminantes et régressions logistiques (Quatrehomme, 2015). Ces dernières permettent d'étudier le caractère discriminant de chaque variable de façon indépendante (analyse univariée) et

de générer des modèles ou fonctions discriminantes pour l'estimation sexuelle à partir des données métriques recueillies (analyses multivariées).

L'**analyse discriminante** va sélectionner la combinaison de variables la plus précise pour l'estimation du sexe d'un individu. La fonction discriminante qui en résulte est la fonction linéaire présentant la plus grande performance pour la différenciation des deux sexes. En d'autres termes, la fonction permettant d'obtenir le moins d'individus mal classés (Giles & Elliot, 1963).

La **régression logistique** est une autre technique prédictive employée pour générer une fonction discriminante entre les sexes. Une équation (modèle logit) va être générée en sélectionnant les mesures les plus discriminantes, comprenant un coefficient de régression pour chaque mesure, ainsi qu'une constante. La valeur logit sera employée pour calculer la probabilité du sexe féminin et du sexe masculin (Antonogeorgos et al., 2009; Gamba et al., 2016).

La qualité du modèle peut être évaluée en confrontant les valeurs prédites aux vraies valeurs à travers la création d'une matrice de confusion. On en déduit alors un indicateur simple, le taux d'erreur ou le **taux de mauvais classement**, qui est le rapport entre le nombre de mauvaises prédictions et la taille de l'échantillon.

À l'issue de l'analyse discriminante ou de la régression logistique, une **validation croisée** est appliquée. Cette méthode d'apprentissage automatique permet de confirmer si la prédiction de l'appartenance à un groupe est correcte et donc d'attester la fiabilité de la fonction discriminante. La validation croisée d'un contre tous (*leave-one-out cross-validation*) est une méthode particulière de validation croisée où le nombre d'itérations d'apprentissage-validation est égal au nombre de spécimens contenus dans l'échantillon (Efron, 1982).

Lorsque ce type de validation n'est pas employé pour valider les fonctions discriminantes générées pour la diagnose sexuelle, les résultats des modèles statistiques sont souvent biaisés et présentent un taux de bon classement surestimé (Bejdová et al., 2018).

1.3 Limites

L'existence d'un dimorphisme sexuel de taille au niveau de l'extrémité céphalique est solidement établie. Bien qu'elles soient plus objectives et performantes que les méthodes qualitatives et semi-quantitatives pour la diagnose sexuelle, les analyses métriques présentent néanmoins certaines limites.

Tout d'abord, la performance des fonctions discriminantes est dépendante de la population à partir de laquelle elles ont été établies. En effet, certaines populations sont composées d'individus grands et robustes, tandis que d'autres sont caractérisées par des hommes et femmes plus graciles (Green & Curnoe, 2009). Le classement d'individus à partir de méthodes métriques sera directement corrélé aux différences de taille, et sa précision sera inférieure lorsque ces méthodes seront employées sur une autre population que la population de référence. En termes pratiques, si on applique un standard développé à partir d'une population à une autre population présentant des dimensions crâniennes plus élevées, on aura une plus grande tendance à classer des individus féminins en tant qu'individus masculins.

Face à ce constat, il apparaît une deuxième difficulté : celle de développer des standards nationaux et des méthodes spécifiques à chaque population.

Traditionnellement, les méthodes de diagnose sexuelle étaient développées sur des collections ostéologiques. Or, actuellement, il est difficile d'obtenir pour chaque population une collection ostéologique d'individus d'âge et de sexe connu sur laquelle se baser (Işcan, 1988). De plus, du fait de l'évolution séculaire de la taille et de la morphologie des individus (Jantz & Meadows Jantz, 2000), on peut supposer que les méthodes de diagnose sexuelle développées à partir de collections ostéologiques du XIX^e et début du XX^e siècle ne peuvent garantir la même précision de résultats lorsqu'elles sont appliquées pour l'identification de restes humains issus de populations contemporaines (Bigoni et al., 2010; Williams & Rogers, 2006).

D'autre part, les analyses métriques fournissent essentiellement des données sur le dimorphisme sexuel de taille et ne peuvent être employées pour apprécier les différences morphologiques existant entre les structures osseuses. Or le dimorphisme sexuel d'une structure ne peut se résumer à une simple différence de taille (Kimmerle et al., 2008). Face à des structures présentant des formes tridimensionnelles complexes, telles que les os du massif crânio-facial, l'estimation du sexe d'un individu doit reposer également sur l'étude des différences de conformation.

Des méthodes d'analyse 3D telles que la morphométrie géométrique ont alors été développées afin d'extraire et d'analyser des traits liés exclusivement à la conformation d'une structure, indépendamment de la taille (Bookstein, 1991).

2. La morphométrie géométrique

2.1 Principe

Définie par Bookstein comme la fusion entre la géométrie et la biologie, la morphométrie géométrique est une méthode d'analyse développée dans les années 1990 ayant pour objet l'étude de la forme des objets en deux ou trois dimensions. Elle permet ainsi de visualiser les changements de conformation tridimensionnels d'une structure.

En morphométrie géométrique, il convient de distinguer les termes forme et conformation. La **forme** ou **configuration** d'un objet correspond à son aspect physique dans l'espace. Elle peut être décomposée en deux éléments : la taille de l'objet, c'est à dire son échelle, et la conformation. On appelle **conformation** l'ensemble des caractéristiques géométriques d'un objet qui sont indépendantes de sa taille, de sa position et de son orientation dans l'espace.

La morphométrie géométrique (GMM pour Geometric Morphometric Method) repose sur le placement de *landmarks* ou points repère sur la surface de la structure à analyser (Bookstein, 1991). Un **landmark** est un point anatomique pouvant être identifié chez tous les spécimens de la population étudiée. Leur positionnement sur une structure permet donc de définir sa forme en 2 ou 3 dimensions (Zelditch et al., 2004). L'analyse de cette forme par la morphométrie géométrique est menée dans un espace de conformation particulier, nommé l'espace de conformation de Kendall. Ceci permet d'extraire la conformation de la structure, c'est-à-dire l'ensemble de ses informations géométriques une fois que les effets de position, rotation et échelle sont éliminés (Kendall, 1977). Ainsi, la morphométrie géométrique permet de visualiser et d'analyser les variations de morphologie entre spécimens indépendamment de leur taille (Bookstein, 1991; Zelditch et al., 2004).

L'analyse par morphométrie géométrique se déroule en plusieurs étapes :

- la sélection et le positionnement de landmarks sur la structure à étudier. Ces derniers sont positionnés à l'aide d'outils numériques informatiques (Bookstein, 1991). Le développement des outils de numérisation et de l'imagerie 3D a contribué à l'essor de cette technique dans le domaine de la paléoanthropologie et de la médecine légale (Bookstein, 1991; O'Higgins, 2000; Pretorius et al., 2006).

- l'extraction des coordonnées tridimensionnelles (3D) des landmarks.
- l'analyse morphométrique, qui consiste à extraire les caractéristiques géométriques de la structure anatomique. Cette étape débute par une superposition Procruste permettant la comparaison de deux ou plusieurs formes en les ajustant au même référentiel.

Secondairement, différentes analyses statistiques peuvent être menées afin de définir et quantifier les variations de conformation.

Définition des landmarks

Bookstein, en 1991, a établi une nomenclature permettant de différencier trois types de landmarks :

- les **landmarks de type I** correspondent à des localisations anatomiques précises et identifiables. Il s'agit de points dont la localisation présente une forte homologie entre individus et dont l'identification est, par conséquent, aisée et reproductible chez n'importe quel spécimen (ex : zone de juxtaposition de différents tissus, zone de jonction de trois sutures, foramina...). Les landmarks de type I présentent une correspondance biologique.
- les **landmarks de type II** sont des points définis par des critères géométriques ; ils renvoient à des structures anatomiques définies mais leur position correspond au sommet ou au minimum de courbure d'une forme donnée (ex : la pointe ou le point de courbure maximal d'une structure). Pour ce type de landmarks, l'homologie d'individu à individu n'est supportée que géométriquement et non plus par des structures locales ; la correspondance biologique est supposée.
- les **landmarks de type III** sont le résultat d'une construction géométrique. Ils peuvent correspondre à l'extrémité d'une structure anatomique ou être définis géométriquement à partir de landmarks de type I et de type II. N'étant pas définis par des structures spécifiques locales, ils peuvent être source d'imprécision et présenter d'importantes variations entre individus, rendant délicate l'interprétation des résultats. Leur utilisation est réservée aux conformations ne pouvant être décrites par des repères de type I ou de type II (O'Higgins, 2000; Zelditch et al., 2004).

À ces landmarks de type I, II ou III il est possible d'associer des points nommés **semi-landmarks**. Les semi-landmarks peuvent être définis comme des points placés à intervalles réguliers le long d'une

courbe réunissant deux landmarks. Ils peuvent être automatiquement répartis le long de courbes ou de surfaces et permettent de définir de façon plus fine la forme d'un objet (Webster & Sheets, 2010).

Des objets ayant la même conformation peuvent présenter des tailles différentes et, inversement, des objets de même taille peuvent avoir des conformations différentes. La morphométrie géométrique permet d'analyser des spécimens non pas par la valeur de paramètres linéaires et angulaires mais à travers des coordonnées cartésiennes des points de repère homologues qui le définissent, calculées dans un repère orthonormé. Ceci permet de décomposer l'étude d'objets en analyse de conformation et analyse de taille.

2.2 Méthode

Les individus contenus dans un échantillon présentent généralement des différences de taille, d'orientation et de position. Il est donc impératif, avant toute analyse, de les aligner et redimensionner afin de retirer ces différences, qui ne sont pas d'ordre biologique. La méthode la plus couramment utilisée est l'analyse Procruste. Celle-ci est réalisée généralement par une Analyse Procrustéenne Généralisée (GPA pour *Generalized Procrustes Analysis*). Les objets définis par les landmarks sont alors ramenés à la même échelle et superposés par des opérations de rotation et translation. Suite à cette étape, les résidus de la superposition Procruste peuvent être utilisés dans diverses analyses statistiques.

Analyse Procruste Généralisée

La base de la GMM est la superposition Procruste. Celle-ci va supprimer les variations non liées à la forme au sein de l'échantillon (telles que des différences de dimension, position et orientation). Les données des spécimens étudiés vont être transformées par le biais d'une translation, d'une rotation et d'un ajustement de taille permettant de minimiser la distance aux moindres carrés entre deux séries de landmarks. Généralement, un spécimen de référence est choisi et tous les autres sont alignés par rapport à celui-ci.

L'Analyse Procruste Généralisée (GPA) est une optimisation de ce principe se déroulant en trois étapes (**Figure 7**) (Gower, 1975) :

- **une translation**, afin d'éliminer les différences de position et de centrer les spécimens sur une origine commune.

Pour chaque spécimen, les coordonnées du point centroïde sont calculées en réalisant la moyenne des coordonnées X, Y et Z de la matrice. L'information de position est alors éliminée en retranchant à chaque coordonnée la valeur du point centroïde, entraînant une translation de chaque point centroïde à l'origine.

- **une mise à l'échelle** par rapport à la taille centroïde.

La taille centroïde est obtenue en calculant la racine carrée de la somme des carrés des distances euclidiennes séparant chaque point (landmark) du point centroïde de l'objet (Bookstein, 1991). Lors de cette étape, la distance entre chaque landmark reste inchangée, selon le principe d'isométrie. Le paramètre de taille est extrait pour chaque individu, ce qui permet de cibler l'étude sur les différences de conformation des structures.

- **une rotation** des configurations permettant d'obtenir un ajustement optimal.

L'angle de rotation à effectuer est calculé de façon à ce que la somme des carrés des écarts séparant les points homologues soit minimale.

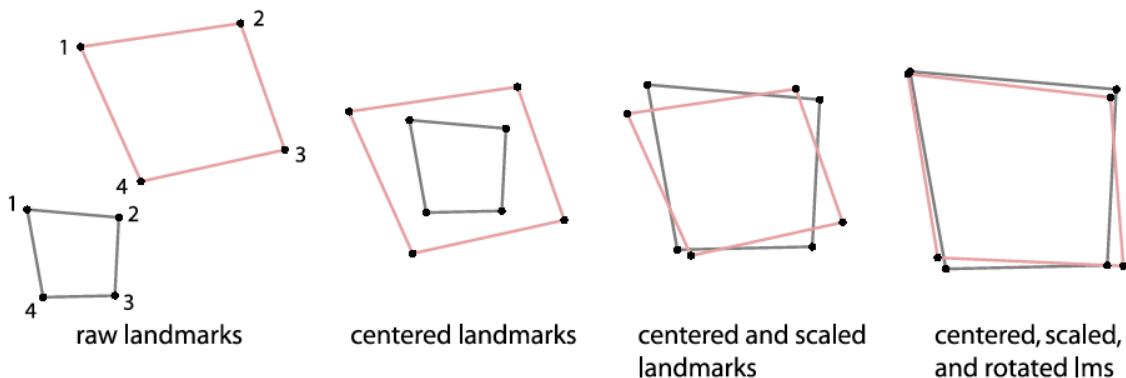


Figure 7 Étapes de l'Analyse Procruste Généralisée. *De gauche à droite : les deux configurations originales obtenues par l'acquisition de landmarks ; translation et superposition des configurations ; mise à l'échelle des configurations ; rotation et suppression des différences d'orientation (Mitteroecker & Gunz, 2009).*

À l'issue de ces opérations de translation, mise à l'échelle et rotation, on obtient de nouvelles coordonnées cartésiennes appelées « coordonnées Procrustes », correspondant uniquement à la conformation de la structure. Les résultats de la superposition Procruste comprennent le

« consensus » et les « résidus Procrustes ». Le **consensus** correspond à la conformation moyenne de la structure. Il est produit par la moyenne des coordonnées Procrustes de l'ensemble des individus de l'échantillon. Les **résidus Procrustes** sont le reflet des variations de conformation. Ils représentent l'écart entre les coordonnées de chaque individu et les coordonnées de la forme moyenne (**Figure 8**). La distance entre deux configurations de coordonnées est également connue sous le nom de **distance Procruste**. Ils seront utilisés pour définir la conformation de chaque objet et mesurer la similarité entre deux ou plusieurs conformations, permettant l'étude des variations morphologiques au sein de l'échantillon.

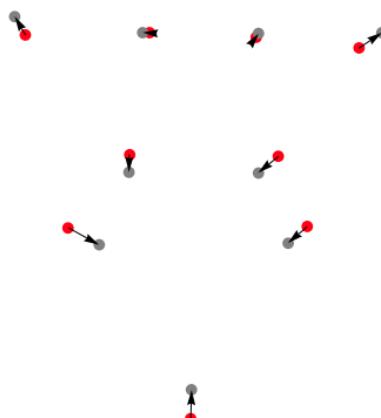


Figure 8 Illustration des résidus Procrustes suite à une Analyse Procruste Généralisée (*d'après P. David Polly, Department of Earth and Atmospheric Sciences, Indiana University, USA*).

L'Analyse Procruste Généralisée comporte trois étapes :

- l'élimination des différences de position par translation
- l'élimination des différences de taille par mise à l'échelle
- l'élimination des différences d'orientation par rotation

À l'issue de la GPA, une conformation moyenne des structures de l'échantillon est obtenue. La conformation de chaque structure est définie par ses résidus ou distances Procrustes, correspondant à la somme des distances entre chaque point repère individuel et le point repère homologue de la forme moyenne.

Il convient de noter que l'analyse Procruste permet d'explorer la variation de la conformation dans son ensemble, mais ne permet pas de quantifier la variation d'un landmark en particulier. En effet, en supprimant l'effet de taille et le système de coordonnées, la conformation est mesurée en tant que déplacement de chaque landmark par rapport à tous les autres. La GMM fournit donc des informations sur le déplacement relatif de tous les landmarks. Par conséquent, lorsque l'on souhaite déterminer si une partie d'une structure présente plus de variation qu'une autre, d'autres analyses doivent être privilégiées, notamment les analyses métriques.

2.3 Analyses statistiques

Les analyses statistiques en morphométrie géométrique sont majoritairement des analyses multivariées sur les coordonnées des points (Mardia & Dryden, 1989).

2.3.1 *Les tests de reproductibilité*

Les méthodes d'analyse métrique et par morphométrie géométrique reposent sur le placement précis de landmarks sur des spécimens biologiques. Un landmark présentant une forte homologie est un point pouvant être identifié de façon précise et reproductible et pouvant fournir une information sur des modifications de forme survenant sur l'un des trois axes.

Avant de procéder à toute analyse des données, il est primordial de valider la précision et reproductibilité de la méthode de placement des landmarks utilisée. La reproductibilité de placement est validée à la fois par l'observateur principal (concordance intra-observateur), qui va répéter la procédure de placement des landmarks sur certains spécimens de l'échantillon, et par un deuxième observateur (concordance inter-observateur) qui analysera ces mêmes spécimens (Cramon-Taubadel et al., 2007).

Dans le cadre d'analyses métriques basées sur des landmarks, l'évaluation de la concordance intra et inter-observateur repose généralement sur la comparaison des mesures obtenues entre deux observations. Les méthodes les plus employées sont :

- le calcul de l'**ICC** (Intraclass Correlation Coefficient) (Gamba et al., 2016; Lopez-Capp et al., 2018; Radulesco et al., 2018),

- le calcul du **TEM** (Technical Error of Measurement), exprimé en millimètres, du **rTEM** (Relative Technical Error of Measurement) exprimé en pourcentage, et du coefficient **R** (Reliability coefficient) (Dong et al., 2015; Perini et al., 2005; Zaafraane et al., 2018).

L'une des limites de ces méthodes est le fait que la proportion d'erreur observée entre deux séries de landmarks varie en fonction de la distance mesurée. En effet, la proportion d'erreur observée sera plus élevée pour des faibles distances que pour des grandes distances (Simon & Marroig, 2015).

Une façon de s'affranchir de ce problème est de mesurer directement les différences entre les coordonnées de deux séries de landmarks. Pour cela, il est essentiel que les différents jeux de données comparés possèdent le même référentiel. Ceci est particulièrement délicat lors de l'étude de collections ostéologiques, où la position des structures observées peut varier selon leur positionnement dans le système d'acquisition 3D. Lors d'acquisitions tomodensitométriques, en revanche, les coordonnées x, y, z de chaque landmark se placent toujours dans le même système de référence (Cramon-Taubadel et al., 2007).

En morphométrie géométrique, une des premières méthodes visant à tester la reproductibilité à partir des coordonnées des landmarks était la mesure de l'écart entre les conformations moyennes des deux séries de données obtenues par GPA (Barbeito-Andrés et al., 2012; Richtsmeier et al., 1995). Le principal inconvénient de cette technique est que la GPA aura tendance à « lisser » l'imprécision entre tous les landmarks, ce qui peut fausser les résultats si un ou plusieurs landmarks présentent des valeurs aberrantes (Cramon-Taubadel et al., 2007).

Étant donné que les configurations sont définies par des landmarks présentant probablement des degrés de précision différents, il est préférable de porter l'évaluation de l'erreur observationnelle sur les landmarks de façon individuelle plutôt que sur l'ensemble de la configuration.

Ceci peut être obtenu par diverses méthodes :

- la mesure de la distance linéaire entre la valeur moyenne de chaque landmark de deux jeux de données et de sa déviation standard (Sholts et al., 2011; Simon & Marroig, 2015). Le degré de précision attendu sera dépendant de la résolution de l'appareil utilisé, mais ne devra pas excéder 5% de la valeur mesurée (Cramon-Taubadel et al., 2007).
- le calcul de la moyenne des distances et de la déviation standard entre les coordonnées de chaque landmark et de son centroïde (Schlicher et al., 2012).

2.3.2 Analyses multivariées

Les analyses multivariées sont employées lorsqu'on souhaite examiner les données de plus de deux variables mesurées sur les spécimens d'un échantillon. Elles permettent d'étudier les relations entre les individus à travers ces variables et de mesurer comment ces derniers se discriminent les uns par rapport aux autres (Mitteroecker & Gunz, 2009). Dans le cadre de l'étude du dimorphisme sexuel, elles sont employées pour étudier les effets du sexe et de l'âge sur la conformation et la taille des matrices osseuses.

- Analyse en Composantes Principales (ACP)

Lorsqu'il existe un nombre important de variables dans un jeu de données, il devient difficile de mettre en évidence les relations globales existant entre ces variables puisqu'il est impossible de les visualiser simultanément. C'est le cas notamment des résidus Procrustes obtenus suite à la GPA, qui sont trop nombreux pour être exploitables individuellement (Jolliffe, 2002).

L'ACP est une méthode d'analyse descriptive permettant une réduction de la dimension de la matrice des données et une mise en évidence de la variance au sein d'un échantillon. Son objectif est de condenser les données de manière à identifier leurs relations caractéristiques et apprécier leur variabilité, tout en limitant la perte d'information. L'ACP peut donc être utilisée pour décrire et visualiser de façon graphique la dispersion au sein d'un échantillon et les changements de conformation en cause.

L'analyse est réalisée à partir de la matrice de variance-covariance des résidus Procrustes. L'objectif est de rechercher un ensemble réduit de combinaisons permettant de résumer les données initiales avec le moins de perte d'information possible et sans distinction des catégories de spécimens (c'est-à-dire *sans a priori*). Une base de vecteurs propres va être définie, les « composantes principales de conformation », correspondant à une combinaison linéaire des variables présentant un mouvement synchrone et simultané. Les spécimens vont alors être projetés dans un espace pour lequel les composantes sont ordonnées selon leur importance en termes de variance (Jolliffe, 2002). Ceci se présente graphiquement par un nuage de points répartis le long d'un, deux ou trois axes, correspondant aux **composantes principales**. Celles-ci sont classées par ordre de valeur propre décroissante, exprimé en pourcentage de la variance totale. Ainsi, l'axe de la première composante principale est celui expliquant le maximum de la variance des variables (Elmore & Richman, 2001; Mardia & Dryden, 1989).

En règle générale, il est préférable de représenter uniquement les deux premières composantes principales car, à partir de trois dimensions, la figure peut devenir difficile à interpréter. Lorsque

plusieurs dimensions doivent être prises en compte, l'utilisation de plusieurs graphiques représentant les dimensions deux à deux peut être envisagée. La représentation en deux dimensions permet d'observer la répartition des individus les uns par rapport aux autres et d'interpréter ainsi les positions des groupes entre eux. En revanche, l'information contenue dans les autres composants n'étant pas représentée, il faudra pondérer les conclusions tirées de l'analyse en deux dimensions. En effet, l'ACP permet une représentation graphique de la répartition des individus au sein d'un échantillon mais n'a pas de valeur statistique.

À l'issue de l'ACP, il est possible d'individualiser des groupes au sein de la population étudiée. La caractérisation des différences morphologiques et l'appréciation des caractères discriminants entre ces groupes peuvent être abordées par différentes méthodes détaillées dans les paragraphes suivants.

- Analyse discriminante

L'analyse discriminante, également appelée analyse canonique ou Canonical Variate Analysis (CVA), est une analyse prédictive permettant de prédire l'appartenance d'un individu à un groupe à partir des variables mesurées. Elle repose sur une fonction mathématique permettant de déterminer les différences maximales entre les individus de deux groupes constitués *a priori*, tout en prenant en compte les variations intragroupe.

Le F-test de Goodall est un test paramétrique permettant de mettre en évidence les différences de forme entre les groupes à partir de la variance des distances Procrustes (Goodall, 1991). La déviation est mesurée en calculant le rapport des carrés des distances Procrustes de la forme moyenne de chaque groupe et la somme des carrés des distances Procrustes de chaque individu (Webster & Sheets, 2010). La valeur p (F) est le reflet de la puissance de la discrimination, à savoir la probabilité pour qu'un individu appartienne au groupe auquel il a été attribué.

Cette analyse peut donc être employée pour évaluer la performance de la discrimination sexuelle à partir de structures osseuses, le crâne et la mandibule dans notre cas, sur la base des différences de conformation mises en évidence par l'ACP.

- Distances de Mahalanobis et distances Procrustes

La distance de Mahalanobis est une mesure de distance mathématique. Elle diffère de la distance euclidienne par le fait qu'elle prend en compte la variance et la corrélation présentes dans une série de données et accorde ainsi un poids moins important aux composantes les plus dispersées (Mahalanobis, 1936). Elle peut être employée en GMM pour évaluer les différences de conformation

par la mesure des distances entre les centroïdes de chaque groupe sur une échelle ajustée à la variation intra-groupe. Les distances Procrustes fournissent, quant à elles, un indicateur des différences de position des landmarks entre deux formes.

Ces deux méthodes sont employées pour évaluer la distance entre deux configurations et apprécier les différences de conformation entre les sexes et les groupes d'âge.

- Analyse de la variance (ANOVA et MANOVA)

L'analyse de la variance est une méthode statistique permettant de comparer les moyennes de plusieurs groupes et de déterminer si ces groupes proviennent d'une même population. Elle détermine si la différence entre deux cohortes est le fait du hasard. Elle peut être employée afin de déterminer si les différences de conformation entre les sexes ou entre groupes d'âge, mises en évidence à partir des résidus Procrustes, sont statistiquement significatives.

2.3.3 Représentations graphiques

L'Analyse Procruste Généralisée produit une conformation moyenne ou consensus des structures de l'échantillon. Celle-ci est obtenue par la superposition de l'ensemble des coordonnées des landmarks des individus. Les différences de position entre chaque point de repère homologue sont, quant à elles, matérialisées par les distances Procrustes, représentent la différence de conformation entre les deux structures osseuses. Ces différences peuvent être visualisées graphiquement à l'aide d'un logiciel statistique tel que le logiciel R©. La forme moyenne de chaque groupe va être matérialisée par différents landmarks reliés par des segments, produisant une silhouette filaire en deux dimensions (**Figure 9**) (Franklin et al., 2012). La superposition des silhouettes filaires des deux groupes que l'on souhaite comparer permet alors de visualiser schématiquement les différences de conformation entre les matrices osseuses.

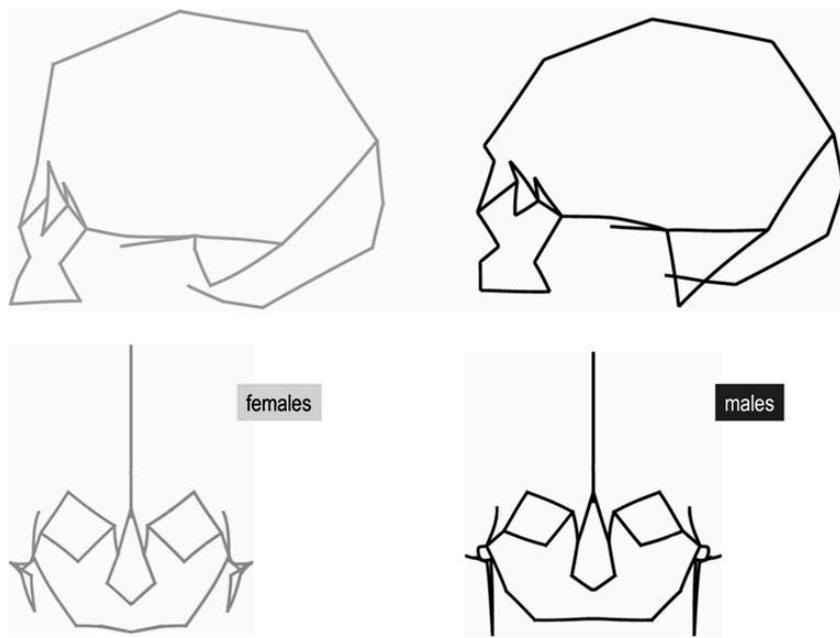


Figure 9 Représentation sous la forme de silhouettes filaires des formes moyennes crânio-faciales des individus masculins et féminins d'une population australienne (Franklin *et al.*, 2012).

2.4 Intérêts de la morphométrie géométrique

En termes de diagnose sexuelle, les méthodes traditionnelles qualitatives et semi-quantitatives présentent pour principal inconvénient leur subjectivité. En effet, l'appréciation visuelle de caractères dimorphiques est fortement dépendante de l'appréciation et de l'expérience de l'observateur, ce qui introduit un biais observationnel rendant ces méthodes peu reproductibles (Franklin, O'Higgins, et al., 2007). Elles ont été progressivement délaissées au profit de méthodes quantitatives telles que les méthodes morphométriques, plus objectives (Quatrehomme, 2015).

Les méthodes morphométriques traditionnelles reposent, elles, sur des mesures métriques. Celles-ci présentent une fiabilité élevée pour la discrimination sexuelle du crâne, avec des taux de précision allant de 85 à 95% (Franklin *et al.*, 2006; Giles & Elliot, 1963; Steyn & İşcan, 1998). Elles présentent néanmoins certaines limites. Premièrement, le recueil des données peut être soumis à une part d'imprécision selon le mode d'acquisition (mesures manuelles ou acquisition 3D). De plus, elles reposent sur les écarts de taille existant entre les sexes pour les différencier. Or les différences observées entre les individus masculins et féminins sont de deux natures : elles sont le fait de l'expression de la taille (gracilité vs. robustesse) mais également le fait de différences morphologiques.

La morphométrie géométrique permet de dissocier la composante de taille individuelle pour n'étudier que la conformation des individus de l'échantillon. L'effet taille ne vient pas alors biaiser l'estimation du sexe d'un individu.

Cette méthode d'acquisition, de traitement et d'analyse géométrique d'objets présente pour avantage principal une absence de subjectivité dans l'analyse morphologique (Oettlé et al., 2005). En effet, elle repose sur une étude non métrique des caractères dimorphiques grâce au positionnement de landmarks. (Franklin et al., 2006). L'utilisation de landmarks de type I et de type II, faciles à positionner, rend la méthode simple, précise, reproductible et peu soumise aux erreurs de mesures intra et inter observateur (Cramon-Taubadel et al., 2007).

De plus, contrairement à la morphométrie traditionnelle, la sélection *a priori* des variables utilisées dans l'analyse n'est pas nécessaire en GMM. En effet, en morphométrie traditionnelle, les variables métriques sont définies et sélectionnées préalablement à l'analyse statistique. Ceci implique que si, parmi les variables sélectionnées, certaines ne sont pas pertinentes pour tester l'hypothèse envisagée, les résultats seront parasités par le bruit de fond provoqué par les variables les moins significatives. En morphométrie géométrique, l'utilisation de landmarks permet de s'affranchir de ce problème. Ces derniers sont définis au début de l'étude, mais l'analyse va inclure toutes les variables qui peuvent être mesurées entre les points choisis, ce qui permettra de déterminer *a posteriori* quelles sont les variables les plus significatives (Zelditch et al., 2004). Ainsi, si des landmarks déterminés initialement ne sont pas suffisamment pertinents pour tester l'hypothèse de départ, ils ne seront pas retenus pas l'analyse et ne viendront pas « brouiller » le résultat.

Un autre avantage de cette méthode est qu'elle permet d'obtenir un meilleur taux de classification correcte pour la détermination du sexe à partir du crâne (Bigoni et al., 2010; Franklin et al., 2005) et de la mandibule (Franklin et al., 2008; Franklin, O'Higgins, et al., 2007) par rapport aux fonctions discriminantes obtenues avec des mesures métriques traditionnelles.

D'ailleurs, en s'affranchissant du critère de taille, la GMM particulièrement adaptée pour comparer la morphologie de structures présentant des variations de taille au cours du temps - lors de la croissance ou du vieillissement (Braga & Treil, 2007) - ou présentant des différences de taille entre les sexes. Il s'agit donc d'un outil extrêmement intéressant dans le cadre de l'étude du dimorphisme sexuel, puisqu'elle permet de définir et quantifier les variations morphologiques pures, et donc le dimorphisme sexuel de conformation, contrairement aux mesures métriques traditionnelles qui ne permettent qu'une analyse du dimorphisme sexuel de taille.

Les applications les plus répandues de la GMM en anthropologie médico-légale sont la détermination de l'origine ou appartenance à une population (Buck & Vidarsdottir, 2004), l'estimation de l'âge au décès (Braga & Treil, 2007) et l'estimation du sexe (Franklin et al., 2006; Franklin, O'Higgins, et al., 2007; Kimmerle et al., 2008; Pretorius et al., 2006).

La morphométrie géométrique n'a pas l'intention de se substituer aux méthodes d'estimation sexuelle traditionnelles reposant sur le dimorphisme sexuel de taille, telles que les approches métriques, mais offre une approche complémentaire en quantifiant et caractérisant la variabilité de conformation de façon objective (Slice, 2007).

Un dernier intérêt des méthodes morphogéométriques est la possibilité de les utiliser pour l'analyse d'ossements fragmentés. En effet, il n'est pas rare de retrouver des os ayant subi des traumatismes ante-mortem ou ayant été exposés à des dégâts post-mortem. En l'absence d'une pièce osseuse complète, il est parfois impossible de recueillir l'ensemble des mesures métriques traditionnelles, ce qui peut impacter la fiabilité de la diagnose sexuelle (Zaafrane et al., 2018). En analysant les différences de conformation tridimensionnelles de structures osseuses complexes, la GMM permet d'estimer le sexe d'un individu même lorsque le crâne n'est pas intact. La précision de la diagnose sexuelle à partir d'une seule région anatomique du crâne est certes moindre que lors de l'utilisation de l'ensemble de la structure mais demeure élevée, pouvant atteindre 80% pour la région orbitaire (Pretorius et al., 2006) et dépasser 90% pour l'étage supérieur de la face (Bejdová et al., 2018; Bigoni et al., 2010).

3. Avantages de l'exploitation de données tomodensitométriques

Deux principales méthodes d'imagerie tridimensionnelle sont employées actuellement pour l'exploration des structures osseuses crânio-faciales : la tomodensitométrie ou CT-scan (*Computed Tomography scan*) et la tomographie volumique numérisée à faisceau conique ou CBCT (Cone Beam Computed Tomography). Nous avons fait le choix d'utiliser des examens tomodensitométriques comme base de données pour notre étude car ces derniers sont utilisés actuellement en pratique courante dans de nombreux services de médecine légale et de façon croissante dans les domaines de l'identification légale et de l'anthropologie virtuelle (Alias et al., 2018; Dedouit et al., 2014).

L'utilisation d'examens tomodensitométriques présente de nombreux avantages dans l'étude du vieillissement du squelette facial et de son dimorphisme sexuel. Premièrement, l'accès à des bases de données et d'archivage d'examens tomodensitométriques permet de constituer un échantillon

d'étude avec un effectif important et de connaître précisément les données civiles des patients étudiés (âge et sexe). Ceci est plus difficile lorsque l'on travaille sur des collections ostéologiques. De plus, une base données radiologiques représente de façon plus réaliste les individus contemporains provenant de populations géographiquement variées (Franklin et al., 2012).

Contrairement aux radiographies 2D, telles que les orthopantomogrammes ou les céphalométries, les examens tomodensitométriques ne sont pas soumis à des problèmes de positionnement du sujet, de superposition droite / gauche, d'échelle ou de distorsion (Alarcón et al., 2016; Ishwarkumar et al., 2017).

Par ailleurs, l'exploitation de données tomodensitométriques permet de combiner différentes méthodes d'analyse, à savoir les méthodes métriques traditionnelles pour l'étude de traits quantitatifs, et la morphométrie géométrique pour l'étude des variations de conformation. Il est possible d'employer les mêmes landmarks que ceux utilisés dans les méthodes archéologiques et anthropométriques classiques, ce qui permet d'établir des comparaisons avec des résultats publiés précédemment et des normes existantes. Contrairement aux méthodes de recueil de mesures manuelles qui se cantonnent à un nombre limité de variables, l'utilisation de landmarks sur une acquisition 3D permet l'analyse statistique de toutes les distances et combinaisons possibles.

De plus, grâce à l'excellente résolution spatiale du scanner, le positionnement des landmarks est non seulement plus aisé, ce qui présente un avantage considérable lors du traitement d'un nombre important d'échantillons, mais également plus précis que sur une numérisation 3D à partir d'os secs (Simon & Marroig, 2015). Ceci augmente la fiabilité des méthodes d'analyse précédemment citées et, vu que les méthodes développées sur des examens tridimensionnels offrent une précision supérieure, elles peuvent également être appliquées aux collections ostéologiques (Zaafrane et al., 2018). La seule situation pouvant compliquer le positionnement d'un point repère sur un examen 3D est une présence importante d'artéfacts métalliques (Gamba et al., 2016).

Le CBCT présente également une excellente résolution spatiale, souvent supérieure au scanner, mais il est fréquemment prescrit dans le cadre de l'exploration de pathologies orales et osseuses des maxillaires, ce qui peut biaiser l'étude des structures osseuses. Néanmoins, divers auteurs ont employé des bases de données Cone Beam pour l'étude du dimorphisme sexuel (Dong et al., 2015; Fan et al., 2019; Mustafa et al., 2019; Tunis et al., 2017; Zheng et al., 2018). Les examens tomodensitométriques crâno-faciaux, en revanche sont souvent prescrits en dehors de toute affection osseuse, dans le cadre d'explorations vasculaires par exemple.

Enfin, les examens tomodensitométriques et les données 3D extraites des landmarks rendent possible la création de standards virtuels pour le squelette facial pouvant être plus facilement appliqués à des contextes médico-légaux, dans lesquels les crânes retrouvés ne sont pas toujours secs. De surcroît, l'acquisition tridimensionnelle englobe également les tissus mous ; ces standards virtuels squelettiques peuvent alors être étendus aux tissus cutanés sus-jacents et permettre la création de standards faciaux. Plusieurs études ont observé qu'il existe un lien étroit entre la forme des tissus mous de la face et celle de l'os sous-jacent, et que le vieillissement squelettique a un impact direct sur l'enveloppe cutanée (Coleman & Grover, 2006; Guyomarc'h et al., 2014; Mydlová et al., 2015). Ainsi, une prédiction exacte des changements de conformation osseux avec le vieillissement pourrait permettre une estimation de la forme des tissus mous de la face.

TRAVAUX

Lorsqu'il existe une identité présumée, l'identification d'un individu en médecine légale est fréquemment réalisée à partir de l'analyse dentaire et du dossier odontologique du patient, si celui est existant ou accessible (Nagi et al., 2019). Quand il n'y a pas d'identité présumée, la première étape du processus d'identification des individus matures est l'estimation du sexe. La précision de la diagnose sexuelle est donc un élément crucial de l'examen anthropologique en archéologie et en médecine légale puisqu'elle conditionne la qualité de l'estimation de l'âge, de la stature et de l'ascendance.

L'analyse de l'ADN est la technique la plus répandue et le gold standard actuel pour l'établissement du profil génétique et l'identification du sexe d'un individu. Néanmoins, dans de rares cas, la détérioration corporelle entraîne une dégradation de l'ADN ou ne permet pas l'obtention d'une quantité suffisante pour une analyse fiable (Raffone et al., 2021). Dans ces situations, l'estimation du sexe peut se faire à partir des éléments squelettiques.

Après le bassin, l'extrémité céphalique est la structure osseuse la plus dimorphique du corps humain et a été, pendant longtemps, employée pour estimer le genre d'un individu (Best et al., 2018; Oikonomopoulou et al., 2017). Bien que son application pour la diagnose sexuelle soit plus limitée de nos jours, l'étude du dimorphisme sexuel de l'extrémité céphalique présente encore un intérêt, à la fois eu égard à ses applications potentielles en identification mais également à la connaissance des mécanismes de maturation et de vieillissement osseux.

L'estimation du sexe d'un individu à partir de la mandibule a été largement étudiée en anthropologie médico-légale. Néanmoins, le dimorphisme sexuel mandibulaire semble très variable selon la technique et la population étudiée. De plus, la vaste majorité des méthodes sont développées pour l'identification d'individus jeunes ou d'adultes, mais il existe très peu de données sur la diagnose sexuelle de la personne âgée. Or la mandibule subit un remodelage osseux conséquent et des changements morphologiques au cours du vieillissement avec, notamment, la progression de l'édentement. Il est donc probable que ces variations de forme puissent avoir un impact sur le dimorphisme sexuel mandibulaire.

Deux principales questions sont à l'origine de ce travail :

- Quelle est la contribution de la mandibule à la diagnose sexuelle de l'extrémité céphalique ?
- Quel est l'impact du vieillissement sur la morphologie mandibulaire et son dimorphisme sexuel ?

Les objectifs qui en découlent sont les suivants :

- 1) Comparer la précision de l'estimation sexuelle du crâne et de la mandibule au sein d'un échantillon virtuel français contemporain.
- 2) Analyser l'effet de l'âge et de la perte dentaire sur la taille, la conformation et le dimorphisme sexuel mandibulaire d'un échantillon virtuel français contemporain.

Nous avons fait le choix de travailler sur une base de données d'examens tomodensitométriques afin d'obtenir un échantillon représentatif de la population contemporaine ainsi qu'optimiser la précision et la reproductibilité de placement des landmarks utilisés dans les analyses. Le dimorphisme sexuel de taille a été étudié à l'aide de méthodes métriques traditionnelles de façon à permettre la comparaison des résultats avec des études antérieures. De façon complémentaire, la morphométrie géométrique a été employée pour visualiser les variations morphologiques mandibulaires ainsi qu'explorer le dimorphisme sexuel de conformation.

Les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une communication au 51^e Congrès International Francophone de Médecine Légale le 3 juillet 2019¹ ainsi que de deux publications, l'une dans l'*International Journal of Legal Medicine*² et l'autre dans *PLoS One*³. Ces dernières sont disponibles en annexe.

¹Gillet C, Costa Mendes L, Rerolle C, Telmon N, Maret D, Savall F. Anthropométrie et morpho-géométrie du crâne et de la mandibule : détermination du sexe à partir d'examen tomodensitométrique. 51^e Congrès International Francophone de la SFML, 3 juillet 2019, Dijon, France.

²Gillet C*, Costa Mendes L*, Rerolle C, Telmon N, Maret D, Savall F. Sex estimation in the cranium and mandible: a multislice computed tomography (MSCT) study using anthropometric and geometric morphometry methods. *Int J Legal Med.* 2020 Mar;134(2):823-832.

³Costa Mendes L, Delrieu J, Gillet C, Telmon N, Maret D, Savall F. Sexual dimorphism of the mandibular conformational changes in aging human adults: A multislice computed tomographic study by geometric morphometrics. *PLoS One.* 2021 Jun 22;16(6):e0253564.

PREMIÈRE PARTIE - APPORT DE LA MANDIBULE DANS LA DIAGNOSE SEXUELLE DE L'EXTRÉMITÉ CÉPHALIQUE



Gillet C*, Costa Mendes L*, Rérolle C, Telmon N, Maret D, Savall F.
Sex estimation in the cranium and mandible: a multislice computed tomography (MSCT) study using anthropometric and geometric morphometry methods. *Int J Legal Med.* 2020 Mar;134(2):823-832.
doi: 10.1007/s00414-019-02203-0.
*first co-authors

I) LE DIMORPHISME SEXUEL DE L'EXTREMITE CEPHALIQUE

Au cours de ce chapitre, nous allons passer en revue les techniques employées pour la diagnose sexuelle de l'extrémité céphalique, depuis les méthodes historiques visuelles et métriques, encore utilisées par certaines équipes (Cappella et al., 2020; Krüger et al., 2015), aux méthodes modernes morphogéométriques.

1. La diagnose sexuelle du crâne et de la face

Le crâne masculin se distingue du crâne féminin à travers sa morphologie et ses dimensions.

Méthodes traditionnelles visuelles

D'un point de vue morphologique, le crâne masculin est de façon générale plus volumineux, plus robuste, plus anguleux et présente des reliefs osseux et des zones d'insertions musculaires plus marquées (Ferembach et al., 1979; Walker, 2008; Williams & Rogers, 2006). Les premières méthodes proposées pour l'estimation sexuelle à partir du crâne reposent sur l'appréciation visuelle de ces

critères anatomiques (Quatrehomme, 2015). Ces manifestations morphologiques du dimorphisme sexuel sont résumées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 Critères morphologiques du dimorphisme sexuel du crâne et de la face d'après Quatrehomme (2015).

	Masculin	Féminin
Crâne		
Aspect général	Gros volume Poids plus important Aspect adulte et archaïque	Faible volume Poids plus faible Aspect « adolescent »
Front	Fuyant	Droit
Arcades sourcilières	Saillantes	Peu marquées
Glabelle	Saillante	Peu marquée
Angle fronto-nasal	Marqué, en coup de serpe	Peu marqué, courbe douce et progressive
Sinus frontaux	Plus grands	Plus petits
Bosses frontales	Peu marquées	Marquées
Bosses pariétales	Peu marquées	Marquées
Mastoïdes	Longues et robustes	Courtes et gracieuses
Processus styloïdes	Bien développés	Peu développés
Protubérance occipitale externe	Bien développée	Peu développée
Relief nuchal	Marqué	Peu marqué
Chignon occipital	Présent	Absent
Condyles occipitaux	Grands et surélevés	Petits et plats
Processus zygomatiques	Hauts, épais, robustes Racine postérieure s'étend en arrière du méat acoustique externe	Bas, fins, gracieuses Racine postérieure se termine en avant du méat acoustique externe
Face		
Orbites	Carrées, basses	Arrondies, hautes
Rebords orbitaires	Arrondis, épais	Tranchants, minces
Os zygomatiques	Postéro-latéraux	Antéro-latéraux
Palais	Grand et large	Petit, étroit, parabolique

La précision de la diagnose sexuelle avoisine les 80% pour les méthodes qualitatives pures mais est très variable selon l'observateur, la population étudiée et le sexe (Williams & Rogers, 2006). Avec des méthodes semi-quantitatives (**Figure 10**), la performance de l'estimation sexuelle est améliorée, et oscille entre 86,1% pour le crâne seul (Nikita & Michopoulou, 2018) et 89 à 93% lorsque l'on inclut la mandibule dans l'analyse discriminante (Krüger et al., 2015; Walker, 2008).

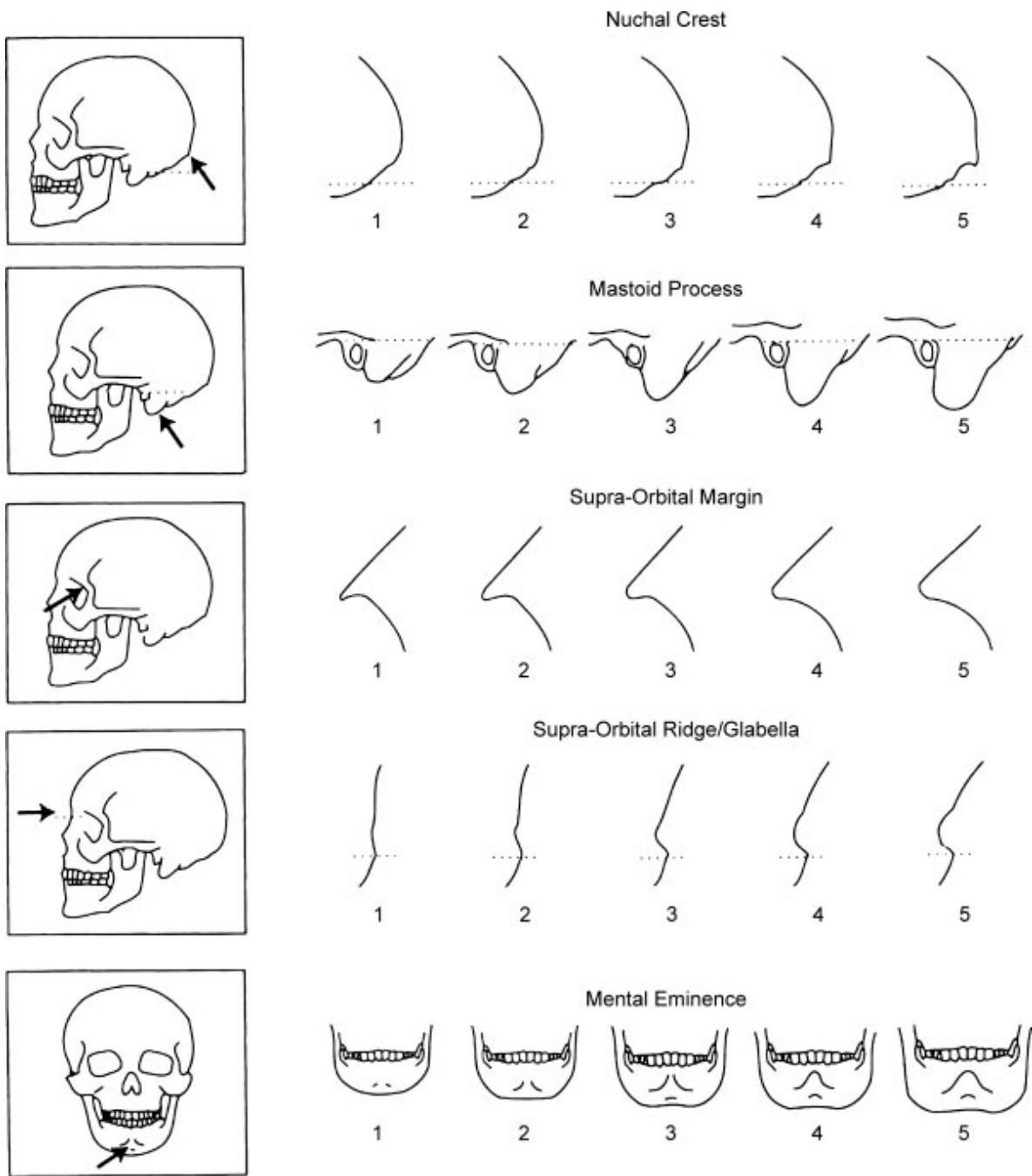


Figure 10 Méthode de Walker pour l'estimation sexuelle à partir de traits crâno-faciaux et mandibulaires. Un système de cotation est associé à chaque trait, selon son degré d'expression de celui-ci (Walker, 2008).

Limites

Ces méthodes présentent divers inconvénients : le premier est qu'elles sont largement dépendantes de l'expérience de l'observateur et de son degré de connaissance de la population étudiée (Walker, 2008). Ceci sous-entend qu'un certain degré d'entraînement est nécessaire et que, malgré cette

courbe d'apprentissage, l'appréciation des différents traits analysés demeure imprécise et subjective (Bigoni et al., 2010; Quatrehomme, 2015). Ceci induit un biais observationnel dans l'estimation du sexe et est à l'origine d'une faible concordance intra et inter observateur (Garvin & Ruff, 2012). De plus, elles se basent sur des caractères qui, bien souvent, sont spécifiques à une population, donc difficilement extrapolables (Krüger et al., 2015). Par ailleurs, l'emploi de variables ordinaires pour l'estimation sexuelle ne prend pas en compte la continuité d'expression d'un caractère et limite le panel d'analyses statistiques possible (Garvin & Ruff, 2012; Williams & Rogers, 2006). De façon générale, les méthodes qualitatives et semi-quantitatives classent efficacement les crânes lorsqu'ils sont masculins puisqu'elles se basent sur des critères de robustesse, mais leur efficacité face à des crânes féminins est médiocre car ils présentent plus de caractères intermédiaires ou ambigus (Hu et al., 2006; Quatrehomme, 2015).

Méthodes métriques

Afin de pallier les problèmes d'objectivité et d'apprécier le dimorphisme sexuel crânien de taille, des méthodes métriques ont été développées. Ces techniques démontrent que les individus féminins présentent généralement des dimensions crâniennes inférieures aux individus masculins. Cette différence peut être appréciée au niveau du volume crânien global mais également à travers certaines mesures linéaires et ratios (Ferembach et al., 1979; Giles & Elliot, 1963).

Parmi les mesures les plus discriminantes nous pouvons citer :

- pour le crâne : la longueur et largeur maximales, la longueur de la base du crâne, la largeur frontale et la hauteur mastoïdienne (Abdel Fatah et al., 2014; Franklin et al., 2005; İşcan et al., 1995),
- pour le massif facial : la largeur bizygomatique, la largeur bijugale, la hauteur malaire, la largeur maxillaire, la hauteur faciale et la largeur orbitaire (Mahakkanukrauh et al., 2015; Saini & Saini, 2016; Zaafrane et al., 2018).

Ces méthodes métriques permettent l'élaboration de fonctions discriminantes à partir des variables les plus dimorphiques. Celles-ci offrent des taux de précision avoisinant les 90% (Cappella et al., 2020; Zaafrane et al., 2018). Certains paramètres tels la largeur bizygomatique et la hauteur mastoïdienne semblent particulièrement dimorphiques, quelle que soit la population étudiée. Ils peuvent être utilisés seuls pour l'estimation sexuelle, avec un taux de précision allant de 74 à 84,3% respectivement (Franklin et al., 2005; İşcan et al., 1995; Mahakkanukrauh et al., 2015; Saini & Saini, 2016).

Méthodes utilisant la morphométrie géométrique

Plus récemment, des analyses par morphométrie géométrique ont permis d'explorer le dimorphisme sexuel de conformation du crâne dans son ensemble ainsi que par région anatomique.

En retirant le critère taille, on s'affranchit de la principale variable sur laquelle repose la spécificité des standards métriques (Bigoni et al., 2010) pour se concentrer sur la forme.

Ces méthodes retrouvent un dimorphisme sexuel de conformation particulièrement marqué au niveau de l'arcade zygomatique, de la glabelle, du front, de la région nasale et orbitaire, de la mastoïde, de la base et de la voûte crânienne, de l'étage supérieur de la face et du palais (Bigoni et al., 2010; Fatah et al., 2014; Franklin et al., 2006; Rosas & Bastir, 2002).

Par ailleurs, le recours à la morphométrie géométrique permet de classer le crâne d'un individu avec une précision allant de 77% (Green & Curnoe, 2009; Kimmerle et al., 2008) à 100% (Bigoni et al., 2010).

2. Le dimorphisme sexuel de la mandibule

Comme pour le crâne et le massif facial, le dimorphisme sexuel de la mandibule repose sur des différences de taille et de morphologie.

Méthodes traditionnelles visuelles

L'inspection visuelle permet d'observer que les individus féminins ont une mandibule plus gracie et moins volumineuse que les hommes. Celle-ci est moins robuste et anguleuse puisque leurs zones d'insertion musculaire sont moins marquées (Alias et al., 2018; Ferembach et al., 1979; Garvin & Ruff, 2012; Toledo Avelar et al., 2017). L'angle goniaque est généralement moins ouvert et moins éversé par rapport aux individus masculins (Hu et al., 2006; Williams & Rogers, 2006). La région mentonnier apparaît également fortement dimorphique et est fréquemment employée dans les analyses qualitatives pour différencier les sexes : les hommes présentent un menton plus carré voire bilobé et une éminence mentonnier plus proéminente (Garvin & Ruff, 2012; Hu et al., 2006; Walker, 2008). Le **Tableau 2** résume les différences morphologiques entre les sexes.

Tableau 2 Critères morphologiques du dimorphisme sexuel de la mandibule d'après Quatrehomme (2015).

	Masculin	Féminin
Mandibule		
Sympyse	Haute	Basse
Menton	En U, massif, carré	En V, arrondi ou pointu, gracile
Protubérance mentonnière	Marquée	Peu marquée
Branche horizontale	Haute	Basse
Branche verticale	Large	Étroite
Condyles	Plus massifs	Plus graciles
Gonions	Insertions musculaires marquées, éversion	Insertions musculaires absentes ou faibles, pas d'éversion

La précision de la diagnose sexuelle peut atteindre 92,5% (Hu et al., 2006) avec des méthodes basées sur l'appréciation visuelle de ces caractères mais, comme pour le crâne, les méthodes qualitatives sont moins précises dans le classement des individus féminins (73,7%). L'appréciation de la morphologie mentonnière paraît notamment très variable et peu fiable pour la diagnose sexuelle (Garvin & Ruff, 2012; Quatrehomme, 2015).

Certains auteurs ont proposé l'appréciation de traits spécifiques tels le contour du rebord inférieur mandibulaire (Hu et al., 2006) ou le degré de courbure du rebord postérieur du ramus (Loth & Henneberg, 1996) comme moyen de différenciation entre les sexes. En effet, chez les femmes, le bord inférieur du corps mandibulaire et le bord postérieur du ramus conservent leur forme rectiligne juvénile tandis que chez les hommes une courbure accentuée est notée. Néanmoins, la fiabilité de ces méthodes est encore une fois controversée (Oettlé et al., 2005).

Méthodes métriques

L'analyse de caractères métriques démontre l'existence d'un dimorphisme sexuel de taille marqué. Les mesures les plus discriminantes sont la hauteur symphysaire, la largeur bigoniale, la largeur bicondylienne, la hauteur ramique, et la longueur mandibulaire (**Figure 11**) (Cappella et al., 2020; Dayal et al., 2008; Dong et al., 2015; Ferembach et al., 1979).

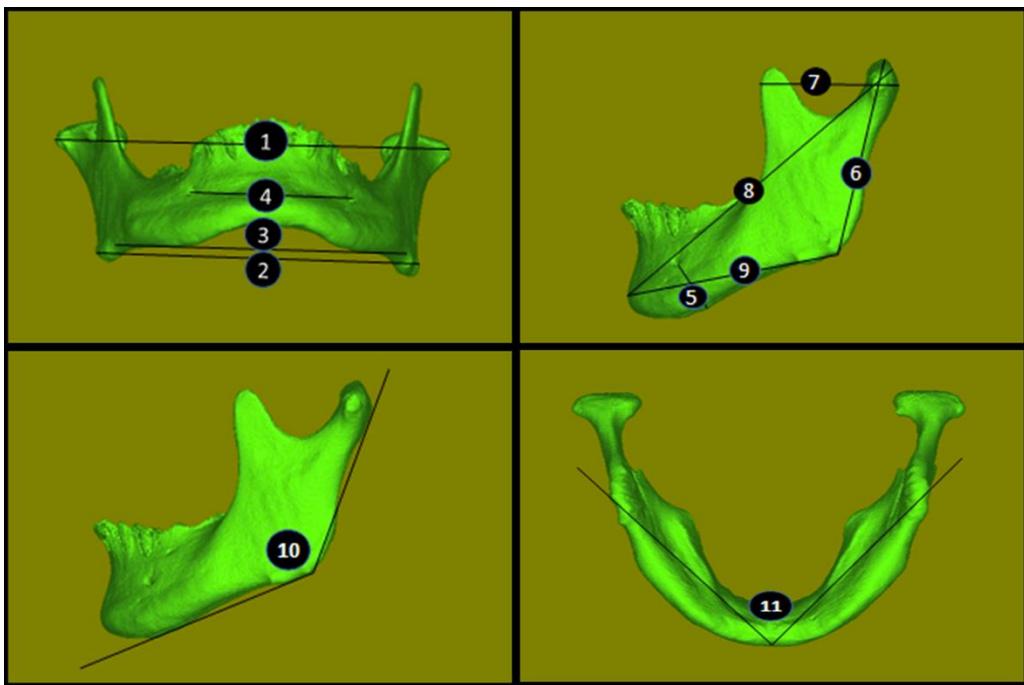


Figure 11 Analyse métrique du dimorphisme sexuel mandibulaire à partir d'examens CBCT (Dong et al., 2015).

Grâce aux fonctions discriminantes obtenues à partir des différentes mesures mandibulaires, la précision de l'estimation sexuelle est généralement supérieure à 80% (Dayal et al., 2008; Işcan & Steyn, 1999) et peut atteindre 95,1% (Gamba et al., 2016). La largeur bigoniale et la hauteur ramique semblent être des marqueurs de dimorphisme sexuel constants, quelle que soit la population étudiée (Franklin et al., 2008; Hunter & Garn, 1972; Ishwarkumar et al., 2017; Lopez-Capp et al., 2018). En effet, il est possible de classer correctement le sexe d'un individu dans 80,5% des cas à partir de la largeur bigoniale (Marinescu et al., 2013) et dans 82,1% des cas avec la hauteur ramique (Tunis et al., 2017). Par ailleurs, diverses études se sont intéressées à la position du canal alvéolaire inférieur et du foramen mentonnier comme indicateurs du sexe mais les résultats sont inconstants (Angel et al., 2011; Hazari et al., 2016).

De façon générale, les individus masculins présentent des valeurs supérieures aux individus féminins, excepté pour la mesure de l'angle goniaque, dont la valeur discriminante est variable selon les publications (Bulut et al., 2019; İlgüy et al., 2014; Kharoshah et al., 2010).

Méthodes utilisant la morphométrie géométrique

L'étude de la conformation mandibulaire par morphométrie géométrique montre également que les individus masculins présentent des reliefs osseux plus marqués, en particulier au niveau des zones d'insertion musculaire telles que le gonion, le condyle, le coroné et le menton (Bejdová et al., 2013; Garvin & Ruff, 2012; Rosas & Bastir, 2002).

D'après Rosas et Bastir (2002), les hommes exhibent un gonion plus antérieur, une échancrure pré-angulaire plus marquée et un condyle plus antérieur. Ceci entraîne une courbure du bord postérieur du ramus spécifique aux individus de sexe masculin. Les femmes, en revanche, présentent un profil mandibulaire plus doux, une symphyse plus haute et antérieure, et un menton plus arrondi.

La précision de l'estimation du sexe à partir de la conformation mandibulaire apparaît nettement supérieure à celle obtenue par des méthodes traditionnelles visuelles ou métriques et peut atteindre 97-100% (Franklin, O'Higgins, et al., 2007; Schmittbuhl et al., 2002). Cependant, il existe peu d'études à l'heure actuelle utilisant des méthodes de morphométrie géométrique pour la diagnose sexuelle mandibulaire.

II) CONTEXTE

La mandibule est l'os le plus volumineux et robuste de la face. Son enveloppe externe, composée d'une épaisseur importante d'os cortical, lui confère une grande solidité et explique sa meilleure préservation dans des contextes archéologiques ou médico-légaux par rapport à d'autres structures osseuses (Hu et al., 2006; Saini et al., 2011). De par sa résistance et son dimorphisme sexuel marqué, il s'agit d'un élément particulièrement intéressant dans le processus d'identification.

Malgré l'existence d'un grand nombre d'études sur la diagnose sexuelle à partir de l'extrémité céphalique, la majorité d'entre-elles utilise soit le crâne, soit la mandibule pour l'estimation du sexe. Il existe, à ce jour, peu d'études comparatives entre les deux structures et une absence de consensus quant à la structure présentant le plus haut degré de dimorphisme sexuel. En effet, certaines publications retrouvent une plus grande précision d'estimation sexuelle à partir de la mandibule (Dayal et al., 2008), tandis que d'autres avancent un meilleur taux classification en utilisant le crâne (Steyn & Işcan, 1998). Il semblerait donc que le dimorphisme sexuel crânien et mandibulaire ait des degrés d'expression variables selon les populations et les méthodes d'analyse employées.

Par conséquent, il est difficile d'évaluer si l'absence ou la dégradation de l'une de ces structures en post mortem a un impact sur le processus d'estimation sexuelle. Or, la mandibule, seul os mobile de l'extrémité céphalique, peut être séparée du crâne sous l'effet de processus taphonomiques. Il est donc fréquent que le crâne et la mandibule ne soient pas retrouvés ensemble, ou que l'une des structures ne soit pas intacte et ne puisse être analysée.

Comme pour d'autres éléments squelettiques, la taille est un aspect important du dimorphisme sexuel de l'extrémité céphalique, qui a été bien documenté et étudié par des mesures métriques traditionnelles. Cependant, les différences anatomiques entre hommes et femmes peuvent également être imputées à des caractères indépendants de la taille tels que la morphologie et la conformation. D'ailleurs, certains auteurs soutiennent que pour l'extrémité céphalique et le bassin, les différences de conformation observées entre les sexes sont plus importantes que les différences de taille, et que la prise en compte de la taille peut entraver les méthodes d'estimation sexuelle (Best et al., 2018; Kimmerle et al., 2008).

L'émergence de méthodes basées sur la morphométrie géométrique ces dernières années a permis l'étude du dimorphisme sexuel de conformation du crâne et de la mandibule et rendu possible la comparaison de ces structures anatomiques par leur seule morphologie, en s'affranchissant du critère de taille. Néanmoins, à notre connaissance, l'étude de ces deux structures au sein du même échantillon

par morphométrie géométrique n'a été employée que par Rosas et Bastir (2002). De plus, l'utilisation combinée de méthodes métriques et morpho-géométriques a été décrite pour l'analyse du dimorphisme sexuel crânien (Franklin et al., 2012) mais pas pour l'étude de la mandibule ni pour l'étude des deux structures chez le même individu.

D'autre part, le dimorphisme sexuel de l'extrémité céphalique a été essentiellement étudié dans des échantillons de grande taille et d'âges variés. De précédentes études se sont focalisées sur le dimorphisme sexuel chez des individus jeunes (Coquerelle et al., 2011; Coqueugniot et al., 2002; Franklin et al., 2007) mais peu d'études se sont intéressées au dimorphisme sexuel selon l'âge des individus (Guyomarc'h et al., 2014). Or nous savons qu'une résorption osseuse survient avec l'avancée en âge, principalement du fait d'une diminution du taux d'œstrogènes (Walsh, 2018). Ces altérations dans la conformation des structures osseuses semblent concerner également le squelette crânio-facial (Toledo Avelar et al., 2017) et peuvent donc avoir un impact sur le dimorphisme sexuel observé ainsi que modifier les normes établies pour la détermination du sexe en fonction de l'âge du sujet.

L'objectif principal de notre étude était d'analyser le dimorphisme sexuel de l'extrémité céphalique d'un échantillon issu de la population française, notamment la contribution du crâne et de la mandibule à la diagnose sexuelle. En effet, dans des contextes médico-légaux et archéologiques, ces deux structures peuvent être retrouvées séparément ou ne pas être retrouvées intactes.

L'objectif secondaire était d'évaluer le potentiel impact de l'âge sur le dimorphisme sexuel du crâne et de la mandibule au sein de l'échantillon d'étude. Pour ce faire, nous avons étudié séparément le dimorphisme sexuel de taille et de conformation grâce à une combinaison de méthodes métriques et morpho-géométriques. Nous avons fait le choix d'utiliser des examens tomodensitométriques pour nos analyses puisqu'ils favorisent la reproductibilité dans le placement de landmarks et permettent l'obtention de résultats plus précis lors d'analyses par morphométrie géométrique que des méthodes traditionnelles (Bookstein, 1991).

III) MATÉRIEL

1. Composition de l'échantillon

Notre matériel provient de la banque de données numériques d'examens tomodensitométriques des Hôpitaux de Toulouse (PACS, McKesson Medical Imaging Group, Richmond, BC, Canada). D'après la loi française, les examens médicaux peuvent être utilisés de façon rétrospective sans le consentement du patient lorsque ces examens ont été réalisés à des fins cliniques et enregistrés de façon anonyme (article 40.1, loi 94-548 du 1^{er} juillet 1994).

Nous avons analysé de façon rétrospective 120 examens tomodensitométriques comprenant l'ensemble du crâne et de la mandibule, réalisés entre 2015 et 2018. Le sexe, l'âge et le motif d'examen étaient connus pour tous les individus. L'indication des examens était le diagnostic ou le suivi de pathologies vasculaires. Les patients présentant une pathologie osseuse ou des antécédents de traumatisme crâno-facial n'ont pas été inclus dans l'étude. Compte tenu du caractère rétrospectif, l'appartenance géographique exacte des patients n'était pas connue. L'échantillon était composé de 63 individus masculins et 57 individus féminins âgés de 23 à 84 ans. Le **Tableau 3** et la **Figure 12** précisent la répartition par âge et par sexe de la population d'étude.

Tableau 3 Composition de la population d'étude (n = 120).

	Nombre d'individus	Âge minimum	Âge maximum	Âge moyen
Féminins	57	23	84	47 ± 15.7
Masculins	63	25	82	48 ± 15.5

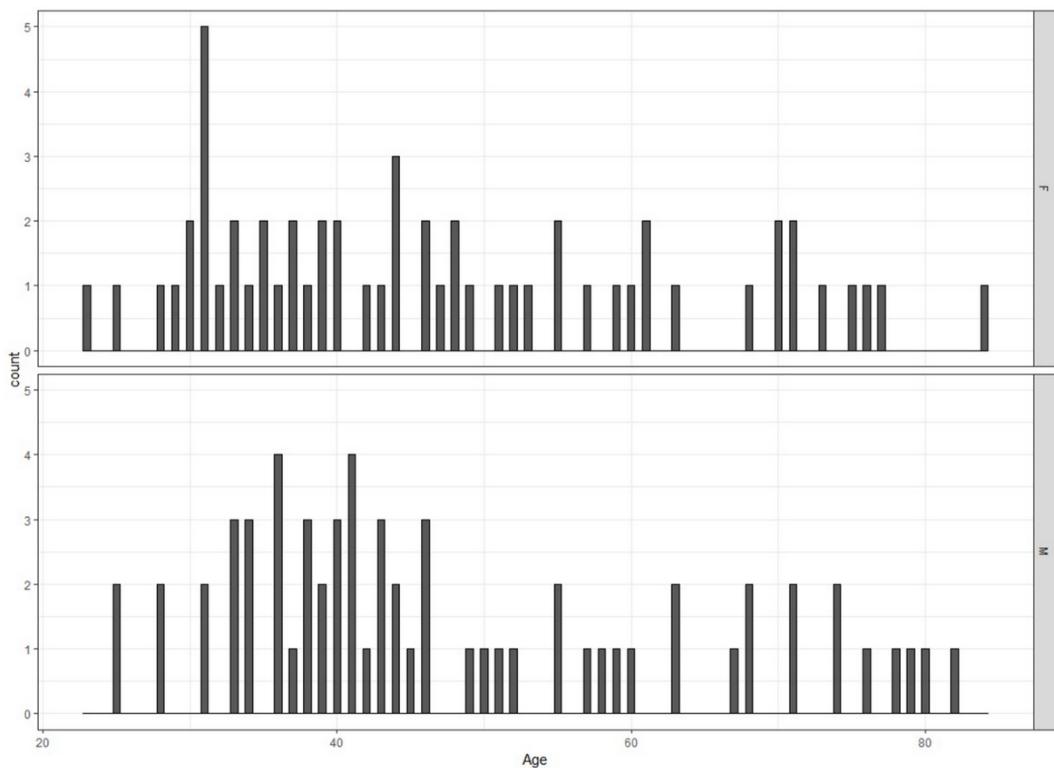


Figure 12 Histogramme représentant la distribution des 120 individus de l'échantillon. *Les individus féminins sont représentés dans le graphique supérieur et les individus masculins dans le graphique inférieur.*

2. Caractéristiques des examens

Les examens ont été réalisés avec un Scanner SOMATOM Sensation 16 (Siemens, Erlangen, Germany), utilisé à des fins cliniques dans le service de radiologie du CHU Toulouse Rangueil.

La collimation était de 16 x 1,5 mm, l'épaisseur de coupe dans le plan axial de 0,6 mm, et la matrice de l'image de 512 x 512 pixels. Les acquisitions étaient reconstruites avec un filtre « tissus durs » (*bone filter*) pour l'analyse osseuse.

IV) MÉTHODES

1. Recueil des données

1.1 Archivage des examens tomodensitométriques

Toutes les données et images ont été enregistrées et traitées de façon anonyme. Les seuls paramètres recueillis étaient le sexe et l'âge des individus au moment de l'acquisition des examens. Les examens tomodensitométriques ont été sauvegardés au format DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) et stockés sur un disque dur externe.

1.2 Choix des landmarks

48 landmarks ont été sélectionnés sur l'extrémité céphalique : 34 landmarks sur le crâne et la face, ainsi que 14 landmarks sur la mandibule. Seuls des landmarks de type I et II ont été choisis afin de garantir un maximum de précision et reproductibilité dans leur placement.

Les critères de sélection de ces landmarks étaient les suivants (Franklin et al., 2008, 2013; Giles & Elliot, 1963; Zaafrane et al., 2018) :

- leur localisation anatomique est décrite dans la littérature comme pertinente pour l'analyse du dimorphisme sexuel du crâne, de la face et de la mandibule
- leur positionnement est facile et reproductible

Les **Tableaux 4 et 5** et les **Figures 13 et 14** détaillent les landmarks crâniens et mandibulaires.

Tableau 4 Définition et typologie des landmarks crâniens et faciaux. 8 landmarks sont médians et 13 bilatéraux.

Landmark	Dénomination	Description anatomique	Type de Bookstein
N	Nasion	Point médian situé à l'intersection des deux os nasaux et de l'os frontal	I
Ns	Nasospinale	Point situé à l'intersection du plan sagittal médian et de la droite horizontale tangente au rebord inférieur de l'orifice pyriforme	II
Al	Alare	Point le plus latéral de l'ouverture nasale	II
Ju	Jugale	Point le plus bas de l'échancrure entre le processus temporal et frontal de l'os zygomatique	II
Pr	Prosthion	Point le plus antérieur du procès alvéolaire du maxillaire, situé sur la ligne médiane	II
Zy	Zygion	Point le plus latéral de l'arcade zygomatique	II
Zm	Zygomaxillare	Point le plus bas de la suture zygomatico-maxillaire	II
Fo	Fronto-zygomaticorbitale	Intersection entre la suture fronto-zygomatique et la paroi latérale de l'orbite	I
Mf	Maxillo-frontale	Jonction entre la crête lacrymale antérieure maxillaire et la suture fronto-maxillaire	I
Ec	Ectoconchion	Point le plus latéral du cadre orbitaire	II
Os	Rebord orbitaire supérieur	Intersection entre la paroi supérieure de l'orbite et la perpendiculaire à la droite reliant les points maxillofrontale et ectoconchion	II
Oi	Rebord orbitaire inférieur	Intersection entre la paroi inférieure de l'orbite et la perpendiculaire à la droite reliant les points maxillofrontale et ectoconchion	II
Ecm	Ectomolare	Point le plus latéral du procès alvéolaire maxillaire, en regard de la 2e molaire	II
Po	Porion	Point le plus haut du rebord du méat acoustique externe	II
Ms	Mastoidale	Point le plus bas du processus mastoïdien	II
G	Glabella	Eminence médiane de l'os frontal située entre les deux sourcils, au-dessus du nez	II
Ba	Basion	Point médian situé sur le rebord antérieur du foramen magnum	II
B	Bregma	Point exocrânien situé à l'intersection des sutures coronale et sagittale	I
O	Opisthion	Point médian situé sur le rebord antérieur du foramen magnum	II
Op	Opisthocranion	Point occipital postérieur situé le plus loin de la glabelle, sur le plan médian	II
Fml	Foramen magnum lateral	Point le plus latéral du foramen magnum	II

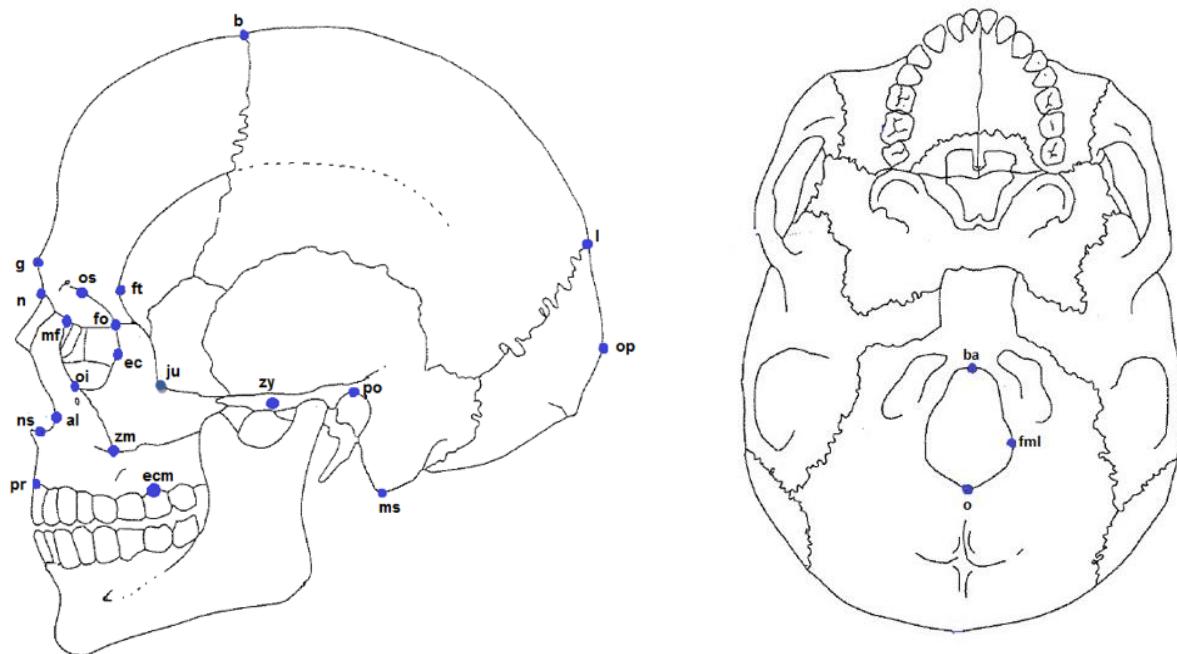


Figure 13 Schéma du crâne en vue latérale et caudale illustrant le positionnement des landmarks crâniens et faciaux (Zaafrane et al., 2018).

Tableau 5 Définition et typologie des landmarks mandibulaires. 4 landmarks sont médians et 5 sont bilatéraux.

Landmark	Dénomination	Description anatomique	Type de Bookstein
Cs	Condylion superior	Point le plus supérieur du condyle mandibulaire	II
Mn	Échancrure mandibulaire	Point le plus inférieur de l'échancrure sigmoïde	II
Co	Coronion	Point le plus supérieur du processus coronoïde	II
Go	Gonion	Point le plus externe de l'angle mandibulaire, à l'intersection entre les branches horizontales et montantes	II
Id	Infradentale	Point le plus antérieur du procès alvéolaire mandibulaire, situé entre les deux incisives centrales mandibulaires	II
Mns	Symphyse mandibulaire	Point le plus postérieur de la concavité de la symphyse mandibulaire (entre l'infradentale et le pogonion)	II
Pg	Pogonion	Point médian le plus antérieur de la symphyse mandibulaire	II
Gn	Gnathion	Point médian le plus inférieur de la symphyse mandibulaire	II
MI	Mentale	Point le plus inférieur du rebord du foramen mentonnier	I

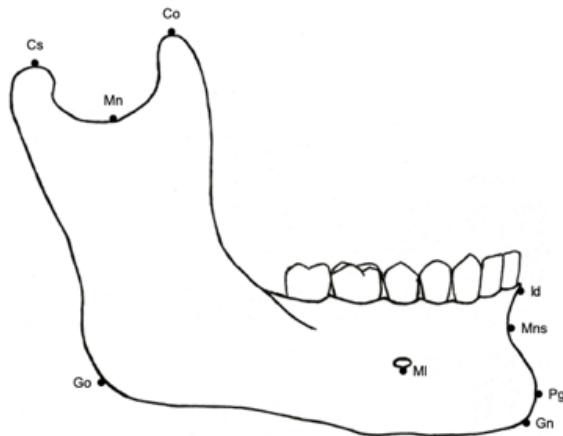


Figure 14 Schéma de la mandibule en vue latérale illustrant le positionnement des landmarks mandibulaires.

1.3 Positionnement des landmarks

Nous avons utilisé le logiciel OsiriX Medical Imaging software (Pixmeo, Geneva, Switzerland) v.5.9 64-bit® pour l'analyse des examens tomodensitométriques et le positionnement des landmarks. Ce logiciel permet une analyse 2D des examens scanner dans les plans axial, coronal et sagittal via un outil de reconstruction multiplanaire (MPR), ainsi qu'une reconstruction volumique 3D de l'acquisition.

Les landmarks ont été posés sur les 120 examens scanner de manière manuelle et systématisée sur chaque spécimen, en suivant le protocole suivant (**Figure 15**) :

- pour chaque landmark, le choix du plan de référence pour le positionnement de celui-ci a été défini
- chaque landmark a ensuite été positionné sur les coupes ou reconstructions 2D, à savoir les coupes axiales, coronales ou sagittales
- enfin, le positionnement de chaque landmark a été validé sur les reconstructions volumiques 3D

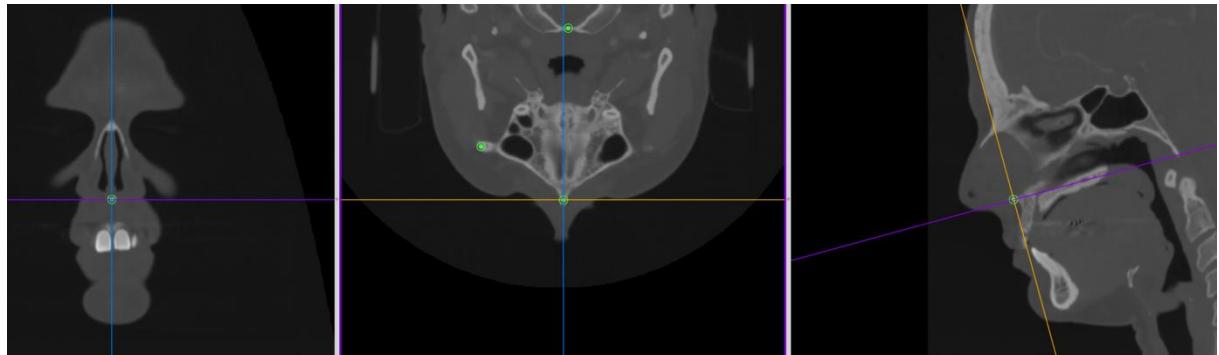


Figure 15 Placement des landmarks mandibulaires sur le logiciel OsiriX Medical Imaging software. *Reconstruction multiplanaire montrant le placement du point Nasospinale (Ns).*

1.4 Enregistrement des données

Après avoir enregistré les coordonnées tridimensionnelles (x, y, z) de chaque landmark, celles-ci ont été exportées depuis Osirix et stockées au sein d'une base de données.

2. Mesures métriques et analyse statistique

2.1 Tests de reproductibilité

L'ensemble des données ont été collectées par un observateur. Afin d'évaluer le pourcentage d'erreur intra-observateur, le même examinateur a procédé à la pose des 48 landmarks sur 40 examens scanner sélectionnés de façon aléatoire au sein de l'échantillon (20 femmes et 20 hommes), un mois suite à la première analyse. Un deuxième observateur a procédé à l'analyse de ces mêmes 40 examens afin d'estimer la variabilité inter-observateur.

Nous nous sommes basés sur la théorie de généralisabilité (GT) pour les tests de reproductibilité en utilisant le coefficient G comme estimateur de l'erreur intra et inter-observateur. Une valeur du coefficient G proche de 1 signifie une haute reproductibilité (Ercan et al., 2008).

Le choix de cette méthode repose sur la problématique du référentiel employé. En effet, les valeurs employées pour le calcul de l'erreur relative dépendent de l'écart du landmark au centre du référentiel (le 0 dans le cas d'examens tomodensitométriques). Le crâne et la mandibule étant des structures médianes, les landmarks sont distribués de part et d'autre du 0, ce qui amène à des valeurs relatives positives et négatives (Cramon-Taubadel et al., 2007). L'utilisation du coefficient G permet de

s'affranchir de cette difficulté, et est possible du fait de la forte homologie des landmarks employés dans cette étude (type I et II).

2.2 Analyse univariée

Le dimorphisme sexuel de taille a été exploré par une analyse métrique. 26 distances et un angle ont été mesurés au niveau du massif crânio-facial et de la mandibule. Il s'agit de paramètres crâniométriques validés par la littérature pour la diagnose sexuelle de l'extrémité céphalique (Franklin et al., 2008, 2012; Giles & Elliot, 1963). Ils sont détaillés dans le **Tableau 6**. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R® 3.0.2 v1.1.463. La normalité des échantillons a été testée grâce au test de Shapiro et le test de Fisher a permis de contrôler l'égalité des variances.

Tableau 6 Paramètres crâniométriques employés pour la diagnose sexuelle.

Mesures métriques	Variables
Hauteur mastoïdienne	Ms.g_Po.g
Hauteur symphysaire	Gn_Id
Hauteur nasale	N_Ns
Largeur bigoniale	Go.g_Go.d
Hauteur ramique	Cs.g_Go.g
Largeur bicondylienne	Cs.g_Cs.d
Longueur mandibulaire	Go.g_Pg
Longueur du foramen magnum	Ba_O
Largeur bizygomatique	Zy.g_Zy.d
Hauteur faciale supérieure	N_Pr
Largeur bimastoïdienne	Ms.g_Ms.d
Largeur maxillaire	Ecm.g_Ecm.d
Longueur de la base du crâne	Ba_N
Largeur nasale	Al.g_Al.d
Corde frontale	B_N
Largeur du foramen magnum	Fml.g_Fml.d
Largeur frontale	Fo.g_Fo.d
Largeur bijugale	Ju.g_Ju.d
Largeur bimaxillaire	Zm.g_Zm.d
Longueur maximale crânienne	G_Op
Longueur basion-nasospinale	Ba_Ns
Longueur nasion-opisthocranion	N_Op
Hauteur basion-bregma	Ba_B
Longueur basion-prosthion	Ba_Pr
Largeur orbitaire	Ec.g_Mf.g
Hauteur orbitaire	Oi-Os
Angle goniaque	Cs.Go.Pg

La significativité des résultats a été évaluée par des tests paramétriques (test de Student) pour la majorité des variables, et par des tests non paramétriques (test U de Mann-Whitney et test d'Aspin Welch) pour quelques variables ne suivant pas une loi normale (révélées par les tests de Shapiro et Fisher). Une valeur de $p < 0.05$ était considérée comme significative et une valeur < 0.2 comme acceptable pour l'analyse multivariée. Le dimorphisme sexuel de taille a été estimé en comparant les valeurs moyennes de chaque paramètre craniométrique pour la population masculine et féminine grâce au ratio de Lovich et Gibbons (Lovich et Gibbons, 1992). Les 15 premières mesures présentant le ratio de Lovich-Gibbons le plus élevé ont été sélectionnées pour l'analyse discriminante sur les 120 individus.

2.3 Analyse multivariée

Le dimorphisme sexuel du crâne et de la mandibule a par la suite été étudié grâce à des analyses multivariées. Celles-ci se sont déroulées en deux temps :

Dans un premier temps, une analyse linéaire discriminante a été appliquée aux 15 variables présentant le plus grand degré de dimorphisme sexuel, définies par l'analyse univariée. Pour cela, trois jeux de données ont été utilisés : l'ensemble des mesures du crâne et de la mandibule, les mesures du crâne et de la face et les mesures mandibulaires. Trois groupes d'âge ont été également été constitués afin d'évaluer l'impact de l'âge sur le dimorphisme sexuel de l'extrémité céphalique :

- le premier comprenant l'ensemble de l'échantillon, composé d'individus âgés de 23 à 84 ans
- le deuxième comprenant les individus âgés de moins de 40 ans ($n = 50$)
- le troisième comprenant les individus âgés de plus de 40 ans ($n = 70$)

Une régression logistique multiple avec une sélection pas à pas descendante (*backward stepwise selection*) a été appliquée aux trois jeux de données et aux trois groupes d'âge.

Ce procédé a permis la sélection des combinaisons de variables les plus précises pour la diagnose sexuelle afin de générer des fonctions discriminantes ou modèles pour le crâne et la mandibule. Les modèles ont été analysés pour les trois groupes d'âge, à savoir l'échantillon complet (23-84 ans) ainsi que les individus âgés de plus et moins de 40 ans.

Dans un deuxième temps, la fiabilité de chaque modèle produit a été testée par validation croisée d'un contre tous (LOOCV pour *leave-one-out cross-validation*). Le biais sexuel a été calculé pour tous les modèles en soustrayant le taux de prédiction correct masculin au taux de prédiction correct féminin.

3. Morphométrie géométrique et analyse statistique

Afin de définir et quantifier les variations morphologiques entre les individus féminins et masculins de notre échantillon, une analyse par morphométrie géométrique a été menée. Celle-ci permet l'étude du dimorphisme sexuel de conformation, c'est-à-dire les différences de forme non liées à la taille.

La première étape a consisté en une Analyse Procruste Généralisée (GPA) du crâne (crâne et face) et de la mandibule de façon indépendante. Les formes des structures osseuses, définies par les landmarks sont alors superposées par des opérations de rotation et translation et ramenées à la même échelle. Ce redimensionnement est effectué à partir de la taille centroïde de l'objet.

Suite à la GPA, une configuration moyenne a été produite pour chaque sexe à partir des coordonnées Procruste afin de comparer les différences de conformation entre les individus masculins et féminins.

Dans un deuxième temps, une analyse en composantes principales (ACP) des résidus Procrustes a été réalisée afin de visualiser les différences de conformation du crâne et de la mandibule en fonction du sexe. Cette analyse permet de réduire la dimension de la matrice de données et de visualiser les principales tendances de variation des individus au sein de l'échantillon. Ceci se traduit graphiquement par un nuage de points répartis selon les deux axes (les composantes principales) expliquant le mieux la dispersion des individus à l'aide des variables qui contribuent le plus à cette dispersion.

Afin d'évaluer la performance de la discrimination sexuelle à partir de la conformation du crâne et de la mandibule, une Analyse Discriminante Linéaire (LDA pour *Linear Discriminant Analysis* ou CVA pour *Canonical Variate Analysis*) a été réalisée à partir des résidus Procrustes. Celle-ci détermine les différences maximales entre les hommes et les femmes en termes de dimorphisme en prenant en compte les variations intragroupes.

Le test F de Goodall et les distances de Mahalanobis ont permis d'évaluer la significativité des différences de conformation entre les sexes retrouvées lors de la CVA. Le test F de Goodall permet de tester les variations globales de formes entre groupes en prenant en compte toutes les variables de l'échantillon. La distance de Mahalanobis permet, elle, de mesurer la distance entre les centroïdes des groupes étudiés selon une échelle ajustée à la variation intra groupe (Zelditch et al., 2004).

V) RÉSULTATS

1. Tests de reproductibilité

Nos résultats présentent une bonne reproductibilité. Les valeurs du coefficient G sont de 0.997 pour la variabilité inter-observateur et de 0.999 pour la variabilité intra-observateur.

2. Analyse univariée

L'analyse métrique permet de constater un dimorphisme sexuel de taille de l'extrémité céphalique bien marqué au sein de la population étudiée.

Les individus masculins présentent des valeurs moyennes significativement plus grandes pour 25 mesures ($p < 0,05$). La hauteur mastoïdienne (Ms_Po), la hauteur symphysaire mandibulaire (Gn_Id), la hauteur ramique (Cs_Go) et la largeur bigoniale (Go_Go) sont les paramètres présentant les ratios de dimorphisme sexuel les plus élevés. En revanche, le test t de Student montre que l'angle goniaque (Cs-Go-Pg) ne permet pas de discriminer les individus féminins et masculins de façon significative dans notre échantillon. Il en est de même pour la hauteur orbitaire (Oi-Os) d'après le test de Mann-Whitney. Les résultats de l'analyse univariée et les distances moyennes pour les hommes et les femmes sont présentées dans le **Tableau 7**.

Tableau 7 Résultats de l'analyse univariée : valeurs moyennes des mesures crâniennes et mandibulaires pour les individus masculins et féminins et ratio de dimorphisme sexuel pour chaque paramètre mesuré (LG ratio).

Mesures	Landmark	<i>p</i>	LG ratio	Hommes : valeurs moyennes \pm SD	Femmes : valeurs moyennes \pm SD
Hauteur mastoïdienne	Ms_Po	<0.001	1.138	34.14 \pm 3.45	29.99 \pm 3.07
Hauteur symphysaire	Gn_Id	<0.001	1.096	32.25 \pm 4.21	29.43 \pm 3.64
Hauteur ramique	Cs_Go	<0.001	1.085	58.96 \pm 6.56	54.34 \pm 6.36
Largeur bigoniale	Go_Go	<0.001	1.085	94.94 \pm 7.12	87.52 \pm 5.25
Largeur bicondylienne	Cs_Cs	<0.001	1.076	104.16 \pm 6.29	96.77 \pm 6.14
Largeur bizygomatique	Zy_Zy	<0.001	1.073	131.73 \pm 5.20	122.73 \pm 4.08
Hauteur nasale	N_Ns	<0.001	1.073	55.85 \pm 3.46	52.06 \pm 3.03
Largeur bimastoïdienne	Ms_Ms	<0.001	1.072	109.86 \pm 4.11	102.47 \pm 3.90
Longueur mandibulaire	Go_Pg	<0.001	1.066	90.31 \pm 5.29	84.69 \pm 6.07
Largeur maxillaire	Ecm_Ecm	<0.001	1.062	60.69 \pm 4.38	57.14 \pm 3.22
Largeur du foramen magnum	Fml_Fml	<0.001	1.060	33.37 \pm 2.74	31.49 \pm 2.52
Longueur de la base du crâne	Ba_N	<0.001	1.056	104.98 \pm 4.75	99.40 \pm 4.05
Hauteur faciale supérieure	N_Pr	<0.001	1.054	73.15 \pm 5.41	69.37 \pm 4.24
Largeur nasale	Al_Al	0.0015	1.054	24.74 \pm 2.16	23.47 \pm 2.15
Longueur du foramen magnum	Ba_O	<0.001	1.052	38.65 \pm 2.40	36.73 \pm 2.47
Corde frontale	B_N	<0.001	1.050	114.12 \pm 5.20	108.66 \pm 4.46
Largeur bimaxillaire	Zm_Zm	<0.001	1.050	90.08 \pm 5.68	85.67 \pm 4.48
Largeur bijugale	Ju_Ju	<0.001	1.045	108.49 \pm 4.07	103.85 \pm 3.55
Largeur frontale	Fo_Fo	<0.001	1.044	98.56 \pm 4.00	94.42 \pm 3.54
Longueur maximale crânienne	G_Op	<0.001	1.042	183.36 \pm 7.59	175.95 \pm 5.85
Hauteur basion-bregma	Ba_B	<0.001	1.041	137.24 \pm 5.79	131.81 \pm 4.68
Longueur basion-nasospinale	Ba_Ns	<0.001	1.038	95.29 \pm 4.73	91.79 \pm 4.62
Longeur nasion-opisthocranion	N_Op	<0.001	1.038	181.65 \pm 7.27	175.06 \pm 5.74
Longeur basion-prosthion	Ba_Pr	0.002	1.034	98.00 \pm 5.46	94.75 \pm 5.80
Largeur orbitaire	Ec_Mf	0.022	1.022	42.56 \pm 2.26	41.64 \pm 2.13
Hauteur orbitaire	Oi_Os	0.3923	-	-	-
Angle goniaque	Cs_Go_Pg	0.405	-	-	-

3. Analyse multivariée

Une régression logistique multiple avec sélection pas à pas descendante a été faite à partir des 15 distances les plus dimorphiques, à savoir celles présentant le ratio de Lovich-Gibbons le plus élevé. À partir des trois jeux de données étudiés (mesures crâniennes et mandibulaires, mesures crâniennes seules et mesures mandibulaires seules) deux principaux modèles de variables ont été calculés :

- un modèle (1) comprenant les mesures crâniennes et faciales
- un modèle (2) comprenant les mesures mandibulaires

En effet, lorsque le jeu de données global comprenant l'ensemble des valeurs crâniennes et mandibulaires a été testé, la fonction discriminante la plus fiable a retenu uniquement les variables crâniennes et faciales, éliminant les mesures mandibulaires du modèle.

Ces deux principaux modèles ont été déclinés pour chaque groupe d'âge (23-84 ans, < 40 ans, > 40 ans), aboutissant, au total, à 6 modèles discriminants comprenant entre 3 et 6 variables métriques.

Puis une LOOCV a permis de valider les 6 modèles générés.

Les paramètres les plus discriminants sont, pour le modèle crânien, la hauteur nasale (N_Ns), la largeur bimastoïdienne (Ms_Ms), la largeur bizygomatique (Zy_Zy) et la hauteur mastoïdienne (Ms_Po). Pour le modèle mandibulaire, il s'agit de la hauteur symphysaire (Gn_Id), la longueur mandibulaire (Go_Pg), la hauteur ramique (Cs_Go) et la largeur bicondylienne (Cs_Cs).

Le premier modèle (crâne et face) présente la plus haute précision d'estimation sexuelle après validation croisée : 88,3% pour l'échantillon complet, 88% pour les individus âgés de moins de 40 ans et 87% pour les individus âgés de plus de 40 ans.

Le deuxième modèle, obtenu à partir des variables mandibulaires, présente une précision de 77,5% pour l'ensemble des individus après validation croisée. La précision du modèle atteint 81,4% pour le groupe d'individus âgés de plus de 40 ans.

Pour les trois groupes d'âge étudiés, le biais sexuel apparaît plus élevé pour le modèle mandibulaire. La tendance globale est à une féminisation des individus (biais sexuel négatif), avec une plus forte propension à attribuer des hommes au groupe féminin.

Les mesures sélectionnées par la régression logistique sont présentées dans le **Tableau 8**, ainsi que les valeurs de biais sexuel et les taux de précision avant et après validation croisée (LOOCV).

Tableau 8 Modèles discriminants pour les deux sexes et les trois groupes d'âge. Leur précision avant et après LOOCV (Leave-One-Out Cross-Validation) est exprimée en pourcentage. Un biais sexuel négatif indique une tendance à sur-classer les individus en tant que « féminins ».

Modèles Fonctions discriminantes	Précision (%)	Biais sexuel	Précision LOOCV (%)	Biais sexuel
Échantillon complet (n=120)				
Modèle 1 (Crâne): = (0.205 x Zy_Zy) + (0.211 x Ba_N) - (0.244 x N_Pr) + (0.270 x Ms_Ms) + (0.364 x Ms_Po) + (0.531 x N_Ns) - 98.666	90	-2.3	88.3	-5.5
Modèle 2 (Mandibule): = (0.142 x Go_Pg) + (0.226 x Gn_Id) + (0.152 x Go_Go) + (0.154 x Cs_Cs) + (0.190 x Cs_Go) - 59.104	84.2	-0.07	77.5	-16.1
Individus ≤ 40 ans				
Modèle 1 (Crâne): = (0.466 x Ba_O) + (0.344 x Ms_Po) + (0.310 x Zy_Zy) - 67.913	90	-4	88	-8
Modèle 2 (Mandibule): = (0.188 x Gn_Id) + (0.142 x Go_Pg) + (0.230 x Cs_Go) + (0.171 x Cs_Cs) - 48.671	78	4	68	-16
Individus > 40 ans				
Modèle 1 (Crâne): = (0.289 x Zy_Zy) + (0.333 x Ms_Po) + (0.337 x Ms_Ms) + (0.522 x N_Ns) - 110.670	88.6	-3.8	87	-6.4
Modèle 2 (Mandibule): = (0.200 x Cs_Cs) + (0.302 x Go_Pg) + (0.198 x Cs_Go) + (0.336 x Gn_Id) + (0.234 x Go_Go) - 89.145	82.9	3	81.4	-5.4

4. Analyse par morphométrie géométrique

L'analyse de la conformation des matrices osseuses montre une meilleure efficacité de prédiction du sexe pour le modèle crânien.

L'ACP permet d'observer des différences morphologiques significatives entre les sexes pour le crâne et la mandibule. La première composante principale (PC1) est celle présentant la plus grande variance au sein de l'échantillon, puis la variance diminue avec les composantes principales suivantes. L'analyse en composantes principales du crâne et de la mandibule est peu contributive (**Figure 16**). En revanche, lorsque l'on étudie le crâne et la mandibule séparément, PC1 et PC2 représentent 27,59% et 45,07% de la variance mesurée au sein de l'échantillon respectivement (**Figure 17**). La tendance de variation de conformation entre individus masculins et féminins est résumée dans les **Figures 16** et **17**. Les individus apparaissant les plus éloignés sont, dans notre étude, les plus opposés sur le plan morphologique.

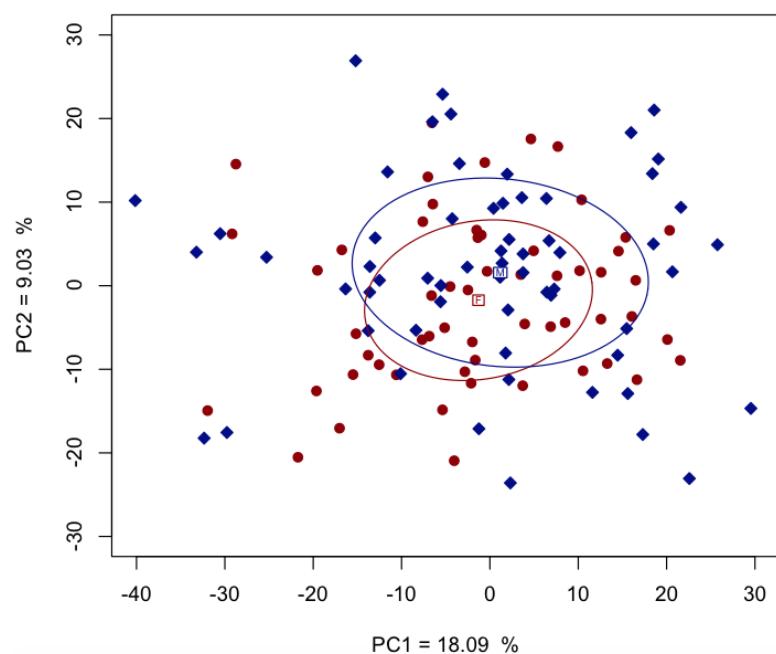


Figure 16 Analyse en Composantes Principales du crâne et de la mandibule. *Les individus masculins sont représentés en bleu, les individus féminins en rouge. Chaque PC est exprimée en pourcentage de la variance totale.*

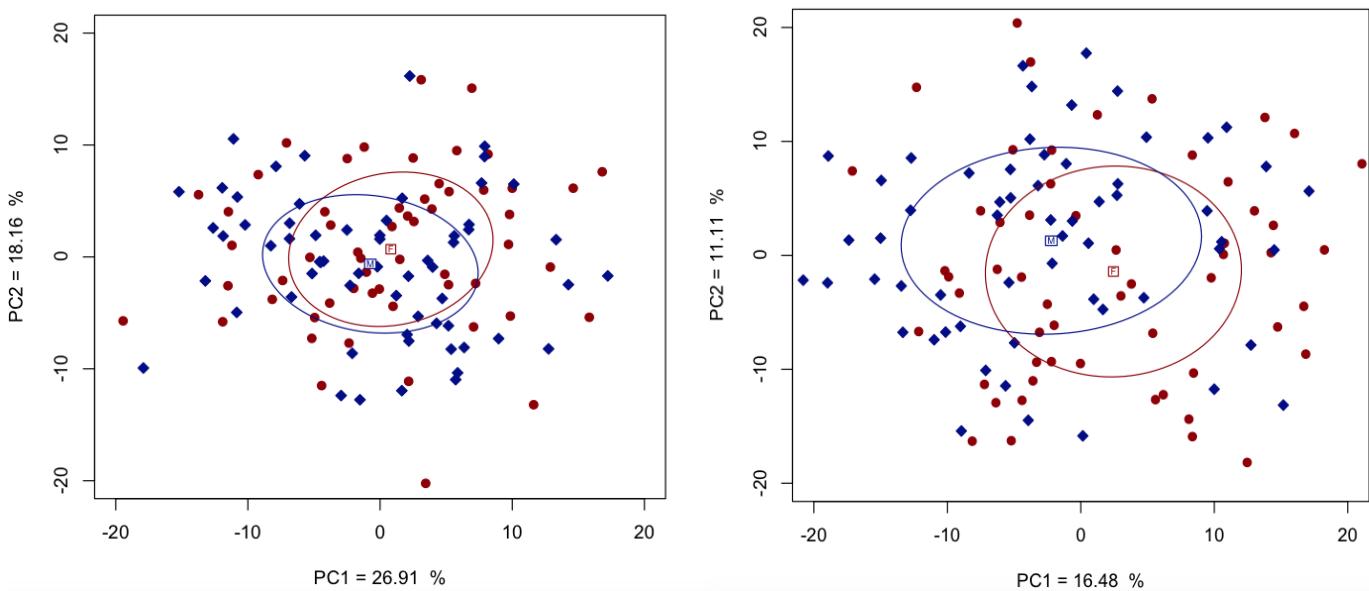


Figure 17 Analyse en Composantes Principales du crâne (gauche) et de la mandibule (droite) de façon isolée. *Les individus masculins sont représentés en bleu, les individus féminins en rouge. Chaque PC est exprimée en pourcentage de la variance totale.*

L'analyse discriminante linéaire (CVA) indique que le sexe est correctement attribué pour 97,5% des individus à partir de la conformation crânienne. Le taux de précision atteint 100% pour les individus âgés de plus de 40 ans. La conformation mandibulaire permet d'atteindre une fiabilité de 84,2% pour l'ensemble de l'échantillon. En revanche, elle ne permet pas de discriminer les individus masculins et féminins des groupes < 40 ans et > 40 ans.

La distance de Mahalanobis, représentant l'unité de mesure pour les changements de forme entre le groupe féminin et masculin après l'analyse canonique, est de 7,6 pour le crâne et de 2,0 pour la mandibule pour l'ensemble de l'échantillon. Cette différence s'explique par la moindre dispersion des landmarks mandibulaires. Le test F de Goodall confirme la plus grande précision du modèle crânien pour tous les groupes d'âge (**Tableau 9**).

Tableau 9 Analyse des variations de conformation du crâne et de la mandibule et fonction de l'âge et du sexe.

Modèle	Distance de Mahalanobis	F de Goodall	p-value	CVA (%)
Échantillon complet n=120				
Crâne	7.6	3.32	0.001*	97.5
Mandibule	2.0	1.97	0.045*	84.2
Individus ≤ 40 ans				
Crâne	3.5	2.02	0.019*	94
Mandibule	5.4	1.45	0.136	-
Individus > 40 ans				
Crâne	6.1	2.13	0.009*	100
Mandibule	2.9	1.27	0.25	-

VI) DISCUSSION

1. Analyse des résultats

L'objectif principal de cette étude était d'apprécier la contribution respective du crâne et de la mandibule dans l'estimation du sexe de l'extrémité céphalique, ainsi que d'évaluer si l'absence de l'une de ces structures pouvait avoir un impact sur le processus d'identification.

Nous avons utilisé à la fois des méthodes crâniométriques classiques et la morphométrie géométrique afin d'évaluer de façon indépendante le dimorphisme sexuel de taille et de conformation pour l'échantillon complet (23 - 84 ans) ainsi qu'avant et après 40 ans.

Dimorphisme sexuel de taille

Les mesures anthropométriques traditionnelles ont été largement utilisées dans l'étude du dimorphisme sexuel crânien et mandibulaire. Dans notre échantillon, l'analyse univariée a mis en évidence un dimorphisme sexuel de taille significatif entre les individus féminins et masculins pour toutes les mesures étudiées excepté la hauteur orbitaire et l'angle goniaque. Oettlé et al. (2009) ont également trouvé que l'angle goniaque n'est pas un indicateur fiable de dimorphisme sexuel, malgré le fait que cette mesure ait été fréquemment employée dans la littérature (Franklin et al., 2007; Kharoshah et al., 2010; Oettlé et al., 2009).

L'exactitude de prédiction pour le modèle crânien était de 90% avant validation croisée (biais -2,3), et de 88,3% après validation croisée (biais -5,5), ce qui semble cohérent avec les résultats décrits dans la littérature. Mahakkanukrauh et al. (2015), en employant la même méthodologie et variables que notre analyse au sein d'une population thaïlandaise, ont retrouvé une précision de 87,7% à partir du crâne (Mahakkanukrauh et al., 2015). Des résultats similaires ont été rapportés pour d'autres populations : 90 % pour une population australienne (Franklin et al., 2013) et tunisienne (Zaafrane et al., 2018), 84, 7% pour une population indienne (Saini & Saini, 2016) et 86% pour une population sud-africaine (Steyn & Işcan, 1998).

Concernant la mandibule, les cinq mesures sélectionnées après régression logistique multiple pour l'ensemble de l'échantillon ($n = 120$) ont montré un taux de précision après validation croisée de 77,5%. Dans la littérature, la mandibule paraît être une structure intéressante pour l'estimation du sexe, avec des taux de précision variant de 60% à 95,1% selon les populations étudiées (Dayal et al., 2008; Franklin et al., 2008; Gamba et al., 2016; Marinescu et al., 2013). Alias et al. (2018) ont retrouvé un taux de précision après validation croisée de 78,5% au sein d'un population malaysienne. Tunis et

al. (2017) ont, quant à eux, un taux de classement correct atteignant 89% après validation croisée pour une population israélienne. Certaines études rapportent des taux de prédition supérieurs, pouvant atteindre 95,1% (Gamba et al., 2016), mais les résultats de l'analyse discriminante ne sont pas soumis à une validation croisée, ce qui augmente le nombre de variables prises en compte dans l'analyse et surestime le taux de classement correct (Bej dová et al., 2018).

En revanche, dans notre étude et pour l'ensemble de l'échantillon (individus âgés de 23 à 84 ans), le modèle le plus précis pour l'estimation du sexe ne prenait pas en compte les mesures mandibulaires. Ainsi, la mandibule ne semble pas augmenter l'efficacité de discrimination des modèles étudiés, et a même tendance à accroître leur taux d'erreur. Ces résultats sont conformes à ceux retrouvés par Steyn et İşcan (1998) au sein d'une population blanche sud-africaine, qui ont démontré que le crâne avait une plus grande précision que la mandibule dans l'estimation du sexe : 85,7% versus 81,5%. Au sein d'un échantillon mixte d'individus sud-africains blancs et noirs, cette différence étant d'autant plus prononcée, avec un taux de prédition moyen de 98% pour le crâne et de 74 à 87% pour la mandibule (İşcan et Steyn 1999). L'étude d'une population italienne, plus proche de celle faisant l'objet de notre analyse, Cappella et al. (2020) ont également constaté que la mandibule présente une précision inférieure au crâne pour la diagnose sexuelle (74,7% vs 88,6% après validation croisée). Néanmoins, au sein de populations indigènes sud-africaines, l'analyse de mesures mandibulaires permet une meilleure estimation du sexe (Dayal et al., 2008; Franklin et al., 2005, 2008, 2008). Certains auteurs ont d'ailleurs constaté que la précision de l'estimation sexuelle crânienne augmente lorsque l'on intègre la mandibule à l'analyse (İşcan et al., 1995).

Les différences retrouvées dans la littérature concernant la diagnose sexuelle de l'extrémité céphalique peuvent être expliquées par le fait que l'appréciation de caractères sexuellement dimorphiques repose sur des standards populationnels et que les caractères squelettiques varient d'une population à l'autre. À notre connaissance, aucune étude métrique portant sur le dimorphisme sexuel de l'extrémité céphalique n'a été menée au sein d'une population française contemporaine. Il nous est donc difficile de comparer nos résultats à des standards populationnels déjà établis.

D'autre part, bien que l'on obtienne un taux de précision inférieur pour la mandibule dans notre échantillon, il convient de noter que les fonctions discriminantes mandibulaires ont nécessité l'inclusion de moins de variables que les fonctions crâniennes. De façon similaire, d'autres études ont démontré que lorsqu'on analyse le dimorphisme sexuel du crâne et de la mandibule, l'ensemble des mesures mandibulaires sont discriminantes, contrairement aux mesures crâniennes, et qu'il est parfois

nécessaire d'inclure un plus grand nombre de variables crâniennes pour obtenir une fonction discriminante fiable (Dayal et al., 2008; Steyn & Işcan, 1998).

Enfin, nos équations d'estimation sexuelle ont montré un biais sexuel négatif marqué pour les modèles mandibulaires (-5,4 à -16,1), ce qui reflète une féminisation du modèle mandibulaire. D'autres auteurs ont décrit une tendance similaire : Kharoshah et al. (2010), Dong et al. (2015) et Mahakkanukrauh et al. (2015) ont rapporté que les mesures faites sur les mandibules d'individus féminins étaient plus correctement classifiées que celles des hommes.

Dimorphisme sexuel de conformation

Dans la 2^e partie de l'étude nous avons analysé les différences de conformation du squelette crâno-facial des hommes et des femmes à l'aide de la morphométrie géométrique. Tandis que les méthodes traditionnelles appréhendent un seul aspect de la variation crânienne et mandibulaire, à savoir la taille, la morphométrie géométrique permet d'étudier de multiples caractéristiques non métriques, telles que la structure et la forme, qui ne sont pas aisément enregistrées par des mesures linéaires. Les différences observées entre les sexes dépendent de la taille des individus - de leur robustesse ou gracilité - mais également de la conformation osseuse. La morphométrie géométrique permet d'éliminer le critère taille et réduit le biais observationnel et les erreurs qui peuvent en découler, offrant ainsi une plus grande précision pour la diagnose sexuelle (Bookstein, 1991; Franklin et al., 2007). De plus, les méthodes morphométriques basées sur des coordonnées obtenues via une analyse Procruste généralisée facilitent l'application de méthodes statistiques multivariées permettant la quantification de similitudes de forme et la visualisation de différences morphologiques (Noble et al., 2019). Enfin, la suppression de la taille lors des analyses rend l'ACP plus sensible aux différences de conformation les plus subtile (Bigoni et al., 2010; Green & Curnoe, 2009).

Les résultats de notre analyse par morphométrie géométrique indiquent des différences significatives entre les sexes ($p=0,001$ pour le crâne ; $p=0,045$ pour la mandibule). Le taux de précision de l'estimation sexuelle était plus élevé par rapport à l'analyse métrique : 97,5% pour le crâne et 84,2% pour la mandibule. Ces observations sont conformes aux précédentes études publiées et viennent appuyer le fait que les méthodes d'analyse par morphométrie géométrique permettent une meilleure appréciation des différences morphologiques crâniennes et mandibulaires que les méthodes linéaires. La précision de la diagnose sexuelle du crâne et de la face par GMM oscille entre 91 et 100% pour des populations d'Europe centrale (Bejdová et al., 2018; Bigoni et al., 2010). Pour une population nord-

américaine composée d'individus noirs et blancs, le taux de classement est de 89,65% et 86,65% respectivement (Kimmerle et al., 2008). Green et Curnoe (2009) ont décrit des résultats similaires au sein d'une population sud asiatique. Comme pour Kimmerle et al. (2008), le meilleur taux de prédiction (86,8%) était atteint lorsque l'analyse incluait la taille centroïde. Pour ce qui concerne la mandibule, la littérature rapporte une fiabilité d'estimation de 82,5 % pour une population rhénoise (Schmittbuhl et al., 2002) et de 96,7 à 100% après validation croisée pour une population indigène sud-africaine (Franklin et al., 2007).

Effet de l'âge sur le dimorphisme sexuel de taille et de conformation

Un des objectifs de notre étude était d'analyser un possible effet de l'âge sur le dimorphisme sexuel du crâne et de la mandibule. Nous savons qu'un phénomène de résorption osseuse, causé par une diminution des niveaux hormonaux, survient avec le vieillissement (Walsh, 2018). Guyomarc'h et al. (2014) ont démontré à l'aide d'analyses discriminantes que l'âge a un impact significatif sur la morphologie osseuse des individus avant et après 40 ans. Par conséquent, nous avons choisi d'établir un seuil (*cut-off*) à 40 ans pour notre étude.

Pour l'ensemble de notre échantillon, nous avons constaté que le modèle généré par la sélection pas à pas descendante permettant de classer les individus avec le plus de précision n'incorporait pas les distances mandibulaires. Il semblerait donc que la mandibule n'apporte pas d'éléments supplémentaires à la diagnose sexuelle lorsque l'ensemble des mesures crâniennes peut être utilisé. En revanche, la précision de nos résultats pour le modèle mandibulaire augmente pour les individus âgés de plus de 40 ans, passant de 68% (avant 40 ans) à 81,4% (après 40 ans). Ceci ne se vérifie pas pour le modèle crânien, pour lequel l'exactitude de prédiction ne varie pas avec l'âge. Une hypothèse pouvant expliquer ce constat est que la mandibule subit des modifications de conformation avec l'âge (Toledo Avelar et al., 2017). Cependant, il est également possible qu'une diminution des niveaux hormonaux (Walsh, 2018), en particulier des niveaux d'œstrogène, entraîne une plus forte résorption osseuse au niveau du squelette facial des femmes que de hommes. Ceci accentuerait le dimorphisme mandibulaire entre les deux sexes et rectifierait le biais constaté.

L'analyse par morphométrie géométrique a montré une augmentation de la précision de la diagnose sexuelle à partir du crâne pour les individus de plus de 40 ans. Celle-ci passe de 97,5 à 100%. Néanmoins, pour les groupes d'individus âgés de plus ou moins de 40 ans, les résultats ont révélé une absence de significativité de la conformation mandibulaire. Le crâne reste donc, comme pour l'analyse

métrique, le modèle le plus fiable pour discriminer les individus féminins et masculins, avec une précision de 97,5%.

2. Implications pour la diagnose sexuelle de l'extrémité céphalique

Nos résultats ainsi que l'analyse de la littérature montrent que le dimorphisme sexuel de l'extrémité céphalique est lié à des différences de taille et de conformation entre les sexes. Les méthodes métriques traditionnelles paraissent donc insuffisantes pour une estimation sexuelle précise, en particulier lorsque les différences de taille sont peu marquées entre individus. La morphométrie géométrique, en revanche, permet une meilleure discrimination entre individus masculins et féminins à partir de la conformation crânienne et mandibulaire, quel que soit l'âge du sujet.

Au sein d'une population contemporaine française, le crâne présente un dimorphisme sexuel de taille et de conformation plus marqué que la mandibule et donc une plus grande fiabilité pour l'estimation du sexe. Ainsi, l'absence de mandibule n'impacte pas négativement la diagnose sexuelle de l'extrémité céphalique.

Néanmoins, lorsque seule la mandibule est retrouvée ou que le crâne est endommagé et ne peut être exploité, la mandibule peut être employée pour le processus d'identification. L'analyse de sa conformation offre la meilleure fiabilité pour l'estimation du sexe. Si l'on opte pour une analyse métrique traditionnelle, celle-ci devrait inclure les distances bigoniale et bicondylienne, les hauteurs ramique et symphysaire ainsi que la longueur mandibulaire. Cependant, bien que la mandibule présente un ratio précision / nombre de landmarks intéressant pour la construction de fonctions discriminantes, il convient de noter que l'analyse métrique a tendance à surestimer les individus féminins.

D'autre part, notre analyse semble montrer qu'il existe une évolution du dimorphisme sexuel crânien et mandibulaire après 40 ans : la précision de la diagnose sexuelle à partir du crâne et de la mandibule semble augmenter avec l'avancée en âge. Un échantillon plus homogène et conséquent est nécessaire pour confirmer cette tendance, mais il est légitime de supposer que les changements morphologiques causés par le vieillissement et la perte dentaire ont un impact sur le dimorphisme sexuel mandibulaire.

Différentes méthodes ont été décrites pour l'estimation sexuelle mandibulaire en période de croissance (Coqueugniot et al., 2002; Franklin, Oxnard, et al., 2007) et à l'âge adulte (Tunis et al., 2017).

Il serait donc intéressant de développer des méthodes et équations de prédiction du sexe pour la population âgée afin de pouvoir disposer de standards adaptés à chaque tranche d'âge : enfance, puberté, âge adulte et âge avancé.

Enfin, une précaution particulière doit être apportée à l'interprétation d'études proposant des équations d'estimation sexuelle pour l'adulte lorsqu'elles basées sur des cohortes comprenant des enfants ou adolescents (Ishwarkumar et al., 2017; Kharoshah et al., 2010; Lopez-Capp et al., 2018). La croissance mandibulaire pouvant se poursuivre jusqu'à 19-22 ans (Buschang et al., 1982; Kelly et al., 2017), l'inclusion d'individus plus jeunes va biaiser l'analyse métrique.

Limites de l'étude

Parmi les limites de la présente étude, nous pouvons citer le faible nombre d'individus de moins de 40 ans ainsi que le fait que l'origine ethnique des individus étudiés n'est pas connue précisément.

Nous avons également remarqué, lors de l'analyse statistique, qu'un certain nombre de variables ne suivaient pas une loi normale, comme il serait attendu pour des variables biologiques de distance. Ceci est probablement lié à la taille relativement faible de l'échantillon. Pour cette raison, nous avons utilisé des tests statistiques adaptés à ces variables, à savoir le test de Mann-Whitney et le test d'Aspin Welch. Bien que le nombre d'individus inclus dans cette étude soit similaire à ceux retrouvés dans de précédentes études (Franklin et al., 2007; Rosas & Bastir, 2002; Schmittbuhl et al., 2001) et ait permis la comparaison du dimorphisme sexuel du crâne et de la mandibule, la taille de notre échantillon est trop faible pour pouvoir établir des standards populationnels pour la population française. Pour ce faire, les méthodes décrites devraient être appliquées à un plus grand nombre d'examens tomodensitométriques. Ceci pourrait faire l'objet d'une future étude.

DEUXIÈME PARTIE - ÉVOLUTION DE LA MORPHOLOGIE MANDIBULAIRE AVEC LE VIEILLISSEMENT ET LA PERTE DENTAIRE



Costa Mendes L, Delrieu J, Gillet C, Telmon N, Maret D, Savall F. Sexual dimorphism of the mandibular conformational changes in aging human adults: A multislice computed tomographic study by geometric morphometrics. *PLoS One*. 2021 Jun 22;16(6):e0253564. doi: 10.1371/journal.pone.0253564.

I) CONTEXTE

Nous l'avons vu lors du chapitre précédent : l'extrémité céphalique est un élément précieux pour l'estimation du sexe chez l'adulte. Le crâne, la face et la mandibule sont des structures hautement dimorphiques utilisées au cours d'études anthropologiques, archéologiques et médico-légales pour l'estimation du sexe, avec de bons taux de classification (Bigoni et al., 2010; Franklin, O'Higgins, et al., 2007).

Nous savons actuellement que certaines zones de l'extrémité céphalique subissent un phénomène de résorption avec le vieillissement et que, parmi ces zones, certaines sont plus sujettes à ces changements morphologiques (Doual et al., 1997; Richard et al., 2009). Par ailleurs, l'âge affecte différemment les individus masculins et féminins (Nikita, 2014).

Le processus de vieillissement a un impact sur la forme de l'ensemble du crâne et du squelette facial (Nikita, 2014) mais ces changements sont particulièrement visibles au niveau de l'étage moyen et inférieur de la face. Le maxillaire, et notamment la région pyriforme, sont soumis à des phénomènes de remodelage et résorption osseuse marqués avec l'avancée en âge. Ceci est également observé au niveau des angles supéro-médial et inféro-latéral du cadre orbitaire, aboutissant à une rétrusion de l'ensemble de l'étage moyen de la face (Kahn & Shaw, 2008; Matros et al., 2009; Mendelson et al.,

2007; Pessa et al., 1998, 1999). Des modifications de conformation avec l'âge peuvent également être observées au niveau de la mandibule. Cependant, il n'y a pas de consensus quant à la tendance de ces variations de forme avec le vieillissement.

L'étude d'Enlow et al. en 1976 est à l'origine du postulat que la mandibule s'accroît de façon continue avec l'âge (Enlow et al., 1976). Cette théorie a été par la suite corroborée par des études affirmant que la croissance de l'étage moyen de la face et de la mandibule se poursuit jusqu'à la fin de l'âge adulte, bien que celle-ci se fasse à des rythmes différents (Bartlett et al., 1992; Matros et al., 2009). Plusieurs auteurs ont en effet rapporté que les hauteur, largeur et longueur mandibulaires avaient tendance à augmenter chez les individus plus âgés (Bartlett et al., 1992; Parr et al., 2017; Pecora et al., 2008; Pessa et al., 2008). Néanmoins, ces études étaient soit composées d'échantillons de petite taille (Bartlett et al., 1992; Enlow et al., 1976; Pessa et al., 2008), soit leur plus jeune groupe comprenait des individus n'ayant pas atteint leur pleine maturité squelettique (Parr et al., 2017; Pecora et al., 2008; Pessa et al., 2008). La comparaison d'adolescents et de jeunes adultes n'ayant pas terminé leur croissance mandibulaire à des individus âgés est source de biais puisque le différentiel de taille entre les deux groupes est lié essentiellement à la fin de la croissance mandibulaire chez les individus jeunes.

Shaw et al., en utilisant des mesures métriques chez des individus caucasiens matures, ont observé une diminution de la hauteur et longueur du corps de la mandibule, ainsi que de la hauteur ramique avec l'âge (Shaw et al., 2010). Cette tendance à une atrophie mandibulaire due au vieillissement a été confirmée par Toledo Avelar et al. (2017). Néanmoins, il semblerait que certaines zones soient plus susceptibles de présenter des remaniements osseux induits par la sénescence : il s'agit de la région symphysaire, la crête alvéolaire, le ramus, y compris le condyle et le processus coronoïde, et la région goniaque (Cawood & Howell, 1988; Doual et al., 1997; Enlow et al., 1976; Pecora et al., 2008; Shaw et al., 2010; Toledo Avelar et al., 2017).

Différents facteurs peuvent contribuer au remodelage osseux mandibulaire observé avec le vieillissement : des facteurs généraux, notamment d'ordre hormonal (Walsh, 2018), et des facteurs locaux d'ordre fonctionnel. Parmi ces facteurs locaux, plusieurs auteurs s'accordent sur l'effet incontestable de l'édentement. En effet, la perte dentaire peut affecter la taille et la morphologie mandibulaire de façon directe et indirecte. L'os alvéolaire, de par son rôle de support de l'organe dentaire, est intimement lié à la présence des dents. Toute perte dentaire sera alors responsable d'une résorption de l'os alvéolaire qui pourra, à terme, atteindre l'os basal (Huunonen et al., 2010; Mağat & Özcan, 2018; Merrot et al., 2005; Tozoğlu & Çakur, 2014). D'autre part, tout édentement, selon son site et étendue, peut mener à une perte de contacts occlusaux et à une altération des fonctions occlusales (Hatch et al., 2001; Orthlieb et al., 2006). Ce déséquilibre de la composante dentaire de

l'appareil manducateur peut, à son tour, perturber l'activité des muscles masticateurs dont les insertions sont situées sur la mandibule (Huumonen et al., 2010; J. p. Newton et al., 1993; Tunis et al., 2017).

L'impact de l'âge sur la précision de l'estimation du sexe à partir du squelette crânio-facial a été observé par certains auteurs à l'aide de méthodes qualitatives (descriptives) et quantitatives (métriques et morphogéométriques). Il semblerait qu'une augmentation de la précision de classification du sexe à partir du crâne et de la mandibule peut être observée avec le vieillissement, et que ces changements commencent à être décelables entre 40 et 50 ans (Gapert et al., 2013; Gillet et al., 2020; Nikita, 2014; Suazo & Matamala, 2012). Bien que le vieillissement de certains traits du squelette et des tissus mous faciaux ait été étudié, en particulier dans le domaine de la chirurgie plastique et de reconstruction (Cotofana et al., 2018; Robertson et al., 2017), l'impact des changements dus au vieillissement et à la perte dentaire sur le dimorphisme de conformation mandibulaire reste peu exploré. De plus, les méthodes actuelles d'estimation sexuelle se basent principalement sur des sujets jeunes, présentant des mandibules dentées (Gamba et al., 2016; Ishwarkumar et al., 2017). Or nous savons que le taux d'édentement augmente avec l'âge et que celui-ci peut influencer la morphologie mandibulaire.

Divers auteurs ont rapporté que les traits mandibulaires les plus dimorphiques étaient la région goniaque, suivie de la position condylienne, la forme du processus coronoïde et l'orientation de la crête alvéolaire dans la région symphysaire (Bejdová et al., 2013; Dong et al., 2015; Franklin, O'Higgins, et al., 2007). Puisque la sénescence a un effet sur ces zones nous pouvons supposer qu'elle pourrait influer sur le dimorphisme sexuel de la mandibule.

La connaissance des changements de conformation liés à l'âge dans le cadre du dimorphisme sexuel est particulièrement importante afin de pouvoir prédire avec justesse le sexe d'un individu, et peut être particulièrement utile dans l'amélioration des procédés de reconstruction faciale et de vieillissement pour les personnes disparues depuis longtemps (Albert et al., 2007).

Les mesures bidimensionnelles utilisées dans les méthodes métriques traditionnelles ne peuvent quantifier les changements tridimensionnels complexes des os au cours du vieillissement. De plus, elles peuvent difficilement différencier les variables de forme dépendant directement de la taille (allométrie) de celles dépendant du sexe (Rosas & Bastir, 2002).

La morphométrie géométrique 3D est, en revanche, une méthode fiable et adaptée pour l'étude de différences de conformation entre individus, permettant de faire la distinction entre la variabilité de taille et de conformation, ainsi que l'analyse des changements de conformation sans biais subjectif (Bigoni et al., 2010).

L'objectif principal de notre étude était de déterminer si le vieillissement et la perte dentaire induisent des changements de la morphologie mandibulaire. L'objectif secondaire était d'évaluer, suite à l'analyse de ces différences morphologiques, si le dimorphisme sexuel de conformation mandibulaire demeure significatif avec l'avancée en âge et l'édentement. Nous avons émis l'hypothèse que les hommes et les femmes présentent des changements de taille et de conformation mandibulaire différents avec le vieillissement.

Les variations de conformation mandibulaire ont été étudiées par morphométrie géométrique, tandis que des analyses métriques et volumiques ont permis d'apprécier l'impact du vieillissement et de la perte dentaire (édentement et perte de calage) sur la taille de la mandibule.

II) MATÉRIEL

1. Composition de l'échantillon

Notre échantillon provient de la banque de données numériques d'examens tomodensitométriques des Hôpitaux de Toulouse (PACS, McKesson Medical Imaging Group, Richmond, BC, Canada). Il est composé d'examens tomodensitométriques crâno-faciaux réalisés au sein du CHU de Toulouse entre 2014 et 2019. Le sexe, l'âge et le motif d'examen étaient connus pour tous les individus. Les examens avaient été prescrits dans un contexte de maladie vasculaire. Les patients présentant des antécédents connus de traumatisme crâno-facial ou de maladie osseuse ont été exclus de l'étude. Compte tenu du caractère rétrospectif du recueil des examens, l'appartenance géographique exacte des patients n'est pas connue. Au total, 160 scanners ont été inclus, correspondant à 80 femmes et 80 hommes, âgés de 40 à 79 ans. Chaque groupe d'âge présentait une distribution homogène et séquentielle. L'âge moyen des individus féminins et masculins était de 59,5 ans, avec une déviation standard de 11,6 ans (**Tableau 10**).

D'après la loi française, les examens médicaux peuvent être utilisés de façon rétrospective sans le consentement du patient lorsque ces examens ont été réalisés à des fins cliniques et enregistrés de façon anonyme (article 40.1, loi 94-548 du 1^{er} juillet 1994).

Tableau 10 Composition de l'échantillon.

Âge (années)	Taille de l'échantillon	
	Hommes	Femmes
40 - 44	10	10
45 - 49	10	10
50 - 54	10	10
55- 59	10	10
60 - 64	10	10
65 - 69	10	10
70 - 74	10	10
75 - 79	10	10

2. Caractéristiques des examens

Les examens ont été réalisés avec un Scanner SOMATOM Sensation 16 (Siemens, Erlangen, Germany), utilisé à des fins cliniques dans le service de radiologie du CHU Toulouse Rangueil.

La collimation était de 16 x 1,5 mm, la matrice de l'image était de 512 x 512 pixels, les coupes axiales avaient une épaisseur de 0,6 mm et les voxels avaient une taille de 15 μm . Les acquisitions étaient reconstruites avec un filtre « tissus durs » (*bone filter*) pour l'analyse osseuse.

III) MÉTHODES

1. Recueil des données

1.1 Archivage des examens tomodensitométriques

Les scanners, recueillis à partir de la banque de données numériques d'examens tomodensitométriques des Hôpitaux de Toulouse (PACS, McKesson Medical Imaging Group, Richmond, BC, Canada), ont été sauvegardés en format DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) et stockés sur un disque dur externe. Un post-traitement des images tomodensitométriques sous la forme de l'application d'un filtre osseux a été réalisé à l'aide du logiciel Horos™ (Horos Medical Imaging software v. 3.3 64-bit) afin d'améliorer la résolution des examens.

Toutes les données et images ont été enregistrées et traitées de façon anonyme. Les seuls paramètres recueillis étaient le sexe et l'âge des individus au moment de l'acquisition des examens.

1.2 Sélection des landmarks

En se basant sur des techniques anthropométriques standard et sur la littérature, 14 landmarks osseux ont été sélectionnés sur le corps et les branches montantes de la mandibule. Seuls des landmarks de type I et II ont été choisis afin de garantir un maximum de précision et reproductibilité dans leur placement. La sélection des landmarks reposait sur les critères suivants (Bejdová et al., 2013; Franklin et al., 2008; Nicholson & Harvati, 2006) :

- leur localisation anatomique est décrite dans la littérature comme pertinente pour l'analyse du dimorphisme sexuel de la mandibule, ce qui permet d'établir des comparaisons avec des résultats publiés précédemment
- leur positionnement est facile et reproductible
- ils permettent de représenter la forme globale de la région symphysaire, du ramus et du rebord inférieur mandibulaire.

Les landmarks utilisés dans cette étude sont décrits dans le **Tableau 11**.

Tableau 11 Définition des landmarks mandibulaires.

Landmark	Dénomination	Description anatomique	Type de Bookstein
Cs	Condylion superior	Point le plus supérieur du condyle mandibulaire	II
Mn	Échancrure mandibulaire	Point le plus inférieur de l'échancrure sigmoïde	II
Co	Coronion	Point le plus supérieur du processus coronoïde	II
Go	Gonion	Point le plus externe de l'angle mandibulaire, à l'intersection entre les branches horizontales et montantes	II
Id	Infradentale	Point le plus antérieur du procès alvéolaire mandibulaire, situé entre les deux incisives centrales mandibulaires	II
Mns	Symphyse mandibulaire	Point le plus postérieur de la concavité de la symphyse mandibulaire (entre l'infradentale et le pogonion)	II
Pg	Pogonion	Point médian le plus antérieur de la symphyse mandibulaire	II
Gn	Gnathion	Point médian le plus inférieur de la symphyse mandibulaire	II
MI	Mentale	Point le plus inférieur du rebord du foramen mentonnier	I

1.3 Positionnement des landmarks

Les landmarks ont été positionnés sur la mandibule de 160 individus de manière manuelle et systématisée grâce au logiciel Horos DICOM Viewer™ (v.3.3 64-bit).

Nous avons suivi le protocole suivant :

- pour chaque landmark, le choix du plan de référence pour le positionnement de celui-ci a été défini
- l'outil « point » a permis de positionner chaque landmark sur les coupes scanner ou reconstructions 2D, à savoir les coupes axiales, coronales ou sagittales à l'aide du mode de reconstruction multiplanaire (MPR)
- l'exactitude de leur placement était ensuite validée sur une reconstruction volumique à l'aide du mode de reconstruction 3D (**Figure 18**).

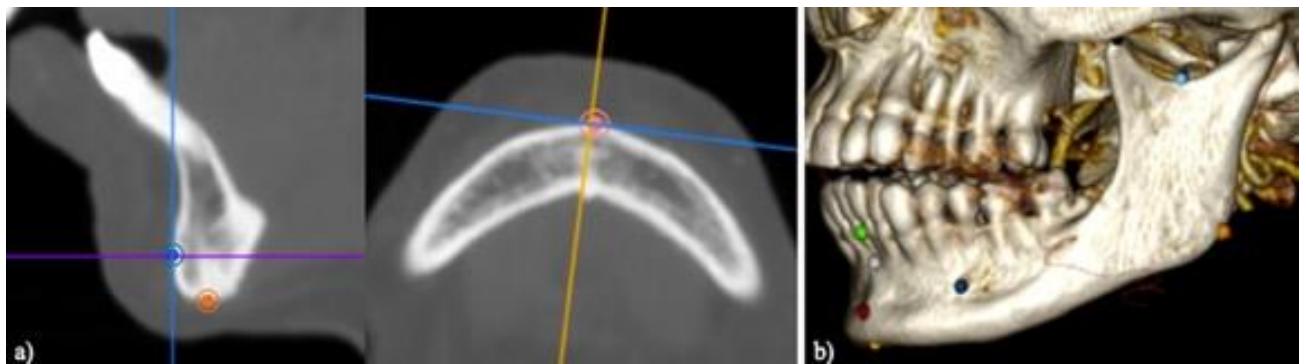


Figure 18 Placement des landmarks mandibulaires sur le logiciel Horos DICOM Viewer. (a) Reconstruction multiplanaire montrant le placement du point Pogonion (Pg). (b) Reconstruction volumique 3D montrant le positionnement des landmarks sous la forme de points colorés.

1.4 Enregistrement des données

Les coordonnées tridimensionnelles (x, y, z) de chaque landmark ont été enregistrées et exportées depuis Horos et stockées au sein d'une base de données.

1.5 Recueil du volume mandibulaire

En complément des analyses métriques et morpho géométriques à partir des 14 landmarks mandibulaires, les mandibules de chaque individu ont été segmentées à l'aide du logiciel Avizo Standard® version 8.1.1 afin d'en extraire le volume. Une méthode de segmentation automatique selon la technique *watershed* a été employée (Galibourg et al., 2018). Dans cette méthode, l'opérateur détermine sur 3 à 4 coupes axiales la zone d'intérêt (dans ce cas, la mandibule) et les structures environnantes, que l'on souhaite exclure de la segmentation. L'outil *watershed* utilise ensuite les différences de niveaux de gris pour isoler la structure d'intérêt. Lorsque deux structures contiguës présentaient la même radio-opacité, une sur ou sous-segmentation pouvait se produire. Dans ces cas, un raffinement manuel de la segmentation était réalisé coupe par coupe.

Afin d'éviter un effet parasite des dents mandibulaires restantes sur l'évaluation du volume mandibulaire, celles-ci ont été extraites à l'aide du logiciel Meshmixer™ (version 3.5.474) (**Figure 19**). La section des dents a été effectuée à la jonction entre racine et os alvéolaire.

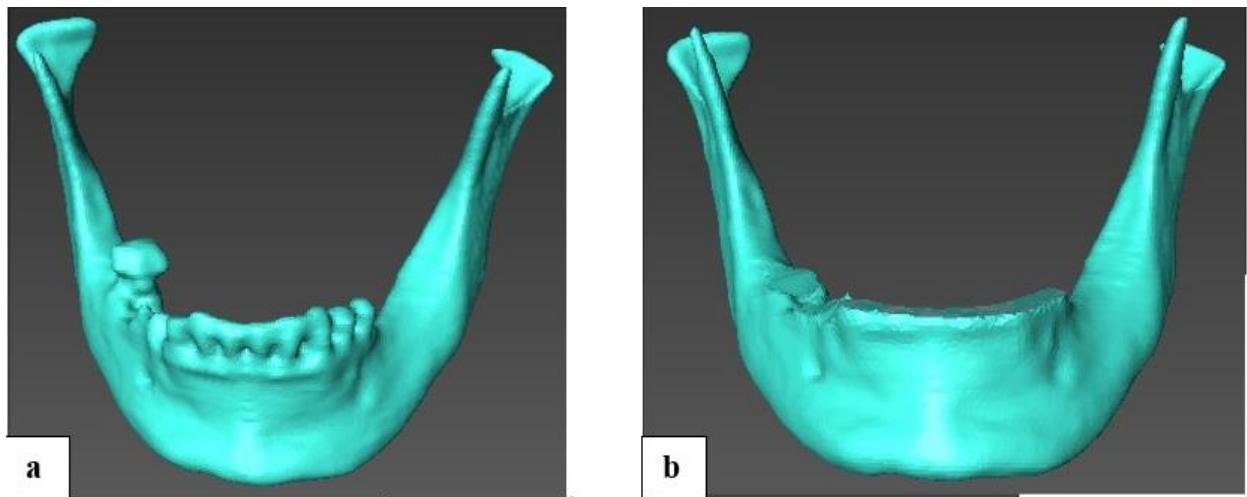


Figure 19 Reconstruction volumique de la segmentation mandibulaire. (a) Mandibule segmentée dans son intégralité ; (b) Mandibule segmentée suite à la suppression des dents.

2. Méthodes d'analyse et statistiques

Les calculs et analyses statistiques ont été effectués à l'aide du logiciel R© (R 3.0.2 software version 3.6.1). Nous avons utilisé les packages *shapes* (v1.2.5 ; Dryden, 2019), *geomorph* (v3.2.1 ; Adams, Collyer & Kaliontzopoulou, 2020) et *RPPP* (v0.5.2 ; Collyer & Adams, 2020), ainsi que les fonctions *mshape*, *procGPA*, *procD.lm*, *procdist* et *CVA*.

2.1 Les tests de reproductibilité

Reproductibilité du positionnement des landmarks

Les méthodes d'analyse par morphométrie géométrique reposent sur le placement précis de landmarks sur des spécimens biologiques. Un landmark présentant une forte homologie est un point pouvant être identifié de façon précise et reproductible et pouvant fournir une information sur des modifications de forme survenant sur l'un des trois axes.

Afin de valider la précision et reproductibilité de la méthode de placement des landmarks utilisée dans cette étude, nous avons procédé à l'évaluation de la concordance intra et inter-observateur (Cramon-Taubadel et al., 2007).

Les coordonnées des landmarks ont été recueillies par un observateur. Afin de quantifier la concordance intra et inter observateur au cours du placement des landmarks, le protocole de positionnement a été répété deux fois :

- un mois après le premier recueil de données, le premier observateur (LCM) a entrepris une deuxième analyse de 40 individus (20 hommes et 20 femmes) sélectionnés de façon aléatoire au sein de l'échantillon ($n = 160$), afin de mesurer la variabilité intra-observateur
- un deuxième observateur (JD) a par la suite effectué une analyse de ces mêmes 40 individus afin de tester la variabilité inter-observateur.

La fiabilité du positionnement des landmarks a été testée grâce à la théorie de généralisabilité (GT). Dans cette méthode, la précision des interprétations est traduite par le coefficient de généralisabilité ou coefficient G (*landmark pairs-by-rater-by-subject* : $I \times r \times s$). Une valeur du coefficient G proche de 1 signifie une haute reproductibilité (Ercan et al., 2008).

Reproductibilité de la segmentation mandibulaire

15 jours après la première segmentation, le même observateur a effectué une segmentation de 30 examens randomisés de l'échantillon. Afin d'évaluer l'erreur inter-observateur, un deuxième observateur a effectué une analyse des 30 mêmes spécimens. La concordance des observateurs a été évaluée par le coefficient de corrélation intra-classe (ICC).

2.2 Analyse de la taille mandibulaire

Analyse métrique

Afin d'évaluer l'impact du vieillissement et de l'édentement sur les dimensions mandibulaires, différents angles et distances ont été calculés à partir des coordonnées 3D des 14 landmarks mandibulaires. Ceux-ci sont détaillés dans le **Tableau 12**.

Tableau 12 Distances et angles utilisés pour l'analyse métrique.

Mesures	Dénomination	Définition
Cs-Go-Gn	Angle goniaque (AG)	Angle mesuré entre les droites Cs-Go et Go-Gn
Cs-Mn-Co	Angle de l'incisure mandibulaire (AI)	Angle mesuré entre les droites Cs-Mn et Mn-Co
Id-Gn	Hauteur symphysaire (HS)	Distance entre les points Gnathion et Infra dentale
Csd-Csg	Largeur bicondylienne (BC)	Distance entre les deux points Condylion superior
Gog-God	Largeur bigoniale (BG)	Distance entre les deux points Gonion
Cs-Go	Hauteur ramique (HR)	Distance entre les points Condylion superior et Gonion

Les différences entre les valeurs métriques mesurées pour les individus masculins et féminins ont été analysées pour chaque groupe par des tests appariés et par une analyse linéaire discriminante.

Le dimorphisme sexuel de taille a été évalué en comparant les valeurs moyennes des individus masculins et féminins pour chaque mesure selon la formule suivante :

$$\% \text{ dimorphisme} = [(|\text{moyenne hommes} - \text{moyenne femme}|)/\text{moyenne femme}] \times 100$$

(Tunis et al., 2017)

La significativité des résultats était évaluée à l'aide du test de Student. Une valeur de $p < 0.05$ était considérée comme statistiquement significative.

Analyse du volume mandibulaire

Le volume en millimètre cube (mm^3) des mandibules segmentées après suppression des dents a été obtenu à l'aide d'Avizo Standard® version 8.1.1. Une régression linéaire a été menée pour déterminer l'effet de l'âge sur le volume mandibulaire. Puis une Analyse de Variance (ANOVA) à deux facteurs a été menée pour déterminer les effets du sexe et de la perte de calage dentaire sur le volume mandibulaire. L'analyse des résidus a été effectuée pour vérifier les hypothèses de l'ANOVA à deux facteurs. La normalité a été évaluée à l'aide du test de normalité de Shapiro-Wilk et l'homogénéité des variances a été évaluée par le test de Levene. Les effets principaux ont été recherchés et les

comparaisons par paires entre les différents groupes ont été effectuées avec un ajustement de Bonferroni.

2.3 Analyse de la conformation mandibulaire

Analyse par morphométrie géométrique

Une analyse par morphométrie géométrique a été utilisée pour étudier les variations de conformation mandibulaires liées à l'âge et à la perte dentaire, ainsi que le dimorphisme sexuel mandibulaire.

La première étape a consisté à supprimer des variations non liées à la forme au sein de l'échantillon (différences de dimension, position et orientation) à l'aide d'une Analyse Procruste Généralisée (GPA). Une Analyse en Composantes Principales (ACP) a par la suite été employée pour résumer la variance des changements de conformation au sein de la population d'étude. Dans un second temps, des tests statistiques ont été effectués sur les résidus Procrustes afin d'étudier les différences de conformation entre groupes d'âge et selon le degré d'édentement. Enfin, des configurations consensuelles ont été produites à partir des formes moyennes des individus féminins et masculins et représentées graphiquement sous la forme de silhouettes filaires 2D.

2.3.1 *Changements de conformation mandibulaire liés à l'âge*

Afin d'évaluer les variations de conformation de la mandibule et estimer la période au cours de laquelle les changements liés au vieillissement commencent à être visibles nous avons mené une analyse préliminaire et testé l'âge en tant que variable indépendante au sein de plusieurs groupes d'âge. Notre échantillon étant composé d'individus présentant une répartition équilibrée entre 40 et 79 ans, nous avons établi de façon arbitraire trois seuils (ou *cut-offs*) à 55, 60 et 65 ans. Puis nous avons réalisé une analyse de variance (ANOVA) à partir des résidus Procrustes avec des tests de permutation, afin de mettre en évidence les différences morphologiques entre le groupe d'individus le plus jeune et le plus âgé pour les hommes et les femmes. La signification statistique des différences retrouvées a été testée avec le test F de Goodall réalisé sur les résidus Procrustes.

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) des coordonnées des landmarks a été menée par la suite pour l'ensemble de l'échantillon, afin de représenter les principales directions de variation de forme entre les sexes et les groupes d'âge (jeunes et vieux).

Le taux de vieillissement mandibulaire a été également calculé pour les individus féminins et masculins (Windhager et al., 2019). Vu que la taille de notre échantillon est assez restreinte, nous avons réalisé une régression linéaire de la conformation mandibulaire selon l'âge dans une fenêtre mobile de 20 individus (40 à 49 ans, 50 à 59 ans, 60 à 69 ans et 70 à 79 ans). La quantité moyenne de variation de conformation mandibulaire était estimée en unités de distance Procruste par an.

Enfin, la moyenne des coordonnées Procruste pour chaque sexe et groupe d'âge a permis d'obtenir la forme moyenne de chaque structure. Ces configurations consensuelles ont été représentées graphiquement sous la forme de silhouettes filaires 2D afin de visualiser les différences de conformation mandibulaire entre les groupes. Pour l'analyse de profil, nous avons choisi de représenter uniquement le profil gauche puisque d'après l'étude de Franklin et al. (2012) les variations de symétrie le côté droit et gauche du crâne sont négligeables par rapport aux variations inter-individuelles observées.

2.3.2 Effet de l'âge sur le dimorphisme sexuel de conformation mandibulaire

En vue de déterminer si la conformation mandibulaire différait entre les sexes et les groupes d'âge, le sexe, l'âge et la taille ont été étudiés comme variables indépendantes. Suite à une GPA commune sur tout l'échantillon, une régression entre la conformation et le sexe a été réalisée, avec l'âge comme covariable, ainsi qu'une régression entre la conformation et la taille, avec le sexe comme covariable. À partir des résultats de la GPA, une ANOVA Procruste avec des tests de permutation a été employée pour évaluer les différences de forme entre les sexes. Pour ce faire, l'échantillon a été divisé en deux groupes couvrant une période de vingt ans (40 à 59 ans et 60 à 79 ans).

L'ampleur du dimorphisme sexuel était déterminée par le calcul des distances Procrustes et des distances de Mahalanobis entre les individus féminins et masculins. Le test F de Goodall, exécuté sur les résidus Procrustes, a permis de tester la signification statistique des différences observées entre les sexes pour le groupe plus jeune et plus âgé. Pour permettre la comparaison des configurations féminines et masculines, des configurations consensuelles ont été produites et représentées par des silhouettes filaires 2D.

2.3.3 Effet de la perte dentaire sur la conformation et le dimorphisme sexuel mandibulaire

Afin d'apprécier l'impact de la perte dentaire sur la conformation mandibulaire nous avons choisi d'analyser deux paramètres de façon distincte : le **degré d'édentement mandibulaire** et le **degré de perte de calage dentaire**.

Effet de l'édentement sur la morphologie mandibulaire

L'échantillon a été divisé en trois groupes selon le degré d'édentement mandibulaire : absence d'édentement, édentement partiel et édentement complet. Une Analyse Procruste Généralisée couplée à une Analyse en Composantes Principales ont été réalisées. Les différences de conformation entre les deux sexes ont été mesurées par des tests appariés pour les trois groupes et les distances de Mahalanobis ont été utilisées pour évaluer l'ampleur du dimorphisme sexuel selon le degré d'édentement. La qualité de la discrimination des différents groupes a été évaluée à l'aide du test F de Goodall effectué sur les résidus Procrustes et une analyse linéaire discriminante (CVA) à partir des résidus Procrustes a été employée pour évaluer la performance de l'estimation sexuelle selon le degré d'édentement.

Enfin, les différences de conformation mandibulaire ont été mises schématiquement en évidence grâce à des silhouettes filaires masculines et féminines superposées.

Effet de la perte de calage dentaire sur la morphologie mandibulaire

Nos examens tridimensionnels comprenant l'os maxillaire, nous avons déterminé le nombre de contacts occlusaux résiduels pour chaque individu et divisé l'échantillon selon le degré de perte de calage dentaire. La perte de calage dentaire a été déterminée selon l'Indice d'Eichner (Eichner, 1955) (**Figure 20**). Ce système de classification considère les prémolaires et molaires comme support occlusal et définit trois catégories selon le contact occlusal résiduel au niveau des secteurs postérieurs :

- le groupe A possède un contact occlusal dans les 4 zones postérieures
- le groupe B présente une à trois zones de contact occlusal postérieur
- le groupe C présente une absence totale de contact occlusal postérieur

Nous avons choisi cet indice car des études antérieures l'ont utilisé pour démontrer qu'une réduction de la force occlusale maximale et de la performance masticatoire étaient corrélées à la réduction des contacts occlusaux (Nakatsuka et al., 2010; Parr et al., 2017).

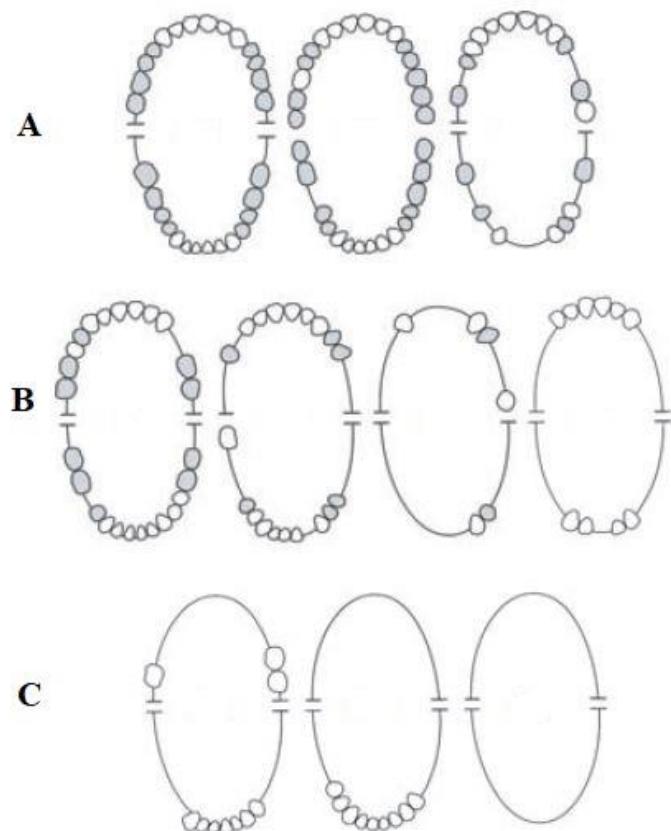


Figure 20 Représentation schématique de l'indice d'Eichner (Nakatsuka et al. 2010). *Les dents grisées correspondent aux contacts occlusaux existants dans les régions prémolaires et molaires, constituant les zones de support occlusal (ZSO). Ces contacts peuvent être obtenus par les dents naturelles présentes ou des réhabilitations prothétiques fixes. Le groupe A présente 4 ZSO. Le groupe B présente une à trois ZSO. Le groupe C ne présente aucune ZSO.*

Comme précédemment, une Analyse Procruste Généralisée et une Analyse en Composantes Principales ont été menées. Une ANOVA à deux facteurs a été employée pour déterminer si la forme mandibulaire différait entre les sexes et selon l'âge et le degré de perte de calage dentaire. Le sexe, l'âge et les trois groupes ont été étudiés comme variables indépendantes.

Afin d'explorer le dimorphisme sexuel de conformation mandibulaire, les distances de Mahalanobis et les distances Procrustes entre les sexes ont été calculées pour chaque Indice d'Eichner. La signification statistique des différences a été évaluée avec le test F de Goodall. Les différences entre

les configurations féminines et masculines liées à la perte de calage dentaire ont ensuite été observées en superposant les formes moyennes des deux sexes pour chaque groupe. Une analyse linéaire discriminante (CVA) à partir des résidus Procrustes a permis de déterminer la performance de l'estimation sexuelle selon la perte de calage dentaire. Enfin, l'effet de la perte de calage dentaire sur la morphologie mandibulaire a été observé séparément, entre chaque sexe et pour chaque sexe, en superposant les formes moyennes de chaque groupe.

IV) RÉSULTATS

1. Les tests de reproductibilité

Toutes les mesures pour les 14 landmarks présentaient une bonne reproductibilité intra et inter-observateur. Le coefficient G pour la variabilité intra et inter-observateur était proche de 1 ($G = 0.94$), témoignant d'une fiabilité élevée dans le positionnement des landmarks. La segmentation mandibulaire présentait également bonne concordance intra et inter observateur avec un $ICC = 0,99$ ($p=7,2.10^{-30}$), montrant une bonne reproductibilité de la méthode.

2. Étude de l'effet de l'âge

2.1 Effet de l'âge sur la taille mandibulaire

2.1.1 Analyse métrique

Pour chaque sexe, nous avons séparé l'échantillon en deux groupes afin de comparer l'effet de l'âge sur la taille mandibulaire pour des individus âgés de moins et plus de 60 ans.

Le vieillissement semble entraîner une diminution de la hauteur symphysaire (Id-Gn), de la hauteur du ramus (Cs-Go) et de l'angle goniaque (Cs-Go-Gn), ainsi qu'une augmentation de la largeur bigoniale (Gog-God) et une ouverture de l'incisure mandibulaire. Ces variations suivent la même direction pour les deux sexes mais sont légèrement plus marquées chez les individus féminins. Les traits les plus dimorphiques sont la hauteur symphysaire, la distance bigoniale et la hauteur ramique (**Tableau 13**).

Tableau 13 Valeur moyenne des mesures linéaires et angulaires selon les groupes d'âge. Leur variation et dimorphisme sexuel (DS) associé sont exprimés en pourcentage.

	Individus jeunes [40 - 59]				Individus vieux [60- 79]			
	p-value	H	F	% DS	p-value	H	F	% DS
HS (mm)	9,9.10 ^{-6*}	31,26	28,08	11,32	0,03*	28,09 (-10,1%)	25,79 (-11,4%)	8,92
BG (mm)	6.10 ^{-11*}	99,47	89,59	11,03	1,3.10 ^{-9*}	100,98 (+1,5%)	91,55 (+2,2%)	10,32
HR (mm)	4,6.10 ^{-6*}	61,77	56,67	8,99	1,1.10 ^{-6*}	60,31 (-2,4%)	54,90 (-3,1%)	9,85
AG (°)	0,4	116,44	117,39	-0,81	0,09	114,06 (-2,0%)	116,14 (-1,1%)	-1,79
AI (°)	0,6	97,52	98,44	-0,93	0,7	99,65 (+2,1%)	100,52 (+2,1%)	-0,87

HS = Hauteur symphysaire, BG = Largeur bigoniale, HR = Hauteur ramique, AG = Angle goniaque, AI = Angle de l'incisure mandibulaire

NB : le pourcentage entre parenthèses est calculé par rapport à la valeur des individus jeunes

2.1.2 Analyse du volume mandibulaire

La régression linéaire entre le volume mandibulaire et l'âge montre une très faible relation décroissante. Celle-ci est significative pour les individus féminins et pour l'ensemble de l'échantillon (Tableau 14).

Tableau 14 Résultat de la régression linéaire entre le volume mandibulaire et âge.

	Coefficient	R ² ajusté	p-value
Hommes	-161,83	0,02	0,09
Femmes	-205,13	0,06	0,01 *
Échantillon	-183,48	0,03	0,008 *

En plaçant un *cut-off* à 55, 60 et 65 ans, une comparaison du volume moyen mandibulaire a été réalisée entre les groupes d'âge plus jeunes et plus âgés pour chaque sexe. Les résultats révèlent une différence

de volume significative chez les hommes à partir de 55 ans ($p=0,038$) et chez les femmes à partir de 65 ans ($p=0,003$).

2.2 Effet de l'âge sur la conformation mandibulaire

Analyse préliminaire

Afin d'affiner la période à laquelle les changements de conformation mandibulaire commencent à être détectables, nous avons dans un premier temps testé l'âge en tant que variable continue dans différents groupes d'âge, couvrant des périodes de 5, 10 et 20 ans. Puis nous avons procédé à des comparaisons par paires (tests de permutation) de groupes d'âge adjacents. Le test F de Goodall était utilisé pour évaluer la qualité de la discrimination entre les groupes.

Âge en tant que variable continue

Lorsque l'âge était étudié en tant que variable continue, une différence de conformation significative était observée pour les individus masculins entre 50 et 69 ans ($p < 0.05$), à la fois lorsque l'échantillon était divisé en groupes d'âge de 10 ans (**Tableau 15**) et 20 ans (**Tableau 16**). Lorsque la population étudiée était divisée en groupes de 5 ans, une différence statistiquement significative était observée entre 60 et 64 ans ($p=0.018$).

Pour les individus féminins, en revanche, bien qu'une variation de conformation liée à l'âge semble exister entre 50 et 69 ans (**Tableau 16**), aucune différence statistiquement significative n'a pu être mise en évidence pour les groupes couvrant des périodes de 5, 10 et 20 ans.

Néanmoins, l'analyse de l'ensemble de l'échantillon féminin ($n = 80$) montre un test F de Goodall statistiquement significatif ($p<0.001$), ce qui confirme l'existence d'un effet du vieillissement sur la conformation mandibulaire féminine.

Tableau 15 Effet de l'âge sur la conformation mandibulaire des individus féminins et masculins. L'échantillon est divisé en groupes de 10 ans (n = 20).

Groupe d'âge (années)	F de Goodall	p-value
H 40-49	1.5086	0.122
H 50-59	1.8147	0.049 *
H 60-69	2.273	0.011 *
H 70-79	0.8224	0.65
F 40-49	0.7597	0.656
F 50-59	1.0001	0.447
F 60-69	1.0413	0.372
F 70-79	1.1851	0.274

Tableau 16 Effet de l'âge sur la conformation mandibulaire des individus féminins et masculins. L'échantillon est divisé en groupes de 20 ans (n = 40).

Groupe d'âge (années)	F de Goodall	p-value
H 40-59	1.3614	0.185
H 50-69	2.3879	0.005 *
H 60-79	1.1381	0.313
F 40-49	1.538	0.124
F 50-69	1.8605	0.067
F 60-79	0.8583	0.539

Comparaison par paires et par groupes d'âge

Les résultats des comparaisons par paires de groupes d'âge de 5 ans étaient statistiquement significatifs pour les hommes entre les groupes 50-54 et 55-59 ans, ainsi qu'entre les groupes 65-69 et 70-74 ans (**Tableau 17**). Cependant, ces résultats n'ont pas été confirmés pour les groupes d'âge de 10 ans (**Tableau 18**), et aucun test par paires n'était significatif pour les individus féminins dans les groupes de 5 et 10 ans.

Tableau 17 Comparaison par paires de groupes d'âge de 5 ans pour les individus masculins et féminins. L'échantillon est divisé en 8 groupes (n = 10).

Comparaison par paires Groupes d'âge	F de Goodall	p-value
M1' - M2'	1.3151	0.202
M2' - M3'	1.7027 -	0.098
M3' - M4'	2.2081	0.022 *
M4' - M5'	0.7513	0.738
M5' - M6'	1.5632	0.107
M6' - M7'	1.9816	0.039 *
M7' - M8'	0.8099	0.626
F1' - F2'	0.8742	0.53
F2' - F3'	1.1894	0.283
F3' - F4'	0.9692	0.455
F4' - F5'	0.7613	0.639
F5' - F6'	0.6752	0.746
F6' - F7'	0.6279	0.77
F7' - F8'	0.8341	0.614

Groupe 1': 40-44 ans; groupe 2': 45-49 ans; groupe 3': 50-54 ans; groupe 4': 55-59 ans; groupe 5': 60-64 ans; groupe 6': 65-69 ans; groupe 7': 70-74 ans; groupe 8': 75-79 ans.

Tableau 18 Comparaison par paires de groupes d'âge de 10 ans pour les individus masculins et féminins. L'échantillon est divisé en 4 groupes (n = 20).

Comparaison par paires Groupes d'âge	F de Goodall	p-value
M1 - M2	1.4568	0.144
M2 - M3	1.3132	0.199
M3 - M4	1.4706	0.131
F1 - F2	0.5591	0.871
F2 - F3	1.5765	0.111
F3 - F4	0.7867	0.613

Groupe 1: 40-49 ans; groupe 2: 50-59 ans; groupe 3: 60-69 ans; groupe 4: 70-79 ans.

2.2.1 Constitution des groupes d'âge

À partir des résultats précédents, nous avons choisi, pour l'analyse des changements conformatiⁿnels, de séparer les individus féminins et masculins en deux groupes, avec des *cut-off* à 55, 60 et 65 ans. Six groupes d'âge ont ainsi été constitués. Chaque seuil permettait de répartir l'échantillon en un groupe d'individus « jeunes » (inférieur à la valeur seuil) ou « âgés » (supérieur à la valeur seuil).

La répartition des individus est détaillée dans le **Tableau 19** ci-dessous.

Tableau 19 Composition des groupes d'âge selon un seuil établi à 55, 60 et 65 ans.

<i>Cut-off</i>	55 ans		60 ans		65 ans	
Nombre d'individus (pour chaque sexe)	< 55 ans	≥ 55 ans	< 60 ans	≥ 60 ans	< 65 ans	≥ 65 ans
n = 80	n = 30	n = 50	n = 40	n = 40	n = 50	n = 30

2.2.2 Analyse par morphométrie géométrique

Afin d'évaluer les variations de conformatiⁿon mandibulaires liées à l'âge, nous avons étudié séparément les individus féminins et masculins.

Les tests de permutation entre les différents groupes d'âge ont révélé la présence de changements de forme significatifs pour les hommes et les femmes avant et après 65 ans.

Au sein de l'échantillon féminin, des variations significatives étaient également observées lorsque le seuil était placé à 55 et 60 ans. Pour les hommes, la différence entre le groupe le plus jeune et le plus âgé ne devient significative qu'à partir de 65 ans. (**Tableau 20**)

Tableau 20 Changements de conformation mandibulaires liés au vieillissement pour les individus masculins et féminins.

Différences entre groupes d'âge	F de Goodall	p-value
Cut-off		
Hommes		
55 ans (40-54 vs 55-79 ans)	1.0951	0.344
60 ans (40-59 vs 60-79 ans)	1.6681	0.084
65 ans (40-64 vs 65-79 ans)	2.2903	0.016*
Femmes		
55 ans (40-54 vs 55-79 ans)	3.261	0.004*
60 ans (40-59 vs 60-79 ans)	3.8611	0.001*
65 ans (40-64 vs 65-79 ans)	3.2856	0.002*

Les individus masculins et féminins sont divisés en deux groupes d'âge selon un seuil à 55, 60 ou 65 ans. Les conformations mandibulaires sont comparées, pour chaque sexe, entre le groupe le plus jeune et le plus vieux.

Analyse en Composantes Principales

L'ACP de l'échantillon complet permet de mettre en évidence des changements de la conformation mandibulaire avec l'avancée en âge (le long du premier axe principal PC1). Les deux axes principaux (PC1 et PC2) expliquent 18,91% et 17,97% de la variance observée (Figure 21).

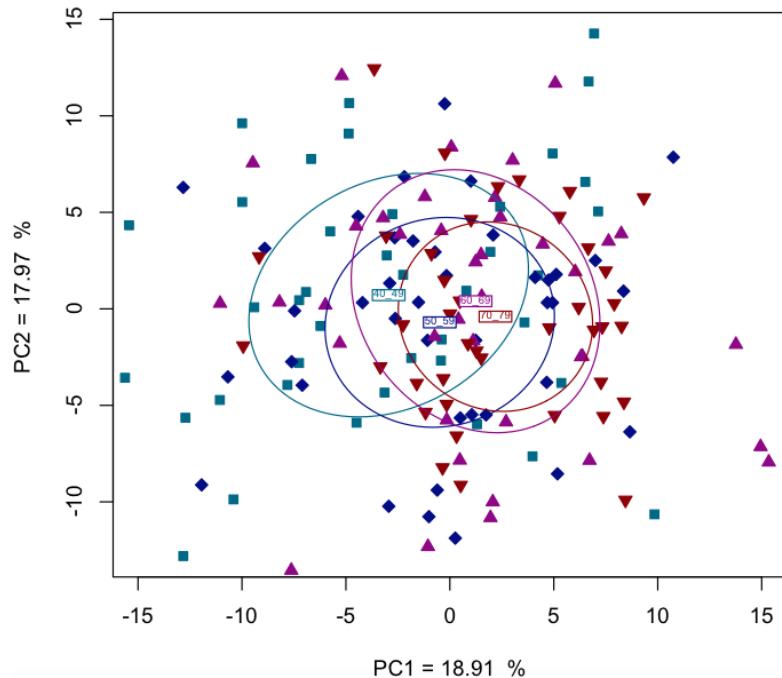


Figure 21 Analyse en Composantes Principales de l'effet de l'âge sur la morphologie mandibulaire : échantillon complet.

En nous basant sur les résultats présentés dans le **Tableau 20**, nous avons secondairement comparé les individus les plus jeunes et les plus vieux pour chaque sexe :

- les femmes âgées de 40 à 54 ans versus les femmes âgées de 55 à 79 ans
 - les hommes âgés de 40 à 64 ans versus les hommes âgés de 65 à 79 ans.

Le premier axe principal (PC1) comptabilise, pour cette analyse, 40,56% des variations de conformation liées à l'âge. Une importante variabilité individuelle de conformation mandibulaire peut donc être observée au sein de l'échantillon. Néanmoins, les différences morphologiques entre les individus féminins jeunes et vieux sont plus clairement visibles que celles des hommes d'après PC1 (**Figure 22**).

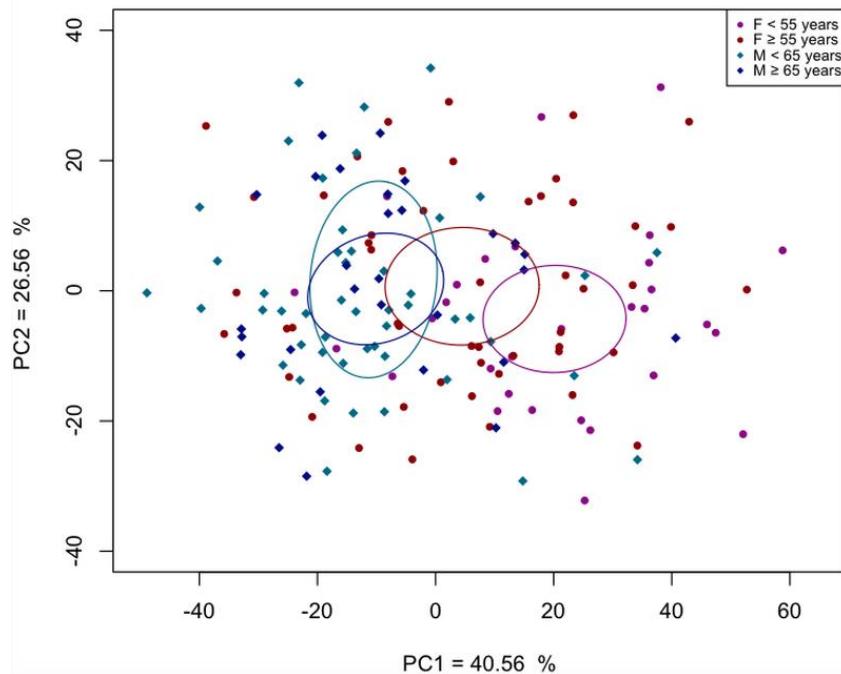


Figure 22 Analyse en Composantes Principales de l'effet de l'âge sur la conformation mandibulaire pour les individus masculins et féminins. *Chaque sexe est divisé en deux groupes d'âge : 40-64 ans vs. 65-79 ans pour les hommes, et 40-54 vs. 55-79 ans pour les femmes.*

Les résultats de cette ACP montrent que l'effet du vieillissement sur la morphologie mandibulaire est plus marqué chez les individus féminins et semblent indiquer que la forme moyenne des femmes se rapproche de celle des hommes au cours du temps.

Afin de confirmer cette hypothèse, nous avons calculé les distances Procrustes entre les quatre groupes d'âge : [hommes jeunes], [femmes jeunes], [hommes vieux] et [femmes vieilles].

Les résultats montrent une plus petite distance entre [hommes vieux - femmes vieilles] qu'entre [hommes jeunes - femmes jeunes]. Par ailleurs, l'écart entre [femmes jeunes - hommes vieux] est supérieur à celui entre [femmes vieilles - hommes jeunes] et [femmes vieilles - hommes vieux] (**Tableau 21**).

Ceci semble signifier que la conformation mandibulaire des femmes vieilles se rapproche de celle des hommes en général, et que la conformation mandibulaire féminine tend à se rapprocher de celle des hommes en vieillissant.

Tableau 21 Distances Procrustes entre sexes et groupes d'âge.

	Distances Procrustes	p-value
HJ / HV (40-64 / 65-79)	0.0219	0.024
FJ / FV (40-55 / 55-79)	0.0271	0.002
FJ / HJ (40-54 / 40-64)	0.0296	0.001
FV / HJ (55-79 / 40-64)	0.0269	0.001
FJ / HV (40-54 / 65-79)	0.0371	0.001
FV / HV (55-79 / 65-79)	0.0232	0.012

HJ : hommes jeunes HV : hommes vieux FJ : femmes jeunes FV : femmes vieilles

Taux de vieillissement mandibulaire

Le taux de vieillissement mandibulaire des hommes, calculé en valeur moyenne annuelle de changement de forme mandibulaire, est relativement constant. En revanche, une accélération du rythme de vieillissement a pu être observée à partir de 50 ans pour les femmes de notre échantillon. Cette accélération paraît culminer autour de 60 ans (**Figure 23**).

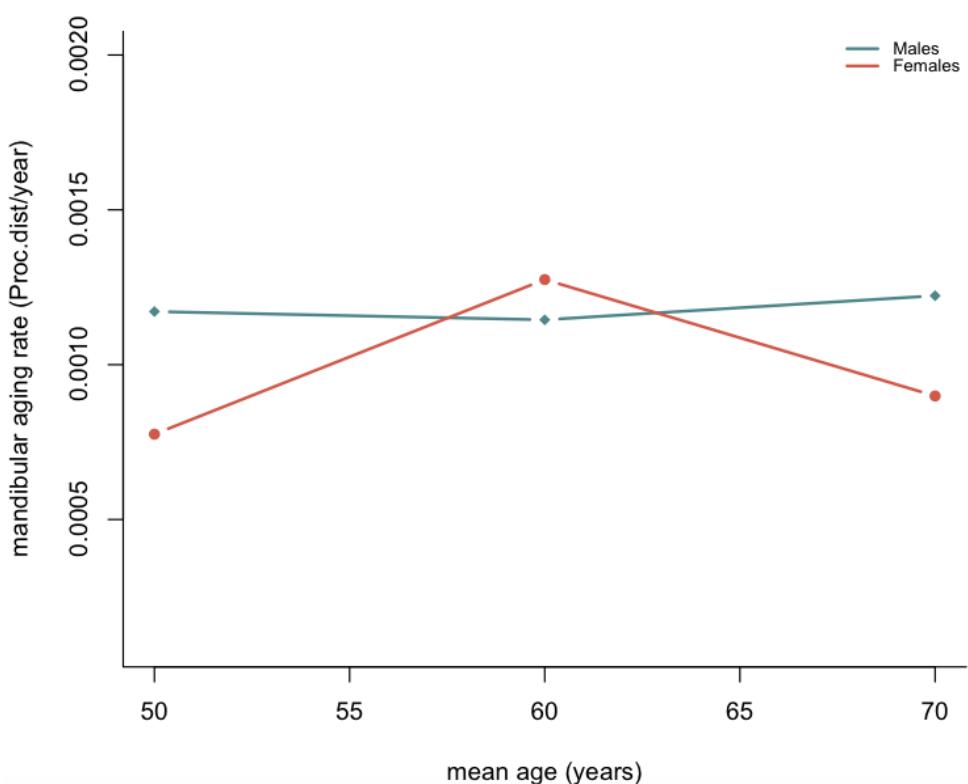


Figure 23 Taux de vieillissement mandibulaire pour les hommes et les femmes. *Une accélération des changements de conformation mandibulaires peut être observée entre 50 et 60 ans pour les femmes. La vitesse des changements est calculée en distance Procruste par année.*

Représentations graphiques des variations de conformation

Des configurations consensuelles ont été créées pour les individus féminins et masculins et représentées par des silhouettes filaires 2D. Ces dernières ont été superposées entre le groupe d'âge le plus jeune et le plus âgé. Au vu des résultats obtenus précédemment (**Tableau 20**), les configurations des individus féminins ont été comparées avant et après 55 ans. Pour les hommes, le seuil a été placé à 65 ans. Les principales différences de conformation entre les deux groupes d'âge sont visualisées par des flèches. La taille des flèches reflète l'ampleur de la différence observée et leur sens la direction des variations au niveau local.

Concernant les variations de conformation spécifiques à chaque sexe, tant les hommes que les femmes montrent des changements marqués au niveau de la région symphysaire mandibulaire (**Figures 24 et 25**).

Les hommes présentent principalement des modifications du sens vertical avec le vieillissement.

De profil, on observe une diminution marquée de l'étage alvéolaire symphysaire, qui se déplace en direction apicale et linguale tandis que le rebord basilaire se déplace en direction crâniale. Un léger mouvement antéro-inférieur du condyle est également noté. De face, on constate un déplacement latéral et crânial du gonion ainsi que l'ascension du gnathion.

Les femmes présentent des changements plus généralisés avec le vieillissement, visibles dans les sens vertical, transversal et sagittal. En vue de face, le condyle et le gonion s'extériorisent et on note une légère ascension du rebord inférieur mandibulaire. De profil, on observe un mouvement du coroné et du condyle en direction antérieure et inférieure, une avancée du bord postérieur du ramus, un déplacement du gonion vers le haut et l'avant ainsi qu'une rétrusion de la symphysis.

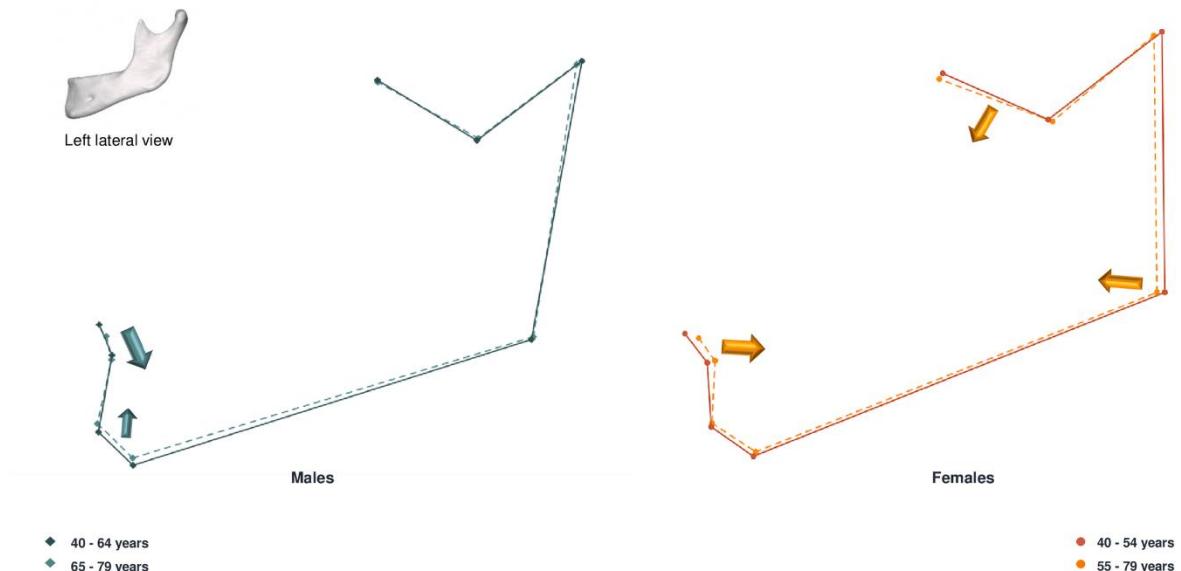


Figure 24 Vue de profil des variations morphologiques mandibulaires avec le vieillissement. À gauche : formes moyennes des hommes : 40-64 ans (trait plein) vs. 65-79 ans (pointillés). À droite : formes moyennes des femmes : 40-54 ans (trait plein) vs. 55-79 ans (pointillés). Les flèches représentent les directions principales et importance des changements conformatiⁿonnels avec l'âge.

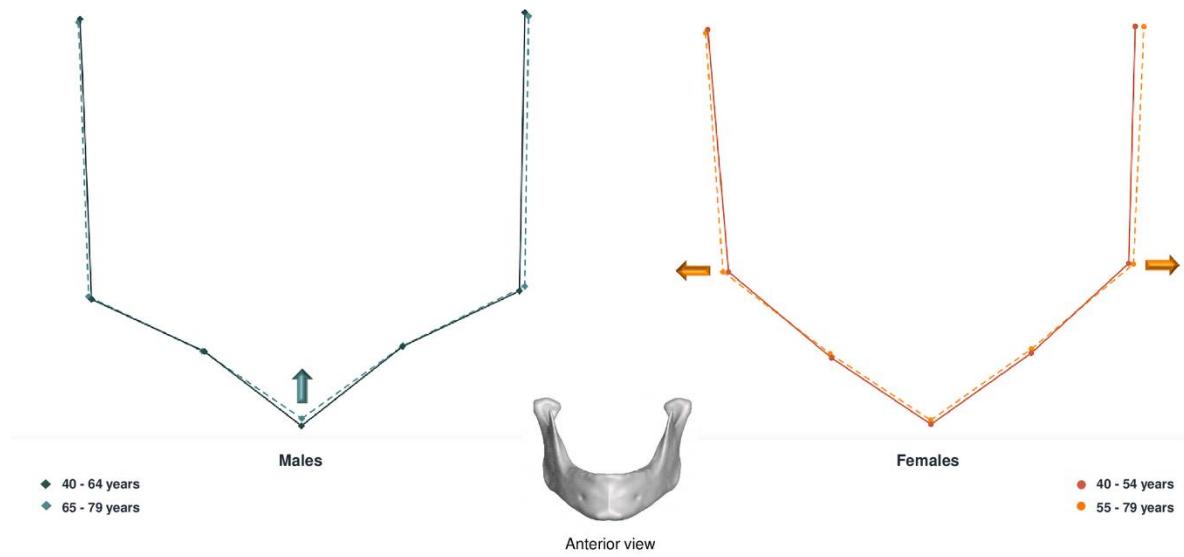


Figure 25 Vue antérieure des variations morphologiques mandibulaires avec le vieillissement. *À gauche : formes moyennes des hommes : 40-64 ans (trait plein) vs. 65-79 ans (pointillés). À droite : formes moyennes des femmes : 40-54 ans (trait plein) vs. 55-79 ans (pointillés). Les flèches représentent les directions principales et importance des changements conformati*nnels avec l'âge.

2.3 Dimorphisme sexuel de conformation

Conformation de la mandibule selon le sexe, l'âge et la taille

Tant le sexe, l'âge, et la taille, en tant que variables indépendantes, ont un effet statistiquement significatif sur la forme de la mandibule ($p < 0.001$). En revanche, l'interaction entre l'âge et sexe et entre taille et sexe ne semble pas statistiquement significative (**Tableau 22**).

Tableau 22 Effet de l'âge, du sexe et interaction entre sexe, âge et taille sur la conformation mandibulaire pour l'ensemble de l'échantillon (n = 160).

Critère étudié	Goodall's F	p-value
Sexe	5.1496	0.001
Âge	4.4970	0.001
Taille	7.4342	0.001
Sexe : Âge	1.3074	0.197
Taille : Sexe	0.7926	0.685

Les distances Procrustes, les distances de Mahalanobis et le F-test de Goodall ont révélé que le dimorphisme sexuel de conformation est statistiquement significatif pour l'ensemble de l'échantillon (p < 0.001), ainsi que pour les deux groupes d'âge testés (Tableau 23).

Tableau 23 Analyse du dimorphisme sexuel de conformation pour l'échantillon complet (n = 160) et tests de permutation entre les sexes par groupe d'âge (jeunes vs. vieux).

	Distance de Mahalanobis	Distance Procrustes	F de Goodall	p-value
F 40-59 / H 40-59	3.2974	0.0282	3.9291	0.001
F 60-79 / H 60-79	2.4278	0.0246	2.9421	0.002
Échantillon complet (F/H)	2.0781	0.0159	5.0285	0.001

Les hommes et les femmes de l'échantillon sont divisés en deux groupes d'âge (n = 40).

Représentations graphiques du dimorphisme sexuel de conformation

Les différences de conformation ont été visualisées à l'aide de configurations consensuelles, générées pour les hommes et les femmes. L'échantillon a été divisé en deux groupes : un groupe âgé de 40 à 59 ans et un groupe âgé de 60 à 79 ans. Les formes moyennes mandibulaires des hommes et des femmes ont ensuite été superposées et le dimorphisme sexuel objectivé par le décalage entre les silhouettes filaires du groupe le plus jeune et le plus âgé.

Les superpositions moyennes féminines et masculines montrent un dimorphisme sexuel de conformation, avec des différences dans la région goniaque, la région supérieure et postérieure du ramus (coroné, condyle, incisure mandibulaire) et la symphyse mandibulaire (**Figures 26 et 27**).

Dans le groupe le plus jeune (40 à 59 ans), les différences de forme entre les hommes et les femmes sont particulièrement marquées dans la région symphysaire et goniaque.

De profil, on observe une symphyse plus proéminente chez les individus féminins plus jeunes, mais à partir de 60 ans les configurations consensuelles des deux sexes convergent.

On remarque également que le condyle et le gonion des individus féminins présentent une position plus postérieure et supérieure que celui des individus féminins. Encore une fois, ces différences s'estompent avec l'avancée en âge, du fait d'une rotation de la forme moyenne des femmes dans le sens horaire. En revanche, le coroné et le milieu de l'incisure mandibulaire se déplacent vers le bas et vers l'avant après 60 ans.

De face, on observe que le gonion et le condyle sont plus latéralisés chez les hommes que chez les femmes entre 40 et 59 ans mais cette différence tend également à s'estomper avec l'avancée en âge. De façon générale, les différences sexuelles observées dans le plus jeune groupe ont tendance à diminuer à partir de 60 ans.

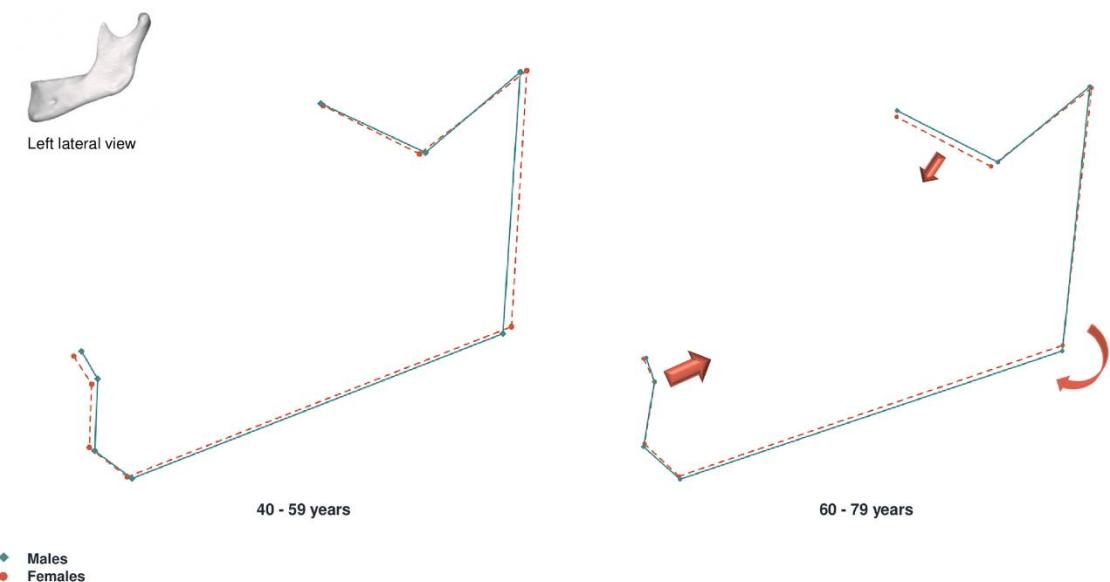


Figure 26 Superposition des consensus des matrices osseuses mandibulaires pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) : vue de profil. À gauche : *individus âgés de 40 à 59 ans*. À droite : *individus âgés de 60 à 79 ans*. Les hommes sont représentés en trait plein, les femmes en pointillés. Les flèches représentent les principales variations de conformation des femmes entre groupes d'âge.

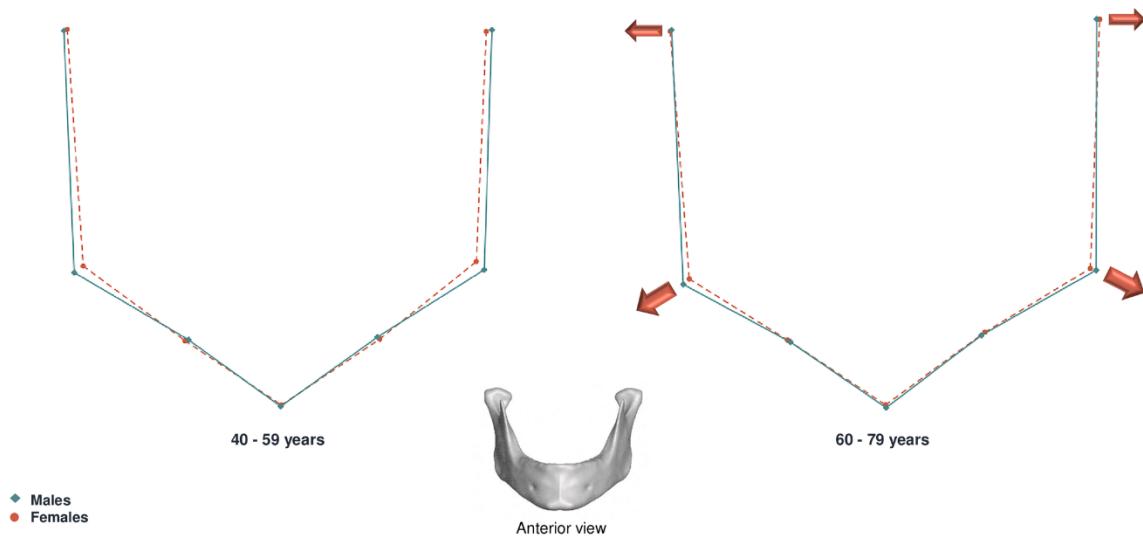


Figure 27 Superposition des consensus des matrices osseuses mandibulaires pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) : vue de face. À gauche : individus âgés de 40 à 59 ans. À droite : individus âgés de 60 à 79 ans. Les hommes sont représentés en trait plein, les femmes en pointillés. Les flèches représentent les principales variations de conformation des femmes entre groupes d'âge.

2.4 Effet de l'âge sur la précision de la diagnose sexuelle

L'analyse discriminante linéaire (CVA) à partir des distances de Mahalanobis et du F de Goodall montre que la précision de l'estimation sexuelle à partir de la conformation mandibulaire est légèrement inférieure pour le groupe d'individus plus âgé (**Tableau 24**) mais demeure élevée malgré le vieillissement.

Tableau 24 Précision de l'estimation sexuelle à partir de la conformation mandibulaire des 2 groupes d'âge.

Précision après validation croisée (%)	
Échantillon complet	86,25
Individus jeunes (40-59 ans)	96,42
Individus âgés (60-79 ans)	94,7

3. Étude de l'effet de la perte dentaire

3.1 Analyse de l'édentement seul

Afin d'analyser l'impact de l'édentement sur la morphologie et le dimorphisme sexuel de la mandibule, notre échantillon a été divisé en trois groupes selon le degré de perte dentaire : absence d'édentement, édentement partiel et édentement complet (**Tableau 25** et **Figure 28**). Notre analyse retrouve un lien significatif entre l'âge et le degré d'édentement.

Tableau 25 Composition des groupes selon le degré d'édentement.

Groupe	Etat dentaire	Taille de l'échantillon	
		Masculin	Féminin
A	Denté complet	29	25
B	Edenté partiel	46	46
C	Édenté complet	5	9

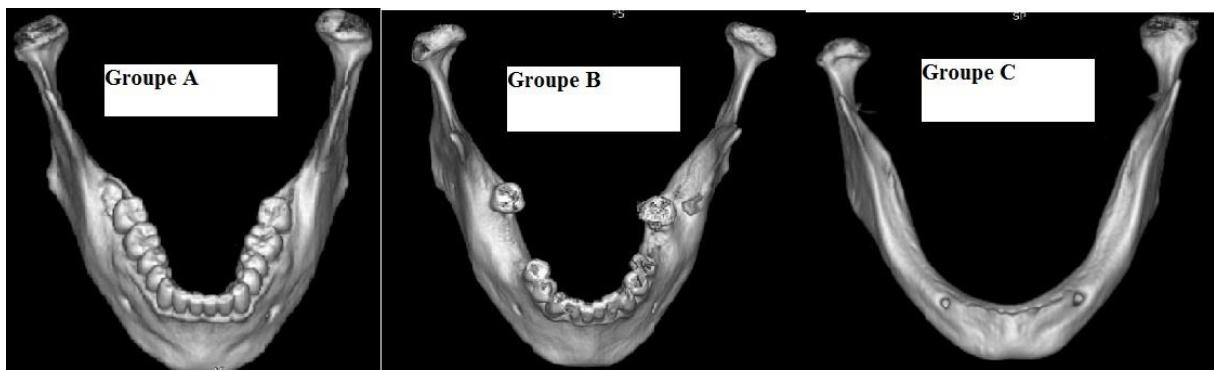


Figure 28 Illustration des trois groupes selon le degré d'édentement.

3.1.1 Effet de l'édentement sur la taille mandibulaire

Analyse métrique

Trois mesures linéaires présentent une différence statistiquement significative entre les deux sexes du groupe A (absence d'édentement) et du groupe B (édentement partiel). Il s'agit de la hauteur symphysaire, la largeur bigoniale et la hauteur ramique. Pour le groupe C, composé d'édentés totaux, seule la hauteur ramique est discriminante entre les sexes. En revanche, les mesures angulaires ne démontrent une différence significative entre hommes et femmes pour aucun des groupes.

Le **Tableau 26** résume l'ensemble de l'analyse métrique. Le dimorphisme sexuel semble marqué pour les individus totalement dentés et édentés partiels (groupes A et B). Le groupe C est difficilement interprétable étant donné le faible effectif.

Tableau 26 Mesures linéaires et angulaires moyennes en fonction du sexe dans chaque groupe.

Distances et angles moyens									
	Groupe A		Groupe B		Groupe C				
	p-value	M	F	p-value	M	F	p-value	M	F
HS (mm)	5,1.10 ^{-6*}	31,51	27,85	0,01*	29,64	27,74	0,95	20,58	20,77
BG (mm)	1,4.10 ^{-6*}	99,55	90,39	7,9.10 ^{-14*}	100,57	89,96	0,15	100,29	93,73
HR (mm)	0,00055*	62,31	57,43	3,2.10 ^{-7*}	60,22	55,10	0,03*	61,73	55,11
AG (°)	0,39	115,46	116,54	0,06	115,07	116,97	0,55	116,62	116,60
AI (°)	0,40	97,41	95,59	0,14	98,73	101,44	0,99	103,19	99,80

HS = Hauteur symphysaire, BG = Largeur bigoniale, HR = Hauteur ramique, AG = Angle goniaque, AI = Angle de l'incisure mandibulaire

*valeur du p significative

Le **Tableau 27** expose les variations de chaque mesure selon le degré d'édentement. Le référentiel est ici le groupe A (patients totalement dentés). On constate une diminution de la hauteur symphysaire, particulièrement marquée chez l'édenté total, ainsi que de la hauteur du ramus. En revanche, une augmentation de la largeur bigoniale, de l'angle goniaque et de l'incisure mandibulaire est observée pour les groupes B et C.

Tableau 27 Variation des mesures linéaires intergroupe en pourcentage.

	Groupe A		Groupe B		Groupe C	
	M	F	M	F	M	F
HS (mm)	31,51	27,85	29,64 (-5,93%)	27,74 (-0,39%)	20,58 (-34,68%)	20,77 (-24,45%)
BG (mm)	99,55	90,39	100,57 (+1,02%)	89,96 (-0,47%)	100,29 (+0,74%)	93,73 (+3,69%)
HR (mm)	62,31	57,43	60,62 (-2,71%)	55,10 (-4,05%)	61,73 (-0,93%)	55,11 (-4,03%)
AG (°)	115,46	116,54	115,07 (-0,33%)	116,97 (+0,36%)	116,62 (+1,00%)	116,60 (+0,05%)
AI (°)	97,41	95,59	98,73 (+1,35%)	101,44 (+6,11%)	103,19 (+5,93%)	99,80 (+4,40%)

HS = Hauteur symphysaire, BG = Largeur bigoniale, HR = Hauteur ramique, AG = Angle goniaque, AI = Angle de l'incisure mandibulaire

3.1.2 Effet de l'édentement sur la conformation mandibulaire

Analyse par morphométrie géométrique

L'Analyse en Composantes Principales montre un dimorphisme sexuel de conformation plus marqué pour les patients présentant un édentement partiel (groupe B) que pour les patients dentés (groupe A). Les deux premières composantes PC1 et PC2 représentent respectivement 22,41% et 17,85% de la variance du groupe A et 21,3% et 18,63% du groupe B. Le groupe C a été exclu de cette analyse au vu de son faible effectif. La tendance de variation de conformation mandibulaire entre hommes et femmes selon l'édentement est représentée sur la **Figure 29**.

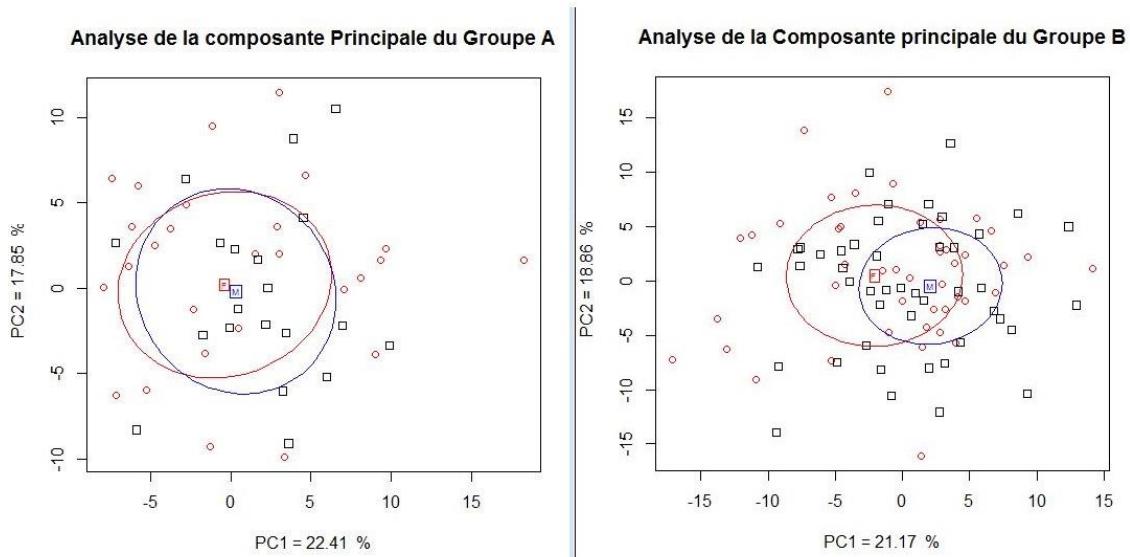


Figure 29 Répartition de l'analyse des composantes principales des formes mandibulaires (bleu pour masculin et rouge pour féminin) de chaque groupe.

Le calcul des distances de Mahalanobis et le F-test de Goodall révèlent une différence significative entre les deux sexes au sein du groupe des édentés partiels (groupe B) ($p=0.001$) (Tableau 28).

Tableau 28 Comparaison de l'analyse multivariée des formes mandibulaires des 3 groupes.

	Distance de Mahalanobis	F de Goodall	p-value	Précision après validation croisée (%)
Groupe A	3.47	1.4553	0.143	90,74%
Groupe B	2.45	4.3921	0.001 *	92,39%
Groupe C	2.40	1.5142	0.128	92,85%

Représentations graphiques des variations de conformation

Des silhouettes filaires 2D, issues des formes consensuelles moyennes, ont été produites pour chaque sexe et groupe d'édentement. Les formes mandibulaires moyennes féminines et masculines ont ensuite été superposées et le dimorphisme sexuel a été visualisé sous forme de flèches.

La superposition des formes moyennes féminines et masculines révèle des différences de conformation entre les sexes, notamment au niveau de la région goniaque (Figure 30), de la région symphysaire et de l'incisure mandibulaire (Figure 31). En vue de profil, ces différences semblent s'accroître avec le degré d'édentement (Figure 31)

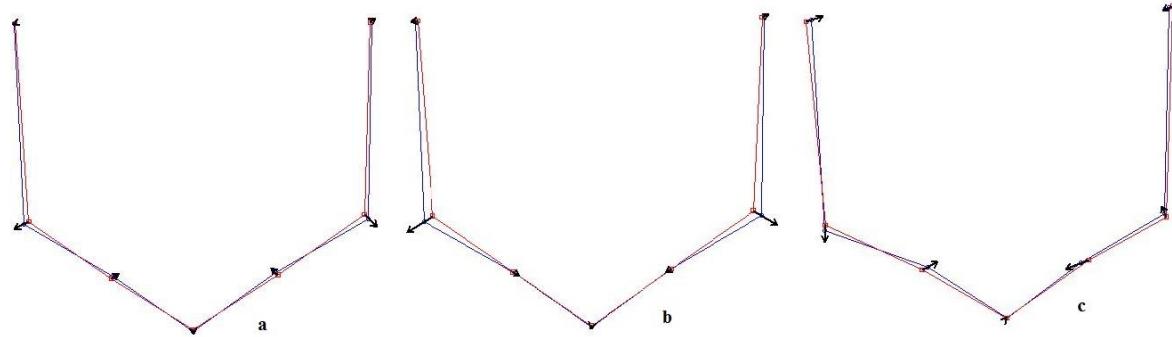


Figure 30 Variation de la forme mandibulaire du sexe féminin vers le sexe masculin en vue de face : Groupe A (a), Groupe B (b), Groupe C (c). *Les flèches représentent les principales variations de conformation entre individus masculins et féminins.*

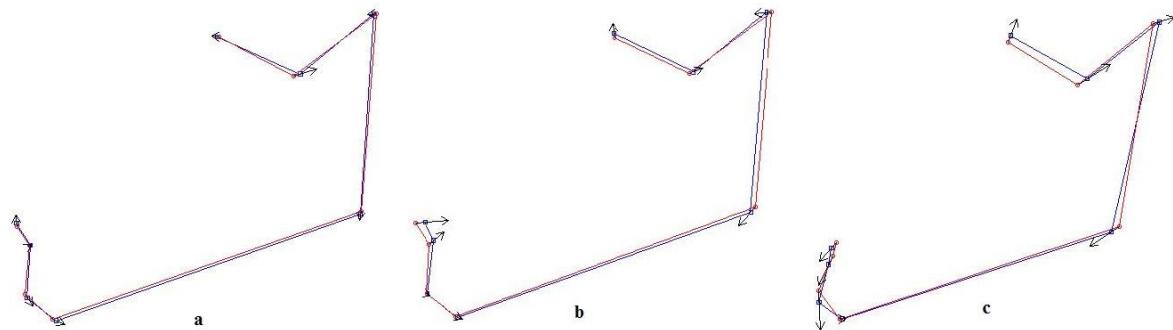


Figure 31 Variation de la forme mandibulaire du sexe féminin vers le sexe masculin vue de profil. Groupe A (a), Groupe B (b), Groupe C (c). *Les flèches représentent les principales variations de conformation entre individus masculins et féminins.*

3.1.3 Effet de l'édentement sur la précision de la diagnose sexuelle

La perte dentaire semble avoir un impact négatif sur la précision de la diagnose sexuelle, en particulier avec des méthodes d'estimation reposant sur des mesures métriques.

Analyse métrique

Le taux de mauvais classement évolue de façon croissante du groupe A au groupe C. Celui-ci est particulièrement important chez l'édenté complet, pour lequel le taux de mauvais classement atteint les 57%. Par ailleurs, le biais sexuel est négatif (-0,01) dans le groupe A, positif dans le groupe B (0,04) et nul dans le groupe C (**Tableau 29**).

Tableau 29 Résultat de l'analyse linéaire discriminante pour chaque groupe.

	Groupe A	Groupe B	Groupe C
TMC	12.96%	13.18%	57.14%
Biais sexuel	- 0.01	0.04	0

TMC = taux de mauvais classement

Analyse par morphométrie géométrique

L'analyse linéaire discriminante montre une bonne précision de l'estimation du sexe pour les trois groupes, allant de 90 à 93%, même si les résultats pour le groupe C sont à pondérer au vu de son faible effectif (**Tableau 28**).

3.2 Analyse de la perte de calage dentaire

Afin d'analyser l'impact de la perte de calages occlusaux sur la morphologie et le dimorphisme sexuel mandibulaire, l'échantillon a été réparti en trois groupes selon le degré de perte de calage dentaire, défini à partir de l'Indice d'Eichner (Eichner, 1955). Le **Tableau 30** présente la composition des trois groupes.

Tableau 30 Composition des groupes selon l'Indice d'Eichner.

Indice d'Eichner	Taille de l'échantillon	
	Masculin	Féminin
A	37	37
B	30	26
C	13	17

Groupe A : présence d'un contact occlusal dans les 4 zones postérieures ; Groupe B : présence d'une à trois zones de contact occlusal postérieur ; Groupe C : absence totale de contact occlusal postérieur.

L'analyse de notre échantillon montre un lien entre le vieillissement et l'importance de la perte de calage dentaire. La différence d'âge est significative entre le groupe A et B ($p=2,8 \cdot 10^{-6}$) et entre le groupe A et C ($p=1,10^{-8}$) (**Figure 32**).

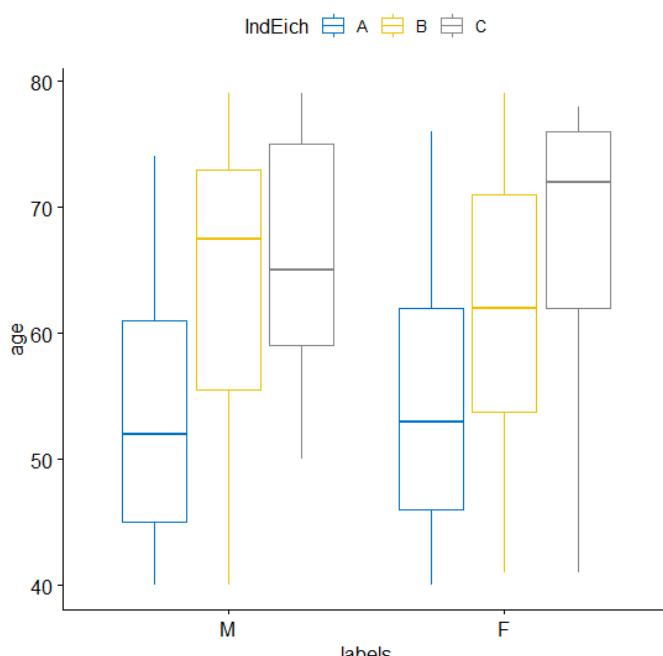


Figure 32 Boxplot de la distribution de l'âge selon le degré de perte de calage dentaire (indice d'Eichner A, B et C) pour chaque sexe. $\bar{A}ge/Indice d'Eichner : F=22,34 ; p=2,9 \cdot 10^{-9} ; ges=0,222 ; R^2ajusté=0,216$.

3.2.1 Effet de la perte de calage dentaire sur la taille mandibulaire

Analyse métrique

La perte de calage dentaire est accompagnée d'une diminution marquée de la hauteur symphysaire pour les individus masculins (-19,50%) et féminins (-19,7%), ainsi que de la hauteur ramique. Cette dernière est plus marquée chez les hommes (-5,4%). On observe également des variations plus modérées des distances bicondylienne et bigoniale, de l'angle goniaque et de l'incisure mandibulaire (**Tableau 31**).

Tableau 31 Mesures linéaires et angulaires moyennes et leur variation^a (%) selon l'indice d'Eichner pour chaque sexe.

Mesures	Distances (mm) et Angles (°) moyens								
	Indice d'Eichner A			Indice d'Eichner B			Indice d'Eichner C		
	p-value	M	F	p-value	M	F	p-value	M	F
HS (mm)	1,8.10 ⁻⁷ *	31,7	27,9	0,24	29,3 (-7,5%)	28,2 (+1,0%)	0,24	25,5 (-19,5%)	22,5 (-19,7%)
BG (mm)	1,4.10 ⁻⁹ *	100,4	90,3	1,3.10 ⁻⁸ *	100,0 (0%)	90,2 (0%)	0,002*	99,99 (-0,4%)	91,55 (+1,4%)
HR (mm)	4,9.10 ⁻⁸ *	62,6	56,3	0,002*	60,0 (-4,0%)	55,9 (-0,6%)	0,01*	59,2 (-5,4%)	54,7 (-2,9%)
BC (mm)	1,5.10 ⁻⁷ *	103,5	95,8	8,1.10 ⁻⁹ *	104,3 (+0,7%)	96,7 (+1%)	0,005*	103,9 (+0,3%)	98,3 (+2,6%)
AG (°)	0,17	115,3	116,9	0,09	114,9 (-0,3%)	116,9 (0%)	0,95	116,24 (+0,8%)	116,3 (-0,5%)
AI (°)	0,36	97,2	98,7	0,75	99,4 (+2,2%)	100,2 (+1,3%)	0,78	100,31 (+3,2%)	98,9 (+0,5%)

HS = Hauteur symphysaire, BG = Distance bigoniale, HR = Hauteur ramique, Distance bicondylienne (BC), AG = Angle goniaque, AI = Angle de l'incisure mandibulaire

NB : le pourcentage entre parenthèses est calculé par rapport à la valeur de l'indice d'Eichner A

*Valeur de p significative

Analyse du volume mandibulaire

Il existe un lien entre la perte de calage dentaire et la diminution du volume mandibulaire. Cette diminution de volume n'est significative qu'entre le groupe A et le groupe C ($p=0,003$) (Figure 33).

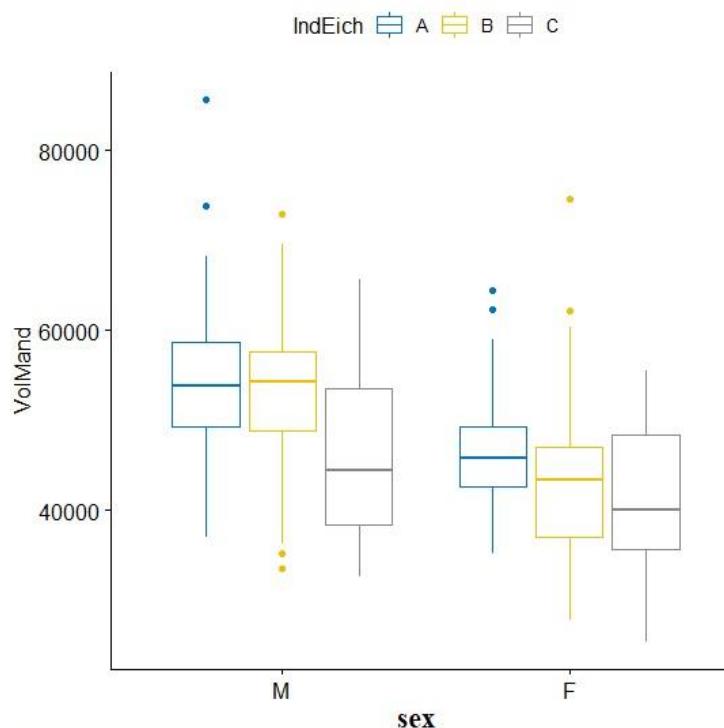


Figure 33 Boxplot de la répartition du volume mandibulaire selon le degré de perte de calage dentaire (indice d'Eichner A, B et C) pour chaque sexe. *Volume mandibulaire/Indice d'Eichner* : $F=5,55$; $p=0,005$; ges=0,066 ; R^2 ajusté=0,054.

Tant le sexe comme l'indice d'Eichner en tant que variables indépendantes ont un effet statistiquement significatif sur le volume de la mandibule ($p < 0.01$). L'effet principal simple de l'indice d'Eichner sur le volume mandibulaire n'est significatif que pour les individus masculins de notre échantillon ($p=0,017$), en particulier entre les groupes A et C (Tableau 32).

Tableau 32 Effet du sexe et de l'indice d'Eichner sur le volume mandibulaire.

Variable	F de Goodall	p-value
Sexe	35,46	$1,7 \cdot 10^{-8} *$
Indice d'Eichner	5,77	0,004 *
Sexe : Indice d'Eichner	0,37	0,689
Masculin : indice d'Eichner	4,22	0,017*
Féminin : indice d'Eichner	1,93	0,149

*valeur de p significative

Le volume mandibulaire diminue entre le groupe A et le groupe C pour les deux sexes (**Tableau 33**).

Tableau 33 Pourcentage de dimorphisme sexuel et variation des volumes moyens mandibulaires (en mm^3) pour chaque indice d'Eichner.

	Volume masculin	Volume féminin	p-value	% DS
Indice A	55614,6	46326,3	$1,2 \cdot 10^{-5} *$	20,0 %
Indice B	52898,1 (-4,9%)	43952,8 (-5,1%)	0,001*	20,4 %
Indice C	47163,9 (-15,2%)	41196,6 (-11,1%)	0,106	14,5%

NB : Le pourcentage entre parenthèses est calculé par rapport à la valeur de l'indice A

*valeur de p significative ; % DS = $[(|\text{moyenne hommes} - \text{moyenne femme}|)/\text{moyenne femme}] \times 100$

3.2.2 Effet de la perte de calage dentaire sur la conformation mandibulaire

Analyse par morphométrie géométrique

L'ACP révèle un dimorphisme sexuel de forme plus marqué avec la diminution des contacts occlusaux, soit de l'indice A à l'indice C (**Figure 34**).

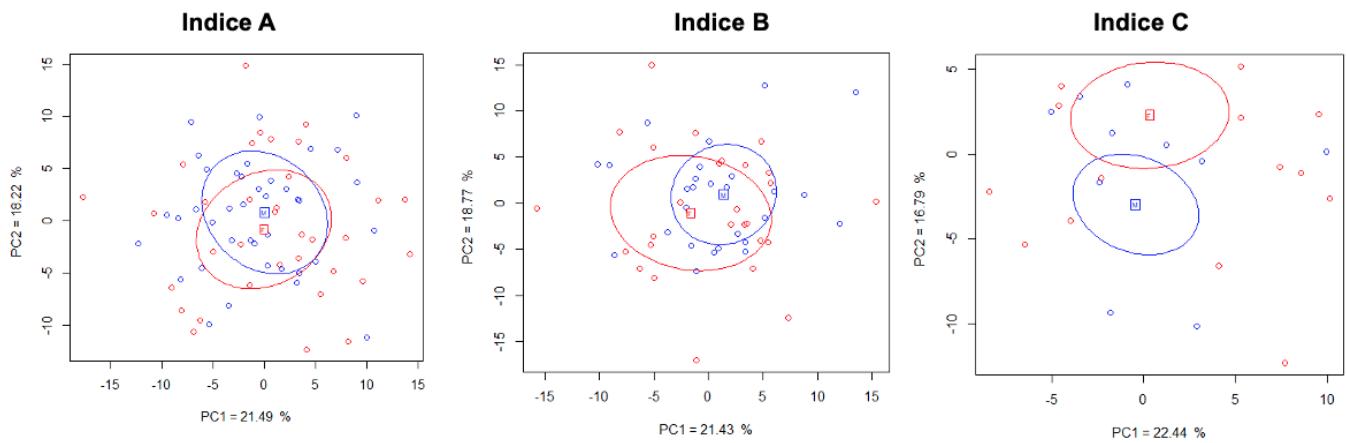


Figure 34 Analyse en Composantes Principales de la conformation mandibulaire pour chaque groupe d'indice d'Eichner. Les individus féminins sont représentés en rouge, les individus masculins en bleu.

Il existe une différence significative des tailles centroïdes moyennes entre les deux sexes au sein de chaque groupe (**Figure 35a**), tandis qu'on ne constate pas de différence significative entre chaque groupe d'indice d'Eichner (**Figure 35b**).

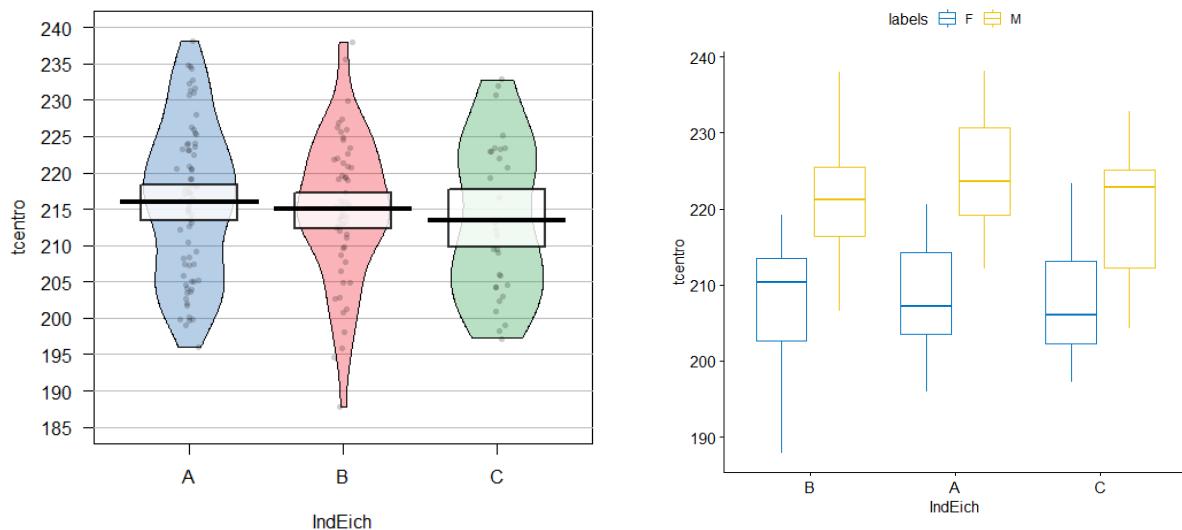


Figure 35 a) diagramme de la répartition des tailles centroïdes selon l'indice d'Eichner ; (b) taille centroïde entre chaque indice d'Eichner. Des différences significatives entre hommes et femmes sont observées pour les trois groupes (A, $p=1.3 \times 10^{-15}$; B, $p=1.6 \times 10^{-5}$; C, $p=0.002$). F = individus féminins ; M = individus masculins.

Les distances de Mahalanobis et Procrustes ainsi que le test F de Goodall révèlent une différence significative entre les deux sexes au sein de l'indice d'Eichner A ($p=0.013$) et B ($p=0.016$) (**Tableau 34**).

Tableau 34 Comparaison de l'analyse multivariée des formes mandibulaires des 3 indices d'Eichner.

Indice d'Eichner	Distance de Mahalanobis	Distance Procrustes	F de Goodall	p-value	Précision après validation croisée (%)		Échantillon complet
					Hommes	Femmes	
A	3.19	0.023	2.444	0.013*	83.8	97.3	90.6
B	3.75	0.026	2.397	0.016*	96.7	96.2	96.4
C	4.33	0.031	1.559	0.113	100	100	100

*valeur de p significative

Représentations graphiques des variations de conformation

La superposition des formes moyennes féminines et masculines pour chaque groupe a montré un dimorphisme sexuel de conformation mandibulaire, notamment au niveau de la région goniaque, de la branche montante et de l'incisure mandibulaire (**Figure 36**).

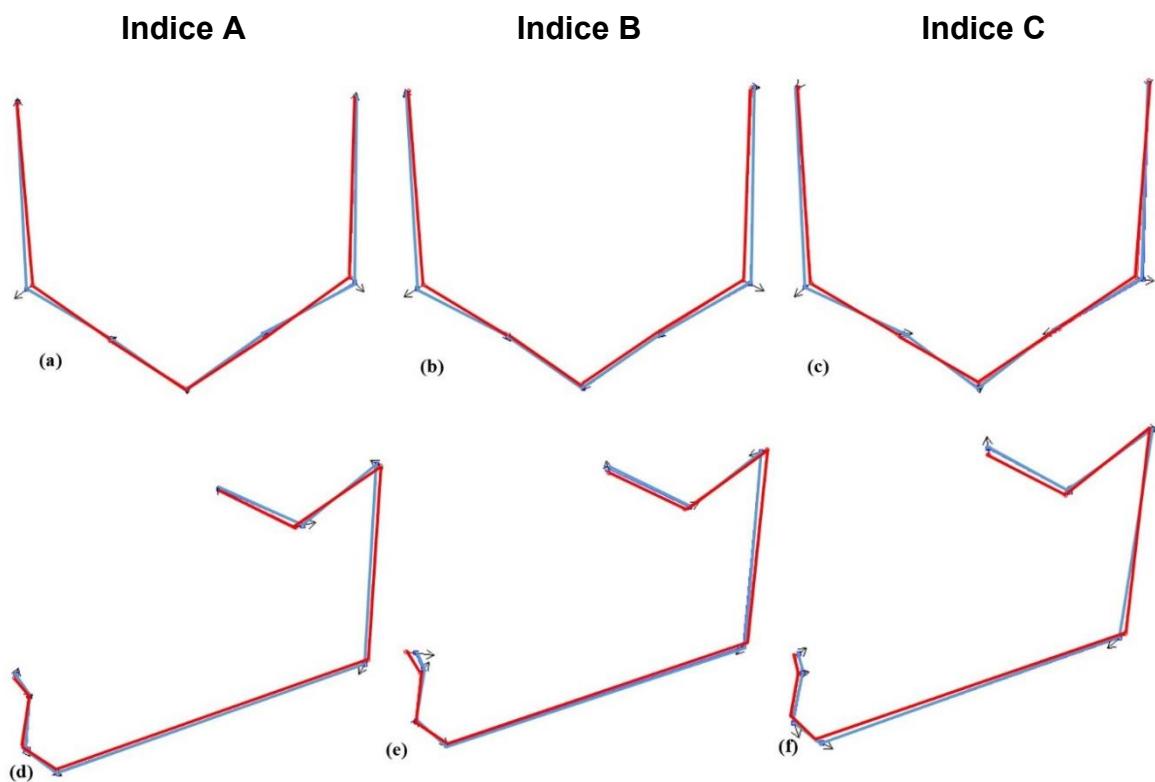


Figure 36 Superposition des consensus des matrices osseuses mandibulaires pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) pour chaque indice d'Eichner. *Les flèches représentent les principales variations de conformation des individus féminins vers les individus masculins.*

La superposition des formes moyennes des groupes A et C a révélé une rotation antérieure de la mandibule avec la perte de calage dentaire pour les deux sexes (Figure 37). La perte de calage dentaire induit des changements de conformation particulièrement marqués au niveau de la région symphysaire, du rebord inférieur mandibulaire et du ramus.

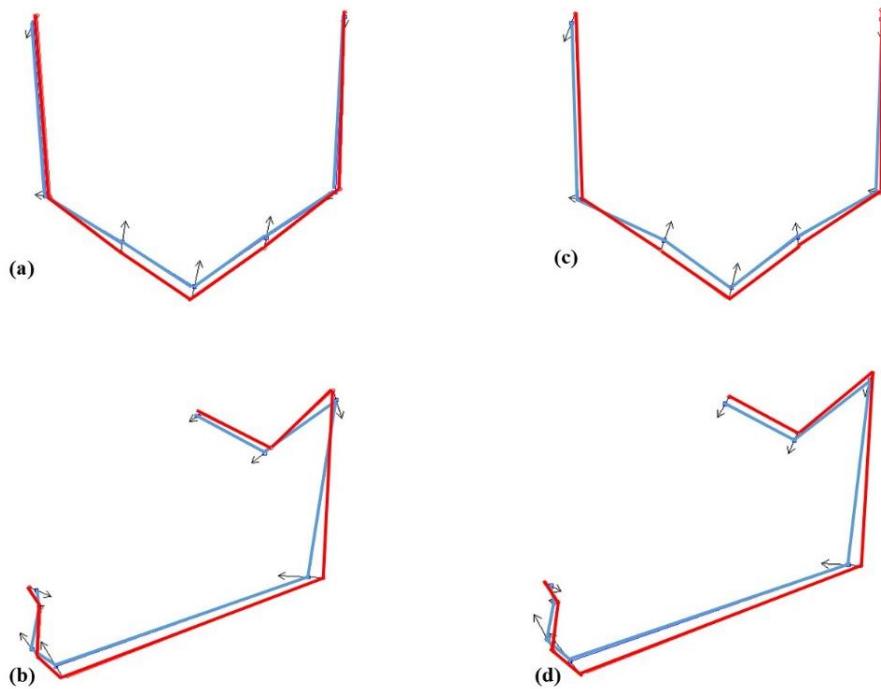


Figure 37 Variation des conformations mandibulaires féminines (a, b) et masculines (c, d) entre les indices d'Eichner A (en rouge) et C (en bleu). *Les flèches représentent les principales variations de conformation liées à la perte de calage dentaire.*

3.2.3 Effet de la perte de calage dentaire sur la précision de la diagnose sexuelle

Analyse métrique

Une diminution du dimorphisme sexuel est constatée avec l'augmentation de la perte de calage dentaire. Seules la hauteur ramique, et les distances bigoniale et bicondylienne demeurent dimorphiques avec la perte de calage dentaire (**Tableau 31**). Le dimorphisme de hauteur symphysaire disparaît pour les groupes B et C.

Le **Tableau 35** illustre ce changement à l'aide des trois traits les plus dimorphiques : la distance bigoniale, la hauteur ramique et la distance bicondylienne.

Tableau 35 Variation du taux de dimorphisme sexuel de trois traits mandibulaires selon l'indice d'Eichner.

Mesures (mm)	Indice d'Eichner A	Indice d'Eichner B	Indice d'Eichner C
BG (mm)	11,22	10,86 (-3,2%)	9,22 (-17,8%)
HR (mm)	11,20	7,16 (-36,1%)	8,28 (-26,1%)
BC (mm)	8,01	7,83 (-2,2%)	5,76 (-28,1%)

BG = Distance bigoniale, HR = Hauteur ramique, Distance bicondylienne (BC)

Taux dimorphisme = $[(\text{moyenne hommes} - \text{moyenne femme})/\text{moyenne femme}] \times 100$; pourcentage calculé par rapport à la valeur de l'indice A

Une régression logistique suivie d'une sélection pas à pas descendante prenant en compte toutes les mesures métriques (distances et angles) a été réalisée dans un premier temps afin d'établir une équation d'estimation sexuelle pour chaque groupe d'indice d'Eichner. Ces fonctions discriminantes ainsi que les taux de classification après validation croisée sont présentés dans le **Tableau 36**. Les individus masculins présentent un meilleur taux de classement chez les sujets complètement ou partiellement dentés (groupes A et B). En revanche, pour les individus avec une perte complète de calage occlusal (groupe C), le taux de classement est largement inférieur chez les hommes. De façon générale, on constate une diminution de la précision de l'estimation du sexe entre le groupe A et le groupe C.

Tableau 36 Fonctions discriminantes pour l'estimation sexuelle et taux de classement après correction pour chaque indice d'Eichner.

	Fonction discriminante ¹ $p>0,5 = \text{individu féminin}^2$	Taux de classement après validation croisée (%)		
		Hommes	Femmes	Échantillon complet
Indice A	Logit = 107,25-(0,29xBG)-(0,29xBC)-(0,60xHRg) (0,53xHS)	91,9	86,5	89,2
Indice B	Logit = 78,72-(0,23xBG)-(0,22xHR)- (0,43BC)+(0,14x AGd)-(0,10x AGg)-(0,09x Ald)+(0,05x Alg)	83,3	80,8	82,2
Indice C	Logit = 49,45-(0,20xBG)-(0,35xRHd)+(0,33xRHg)- (0,23BC)-(0,14xHS)	61,2	82,4	73,3

¹ $\text{Logit}(p) = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_n * X_n$

² $p = 1/(1 + \exp.^{-\text{logit}(p)})$

HS = Hauteur symphysaire, BG = Distance bigoniale, HR = Hauteur ramique, Distance bicondylienne (BC), AGd = Angle gonioïque droit, AGg = Angle gonioïque gauche, Ald = Angle de l'incisure mandibulaire droite, Alg = Angle de l'incisure mandibulaire gauche

Afin de simplifier les équations d'estimation sexuelle, nous avons procédé à une deuxième régression logistique incluant uniquement les trois mesures les plus dimorphiques (hauteur ramique, distance bigoniale, distance bicondylienne) (**Tableau 37**). La performance de ces équations apparaît supérieure à celle présentée dans le **Tableau 36**.

Tableau 37 Fonctions discriminantes pour l'estimation sexuelle et taux de classement après correction en prenant en compte les trois mesures les plus dimorphiques pour chaque indice d'Eichner.

	Fonction discriminante ¹ $p>0,5 = \text{individu féminin}^2$	Taux de classement après validation croisée (%)		
		Hommes	Femmes	Groupe
Indice A	Logit = 84,16-(0,29xBG)-(0,54xHR)-(0,25xBC)	91,9	91,9	91,9
Indice B	Logit = 78,90-(0,25xBG)-(0,18xRH)-(0,45xBC)	93,3	84,6	89,3
Indice C	Logit = 30,33-(0,14xBG)-(0,11xRH)-(0,10xBC)	69,2	88,2	80,0

¹ $\text{Logit}(p) = 80 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_n * X_n$

² $p = 1/(1 + \exp^{-\text{logit}(p)})$

HS = Hauteur symphysaire, BG = Distance bigoniale, HR = Hauteur ramique, Distance bicondylienne (BC), AGd = Angle goniaque droit, AGg = Angle goniaque gauche, Ald = Angle de l'incisure mandibulaire droite, Alg = Angle de l'incisure mandibulaire gauche

Analyse du volume mandibulaire

Le pourcentage de dimorphisme sexuel demeure stable pour les groupes A et B puis décroît dans le groupe C (**Tableau 33**). La précision d'estimation sexuelle après validation croisée est de 77%, 75% et 60% pour les groupes A, B et C respectivement.

Analyse par morphométrie géométrique

La CVA (test de permutation avec 10000 interactions) permet de noter que la perte de calage dentaire n'affecte pas l'estimation du sexe à partir de la conformation mandibulaire. La précision de celle-ci varie de 90% pour l'indice d'Eichner A à 100% pour l'indice d'Eichner C (**Tableau 34**).

V) DISCUSSION

1. Effet de l'âge sur la morphologie et le dimorphisme sexuel mandibulaire

L'impact du processus de sénescence sur la morphologie osseuse mandibulaire a été décrit dans diverses publications. Certaines zones semblent plus sujettes à des remaniements liés à l'âge, à savoir la région symphysaire, la crête alvéolaire, le ramus et la région goniaque (Cawood & Howell, 1988; Doual et al., 1997; Enlow et al., 1976; Pecora et al., 2008; Shaw et al., 2010; Toledo Avelar et al., 2017). Étant donné que ces zones sont celles présentant le dimorphisme sexuel le plus marqué au niveau de l'os mandibulaire, il y a très probablement une évolution de celui-ci avec le vieillissement.

L'objectif de notre travail était d'analyser la nature des modifications de forme liées au vieillissement et de tester si le dimorphisme sexuel mandibulaire observé à l'âge adulte demeurait significatif malgré ces changements morphologiques.

Évolution de la taille mandibulaire avec le vieillissement

Notre analyse indique que le vieillissement a un impact sur les dimensions mandibulaires. Il entraîne notamment une diminution de la hauteur symphysaire, ramique et de l'angle goniaque, tandis qu'une résorption centrifuge conduit à une augmentation de la largeur bigoniale. Ces observations ont été préalablement décrites dans la littérature (Shaw et al., 2010, 2011).

Des variations volumiques sont également observées, avec une diminution du volume mandibulaire à partir de 55 ans pour les hommes et 65 ans pour les femmes.

Évolution de la conformation mandibulaire avec le vieillissement

Nos résultats ont montré, par la superposition des consensus des matrices osseuses, que des changements de conformation surviennent avec l'âge pour les deux sexes et que ces derniers sont plus étendus pour les femmes. La symphyse mandibulaire est la zone où les changements de conformation liés au vieillissement sont le plus prononcés. Ces derniers se traduisent par une résorption antérieure et inférieure du corps de la mandibule touchant les individus féminins et masculins, ce qui est également décrit dans de précédentes études (Toledo Avelar et al., 2017). En effet, divers auteurs ont décrit des changements de conformation considérables au niveau de la région symphysaire avec l'âge.

Shaw et al. ont retrouvé une diminution de la longueur mandibulaire conduisant à une projection du menton similaire pour les hommes et les femmes d'âge moyen (Shaw et al., 2010). Toledo Avelar et al. (2017) ont également remarqué que le menton devient plus proéminent et oblique chez les individus plus âgés, et que la hauteur symphysaire diminue.

Le vieillissement induit également des altérations morphologiques de la région goniaque, coronoïdienne et condylienne, particulièrement chez les individus féminins. La tendance générale de variation suit une direction excentrique dans la région goniaque et concentrique dans les régions symphysaire, ramique et condylienne. Oettlé et al. (2005) ont aussi décrit une plus grande variabilité de conformation de la région ramique chez les femmes.

Profil du vieillissement mandibulaire

L'analyse des variations de conformation montre que les changements morphologiques commencent plus précocement chez les femmes, à partir de 55 ans, tandis que pour les hommes des différences significatives de conformation ne semblent apparaître qu'à partir de 65 ans (**Tableau 20**). Un début plus précoce du processus de sénescence chez les femmes pourrait expliquer l'observation de modifications de conformation plus importantes observées au sein de cet échantillon. Il est également possible que la vitesse des changements de forme liés à l'âge soit plus lente chez les hommes. Ceci associé au fait que le processus de vieillissement débute plus tardivement chez les individus masculins limiterait la mise en évidence de modifications dans notre échantillon qui n'inclut pas des individus âgés de plus 79 ans.

Nous savons que d'autres structures du squelette facial, en particulier l'étage moyen de la face, sont soumises à des changements précoces chez la femme (Kahn & Shaw, 2008; Robertson et al., 2017; Shaw & Kahn, 2007). Kahn et Shaw (2008) ont observé des changements plus conséquents et plus précoces au niveau de l'ouverture orbitaire et des angles glabellaires et pyriformes des sujets féminins. Comme dans notre étude, les femmes présentaient de façon générale une perte osseuse plus marquée. Cette résorption commençait entre le groupe le plus jeune et celui d'âge moyen pour les femmes, et entre le groupe d'âge moyen et plus âgé chez les hommes. Ces observations montrent que le processus de sénescence est différent entre les individus féminins et masculins et accentue la variabilité de forme inter-individuelle. Cependant, il semblerait également qu'une variabilité intra-individuelle soit remarquée suite à l'amorce du processus de vieillissement, puisque toutes les structures faciales ne sont pas touchées simultanément. Cotofana et al. ont trouvé que la vitesse des changements liés au vieillissement ne présente pas une distribution homogène à travers l'étage moyen

de la face : certaines structures osseuses présentent des changements de façon anticipée (Cotofana et al., 2018). Au niveau de la mandibule, il a été constaté que les changements conformatiⁿnels de longueur précèdent les changements de hauteur (Shaw et al., 2010).

Bien que le vieillissement affecte tous les individus, la nature des altérations de forme diverge entre les individus masculins et féminins de notre population. Tandis que pour les hommes les principaux changements de conformatiⁿ se trouvent au niveau de la région symphysaire, et de façon plus accentuée au niveau alvéolaire, l'ensemble de la mandibule est soumis à des modifications chez les femmes. Comme pour les individus masculins, la zone la plus concernée est la symphyse, présentant une rétrusion marquée après 55 ans. Les femmes présentent également une latéralisation du ramus mandibulaire, avec un déplacement externe du gonion et du condyle, ainsi qu'un déplacement antérieur du gonion et du coroné.

Des publications antérieures ont également observé que les changements mandibulaires liés au vieillissement diffèrent entre les sexes, et que chez les femmes les modifications de conformatiⁿ sont plus accentuées (Doual et al., 1997; Richard et al., 2009). Pecora et al., dans une étude céphalométrique longitudinale, ont constaté que les individus masculins affichent des changements principalement au niveau de la portion antérieure de la mandibule avec, en conséquence, une augmentation de la proéminence du menton avec l'âge. Les individus féminins, en revanche, étaient plus sujets à des changements dans le sens vertical, associés à une rotation postérieure de la mandibule (Pecora et al., 2008). Ces observations indiquent que la nature des changements de conformatiⁿ induits par le vieillissement est soumise à un dimorphisme sexuel, étayant nos résultats.

Évolution du dimorphisme sexuel mandibulaire avec le vieillissement

Lorsque nous avons procédé à l'analyse du dimorphisme sexuel de la mandibule dans différents groupes d'âge grâce à la morphométrie géométrique, nous avons observé que le dimorphisme sexuel de conformatiⁿ reste significatif ($p < 0.005$) pour tous les groupes d'âge et que la précision de la diagnose sexuelle est peu affectée par le vieillissement (94,7% pour le groupe plus âgé).

De précédentes études sont parvenues à des conclusions semblables en employant des méthodes qualitatives et quantitatives (Garvin et al., 2014; Garvin & Ruff, 2012; Suazo & Matamala, 2012).

Il a été rapporté que le vieillissement peut même avoir un effet positif sur la diagnose sexuelle de l'extrémité céphalique, avec de meilleurs taux de classement suite à l'établissement des changements de conformatiⁿ liés à l'âge. Suazo et Matamala (2012) ont retrouvé une augmentation de la performance diagnostique des indicateurs morphologiques utilisés pour estimer le dimorphisme

sexuel du crâne et de la mandibule d'individus âgés. D'autres études ont observé une amélioration de la classification sexuelle à partir de 40 ans, tant pour le crâne (Nikita, 2014) que pour la mandibule (Gillet et al., 2020). Pour Gapert et al., le degré de précision de l'estimation sexuelle à partir du foramen magnum augmentait après 50 ans, en particulier pour les femmes (Gapert et al., 2013). Néanmoins, la majorité de ces études se base sur des méthodes métriques, et prend surtout en compte le dimorphisme sexuel de taille plutôt que de celui de conformation.

Afin d'évaluer l'évolution des différences de conformation entre les sexes nous avons divisé notre échantillon en 2 groupes d'âge : 40 à 59 ans et 60 à 79 ans. La superposition des formes moyennes entre hommes et femmes a montré la survenue de changements avec le vieillissement, majoritairement au niveau des régions symphysaire, goniaque et de la portion supérieure du ramus (coroné, condyle et incisure mandibulaire).

Les différences de conformation sont plus marquées avant 60 ans, les femmes présentant une projection symphysaire plus importante. Nos résultats sont en accord avec de précédentes études, dans lesquelles il est retrouvé que la symphyse est l'une des régions les plus dimorphiques de la mandibule : les hommes ont généralement une symphyse plus haute, plus large et une éminence mentonnière moins projetée que les femmes (Garvin & Ruff, 2012; Vallabh et al., 2019).

Dans notre échantillon, même si le sexe et l'âge avaient incontestablement un effet sur la conformation mandibulaire, nous n'avons pas trouvé de corrélation significative lors de l'étude de l'interaction entre le sexe et l'âge et la conformation mandibulaire, ce qui implique que l'âge n'accentue pas le dimorphisme sexuel de conformation (**Tableau 22**). Deux hypothèses peuvent être dégagées de cette observation :

- les conformations masculines et féminines convergent avec le vieillissement : on assisterait alors à une féminisation des hommes et une masculinisation des femmes
- les conformations masculines et féminines évoluent dans la même direction avec le vieillissement.

Les résultats de l'Analyse en Composantes Principales (**Figure 22**) et le calcul des distances Procrustes entre les sexes et les groupes d'âge (**Tableau 21**) semblent étayer plutôt la deuxième hypothèse : les configurations des deux sexes évoluent dans le même sens avec l'âge puisque la configuration mandibulaire féminine semble se rapprocher de la configuration masculine avec le vieillissement. Ainsi, bien que le dimorphisme sexuel de conformation demeure significatif avec l'avancée en âge, nos résultats indiquent qu'il a tendance à s'estomper. Pessa et al., dans une étude longitudinale, ont également observé que les différences de forme entre les individus féminins et masculins tendaient à s'estomper avec la sénescence (Pessa et al., 2008).

Conformément à notre objectif principal, nos résultats ont révélé que la sénescence induit des changements de conformation mandibulaires. Nous avons également confirmé la présence de différences de conformation mandibulaire entre individus masculins et féminins au cours du processus de vieillissement. Ceci nous permet d'accepter l'hypothèse que les hommes et les femmes sont soumis à des modifications de forme distinctes avec l'âge.

De plus, nos résultats indiquent que le processus de vieillissement présente non seulement une variabilité entre hommes et femmes mais aussi une variabilité entre individus de même sexe.

Le vieillissement est un processus soumis à l'influence de multiples facteurs externes et internes, et affiche en conséquence une plus forte hétérogénéité que la croissance et la maturation. La morphologie mandibulaire est fortement dépendante de facteurs externes tels que les hormones et la force musculaire. Le début plus précoce des changements observés chez la femme pourrait s'expliquer par les effets hormonaux de la ménopause, puisqu'une diminution des taux d'hormones, en particulier de l'œstrogène, entraîne une résorption osseuse accrue au niveau des os de la face (Walsh, 2018). Bien que les deux sexes soient affectés par des variations hormonales avec le vieillissement, le remodelage osseux s'intensifie de façon marquée chez la femme ménopausée, tandis que chez l'homme ce processus se fait plus progressivement (Walsh, 2018).

2. Effet de la perte dentaire sur la morphologie et le dimorphisme sexuel mandibulaire

Parmi les facteurs pouvant expliquer les différences interindividuelles observées au cours du processus de vieillissement on retrouve la fonction musculaire et l'édentement.

Il a été démontré que la morphologie mandibulaire varie en fonction de l'intensité des forces exercées par les muscles masticateurs, en particulier le temporal et le masséter. L'existence d'un lien entre la taille des muscles masticateurs et la forme de la mandibule a été confirmée par Sella-Tunis et al. (2018).

Une part du dimorphisme sexuel observé à la mandibule peut en effet être expliquée par le fait que les hommes génèrent en moyenne plus de force musculaire au cours de la mastication que les femmes, ce qui donne lieu à des mandibules plus volumineuses et à des zones d'insertion musculaire plus rugueuses. Ceci est particulièrement visible au niveau de l'angle goniaque et du processus coronoïde (Bakke et al., 1990; Bejdová et al., 2013; Shinogaya et al., 2001).

Une perturbation de la fonction musculaire peut être observée avec le vieillissement puisque celui-ci entraîne une diminution du volume musculaire, une tendinification des muscles masticateurs et une modification du contrôle neuro musculaire (Siparsky et al., 2014). Ainsi, la force masticatoire diminue de façon significative avec l'âge (Shinogaya et al., 2001), et ce phénomène paraît à la fois plus précoce et plus marqué chez les individus féminins (Bakke et al., 1990).

D'autre part, nous savons que la perte dentaire s'accroît avec le vieillissement (Ozturk et al., 2013), et que ceci peut également impacter la fonction musculaire lors de la mastication. Les individus édentés partiellement ou totalement génèrent des forces de mastication plus faibles que les dentés complets du fait de la perte des contacts occlusaux (Hatch et al., 2001). Cette réduction de l'activité musculaire peut mener à des changements de conformation de la mandibule, en particulier au niveau des zones d'insertion des muscles masticateurs, à savoir la région goniaque, condylienne et le processus coronoïde (Sella-Tunis et al., 2018). De plus, la perte dentaire induit une résorption au niveau des procès alvéolaires, puisque leur principale fonction est d'apporter un soutien structurel à la dentition (Cawood & Howell, 1988; Enlow et al., 1976). Dans le secteur antérieur mandibulaire, la perte osseuse est verticale et horizontale, selon un déplacement concentrique, tandis que la mandibule postérieure est plutôt soumise à une résorption verticale et la résorption horizontale se fait de façon excentrique (Kuć et al., 2015). Plusieurs auteurs ont affirmé que la dentition est le principal déterminant de la morphologie mandibulaire, pouvant affecter sa taille et sa forme (Chrcanovic et al., 2011; Guevara Perez et al., 2018; Kuć et al., 2015; Ozturk et al., 2013; Parr et al., 2017). Dans notre échantillon, la plupart des changements liés à l'âge se situaient au niveau de la symphyse chez les hommes, plus spécifiquement au niveau de l'étage alvéolaire, tandis que les individus féminins présentaient des variations de conformation plus généralisées.

Nous pouvons émettre l'hypothèse que les changements liés au vieillissement sont essentiellement liés à la perte dentaire chez les hommes, tandis que chez les femmes les effets de l'édentement sont moins flagrants du fait de l'influence d'autres facteurs tels qu'une baisse du niveau d'oestrogènes.

Afin de préciser quelle est la part des changements mandibulaires observés due au vieillissement et quelle est la part due à la perte dentaire nous avons étudié l'impact de l'édentement et de la perte de calages occlusaux au sein de notre échantillon.

2.1 Effet de l'édentement

Il convient de souligner que la composition des groupes utilisés pour l'analyse de l'influence de l'édentement sur le dimorphisme sexuel de la mandibule n'est pas équilibrée, et que le faible effectif du groupe C (édentés complets) constitue la principale limite de cette analyse.

Néanmoins, nous pouvons mettre en avant certaines observations démontrant que l'édentement a une influence aussi bien sur la taille que sur la conformation de la mandibule.

Évolution de la taille mandibulaire avec l'édentement

L'analyse des mesures linéaires et angulaires mandibulaires montre un effet de l'édentement sur les dimensions de la mandibule.

La diminution de la hauteur symphysaire est l'élément le plus palpable. Cette observation est largement retrouvée dans la littérature (Aragão et al., 2014; Guevara Perez et al., 2018; Parr et al., 2017; Vacher, 2004). Elle s'explique essentiellement par la résorption de l'os alvéolaire post-édentement, et, pour certains auteurs, par un remodelage de l'os basal chez l'édenté complet (Enlow et al., 1976). La variation de la hauteur symphysaire est plus marquée chez les individus masculins, ce qui est en accord avec nos observations sur l'effet du vieillissement et les travaux de Cawood et Howell (1988) sur le remodelage alvéolaire post-édentement.

La diminution significative de la hauteur du ramus, plus marquée chez les femmes de notre échantillon, a également été fréquemment décrite dans la littérature (Chrcanovic et al., 2011, 2011; Guevara Perez et al., 2018; Parr et al., 2017; Raustia et al., 1998). Enlow et al. expliquent cette réduction par la résorption du bord postérieur et inférieur du ramus causée par les adaptations physiologiques survenant suite à la perte des zones de support occlusal (1976). L'ostéoporose pourrait expliquer la plus forte diminution de la hauteur ramique observée chez les femmes (Vacher, 2004).

L'augmentation de la distance bigoniale et de l'angle goniaque peut s'expliquer par l'action conjointe des muscles masticateurs et du remodelage osseux mandibulaire survenant suite à l'édentement. En effet, celui-ci va être responsable d'une apposition osseuse vestibulaire et d'une résorption linguale (Enlow et al., 1976; Parr et al., 2017; Vacher, 2004).

Enfin, l'ouverture de l'incisure sigmoïde observée dans notre étude peut être liée à un raccourcissement du processus coronoïde conduisant à une diminution de la profondeur de l'échancrure sigmoïde (Hutchinson et al., 2015). Cette observation n'est pas constante puisque certains auteurs décrivent une fermeture de l'incisure due à l'allongement du processus coronoïde et à l'augmentation de la profondeur de l'échancrure sigmoïde (Enlow et al., 1976). Néanmoins, tous les auteurs semblent s'accorder sur le fait que cette modification est induite par l'action des muscles masticateurs, notamment le muscle temporal dont l'activité est perturbée avec l'édentement (Enlow et al., 1976; Parr et al., 2017).

Évolution de la conformation mandibulaire avec l'édentement

L'édentement semble entraîner une rotation antérieure de la mandibule, largement retrouvée dans la littérature. Elle est l'action conjuguée de l'évolution centrifuge de la résorption osseuse (Cawood & Howell, 1988; Vacher, 2004), de l'antéposition de la cavité glénoïde (Raustia et al., 1998) et de la rotation des condyles mandibulaires (Enlow et al., 1976; Vacher, 2004). Pour certains auteurs, elle est responsable de l'ouverture de l'angle goniaque observée chez les édentés partiels et complets (Enlow et al., 1976; Guevara Perez et al., 2018). Cette rotation semble plus marquée chez la femme que chez les hommes dans notre étude. L'évolution rapide de la résorption osseuse chez la femme (Hüe & Berteretche, 2003; Vacher, 2004) pourrait en être la cause.

L'Analyse en Composantes Principales a permis d'observer un dimorphisme de plus en plus marqué avec l'évolution de l'édentement, en accord avec les observations de Guevara Perez et al. (2018). La superposition des consensus des matrices osseuses des mandibules masculines et féminines et l'étude des variations anatomiques ont permis de constater un impact tridimensionnel de l'édentement sur la conformation mandibulaire, aussi rencontré dans la littérature (Guevara Perez et al., 2018). Les modifications au niveau de la région goniaque, symphysaire et ramique s'accentuent avec le degré d'édentement.

Évolution du dimorphisme sexuel mandibulaire avec l'édentement

L'analyse linéaire discriminante basée sur les mesures métriques montre une diminution de la précision de la diagnose sexuelle avec l'édentement. Ceci s'explique par une plus grande similitude de taille entre individus masculins et féminins liée à la perte dentaire, en particulier chez les édentés complets.

La morphométrie géométrique, en revanche, semble indiquer que le dimorphisme sexuel de conformation s'accroît avec l'édentement. Il est en effet plus important chez les édentés partiels que les dentés, mais le faible effectif du groupe C ne nous permet pas confirmer la tendance. Un échantillon d'individus totalement édentés nous permettrait peut-être de confirmer une augmentation du dimorphisme sexuel chez cette population.

L'importance de l'influence de l'édentement sur la morphologie mandibulaire a été illustrée par Chrcanovic et al. (2011). Pour les auteurs, l'état dentaire a plus d'influence sur l'anatomie mandibulaire que le sexe.

Parmi les modifications de taille et de conformation mandibulaire observées, seule la diminution de la hauteur symphysaire est une conséquence directe de l'édentement. Les autres changements semblent être une conséquence indirecte, liée à la perturbation de la fonction musculaire et aux variations des contraintes musculaires induites par la perte de calage provoquée par l'édentement (Orthlieb et al., 2006).

2.2 Effet de la perte de calage dentaire

Afin d'explorer l'effet de la perte de calage sur la morphologie mandibulaire nous avons procédé à une analyse métrique, volumique et conformationnelle de la mandibule.

Évolution de la taille mandibulaire avec la perte de calage dentaire

La perte d'un ou de plusieurs organes dentaires entraîne une résorption osseuse, essentiellement de l'os alvéolaire, cumulative et irréversible (Hüe & Berteretche, 2003; Vacher, 2004). L'importance de la résorption alvéolaire dépend surtout du nombre de dents perdues et du volume qu'occupaient les racines dentaires (Kingsmill, 1999; Vacher, 2004).

Comme pour l'édentement, nos résultats montrent des modifications de l'étage alvéolaire, en particulier une diminution de la hauteur symphysaire, et des modifications des parties non dentées de la mandibule avec la perte de calage dentaire. Ces altérations (ouverture de l'angle goniaque et de l'incisure mandibulaire, diminution de la hauteur ramique, augmentation de la distance bigoniale et bicondylienne) sont en accord avec la littérature (Chrcanovic et al., 2011; Guevara Perez et al., 2018;

Merrot et al., 2005; Parr et al., 2017). Pour Parr et al. (2017), la perte de calage dentaire a plus d'influence que le vieillissement sur les variations dimensionnelles observées à la mandibule, en particulier au niveau symphysaire.

Notre analyse révèle par ailleurs que l'impact de la perte de calage dentaire diffère en fonction du sexe et des mensurations étudiées. On constate une diminution de la hauteur ramique et une ouverture de l'échancrure sigmoïde plus marquée chez les hommes. Ces résultats diffèrent de ceux de Parr et al. (2017) et Guevara Perez et al. (2018), qui rapportent une résorption osseuse plus précoce et plus marquée chez la femme et pour qui cette différence s'explique par la fréquence de l'ostéoporose chez la femme ménopausée.

Concernant le volume mandibulaire, nous constatons une réduction du volume mandibulaire aussi bien chez les hommes (4 à 15%) que chez les femmes (5 à 11%) en fonction de l'ampleur de la perte de calage dentaire.

De plus, l'évolution du volume mandibulaire en fonction de l'âge montre une variation plus précoce chez l'homme (autour de 55 ans) que chez la femme (autour de 65 ans). Ceci pourrait être expliqué par une perte dentaire plus précoce chez les individus masculins.

Évolution de la conformation mandibulaire avec la perte de calage dentaire

L'étude des variations de conformation des trois groupes d'indice d'Eichner a permis d'observer également un impact de la perte de calage dentaire au niveau alvéolaire et basal. Les modifications observées sont semblables à celles de l'édentement, avec une rotation antérieure de la mandibule et des variations morphologiques au niveau des zones d'insertion des muscles masticateurs : angle goniaque, condyle et coroné.

Ces observations prouvent encore une fois l'action indirecte de l'édentement sur le remodelage osseux mandibulaire. En effet, l'édentement mais surtout la perte des zones de support occlusal postérieures entraînent une perturbation musculo-articulaire de l'appareil manducateur. La diminution des contacts occlusaux induit une baisse de l'activité des muscles masticateurs, notamment du masséter, du temporal et du ptérygoïdien médial (Newton et al., 1993; Yamaguchi et al., 2020) ayant pour conséquence un déséquilibre entre les muscles abaisseurs et éléveurs de la mandibule en faveur des muscles abaisseurs (Tozoğlu & Cakur, 2014). Cette hypoactivité musculaire diminue l'activation des ostéocytes, ce qui entraîne une diminution de la masse et de la densité osseuses (Inoue et al., 2019),

ainsi que des changements morphologiques conduisant à un déplacement et une diminution de la surface d'attache musculaire (Enlow et al., 1976).

Bien que le vieillissement soit responsable d'une résorption osseuse d'origine hormonale et d'une diminution de la force de mastication, divers auteurs soutiennent que la perte de calage dentaire représente le facteur déterminant de la morphologie mandibulaire (Chrcanovic et al., 2011; Ozturk et al., 2013). Pour Ozturk et al. (2013) la résorption mandibulaire observée avec le vieillissement est due à la perte dentaire et à la perte de la fonction masticatoire qui en résulte. Yamaguchi et al. (2018) ont quant à eux constaté que la perte dentaire joue un rôle plus important que le vieillissement sur la force musculaire du muscle masséter, et donc la forme mandibulaire, en particulier pour les individus féminins (Yamaguchi et al., 2018, 2020).

Évolution du dimorphisme sexuel mandibulaire avec la perte de calage dentaire

L'impact de la perte de calage dentaire sur le dimorphisme sexuel mandibulaire, en particulier à travers son volume et sa conformation, n'a pas été explorée dans la littérature à notre connaissance.

Les résultats de notre analyse nous permettent de dégager deux principaux effets de la perte de calage dentaire.

- Le dimorphisme sexuel de taille tend à s'estomper avec la perte de calage dentaire

L'analyse métrique et volumique montre que le dimorphisme sexuel de taille demeure significatif au sein des trois indices d'Eichner. La seule mesure linéaire non dimorphique au sein de l'indice d'Eichner B et C était la mesure sous influence directe de l'édentement (hauteur symphysaire).

Néanmoins l'amplitude du dimorphisme sexuel mandibulaire diminue avec le degré de perte de calage dentaire. Le taux de prédiction sexuelle correcte à partir des mesures métriques diminue ainsi de 89,2 à 73,3%, voire 61,2% chez les hommes édentés complets. De façon similaire, la précision de la diagnose à partir du volume mandibulaire ne dépasse pas 60% pour le groupe C. Plusieurs études ont observé cet effacement du dimorphisme sexuel mandibulaire avec la perte dentaire (Guevara Perez et al., 2018; Hutchinson et al., 2015; Merrot et al., 2005; Parr et al., 2017). Dans un souci de simplifier le modèle de régression et de rendre plus applicable les équations pour l'estimation sexuelle en sciences médico-légales, nous avons choisi de les construire à partir des trois mesures les plus dimorphiques dans les trois groupes d'indice d'Eichner. La précision d'estimation sexuelle est légèrement plus élevée.

Ceci implique que l'estimation sexuelle à partir de la taille d'une mandibule totalement édentée est moins précise et ne doit pas reposer sur des fonctions discriminantes établies à partir de mandibules dentées.

Une explication possible de cette diminution du dimorphisme sexuel de taille est que la perte de calage dentaire induit des modifications dimensionnelles plus marquées chez les individus masculins.

En effet, l'indice d'Eichner étant corrélé à l'âge et au volume mandibulaire, et la résorption osseuse consécutive à l'édentement étant progressive, cumulative et irréversible, la perte dentaire précoce chez les hommes dans notre échantillon peut entraîner des modifications plus accentuées chez ces derniers, les rapprochant de la taille moyenne féminine.

- Le dimorphisme sexuel de conformation tend à s'accentuer avec la perte de calage dentaire

Dans notre échantillon, nous avons noté un taux de précision d'estimation sexuelle croissant avec la gravité de la perte de calage dentaire à partir de l'analyse de la conformation mandibulaire, bien que le dimorphisme ne soit pas significatif au sein de l'indice d'Eichner C.

Le dimorphisme sexuel de conformation est particulièrement marqué au niveau de la région goniaque et du ramus. Chrcanovic et al. (2011) ont suggéré que des muscles plus volumineux et le maintien d'une force masticatoire plus élevée chez les hommes avec le vieillissement du fait d'un taux de testostérone plus élevé pourrait expliquer les différences de conformation mandibulaire observées entre les sexes.

Par ailleurs, la conformation des mandibules féminines et masculines évolue différemment sous l'effet la perte des zones de support occlusal, et nos résultats suggèrent l'existence d'une différence de la cinétique d'édentement entre les hommes et les femmes, les hommes étant touchés plus précocement.

Bien que nos résultats confirment un effet indiscutable de l'édentement sur la morphologie et le dimorphisme sexuel mandibulaires, le développement dentaire adulte ne semble pas jouer de rôle prépondérant dans l'établissement de ce dimorphisme sexuel.

La mise en place et l'évolution du dimorphisme sexuel de conformation de la mandibule depuis la vie fœtale jusqu'à l'âge adulte a été bien documentée. Les travaux de Coquerelle et al. ont montré qu'un dimorphisme de conformation est observé depuis la vie fœtale jusqu'à 4 ans, puis s'atténue entre 4 et 14 ans, avant de réapparaître à l'âge adulte au moment où presque toutes les dents ont fini leur mise en place sur l'arcade (Coquerelle et al., 2011). Pour les auteurs, le développement dentaire n'a pas d'influence sur la morphologie mandibulaire hormis lors de la mise en place de la denture temporaire (Coquerelle et al., 2010). La croissance et la forme de la mandibule seraient plutôt sous l'influence de facteurs fonctionnels tels que la mastication et la phonation, qui ont une action sur les muscles manducateurs (Coquerelle et al., 2010). Un argument en faveur de cette théorie a été apporté par Sarnat et al., qui ont constaté la présence d'un dimorphisme sexuel chez les patients anodontes. Le jeu des muscles oro-faciaux est, selon les auteurs, à l'origine des différences observées entre les sexes (Sarnat et al., 1953).

Limites de l'étude

La première partie de notre étude avait pour objectif d'estimer l'âge marquant le début des changements morphologiques mandibulaires. Bien que ces derniers étaient clairement visibles avec le vieillissement, nous n'avons pas pu déterminer avec précision l'âge signant le début du processus de sénescence. Ceci pourrait être dû au fait que le nombre de sujets étudiés n'était pas suffisamment élevé. Puisque les variations de conformation paraissent significatives entre 50 et 70 ans, il serait nécessaire de constituer un plus grand échantillon d'individus âgés de 50 à 70 ans afin d'affiner ces résultats. Un autre élément constituant une limite à l'étude du vieillissement mandibulaire est le fait que notre échantillon soit limité à des individus âgés de 79 ans. Dans l'hypothèse que le processus de vieillissement s'installe plus tardivement chez les hommes, la totalité des changements conformationnels qui y sont associés ne peut être cernée par notre échantillon.

Pour ce qui est de l'étude de la perte de calage dentaire, il convient de souligner la composition inhomogène des groupes d'édentement. De plus, l'ancienneté de l'édentement et la notion de port d'une prothèse amovible n'étaient pas connues pour la population étudiée. Or nous savons que l'ancienneté de l'édentement est liée à la résorption alvéolaire : sa vitesse est plus importante dans les stades les plus précoce suite à la perte dentaire, puis ralentit au cours du temps (Xie & Ainamo,

2004). D'autre part, bien que le port d'une restauration prothétique amovible n'empêche pas la résorption de la crête résiduelle (Knezović Zlatarić et al., 2002; Tallgren, 1972), il permet le maintien d'un certain potentiel de mastication, ce qui limite la résorption osseuse (AlSheikh et al., 2019; Kumar, 2014).

Enfin, outre l'âge, le sexe et la perte dentaire, une multitude d'autres facteurs peuvent influer sur la force musculaire et donc sur la morphologie mandibulaire : l'état parodontal, des pathologies de l'articulation temporo-mandibulaire, l'alimentation, la génétique ainsi que des facteurs hormonaux et métaboliques (Kingsmill, 1999; Koc et al., 2010) non pris en compte ici.

D'un point de vue méthodologique, bien que la morphométrie géométrique présente des avantages incontestables par rapport aux méthodes d'estimation sexuelles traditionnelles, elle n'en présente pas moins quelques limites :

- la reproductibilité du positionnement des landmarks. En effet, ces derniers sont positionnés manuellement par des experts, ce qui peut poser des problèmes de variabilité intra et inter observateur,
- le nombre limité de landmarks présentant une forte homologie (type I et type II) qu'il est possible de positionner sur un objet. Même en ayant recours à des semi-landmarks, cette méthode ne permet pas une analyse exhaustive de l'ensemble de la surface d'un objet.

Une solution à ces problématiques serait l'automatisation du positionnement et du recueil des landmarks et le développement de méthodes permettant d'extraire l'ensemble des données de surface des structures anatomiques telles que les méthodes de recalage par difféomorphisme (Braga et al., 2019) afin d'aller plus loin que l'étude d'un ensemble fini de points.

SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

I) SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

La connaissance du processus de sénescence de la face est essentielle afin d'estimer correctement le sexe d'un individu et prédire les changements de conformation liés à l'âge. Ceci peut être particulièrement intéressant dans les domaines de la reconstruction et reconnaissance faciale en anthropologie et en médecine légale.

L'objectif de notre travail était de définir la place de la mandibule dans la diagnose sexuelle de l'extrémité céphalique ainsi que l'influence du vieillissement sur la morphologie et le dimorphisme sexuel mandibulaires.

Nous avons fait le choix d'avoir recours à la morphométrie géométrique et à une base de données d'examens tomodensitométriques puisqu'elles présentent de nombreux avantages dans l'étude du vieillissement du squelette facial et de son dimorphisme sexuel. La GMM permet d'étudier spécifiquement des variations de conformation et d'apprécier des changements complexes tridimensionnels des structures osseuses au fil du temps (Mendelson & Wong, 2012). Il est possible d'employer les mêmes landmarks que ceux utilisés dans les méthodes archéologiques et anthropométriques classiques, ce qui permet d'établir des comparaisons avec des résultats publiés précédemment et des normes existantes. De plus, les examens tomodensitométriques et les données 3D extraites des landmarks rendent possible la création de bases de données et de standards virtuels faciaux à la fois pour le squelette facial et pour les tissus mous sus-jacents.

Nos résultats nous ont permis de présenter les conclusions suivantes :

Au sein de notre échantillon, composé d'une population du Sud la France :

- *le crâne présente le meilleur taux de prédition sexuelle*
- *la mandibule n'augmente pas la précision de l'estimation sexuelle de l'extrémité céphalique*
- *la précision de la diagnose sexuelle à partir de la mandibule augmente à partir de 40 ans lorsque des méthodes métriques sont utilisées*
- *les méthodes morphogéométriques présentent une précision supérieure aux méthodes métriques pour l'estimation sexuelle à partir de l'extrémité céphalique*

Le vieillissement, l'édentement et la perte de calage dentaire conduisent à :

- *une diminution de la hauteur symphysaire et de la hauteur ramique*
- *une augmentation de la largeur bicondylienne et de la largeur bigoniale*
- *une ouverture de l'angle de l'incisure mandibulaire*
- *une rotation antérieure de la mandibule*

Le vieillissement :

- *a peu d'effet sur le volume mandibulaire*
- *induit des variations de la conformation mandibulaire plus marquées chez les femmes*
- *entraîne un rapprochement de la conformation moyenne mandibulaire des individus féminins et masculins par une masculinisation des femmes*

La perte dentaire :

- *induit une diminution du volume et des dimensions mandibulaires*
- *semble avoir plus d'impact que le vieillissement sur la morphologie mandibulaire*
- *est responsable de variations de taille plus marquées chez les hommes*

Ces changements morphologiques ont un impact direct sur le dimorphisme sexuel mandibulaire et les méthodes d'estimation sexuelle :

- *Le dimorphisme sexuel de taille diminue avec l'édentement et la perte des contacts occlusaux*
- *Le dimorphisme sexuel de conformation augmente avec l'édentement et la perte des contacts occlusaux*
- *La précision des méthodes d'estimation sexuelle basées sur des données métriques diminue avec l'édentement et la perte des contacts occlusaux*
- *La précision des méthodes d'estimation sexuelle basées sur la morphométrie géométrique demeure élevée avec le vieillissement, l'édentement et la perte des contacts occlusaux*

Ceci nous amène à conclure que la diagnose sexuelle chez l'individu âgé et en particulier chez le sujet édenté doit reposer sur une analyse de la conformation plutôt que sur une analyse de la taille mandibulaire.

II) PERSPECTIVES

1. Applications en anthropologie et médecine légale

1.1 Vers une unification des méthodes d'estimation sexuelle ?

La morphométrie géométrique a révolutionné la façon d'appréhender le dimorphisme sexuel osseux de l'extrémité céphalique en permettant l'analyse de différences de taille et de conformation de façon objective et standardisée et une précision supérieure aux méthodes traditionnelles dans le cadre de la diagnose sexuelle. Néanmoins, bien que les premières études morphométriques sur le dimorphisme sexuel crânien et mandibulaire aient été décrites il y a près de 20 ans (Rosas & Bastir, 2002; Schmittbuhl et al., 2001), un grand nombre de publications récentes ont encore exclusivement recours à des méthodes semi-quantitatives (Garvin & Ruff, 2012; Krüger et al., 2015) ou métriques (Cappella et al., 2020; Lopez-Capp et al., 2018; Tunis et al., 2017; Zheng et al., 2018). De plus, le recueil des données paraît encore très hétérogène, certains auteurs s'appuyant sur des collections ostéologiques anciennes et modernes (Cappella et al., 2020; Krüger et al., 2015; Lopez-Capp et al., 2018; Oikonomopoulou et al., 2017), d'autres sur des examens tridimensionnels d'individus contemporains tels que des scanners (Tunis et al., 2017; Zaafrane et al., 2018) ou des CBCT (Dong et al., 2015; Zheng et al., 2018).

Un des objectifs les plus répandus des études actuelles portant sur le dimorphisme sexuel de l'extrémité céphalique est l'établissement de standards spécifiques à une population (Cappella et al., 2020) ou la validation d'une méthode d'estimation sexuelle développée pour une autre population (Garvin & Ruff, 2012).

Quels standards pour l'estimation sexuelle des populations contemporaines ?

Le dimorphisme sexuel pelvien est le résultat de forces évolutives communes à l'ensemble des populations, ce qui explique que le bassin présente un bon pouvoir discriminant indépendamment de la population étudiée (Oikonomopoulou et al., 2017). La nature du dimorphisme sexuel de l'extrémité céphalique, en revanche, est fortement dépendante de facteurs génétiques et environnementaux et varie en fonction de l'appartenance ethnique et géographique d'un individu (Cappella et al., 2020).

En effet, les notions de stature, robustesse et gracilité entre individus masculins et féminins sont spécifiques à chaque population, conduisant à une grande variabilité du dimorphisme sexuel de taille crânien et mandibulaire (Bigoni et al., 2010; Franklin, O'Higgins, et al., 2007; Kimmerle et al., 2008). Cette variabilité inter-populationnelle se reflète également dans la morphologie mandibulaire (Bejdová et al., 2013), en particulier au niveau mentonnier (Garvin & Ruff, 2012) et ramique (Loth & Henneberg, 1996). Ainsi, certaines populations telles que les populations d'Asie du Sud-Est (Green & Curnoe, 2009; Nidugala et al., 2013) ou du Proche Orient (Mustafa et al., 2019) semblent présenter un dimorphisme sexuel crânien moins marqué, tandis que le dimorphisme sexuel mandibulaire est extrêmement présent au sein des populations indigènes sud-africaines par exemple (Franklin et al., 2007). Pour Walker (2008), les populations présentant un degré de robustesse global plus important sont celles où le dimorphisme sexuel est moins marqué.

Ces différences peuvent être objectivées par l'étude individuelle de certains critères métriques. En effet, il est fréquent d'observer, pour une population donnée, un caractère extrêmement discriminant : c'est le cas de la distance glabelle_zygion pour la population australienne, permettant de classer correctement les individus dans 88% des cas (Franklin et al., 2012) et de la distance bizygomatique pour les populations indienne et thaïlandaise, permettant un pourcentage de discrimination correcte de 82,2 à 84,3% (Mahakkanukrauh et al., 2015; Saini & Saini, 2016). La distance bigoniale représente un bon exemple de la disparité observée entre les populations : elle offre une précision de 79% pour une population brésilienne (Lopez-Capp et al., 2018), de 74% pour une population chinoise (Dong et al., 2015) et sud-africaine noire (Franklin et al., 2008) mais seulement de 59% pour une population italienne (Cappella et al., 2020). De plus, même si certains paramètres semblent peu impactés par la variabilité ethnique, leur poids dans les équations de prédiction peut changer d'une population à l'autre, ce qui souligne à nouveau la difficulté à appliquer les mêmes formules d'estimation sexuelle à des populations distinctes (Cappella et al., 2020, Zaafrane et al., 2018).

Fort de ce constat, une multitude d'études ont été menées afin d'établir des équations d'estimation sexuelle spécifiques à chaque population. Il est ainsi possible de trouver dans la littérature des méthodes adaptées à la population Sud-Africaine (Dayal et al., 2008; Franklin et al., 2005; Franklin, O'Higgins, et al., 2007; Steyn & İşcan, 1998), Nord-Américaine (Abdel Fatah et al., 2014; Giles, 1964), canadienne (Rogers, 2005), australienne (Franklin et al., 2012), japonaise (İşcan et al., 1995), coréenne (Hu et al., 2006), thaïlandaise (Mahakkanukrauh et al., 2015; Sinhubua et al., 2017), malaysienne (Alias et al., 2018), chinoise (Dong et al., 2015 ; Zheng et al., 2018), indienne (Nidugala et al., 2013; Saini & Saini, 2016; Vinay et al., 2013), jordanienne (Mustafa et al., 2019), israélienne (Tunis et al., 2017), polonaise (Tomaszewska et al., 2014), roumaine (Marinescu et al., 2013), grecque (Nikita &

Michopoulou, 2018; Oikonomopoulou et al., 2017), italienne (Cappella et al., 2020), portugaise (Rosas & Bastir, 2002), tunisienne (Zaafrane et al., 2018), égyptienne (Kharoshah et al., 2010) ou encore brésilienne (Toledo Avelar et al., 2017 ; Lopez-Capp et al., 2018).

Néanmoins, ces standards nationaux présentent un inconvénient majeur car bien que l'on considère que les ressortissants d'un état constituent une même population, l'origine biogéographique des individus qui la composent n'est pas connue, et d'importantes différences morphologiques peuvent exister au sein de la population.

Franklin et al (2005) ont conduit une analyse métrique de trois populations indigènes Sud-africaines et ont constaté une variabilité dans l'expression du dimorphisme sexuel entre ces trois populations, malgré leur proximité géographique. De façon similaire, Carvalho et al. (2013) ont appliqué une méthode métrique d'estimation sexuelle établie sur une population du Nord du Brésil (Oliveira et al., 1995) à une population du Sud du pays. La méthode s'est avérée particulièrement discriminante pour les femmes (100% de classement correct) mais inexploitable pour les individus masculins (11% de classement correct) illustrant, encore une fois, l'importance des différences morphologiques pouvant être observées entre deux populations géographiquement proches (Carvalho et al., 2013).

Par ailleurs, outre le fait que les méthodes qualitatives et métriques traditionnelles soient difficilement extrapolables à d'autres populations, une de leurs principales limitations est le fait qu'elles sont fréquemment basées sur des collections ostéologiques anciennes (Franklin et al., 2008; Krüger et al., 2015; Rogers, 2005; Walker, 2008). Or du fait de l'évolution séculaire de la taille et de la morphologie des individus (Jantz & Meadows Jantz, 2000), on peut supposer que les méthodes de diagnose sexuelle développées à partir de collections ostéologiques de la fin du XIX^e et début du XX^e siècle ne peuvent garantir la même précision de résultats lorsqu'elles sont appliquées pour l'indentification de restes humains issus de populations modernes (Bejdová et al., 2018). Même des collection ostéologiques du début du XX^e siècle ne sont plus considérées comme suffisamment fiables pour l'identification des populations contemporaines (Bigoni et al., 2010; İşcan et al., 1995).

Deux études constituent un exemple parlant de ces difficultés :

◆ Williams et Rogers (2006) ont appliqué la méthode qualitative définie par Rogers en 1991 pour étudier une population européenne contemporaine (Rogers, 1991). Ils ont obtenu des taux d'estimation sexuelle variant de 60 à 100% pour les individus masculins et de 24 à 96% pour les individus féminins. L'observateur étant le même entre les deux études, l'amplitude de ces variations

intra et inter sexe peut s'expliquer par le fait que la méthode a été développée à partir d'une autre population (population canadienne) provenant d'une époque plus ancienne (XIX^e siècle).

◆ Krüger et al., en 2015, ont appliqué la méthode de Walker (2008) pour la classification de crânes et mandibules d'une population Sud-africaine moderne. Cette méthode semi-quantitative, initialement établie à partir d'une population Britannique du XVIII^e siècle et d'une population Nord-américaine du XIX^e siècle, était très peu performante pour la discrimination sexuelle des femmes blanches de la population étudiée, avec une précision de 31 à 62%. Lorsque les équations discriminantes ont été adaptées à la population étudiée, la précision de l'estimation est montée à 93%.

Enfin, à l'heure actuelle, l'accroissement des flux de population entre pays et continents a créé une forte mixité ethnique et hétérogénéité populationnelle au sein de la majorité des sociétés (Bigoni et al., 2010; Tunis et al., 2017). Il est ainsi difficile, dans nos sociétés modernes, d'établir avec certitude l'affinité populationnelle d'un individu. Ceci complexifie l'établissement et l'application de standards nationaux pour l'estimation sexuelle (Bigoni et al., 2010).

Le processus de mondialisation et les déplacements de population qu'il a engendrés montrent la nécessité d'établir de nouvelles approches et de nouveaux standards pour l'estimation du sexe. Une des pistes pourrait être d'utiliser des méthodes morphométriques modernes pour identifier des traits morphologiques mandibulaires constants entre les populations.

Deux solutions pourraient être envisagées :

- la constitution d'un échantillon mandibulaire embrassant toute la variabilité mondiale, qui semble difficilement réalisable,
- ou le développement de standards régionaux, qui ne correspondraient pas à des populations dans le sens médico-légal du terme, mais qui regrouperaient des individus présentant la même origine biogéographique.

Enfin, plutôt que d'avoir recours à des collections ostéologiques, l'utilisation de bases de données tomodensitométriques pratiquées à des fins médicales (CT-scan ou CBCT) semble une alternative particulièrement intéressante. En effet, du fait de l'abondance des données disponibles, il est possible de constituer des échantillons de grande taille à partir d'individus contemporains.

La problématique des crânes fragmentés

Une autre difficulté à laquelle peuvent se heurter le paléoanthropologue ou le médecin légiste est la détérioration squelettique. Plusieurs situations peuvent conduire à la fragmentation d'un squelette ou à l'endommagement de pièces osseuses : le contexte de la mort, notamment en cas de mort violente (accident, homicide, guerre, catastrophe de masse), et l'exposition du cadavre à divers facteurs environnementaux au cours du processus de décomposition (température, eau, pH). Face à un squelette crânio-facial fragmenté, l'estimation sexuelle reposera sur l'analyse des zones ayant conservé leur intégrité. Ainsi, des méthodes d'estimation sexuelle ont été développées à partir de zones anatomiques précises telles que la base du crâne (Amores-Ampuero, 2017; İlgüy et al., 2014), le palais (Sinthubua et al., 2017; Tomaszewska et al., 2014) ou encore le sinus maxillaire (Radulesco et al., 2018).

En cas de fragmentation de la mandibule, une estimation du sexe par des méthodes métriques peut également être envisagée. La précision des équations de prédiction varie entre 79,6% et 85,6% pour une hémi-mandibule, 75,1% et 82,1% pour le ramus, 72,9% pour un fragment du corps mandibulaire et 63,6% pour la symphyse seule (Franklin et al., 2008; Saini et al., 2011; Tunis et al., 2017).

Le ramus semble être la région la plus intéressante pour la diagnose sexuelle en cas de dégradation mandibulaire. Le dimorphisme observé peut s'expliquer par le fait que les muscles masticateurs s'y insérant ont plus d'impact sur la morphologie mandibulaire que les muscles symphysaires. En effet, les muscles masséter, temporal et ptérygoïden médial sont les muscles les plus puissants de l'extrémité céphalique et ils possèdent tous des insertions au niveau du ramus mandibulaire, du condyle et du processus coronoïde. Les muscles de la région symphysaire (muscle mentonnier et orbiculaire) sont quant à eux des muscles auxiliaires de la mastication, présentant une force musculaire moindre (Franklin et al., 2007).

Une des limites des méthodes de mesure linéaires traditionnelles est qu'elles peuvent être difficiles à appliquer à des crânes et mandibules incomplets puisque l'absence de certains éléments osseux rend impossible la prise en compte de l'ensemble des traits dimorphiques. Ceci est particulièrement problématique lorsque le dimorphisme sexuel est peu marqué au sein d'une population, puisqu'un plus grand nombre de variables est nécessaire pour obtenir une équation d'estimation sexuelle fiable (Cappella et al., 2020). Les équations de prédiction sexuelle qui en découlent présentent par conséquent une précision plus faible, très souvent inférieure à 80% (Franklin et al., 2008 ; Sinthubua et al., 2017 ; Zaafrane et al. 2018).

La morphométrie géométrique apparaît alors comme une alternative intéressante pour l'analyse d'ossements fragmentés. En effet, avec des méthodes de GMM, les différences de forme de structures complexes peuvent être objectivées, permettant d'atteindre un degré de précision élevé même si les structures crâno-faciales ne peuvent être analysées dans leur ensemble. À titre d'exemple, il a été démontré que la GMM permet d'identifier le sexe d'un individu dans 91 à 100% des cas à partir du seul étage supérieur de la face (Bejdová et al., 2013; Bigoni et al., 2010). On peut donc imaginer, qu'à l'avenir, la morphométrie géométrique soit mise au profit de l'estimation sexuelle de crânes et mandibules incomplètes.

1.2 Vers une optimisation des méthodes de reconstruction faciale

La connaissance des mécanismes affectant la morphologie des structures osseuses faciales, tels que le vieillissement ou l'édentement, peut constituer une aide précieuse pour le perfectionnement des techniques d'identification et de reconstruction faciale en médecine légale et en anthropologie.

Les données ante-mortem d'une victime ne sont pas toujours accessibles aux enquêteurs, ce qui rend impossible une identification comparative de l'individu. Dans ces situations, l'identification sera reconstructive et pourra reposer sur diverses techniques telles la superposition faciale, la restauration faciale et la reconstruction faciale proprement dite. L'objectif des procédés de restauration et reconstruction faciale est de produire une image acceptable du visage de l'individu à identifier en vue de la diffuser et permettre ainsi sa reconnaissance par des proches ou des témoins.

Dans le cadre de la superposition faciale, une photographie, portrait ou vidéo de la victime est superposée aux photographies du crâne inconnu à identifier. La restauration faciale, elle, consiste à restaurer l'apparence supposée du visage par des techniques chirurgicales ou thanatopraxiques. Elle n'est en revanche applicable qu'aux situations où il reste suffisamment de tissus mous sur le crâne de la victime pour restaurer son visage.

La reconstruction faciale est employée lorsque le crâne est squelettisé, donc en l'absence de tissus mous. Traditionnellement, les méthodes de reconstruction faciale avaient recours à diverses techniques graphiques ou plastiques permettant de recomposer et retrouver les caractères généraux du visage à partir d'une étude anthropologique crânofaciale, à l'interface de la science et de l'art (Kundu et al., 2021). Puis l'avènement de l'imagerie et des méthodes morphométriques ont permis le

développement de techniques informatiques de reconstruction 3D permettant un gain de temps et une réduction de la subjectivité. Ces méthodes s'appuient sur l'idée que le crâne constitue le support du visage et de l'enveloppe cutanée, et qu'il est possible d'inférer la morphologie des tissus mous à partir de l'anatomie du squelette facial, et de produire ainsi un visage reconstruit s'approchant de la réalité.

Les reconstructions faciales tridimensionnelles informatisées peuvent reposer sur la morphométrie, la déformation volumique ou « morphing » et la morphologie et anatomie. Le principe général est similaire : une estimation anthropologique du crâne à identifier est réalisée, puis le crâne est numérisé en utilisant l'une des modalités d'acquisition d'imagerie médicale (scanner, CBCT ou IRM).

À partir de l'image tridimensionnelle numérisée du crâne, des points anthropologiques vont être définis à sa surface, et le logiciel va apparter ces points avec des marqueurs virtuels représentant les épaisseurs tissulaires correspondant aux muscles et à la peau. Un modèle générique facial pourra alors être déformé et ajusté afin de le faire coïncider l'enveloppe cutanée avec les reliefs osseux crâniens. On obtient ainsi un visage candidat pour la victime (**Figure 38**) (Claes et al., 2010; Kähler et al., 2003).

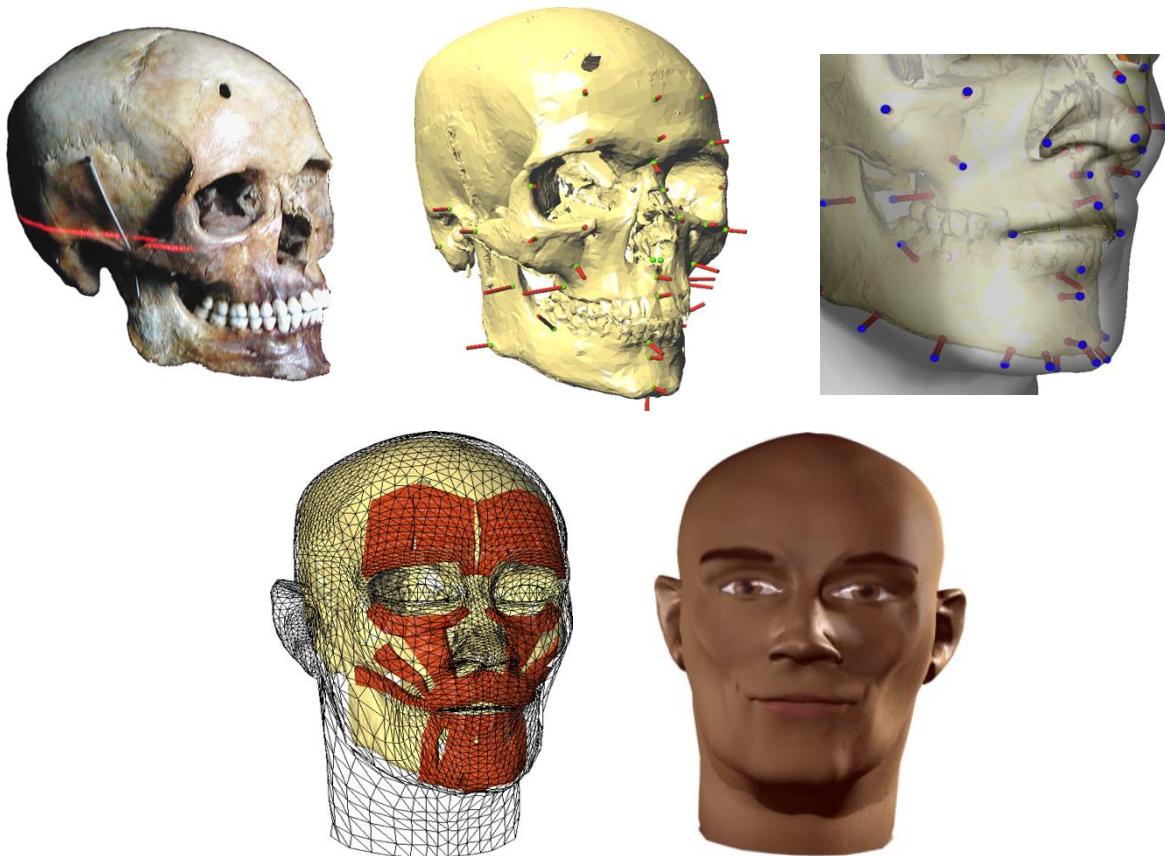


Figure 38 Exemple de reconstruction faciale à partir d'un crâne sec. De gauche à droite : *le crâne est scanné, des landmarks sont positionnés sur la surface osseuse, les landmarks osseux sont ajustés aux landmarks cutanés d'un modèle facial générique. En bas à gauche : simulation des structures musculaires faciales d'après l'enveloppe osseuse ; à droite : création d'une enveloppe cutanée ajustée au profil osseux et au profil musculaire modélisé (Kähler et al., 2013)*

Une des difficultés de la reconstruction faciale est l'identification de sujets disparus depuis longtemps (Albert et al., 2007).

Bien que les changements du profil des tissus mous faciaux aient été bien documentés dans l'enfance et l'adolescence (Blanchette et al., 1996; Ferrario et al., 1998, 1999; Kesterke et al., 2016), les variations des tissus mous avec l'âge ne sont pas encore connues avec précision. Néanmoins, il semblerait que l'aspect extérieur du visage se modifie avec le temps (Velemínská et al., 2018) et que le vieillissement squelettique a un impact direct sur l'enveloppe cutanée (Coleman & Grover, 2006; Guyomarc'h et al., 2014; Mydlová et al., 2015). Par ailleurs, la perte dentaire joue sur la musculature péri-orale et sur le profil de l'étage moyen et inférieur de la face (Bartlett et al., 1992).

Plusieurs études ont confirmé le lien étroit existant entre la forme des tissus mous de la face et celle de l'os sous-jacent (Halazonetis, 2007; Zedníková Malá et al., 2018). Actuellement, le développement de la morphométrie géométrique 3D et des bases de données d'examens tomodensitométriques permettent de développer et tester des méthodes d'approximation faciale assistées par ordinateur à plus grande échelle. En effet, ces examens sont capables d'enregistrer à la fois la morphologie des tissus durs et des tissus mous, permettant la création de standards virtuels faciaux à la fois pour le squelette facial et pour l'enveloppe cutanée (Guyomarc'h et al., 2014; Lee et al., 2012; Short et al., 2014). Ces techniques s'étendent non seulement à l'identification médico-légale mais également à la reconstruction faciale dans des contextes archéologiques (Abate et al., 2004).

Ainsi, l'étude de l'effet de l'âge et de la perte dentaire pourrait permettre une prédiction exacte des changements de conformation osseux et rendre possible une estimation de la forme des tissus mous de la face, ce qui améliorerait les processus de vieillissement par ordinateur et l'élaboration de portraits robots (Albert et al., 2007).

De plus, la connaissance du processus de sénescence de la face est essentielle afin d'estimer correctement le sexe d'un individu. Le dimorphisme sexuel de l'enveloppe cutanée faciale a été exploré par des méthodes faciométriques (Anić-Milosević et al., 2009; Tanikawa et al., 2016; Velemínská et al., 2012) et, comme les structures osseuses sous-jacentes, il semble être impacté par le vieillissement. Robertson et Kingsley ont constaté une diminution du dimorphisme sexuel facial, tandis que Mydlová et al. (2015) ont, au contraire, observé une accentuation de celui-ci avec le vieillissement. Quant à Windhager et al., ils ont remarqué une divergence dans la trajectoire de vieillissement facial entre les hommes et les femmes à partir de 50 ans, soit à partir de la ménopause (Windhager et al., 2019). Actuellement, le lien entre dimorphisme sexuel osseux et dimorphisme sexuel cutané est encore peu connu et mérite d'être exploré.

2. Applications chirurgicales

La caractérisation de la morphologie mandibulaire est fondamentale en orthodontie, chirurgie maxillo-faciale et chirurgie orale pour la compréhension de la croissance, des dysmorphoses faciales, du processus de vieillissement et des traitements associés.

Chirurgie plastique et esthétique

Dans le domaine de la chirurgie plastique et esthétique, la connaissance des effets du vieillissement et de la perte dentaire sur le squelette osseux, la musculature et l'enveloppe cutanée faciales vont permettre d'améliorer les techniques de rajeunissement et de proposer une approche esthétique prédictive (Coleman & Grover, 2006; Mendelson & Wong, 2012; Shaw et al., 2011). L'étude de l'évolution du dimorphisme sexuel avec l'âge est cruciale afin de pouvoir adapter la technique à l'évolution de chaque sexe.

Un autre domaine nécessitant une compréhension du dimorphisme sexuel existant au niveau de la mandibule est la chirurgie de féminisation ou masculinisation de la face dans le cadre de la réassignation sexuelle. La réalisation de cette chirurgie implique une connaissance des différences morphologiques de taille et de conformation entre les sexes, aussi bien au niveau osseux qu'au niveau des tissus mous.

La chirurgie de féminisation est celle qui est le plus souvent pratiquée et elle concerne fréquemment l'étage inférieur de la face (Hohman & Teixeira, 2021). En effet, il est admis qu'une part importante de l'attraction d'un visage féminin est liée à la morphologie de la mandibule. Un menton petit, légèrement proéminent, et un angle goniaque peu fermé sont considérés comme des caractéristiques attrayantes pour les individus féminins (Valenzano et al., 2006). Les régions mentonnière et goniaque figurent parmi les régions mandibulaires présentant un dimorphisme sexuel marqué et sont les sites faisant le plus souvent l'objet d'un geste chirurgical de par leur accessibilité (Altman, 2012). Les interventions les plus souvent pratiquées sont la génioplastie de réduction et la correction des angles, notamment de leur éversion (**Figure 39**) (Morrison et al., 2016). Ce type d'intervention a un retentissement sur les tissus mous : non seulement la peau mais également les muscles masticateurs et le tissu adipeux, ce qui conditionne le rendu esthétique de ces interventions.

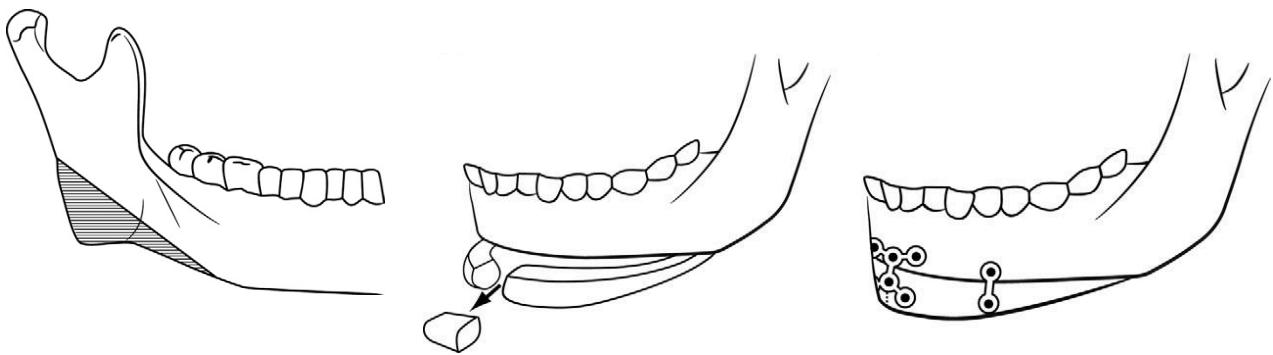


Figure 39 Chirurgie de féminisation mandibulaire. À gauche : shaving et résection de l'angle mandibulaire. Au centre et à droite : diminution de la largeur mentonnière par génioplastie de réduction (Altman, 2012).

La morphométrie géométrique est un outil particulièrement intéressant pour l'optimisation de la correction chirurgicale. Elle peut être employée, d'une part, pour l'exploration des variations de conformation mandibulaires et la mise au point de protocoles chirurgicaux pour la chirurgie de féminisation du tiers inférieur de la face. D'autre part, elle peut être utilisée de façon individuelle en pré-opératoire pour la planification de l'intervention et la confection de guides chirurgicaux (Hirsch et al., 2009). Les représentations 3D mandibulaires permettent de cibler les zones les plus dimorphiques et de simuler le résultat de l'intervention à l'aide de logiciels de planification. Selon le principe des techniques d'approximation faciale, une simulation du profil des tissus mous pourrait secondairement être obtenue à partir de la planification osseuse afin de proposer une prise en charge « sur mesure » des patients. Ce type de simulation est déjà employé dans le domaine de la chirurgie orthognathique (Figure 40) (Knoops et al., 2019; Yamashita et al., 2021).

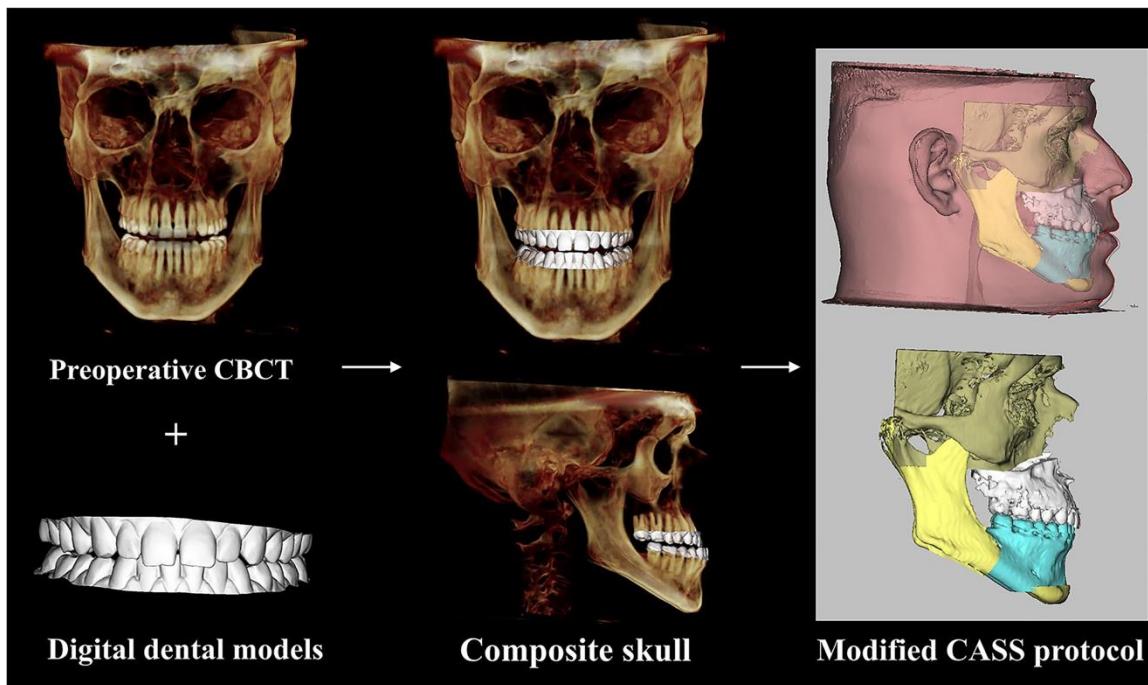


Figure 40 Simulation chirurgicale pré-opératoire d'une chirurgie orthognathique bimaxillaire. Les moules des arcades dentaires sont numérisés et surperposés au CBCT pré-opératoire afin de créer un modèle crânien composite (à gauche et au centre). Puis le logiciel génère une simulation de la position des bases osseuses et des tissus mous en post-opératoire (à droite) (Yamashita et al., 2021).

Chirurgie de reconstruction

La chirurgie orale et maxillo-faciale de demain doit répondre actuellement à de nouveaux enjeux :

- le vieillissement de la population
- l'amélioration de l'espérance de vie et la réduction de la sanction thérapeutique des patients atteints de cancer des voies aéro-digestives supérieures
- le diagnostic précoce et l'augmentation du niveau d'exigence dans la prise en charge des patients atteints de maladies rares (malformations crâno-faciales, agénésies, oligodonties, troubles métaboliques, pathologies dermatologiques...)

Ces enjeux font émerger deux problématiques : celle de la pérennité des réhabilitations faciales et orales face à une population vieillissante et celle de l'augmentation de la difficulté technique de la reconstruction chirurgicale chez les patients présentant un passé médical et chirurgical lourd.

Pour répondre à ces défis, nous assistons à un changement de paradigme dans la prise en charge du patient, qui s'oriente vers médecine personnalisée, globale et prédictive, permettant au patient de « bien vivre et bien vieillir ».

Les nouveaux outils numériques d'imagerie, de planification et d'assistance chirurgicale permettent de répondre aux défis techniques de la chirurgie de reconstruction.

Dans le cadre de la reconstruction mandibulaire post-tumorale certaines zones, telles la région goniaque et la branche montante, de par leur variabilité anatomique intra et inter-sexuelle, nécessitent une reconstruction adaptée à chaque patient, en particulier au vu du retentissement esthétique et fonctionnel occlusal de ces reconstructions.

L'utilisation de techniques de modélisation tridimensionnelle a été décrite pour la simulation chirurgicale de la reconstruction mandibulaire par lambeau libre fibulaire. Elle permet notamment la confection de guides de coupe et de plaques d'ostéosynthèse préformées personnalisés (Hirsch et al., 2009; Lee et al., 2020; Weitz et al., 2018) (**Figure 41**). Nous pouvons également imaginer qu'en cas de contre-indication chirurgicale la confection d'endoprothèses mandibulaires sur mesure sera le gold standard à l'avenir (Kumar et al., 2016).

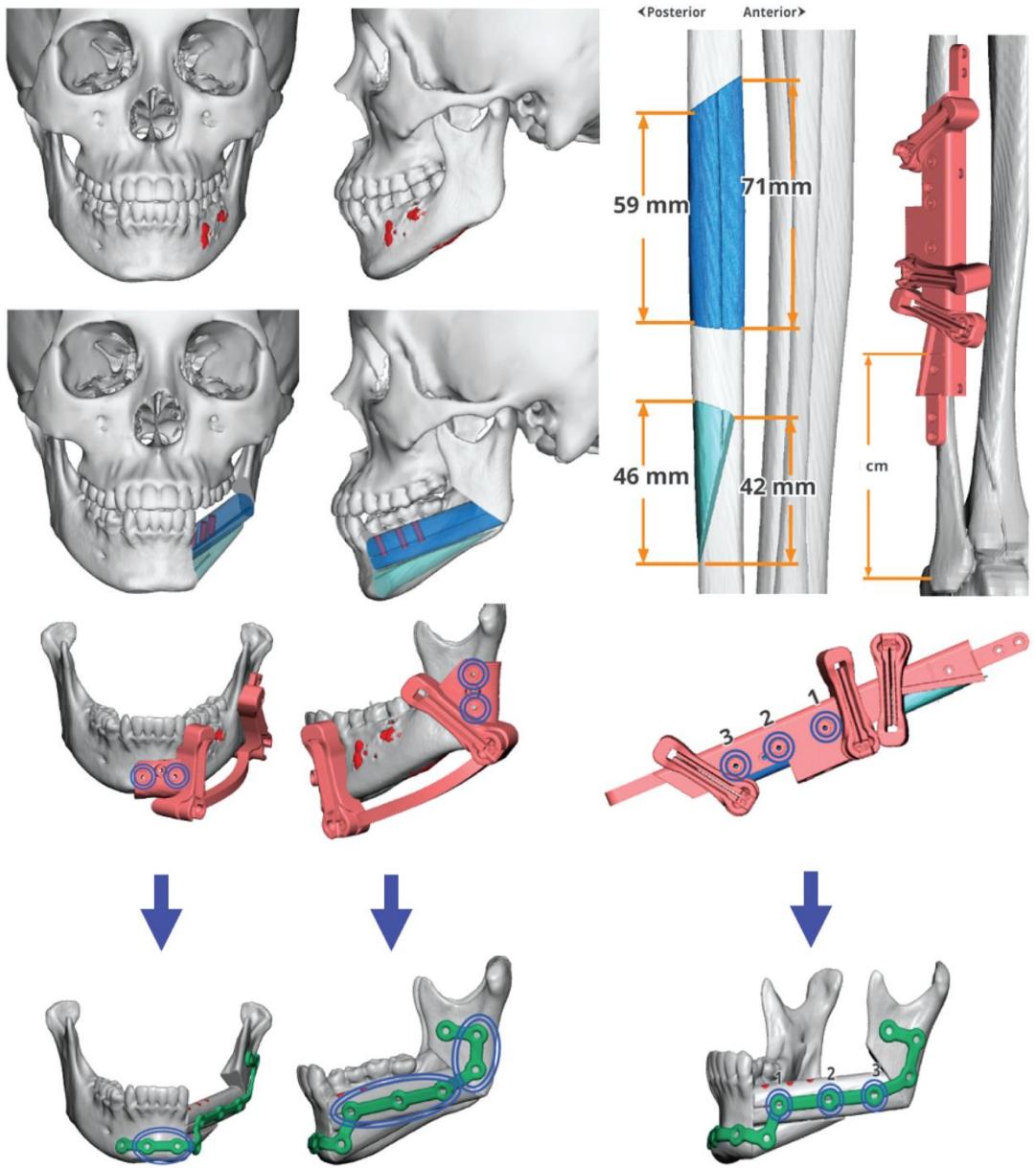


Figure 41 Planification chirurgicale virtuelle de l'exérèse d'un myxome odontogène mandibulaire gauche (en haut, à gauche) et simulation de la reconstruction mandibulaire par lambeau de fibula (en haut, à droite). Des guides de coupe et de forage personnalisés ont été conçus pour la mandibule et la fibula (au centre) et des plaques sur-mesure ont été confectionnées (en bas) (Lee et al., 2020).

La connaissance des particularités anatomiques spécifiques à chaque sexe est indispensable au succès fonctionnel et esthétique de ces reconstructions. De même, la compréhension et l'anticipation du vieillissement des structures faciales lors de la reconstruction est essentielle, tant pour la confection du matériel que pour son intégration fonctionnelle et esthétique au long cours.

Dans le cadre des réhabilitations orales implantaires, la difficulté actuelle réside dans la difficulté à anticiper leur pérennité et les effets du vieillissement sur les tissus oraux. Ceci est d'autant plus problématique chez les patients atteints de maladies rares qui vont bénéficier de réhabilitations implanto-portées à un âge jeune (Wang et al., 2016). Chez ces patients, et en cas d'atrophie osseuse sévère, des greffes osseuses doivent être envisagées de façon préalable ou concomitante à la pose des implants. Néanmoins, la stabilité dimensionnelle de ces greffes à long terme est méconnue (Lutz et al., 2015). Diverses études ont montré l'existence d'une résorption des greffes osseuses, même suite à la mise en fonction des implants. Ces variations dimensionnelles sont plus marquées dans les premiers mois ou années suite à l'augmentation osseuse, mais le phénomène de résorption semble se poursuivre dans le temps (**Figure 42**). Malgré l'abondance de publications portant sur le suivi des réhabilitations implantaires, la majorité offre peu de recul et repose sur l'analyse de la survie ou du succès implantaire (Chiapasco et al., 2008; Groot et al., 2018; Klinge et al., 2018; Schwartz-Arad et al., 2016). Peu s'intéressent aux variations dimensionnelles que peuvent subir les greffes osseuses avec le temps. Or le succès et la survie des réhabilitations implantaires est dépendant du volume osseux environnant, et celui-ci conditionne la possibilité d'une réhabilitation future.

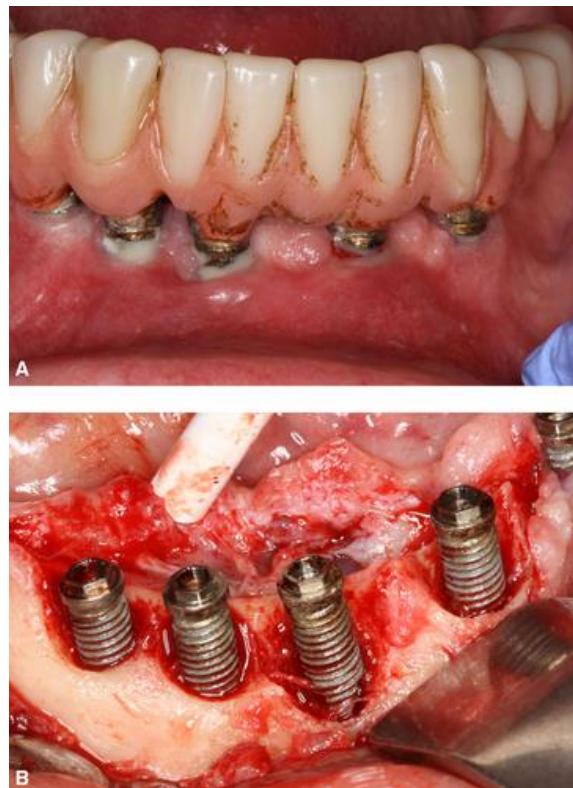


Figure 42 Développement d'une péri-implantite après plusieurs années de port d'une prothèse complète supra-implantaire mandibulaire. L'importante résorption osseuse autour des implants mandibulaires compromet le pronostic de la réhabilitation implantaire (Klinge et al., 2018).

La connaissance des mécanismes de vieillissement et leur variabilité inter-sexuelle est donc indispensable pour pouvoir anticiper l'effet de l'âge sur nos réhabilitations et proposer une thérapeutique prédictive, évolutive et personnalisée. Les perspectives innovantes s'orientent non plus vers la réparation mais vers la régénération tissulaire, afin de rétablir fonction, esthétique et biologie et que les tissus néoformés puissent accompagner le vieillissement du patient.

CONCLUSION

Malgré le nombre important de travaux sur l'estimation du sexe à partir de l'extrémité céphalique, la place de la mandibule dans la diagnose sexuelle n'est pas encore clairement définie. De plus, des méthodes d'estimation sexuelle ont été développées chez l'enfant et l'adulte, mais le dimorphisme sexuel mandibulaire de la personne âgée n'a été que peu exploré.

Ce travail, mené en deux temps, nous a permis d'explorer le dimorphisme sexuel et les variations de la morphologie mandibulaire à partir d'examens tomodensitométriques d'une population adulte française.

Dans un premier temps, nous avons étudié de dimorphisme sexuel crâno-facial et mandibulaire par des méthodes métriques et morpho-géométriques.

Nos résultats montrent que le crâne est la structure la plus dimorphique de l'extrémité céphalique, indépendamment de la méthode d'analyse utilisée et de l'âge des sujets. Bien que la mandibule représente un outil fiable pour l'identification du genre d'un individu, l'inclusion des données mandibulaires dans l'analyse n'augmente pas la précision de l'estimation sexuelle. Néanmoins, la performance des équations de prédiction formulées à partir des mesures métriques mandibulaires est meilleure à partir de 40 ans. Enfin, d'un point de vue méthodologique, la morphométrie géométrique présente une précision supérieure aux méthodes métriques pour l'estimation sexuelle à partir de l'extrémité céphalique.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés aux variations de la morphologie mandibulaire avec le temps et, en particulier, à l'impact du vieillissement et de la perte dentaire sur la forme et le dimorphisme sexuel mandibulaires.

Nous avons pu observer que le dimorphisme sexuel de la mandibule se maintient à un âge moyen et avancé. Il semblerait que la sénescence mandibulaire soit elle-même un processus dimorphique puisque son début, sa vitesse ainsi que les zones soumises à des changements diffèrent entre les hommes et les femmes. Les individus féminins présentent des modifications morphologiques plus précoces, marquées et généralisées que les hommes. Les changements induits par le vieillissement semblent survenir entre 50 et 70 ans, et les zones les plus affectées sont la symphyse, la région goniaque et la portion supérieure du ramus

L'étude de la perte dentaire montre que la mandibule se conforme à la loi de Wolff avec le vieillissement : la forme suit la fonction. Ainsi, la perte dentaire a une conséquence directe au niveau de l'étage alvéolaire, avec une résorption de la zone osseuse édentée, et un impact indirect au niveau de l'os basal, en particulier des zones d'insertion musculaire, qui se résorbent en cas de diminution des contraintes mécaniques appliquées par les muscles masticateurs. Ainsi, l'édentement, et en particulier la perte de calage dentaire, ont un impact sur la taille et la conformation mandibulaire, et ces changements affectent différemment les individus féminins et masculins. Nos résultats suggèrent que ces éléments ont une plus grande influence sur la morphologie mandibulaire que le processus physiologique de vieillissement. Les modifications observées affectent également le dimorphisme sexuel mandibulaire et la précision de la diagnose sexuelle. Il ressort que la mandibule peut être employée pour l'estimation sexuelle d'un individu, quel que soit son degré d'édentement, mais que le dimorphisme sexuel de taille tend à s'estomper avec le degré de perte dentaire, tandis que le dimorphisme sexuel de conformation se maintient, voire s'accentue avec l'édentement. Ainsi, la diagnose sexuelle à partir de la mandibule chez le patient édenté doit préférentiellement reposer sur une analyse de conformation ou se focaliser sur les mesures peu affectées par la perte dentaire : la hauteur du ramus, la distance bigoniale et la distance bicondylienne.

Le vieillissement apparaît comme un processus très hétérogène, différent d'un individu à l'autre selon le sexe, le degré d'édentement, l'influence hormonale, la nutrition... Il est par conséquent difficile de déterminer avec précision l'âge marquant son commencement et l'influence exacte de chaque paramètre sur la morphologie mandibulaire. Néanmoins, la connaissance des mécanismes du vieillissement des structures osseuses faciales et la maîtrise de nouvelles technologies morphométriques ouvre des perspectives intéressantes dans le domaine de la reconstruction faciale en anthropologie médico-légale ainsi qu'en chirurgie de reconstruction faciale.

RÉFÉRENCES

- Abate, A. F., Nappi, M., Ricciardi, S., & Tortora, G. (2004). FACES : 3D FAcial reConstruction from anciEnt Skulls using content based image retrieval. *Journal of Visual Languages & Computing*, 15(5), 373-389. <https://doi.org/10.1016/j.jvlc.2003.11.004>
- Abdel Fatah, E. E., Shirley, N. R., Jantz, R. L., & Mahfouz, M. R. (2014). Improving sex estimation from crania using a novel three-dimensional quantitative method. *Journal of Forensic Sciences*, 59(3), 590-600. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12379>
- Alarcón, J. A., Bastir, M., & Rosas, A. (2016). Variation of mandibular sexual dimorphism across human facial patterns. *Homo: Internationale Zeitschrift Fur Die Vergleichende Forschung Am Menschen*, 67(3), 188-202. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2015.11.004>
- Albert, A. M., Ricanek, K., & Patterson, E. (2007). A review of the literature on the aging adult skull and face : Implications for forensic science research and applications. *Forensic Science International*, 172(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2007.03.015>
- Alias, A., Ibrahim, A., Bakar, S. N. A., Shafie, M. S., Das, S., Abdullah, N., Noor, H. M., Liao, I. Y., & Nor, F. M. (2018). Anthropometric analysis of mandible : An important step for sex determination. *La Clinica Terapeutica*, 30(5), e217-e223.
- Al-Rawee, R. Y., Abdalfattah, M. M., Al-Rawee, R. Y., & Abdalfattah, M. M. (2020). Anatomy Respect in Implant Dentistry. Assortment, Location, Clinical Importance (Review Article). *Journal of Dental Problems and Solutions*, 7(2), 068-078.
- AlSheikh, H. A., AlZain, S., Warsy, A., AlMukaynizi, F., & AlThomali, A. (2019). Mandibular residual ridge height in relation to age, gender and duration of edentulism in a Saudi population : A clinical and radiographic study. *The Saudi Dental Journal*, 31(2), 258-264. <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2018.12.006>
- Altman, K. (2012). Facial feminization surgery : Current state of the art. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 41(8), 885-894. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2012.04.024>
- Amores-Ampuero, A. (2017). Sexual dimorphism in base of skull. *Anthropologischer Anzeiger; Bericht Uber Die Biologisch-Anthropologische Literatur*, 74(1), 9-14. <https://doi.org/10.1127/anthranz/2017/0603>
- Angel, J. S., Mincer, H. H., Chaudhry, J., & Scarbecz, M. (2011). Cone-beam computed tomography for analyzing variations in inferior alveolar canal location in adults in relation to age and sex. *Journal of Forensic Sciences*, 56(1), 216-219. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2010.01508.x>
- Anić-Milosević, S., Mestrović, S., & Slaj, M. (2009). Soft tissue profile typology : Results of the cluster analysis. *The Journal of Craniofacial Surgery*, 20(4), 1263-1268. <https://doi.org/10.1097/SCS.0b013e3181ace048>

Antonogeorgos, G., Panagiotakos, D. B., Priftis, K. N., & Tzonou, A. (2009). Logistic Regression and Linear Discriminant Analyses in Evaluating Factors Associated with Asthma Prevalence among 10- to 12-Years-Old Children : Divergence and Similarity of the Two Statistical Methods. *International Journal of Pediatrics*, 2009, e952042. <https://doi.org/10.1155/2009/952042>

Aragão, J. A., Souto, M. L. S., Mateus, C. R. S., Menezes, L. dos S., & Reis, F. P. (2014). Edentulousness in relation to remodeling of the gonial angles and incisures in dentate and edentate mandibles : Morphometric study using the Image J software. *Surgical and Radiologic Anatomy: SRA*, 36(9), 889-894. <https://doi.org/10.1007/s00276-014-1335-1>

Baker, E. W., Schuenke, M., Schulte, E., & Schumacher, U. (2011). *Anatomie tête et cou en odontostomatologie*. Lavoisier. <https://www.lavoisier.fr/livre/medecine/anatomie-tete-et-cou-en-odontostomatologie/baker/descriptif-9782257204059>

Bakke, M., Holm, B., Jensen, B. L., Michler, L., & Möller, E. (1990). Unilateral, isometric bite force in 8-68-year-old women and men related to occlusal factors. *European Journal of Oral Sciences*, 98(2), 149-158. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.1990.tb00954.x>

Barbeito-Andrés, J., Anzelmo, M., Ventrice, F., & Sardi, M. L. (2012). Measurement error of 3D cranial landmarks of an ontogenetic sample using Computed Tomography. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 2(2), 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2012.05.005>

Bartlett, S. P., Grossman, R., & Whitaker, L. A. (1992). Age-Related Changes of the Craniofacial Skeleton : An Anthropometric and Histologic Analysis. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 90(4), 592.

Bejdová, Š., Dupej, J., Krajíček, V., Velemínská, J., & Velemínský, P. (2018). Stability of upper face sexual dimorphism in central European populations (Czech Republic) during the modern age. *International Journal of Legal Medicine*, 132(1), 321-330. <https://doi.org/10.1007/s00414-017-1625-3>

Bejdová, S., Krajíček, V., Velemínská, J., Horák, M., & Velemínský, P. (2013). Changes in the sexual dimorphism of the human mandible during the last 1200 years in Central Europe. *Homo: Internationale Zeitschrift Fur Die Vergleichende Forschung Am Menschen*, 64(6), 437-453. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2013.05.003>

Best, K. C., Garvin, H. M., & Cabo, L. L. (2018). An Investigation into the Relationship between Human Cranial and Pelvic Sexual Dimorphism. *Journal of Forensic Sciences*, 63(4), 990-1000. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13669>

Bigoni, L., Velemínská, J., & Brůzek, J. (2010). Three-dimensional geometric morphometric analysis of crano-facial sexual dimorphism in a Central European sample of known sex. *Homo: Internationale Zeitschrift Fur Die Vergleichende Forschung Am Menschen*, 61(1), 16-32. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2009.09.004>

Blanchette, M. E., Nanda, R. S., Currier, G. F., Ghosh, J., & Nanda, S. K. (1996). A longitudinal cephalometric study of the soft tissue profile of short- and long-face syndromes from 7 to 17 years. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics: Official Publication of the American Association of Orthodontists, Its Constituent Societies, and the American Board of Orthodontics*, 109(2), 116-131. [https://doi.org/10.1016/s0889-5406\(96\)70172-5](https://doi.org/10.1016/s0889-5406(96)70172-5)

Bookstein, F. L. (1991). *Morphometric tools for landmark data : Geometry and biology*. Cambridge University Press, Cambridge.

Braga, J., & Treil, J. (2007). Estimation of Pediatric Skeletal Age Using Geometric Morphometrics and Three-Dimensional Cranial Size Changes. *International journal of legal medicine*, 121, 439-443. <https://doi.org/10.1007/s00414-007-0170-x>

Braga, J., Zimmer, V., Dumoncel, J., Samir, C., de Beer, F., Zanolli, C., Pinto, D., Rohlf, F. J., & Grine, F. E. (2019). Efficacy of diffeomorphic surface matching and 3D geometric morphometrics for taxonomic discrimination of Early Pleistocene hominin mandibular molars. *Journal of Human Evolution*, 130, 21-35. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2019.01.009>

Broom, R. (1948). Another new type of fossil ape-man. *Nature*, 162(4132), 57. <https://doi.org/10.1038/163057a0>

Bruzek, J. (2002). A method for visual determination of sex, using the human hip bone. *American Journal of Physical Anthropology*, 117(2), 157-168. <https://doi.org/10.1002/ajpa.10012>

Buck, T. J., & Vidarsdottir, U. S. (2004). A proposed method for the identification of race in sub-adult skeletons : A geometric morphometric analysis of mandibular morphology. *Journal of Forensic Sciences*, 49(6), 1159-1164.

Bulut, O., Freudenstein, N., Hekimoglu, B., & Gurcan, S. (2019). Dilemma of Gonial Angle in Sex Determination : Sexually Dimorphic or Not? *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology*. <https://doi.org/10.1097/PAF.0000000000000500>

Buschang, P. H., Nass, G. G., & Walker, G. F. (1982). Principal components of craniofacial growth for white Philadelphia males and females between 6 and 22 years of age. *American Journal of Orthodontics*, 82(6), 508-512. [https://doi.org/10.1016/0002-9416\(82\)90320-7](https://doi.org/10.1016/0002-9416(82)90320-7)

Cappella, A., Gibelli, D., Vitale, A., Zago, M., Dolci, C., Sforza, C., & Cattaneo, C. (2020). Preliminary study on sexual dimorphism of metric traits of cranium and mandible in a modern Italian skeletal population and review of population literature. *Legal Medicine (Tokyo, Japan)*, 44, 101695. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2020.101695>

Carvalho, S. P. M., Brito, L. M., Paiva, L. A. S. de, Bicudo, L. A. R., Crosato, E. M., & Oliveira, R. N. de. (2013). Validation of a physical anthropology methodology using mandibles for gender estimation in a Brazilian population. *Journal of Applied Oral Science: Revista FOB*, 21(4), 358-362. <https://doi.org/10.1590/1678-775720130022>

Casado, A. M. (2017). Quantifying Sexual Dimorphism in the Human Cranium : A Preliminary Analysis of a Novel Method. *Journal of Forensic Sciences*, 62(5), 1259-1265. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13441>

Cawood, J. I., & Howell, R. A. (1988). A classification of the edentulous jaws. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 17(4), 232-236.

Chiapasco, M., Colletti, G., Romeo, E., Zaniboni, M., & Brusati, R. (2008). Long-term results of mandibular reconstruction with autogenous bone grafts and oral implants after tumor resection. *Clinical Oral Implants Research*, 19(10), 1074-1080. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2008.01542.x>

Chrcanovic, B. R., Abreu, M. H. N. G., & Custódio, A. L. N. (2011). Morphological variation in dentate and edentulous human mandibles. *Surgical and Radiologic Anatomy: SRA*, 33(3), 203-213. <https://doi.org/10.1007/s00276-010-0731-4>

Claes, P., Vandermeulen, D., De Greef, S., Willems, G., Clement, J. G., & Suetens, P. (2010). Computerized craniofacial reconstruction : Conceptual framework and review. *Forensic Science International*, 201(1-3), 138-145. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.03.008>

Coleman, S. R., & Grover, R. (2006). The anatomy of the aging face : Volume loss and changes in 3-dimensional topography. *Aesthetic Surgery Journal*, 26(1S), S4-9. <https://doi.org/10.1016/j.asj.2005.09.012>

Coquerelle, M., Bayle, P., Bookstein, F. L., Braga, J., Halazonetis, D. J., Katina, S., & Weber, G. W. (2010). The association between dental mineralization and mandibular form : A study combining additive conjoint measurement and geometric morphometrics. *Journal of Anthropological Sciences : Rivista Di Antropologia: JASS*, 88, 129-150.

Coquerelle, M., Bookstein, F., Braga, J., Halazonetis, D., Weber, G., & Mitteroecker, P. (2011). Sexual Dimorphism of the Human Mandible and Its Association With Dental Development. *American journal of physical anthropology*, 145, 192-202. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21485>

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*, 14 (1-2).

Cotofana, S., Gotkin, R. H., Morozov, S. P., Kim, S. Y., Gombolevskiy, V. A., Laipan, A. S., Pyatnitskiy, I. A., Movsisyan, T. V., & Frank, K. (2018). The Relationship between Bone Remodeling and the Clockwise Rotation of the Facial Skeleton : A Computed Tomographic Imaging-Based Evaluation. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 142(6), 1447-1454. <https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000004976>

Cramon-Taubadel, N., Frazier, B. C., & Lahr, M. M. (2007). The problem of assessing landmark error in geometric morphometrics : Theory, methods, and modifications. *American Journal of Physical Anthropology*, 134(1), 24-35. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20616>

Cramon-Taubadel, N. (2011). Global human mandibular variation reflects differences in agricultural and hunter-gatherer subsistence strategies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(49), 19546-19551. <https://doi.org/10.1073/pnas.1113050108>

Daegling, D. J. (2012). The Human Mandible and the Origins of Speech. *Journal of Anthropology*, 2012, e201502. <https://doi.org/10.1155/2012/201502>

Dayal, M. R., Spoerl, M. A., & Bidmos, M. A. (2008). An assessment of sex using the skull of black South Africans by discriminant function analysis. *Homo: Internationale Zeitschrift Fur Die Vergleichende Forschung Am Menschen*, 59(3), 209-221. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2007.01.001>

Dedouit, F., Savall, F., Mokrane, F.-Z., Rousseau, H., Crubézy, E., Rougé, D., & Telmon, N. (2014). Virtual anthropology and forensic identification using multidetector CT. *The British Journal of Radiology*, 87(1036), 20130468. <https://doi.org/10.1259/bjr.20130468>

- Dong, H., Deng, M., Wang, W., Zhang, J., Mu, J., & Zhu, G. (2015). Sexual dimorphism of the mandible in a contemporary Chinese Han population. *Forensic Science International*, 255, 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.06.010>
- Doual, J. M., Ferri, J., & Laude, M. (1997). The influence of senescence on craniofacial and cervical morphology in humans. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 19(3), 175-183. <https://doi.org/10.1007/BF01627970>
- Efron, B. (1982). *The jackknife, the bootstrap, and other resampling plans*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Eichner, K. (1955). Über eine Gruppeneinteilung der Lunckengebisse für die Prothetik. *Dtsch. Zahnärztl. Z*, 10, 1831-1834.
- Elmore, K. L., & Richman, M. B. (2001). Euclidean Distance as a Similarity Metric for Principal Component Analysis. *Monthly Weather Review*, 129(3), 540-549. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0540:EDAASM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0540:EDAASM>2.0.CO;2)
- Enlow, D. H. (1966). A morphogenetic analysis of facial growth. *American Journal of Orthodontics*, 52(4), 283-299. [https://doi.org/10.1016/0002-9416\(66\)90169-2](https://doi.org/10.1016/0002-9416(66)90169-2)
- Enlow, D. H., Bianco, H. J., & Eklund, S. (1976). The remodeling of the edentulous mandible. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 36(6), 685-693. [https://doi.org/10.1016/0022-3913\(76\)90035-4](https://doi.org/10.1016/0022-3913(76)90035-4)
- Ercan, I., Ocakoglu, G., Guney, I., & Yazici, B. (2008). Adaptation of Generalizability Theory for Inter-Rater Reliability for Landmark Localization. *International Journal of Tomography & Simulation™*, 9(S08), 51-58.
- Fan, Y., Pennington, A., Kilpatrick, N., Hardiman, R., Schneider, P., Clement, J., Claes, P., & Matthews, H. (2019). Quantification of mandibular sexual dimorphism during adolescence. *Journal of Anatomy*, 234(5), 709-717. <https://doi.org/10.1111/joa.12949>
- Fatah, E. E. A., Shirley, N. R., Jantz, R. L., & Mahfouz, M. R. (2014). Improving Sex Estimation from Crania Using a Novel Three-dimensional Quantitative Method. *Journal of Forensic Sciences*, 59(3), 590-600. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12379>
- Ferembach, D., Schwidetzky, I., & Stloukal, M. (1979). Recommandations pour déterminer l'âge et le sexe sur le squelette. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 6(1), 7-45. <https://doi.org/10.3406/bmsap.1979.1945>
- Ferrario, V. F., Sforza, C., Poggio, C. E., & Schmitz, J. H. (1998). Facial volume changes during normal human growth and development. *The Anatomical Record*, 250(4), 480-487. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0185\(199804\)250:4<480::AID-AR12>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0185(199804)250:4<480::AID-AR12>3.0.CO;2-K)
- Ferrario, V. F., Sforza, C., Poggio, C. E., & Schmitz, J. H. (1999). Soft-tissue facial morphometry from 6 years to adulthood: A three-dimensional growth study using a new modeling. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 103(3), 768-778.
- Franklin, D., Cardini, A., Flavel, A., & Kulikas, A. (2012). The application of traditional and geometric morphometric analyses for forensic quantification of sexual dimorphism: Preliminary investigations in a Western Australian population. *International Journal of Legal Medicine*, 126(4), 549-558. <https://doi.org/10.1007/s00414-012-0684-8>

- Franklin, D., Cardini, A., Flavel, A., & Kuliukas, A. (2013). Estimation of sex from cranial measurements in a Western Australian population. *Forensic Science International*, 229(1-3), 158.e1-8. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.03.005>
- Franklin, D., Freedman, L., & Milne, N. (2005). Sexual dimorphism and discriminant function sexing in indigenous South African crania. *HOMO*, 55(3), 213-228. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2004.08.001>
- Franklin, D., Freedman, L., Milne, N., & Oxnard, C. E. (2006). A geometric morphometric study of sexual dimorphism in the crania of indigenous southern Africans : Research article. *South African Journal of Science*, 102(5), 229-238. <https://doi.org/10.10520/EJC96545>
- Franklin, D., O'Higgins, P., Oxnard, C. E., & Dadour, I. (2007). Sexual dimorphism and population variation in the adult mandible. *Forensic Science, Medicine, and Pathology*, 3(1), 15-22. <https://doi.org/10.1385/FSMP:3:1:15>
- Franklin, D., O'Higgins, P., Oxnard, C. E., & Dadour, I. (2008). Discriminant function sexing of the mandible of indigenous South Africans. *Forensic Science International*, 179(1), 84.e1-5. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2008.03.014>
- Franklin, D., Oxnard, C., O'Higgins, P., & Dadour, I. (2007). Sexual Dimorphism in the Subadult Mandible : Quantification Using Geometric Morphometrics*. *Journal of forensic sciences*, 52, 6-10. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2006.00311.x>
- Galibourg, A., Dumoncel, J., Telmon, N., Calvet, A., Michetti, J., & Maret, D. (2018). Assessment of automatic segmentation of teeth using a watershed-based method. *Dentomaxillofacial Radiology*, 47(1). <https://doi.org/10.1259/dmfr.20170220>
- Gamba, T. de O., Alves, M. C., & Hailer-Neto, F. (2016). Mandibular sexual dimorphism analysis in CBCT scans. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 38, 106-110. <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2015.11.024>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s12024-013-9437-3>
- Garvin, H. M., & Ruff, C. B. (2012). Sexual dimorphism in skeletal browridge and chin morphologies determined using a new quantitative method. *American Journal of Physical Anthropology*, 147(4), 661-670. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22036>
- Garvin, H. M., Sholts, S. B., & Mosca, 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. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22502>
- Giles, E. (1964). Sex determination by discriminant function analysis of the mandible. *American Journal of Physical Anthropology*, 22(2), 129-135. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330220212>
- Giles, E., & Elliot, O. (1963). Sex determination by discriminant function analysis of crania. *American Journal of Physical Anthropology*, 21(1), 53-68. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330210108>

Gillet, C., Costa-Mendes, L., Rérolle, C., Telmon, N., Maret, D., & Savall, F. (2020). Sex estimation in the cranium and mandible: A multislice computed tomography (MSCT) study using anthropometric and geometric morphometry methods. *International Journal of Legal Medicine*, 134(2), 823-832. <https://doi.org/10.1007/s00414-019-02203-0>

Goodall, C. (1991). Procrustes Methods in the Statistical Analysis of Shape. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 53(2), 285-321. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1991.tb01825.x>

Gower, J. C. (1975). Generalized procrustes analysis. *Psychometrika*, 40(1), 33-51. <https://doi.org/10.1007/BF02291478>

Green, H., & Curnoe, D. (2009). Sexual dimorphism in southeast Asian crania: A geometric morphometric approach. *Homo: Internationale Zeitschrift Fur Die Vergleichende Forschung Am Menschen*, 60(6), 517-534. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2009.09.001>

Groot, R. J. de, Oomens, M. a. E. M., Forouzanfar, T., & Schulten, E. a. J. M. (2018). Bone augmentation followed by implant surgery in the edentulous mandible: A systematic review. *Journal of Oral Rehabilitation*, 45(4), 334-343. <https://doi.org/10.1111/joor.12605>

Groves, C., & Mazak, V. (1975). An approach to the taxonomy of the hominidae: Gracile Villafranchian hominids of Africa. *Casopis pro Mineralogii a Geologii*, 20: 225-247.

Guevara Perez, S. V., de la Rosa Castolo, G., Thollon, L., & Behr, M. (2018). A 3D characterization method of geometric variation in edentulous mandibles. *Morphologie: Bulletin De l'Association Des Anatomistes*, 102(339), 255-262. <https://doi.org/10.1016/j.morpho.2018.08.001>

Guyomarc'h, P., Dutailly, B., Charton, J., Santos, F., Desbarats, P., & Coqueugniot, H. (2014). Anthropological Facial Approximation in Three Dimensions (AFA3D): Computer-Assisted Estimation of the Facial Morphology Using Geometric Morphometrics. *Journal of Forensic Sciences*, 59(6), 1502-1516. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12547>

Halazonetis, D. J. (2007). Morphometric correlation between facial soft-tissue profile shape and skeletal pattern in children and adolescents. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics: Official Publication of the American Association of Orthodontists, Its Constituent Societies, and the American Board of Orthodontics*, 132(4), 450-457. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2005.10.033>

Hatch, J. P., Shinkai, R. S. A., Sakai, S., Rugh, J. D., & Paunovich, E. D. (2001). Determinants of masticatory performance in dentate adults. *Archives of Oral Biology*, 46(7), 641-648. [https://doi.org/10.1016/S0003-9969\(01\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S0003-9969(01)00023-1)

Hazari, P., Hazari, R. S., Mishra, S. K., Agrawal, S., & Yadav, M. (2016). Is there enough evidence so that mandible can be used as a tool for sex dimorphism? A systematic review. *Journal of Forensic Dental Sciences*, 8(3), 174. <https://doi.org/10.4103/0975-1475.195111>

Hirsch, D. L., Garfein, E. S., Christensen, A. M., Weimer, K. A., Saddeh, P. B., & Levine, J. P. (2009). Use of computer-aided design and computer-aided manufacturing to produce orthognathically ideal surgical outcomes: A paradigm shift in head and neck reconstruction. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery: Official Journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, 67(10), 2115-2122. <https://doi.org/10.1016/j.joms.2009.02.007>

Hohman, M. H., & Teixeira, J. (2021). Transgender Surgery of the Head and Neck. *StatPearls*. StatPearls Publishing.

Hu, K.-S., Koh, K.-S., Han, S.-H., Shin, K.-J., & Kim, H.-J. (2006). Sex determination using nonmetric characteristics of the mandible in Koreans. *Journal of Forensic Sciences*, 51(6), 1376-1382. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2006.00270.x>

Hüe, O., & Berteretche, M.-V. (2003). *Prothèse complète, réalité clinique, solutions thérapeutiques*, Quintessence International.

Humphrey, L. T., Dean, M. C., & Stringer, C. B. (1999). Morphological variation in great ape and modern human mandibles. *Journal of Anatomy*, 195 (Pt 4), 491-513. <https://doi.org/10.1046/j.1469-7580.1999.19540491.x>

Hunter, W. S., & Garn, S. M. (1972). Disproportionate sexual dimorphism in the human face. *American Journal of Physical Anthropology*, 36(1), 133-138. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330360115>

Hutchinson, E. F., Farella, M., & Kramer, B. (2015). Importance of teeth in maintaining the morphology of the adult mandible in humans. *European Journal of Oral Sciences*, 123(5), 341-349. <https://doi.org/10.1111/eos.12203>

Huumonen, S., Sipilä, K., Haikola, B., Tapiola, M., Söderholm, A.-L., Remes-Lyly, T., Oikarinen, K., & Raustia, A. M. (2010). Influence of edentulousness on gonial angle, ramus and condylar height. *Journal of Oral Rehabilitation*, 37(1), 34-38. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.2009.02022.x>

Hylander, W. L. (1979). The functional significance of primate mandibular form. *Journal of Morphology*, 160(2), 223-240. <https://doi.org/10.1002/jmor.1051600208>

Hylander, W. L. (1985). Mandibular Function and Biomechanical Stress and Scaling1. *American Zoologist*, 25(2), 315-330. <https://doi.org/10.1093/icb/25.2.315>

Hylander, W. L., & Johnson, K. R. (1994). Jaw muscle function and wishboning of the mandible during mastication in macaques and baboons. *American Journal of Physical Anthropology*, 94(4), 523-547. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330940407>

İlgüy, D., İlgüy, M., Ersan, N., Dölekoğlu, S., & Fişekcioğlu, E. (2014). Measurements of the foramen magnum and mandible in relation to sex using CBCT. *Journal of Forensic Sciences*, 59(3), 601-605. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12376>

Inoue, M., Ono, T., Kameo, Y., Sasaki, F., Ono, T., Adachi, T., & Nakashima, T. (2019). Forceful mastication activates osteocytes and builds a stout jawbone. *Scientific Reports*, 9(1), 4404. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40463-3>

İşcan, M. Y. (1988). Rise of forensic anthropology. *American Journal of Physical Anthropology*, 31(S9), 203-229. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330310510>

İşcan, M. Y., & Steyn, M. (1999). Craniometric determination of population affinity in South Africans. *International Journal of Legal Medicine*, 112(2), 91-97.

İşcan, M. Y., Yoshino, M., & Kato, S. (1995). Sexual dimorphism in modern Japanese crania. *American Journal of Human Biology*, 7(4), 459-464. <https://doi.org/10.1002/ajhb.1310070407>

Ishwarkumar, S., Pillay, P., Haffajee, M. R., & Satyapal, K. S. (2017). Morphometric analysis of the mandible in the Durban Metropolitan population of South Africa. *Folia Morphologica*, 76(1), 82-86. <https://doi.org/10.5603/FM.a2016.0041>

Jantz, R. L., & Meadows Jantz, L. (2000). Secular change in craniofacial morphology. *American Journal of Human Biology: The Official Journal of the Human Biology Council*, 12(3), 327-338. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6300\(200005/06\)12:3<327::AID-AJHB3>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6300(200005/06)12:3<327::AID-AJHB3>3.0.CO;2-1)

Jolliffe, I. T. (2002). *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/b98835>

Kähler, K., Haber, J., & Seidel, H.-P. (2003). Reanimating the dead : Reconstruction of expressive faces from skull data. *ACM SIGGRAPH 2003 Papers*, 554-561. <https://doi.org/10.1145/1201775.882307>

Kahn, D. M., & Shaw, R. B. (2008). Aging of the Bony Orbit : A Three-Dimensional Computed Tomographic Study. *Aesthetic Surgery Journal*, 28(3), 258-264. <https://doi.org/10.1016/j.asj.2008.02.007>

Kano, T., Oritani, S., Michiue, T., Ishikawa, T., Hishmat, A. M., Sogawa, N., Inamori-Kawamoto, O., & Maeda, H. (2015). Postmortem CT morphometry with a proposal of novel parameters for sex discrimination of the mandible using Japanese adult data. *Legal Medicine (Tokyo, Japan)*, 17(3), 167-171. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2014.12.009>

Kelly, M. P., Vorperian, H. K., Wang, Y., Tillman, K. K., Werner, H. M., Chung, M. K., & Gentry, L. R. (2017). Characterizing mandibular growth using three-dimensional imaging techniques and anatomic landmarks. *Archives of Oral Biology*, 77, 27-38. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2017.01.018>

Kendall, D. G. (1977). The Diffusion of Shape. *Advances in Applied Probability*, 9(3), 428-430. <https://doi.org/10.2307/1426091>

Kesterke, M. J., Raffensperger, Z. D., Heike, C. L., Cunningham, M. L., Hecht, J. T., Kau, C. H., Nidey, N. L., Moreno, L. M., Wehby, G. L., Marazita, M. L., & Weinberg, S. M. (2016). Using the 3D Facial Norms Database to investigate craniofacial sexual dimorphism in healthy children, adolescents, and adults. *Biology of Sex Differences*, 7. <https://doi.org/10.1186/s13293-016-0076-8>

Kharoshah, M. A. A., Almadani, O., Ghaleb, S. S., Zaki, M. K., & Fattah, Y. A. A. (2010). Sexual dimorphism of the mandible in a modern Egyptian population. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 17(4), 213-215. <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2010.02.005>

Kimmerle, E. H., Ross, A., & Slice, D. (2008). Sexual Dimorphism in America : Geometric Morphometric Analysis of the Craniofacial Region*. *Journal of Forensic Sciences*, 53(1), 54-57. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2007.00627.x>

Kingsmill, V. J. (1999). Post-extraction remodeling of the adult mandible. *Critical Reviews in Oral Biology and Medicine: An Official Publication of the American Association of Oral Biologists*, 10(3), 384-404. <https://doi.org/10.1177/10454411990100030801>

Klinge, B., Klinge, A., Bertl, K., & Stavropoulos, A. (2018). Peri-implant diseases. *European Journal of Oral Sciences*, 126(S1), 88-94. <https://doi.org/10.1111/eos.12529>

Knezović Zlatarić, D., Celebić, A., Lazić, B., Baucić, I., Komar, D., Stipetić-Ovcaricek, J., & Ibrahimagić, L. (2002). Influence of age and gender on radiomorphometric indices of the mandible in removable denture wearers. *Collegium Antropologicum*, 26(1), 259-266.

Knoops, P. G. M., Borghi, A., Breakey, R. W. F., Ong, J., Jeelani, N. U. O., Bruun, R., Schievano, S., Dunaway, D. J., & Padwa, B. L. (2019). Three-dimensional soft tissue prediction in orthognathic surgery: A clinical comparison of Dolphin, ProPlan CMF, and probabilistic finite element modelling. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 48(4), 511-518. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2018.10.008>

Koc, D., Dogan, A., & Bek, B. (2010). Bite Force and Influential Factors on Bite Force Measurements: A Literature Review. *European Journal of Dentistry*, 4(2), 223.

Krüger, G. C., L'Abbé, E. N., Stull, K. E., & Kenyhercz, M. W. (2015). Sexual dimorphism in cranial morphology among modern South Africans. *International Journal of Legal Medicine*, 129(4), 869-875. <https://doi.org/10.1007/s00414-014-1111-0>

Kuć, J., Sierpińska, T., & Gołębiewska, M. (2015). The relationship between facial morphology and the structure of the alveolar part of the mandible in edentulous complete denture wearers. A preliminary study. *Acta Odontologica Scandinavica*, 73(1), 57-66. <https://doi.org/10.3109/00016357.2014.950181>

Kumar, B. P., Venkatesh, V., Kumar, K. A. J., Yadav, B. Y., & Mohan, S. R. (2016). Mandibular Reconstruction: Overview. *Journal of Maxillofacial & Oral Surgery*, 15(4), 425-441. <https://doi.org/10.1007/s12663-015-0766-5>

Kumar, L. (2014). Biomechanics and clinical implications of complete edentulous state. *Journal of Clinical Gerontology and Geriatrics*, 5(4), 101-104. <https://doi.org/10.1016/j.jcgg.2014.03.001>

Kundu, A., Streed, M., Galzi, P. J., & Johnson, A. (2021). A detailed review of forensic facial reconstruction techniques. *The Medico-Legal Journal*, 89(2), 106-116. <https://doi.org/10.1177/0025817221989591>

Leakey, M. D., Hay, R. L., Curtis, G. H., Drake, R. E., & Jackes, M. K. (1976). Fossil hominids from the Laetoli Beds. *Nature*, 262(5568), 460-466. <https://doi.org/10.1038/262460a0>

Lee, W.-J., Wilkinson, C. M., & Hwang, H.-S. (2012). An accuracy assessment of forensic computerized facial reconstruction employing cone-beam computed tomography from live subjects. *Journal of Forensic Sciences*, 57(2), 318-327. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2011.01971.x>

Lee, Z.-H., Alfonso, A., Ramly, E., Kantar, R., Yu, J., Daar, D., Hirsch, D., Jacobson, A., & Levine, J. (2020). The Latest Evolution in Virtual Surgical Planning: Customized Reconstruction Plates in Free Fibula Flap Mandibular Reconstruction. *Plastic & Reconstructive Surgery, Publish Ahead of Print*. <https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000007161>

Li, H., Zhang, Q., & Zhu, H. (2012). The size variation and related implications of mandibles in northern China in the past 7000 years. *Chinese Science Bulletin*, 57(4), 387-394. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4808-1>

Lieberman, D. E., McBratney, B. M., & Krovitz, G. (2002). The evolution and development of cranial form in *Homo sapiens*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(3), 1134-1139. <https://doi.org/10.1073/pnas.022440799>

Lopez-Capp, T. T., Rynn, C., Wilkinson, C., de Paiva, L. A. S., Michel-Crosato, E., & Biazovic, M. G. H. (2018). Discriminant analysis of mandibular measurements for the estimation of sex in a modern Brazilian sample. *International Journal of Legal Medicine*, 132(3), 843-851. <https://doi.org/10.1007/s00414-017-1681-8>

Loth, S. R., & Henneberg, M. (1996). Mandibular ramus flexure : A new morphologic indicator of sexual dimorphism in the human skeleton. *American Journal of Physical Anthropology*, 99(3), 473-485. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-8644\(199603\)99:3<473::AID-AJPA8>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-8644(199603)99:3<473::AID-AJPA8>3.0.CO;2-X)

Loth, S. R., & Henneberg, M. (2001). Sexually dimorphic mandibular morphology in the first few years of life. *American Journal of Physical Anthropology*, 115(2), 179-186. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1067>

Lutz, R., Neukam, F. W., Simion, M., & Schmitt, C. M. (2015). Long-term outcomes of bone augmentation on soft and hard-tissue stability : A systematic review. *Clinical Oral Implants Research*, 26 Suppl 11, 103-122. <https://doi.org/10.1111/cir.12635>

Mağat, G., & Özcan, S. (2018). Mandibular Morphological Changes : The Effects of Age, Gender and Dental Status. *Meandros Medical and Dental Journal*, 19. <https://doi.org/10.4274/meandros.02886>

Mahakkanukrauh, P., Sinthubua, A., Prasitwattanaseree, S., Ruengdit, S., Singsuwan, P., Praneatpolgrang, S., & Duangto, P. (2015). Craniometric study for sex determination in a Thai population. *Anatomy & Cell Biology*, 48(4), 275-283. <https://doi.org/10.5115/acb.2015.48.4.275>

Mahalanobis, P. C. (1936). *On the Generalized Distance in Statistics, Proceedings of National Institute of Sciences (India)*, Vol. 2, No. 1, 1936, pp. 49-55. <https://doi.org/10.1007/s13171-019-00164-5>

Mardia, K. V., & Dryden, I. L. (1989). The Statistical Analysis of Shape Data. *Biometrika*, 76(2), 271-281. <https://doi.org/10.2307/2336660>

Marinescu, M., Panaitescu, V., & Rosu, M. (2013). Sex determination in Romanian mandible using discriminant function analysis : Comparative results of a time-efficient method. *Romanian Journal of Legal Medicine*, 21(4), 305-308. <https://doi.org/10.4323/rjlm.2013.305>

Mathew, D. G., Rajesh, S., Koshi, E., Priya, L. E., Nair, A. S., & Mohan, A. (2013). Adult forensic age estimation using mandibular first molar radiographs : A novel technique. *Journal of Forensic Dental Sciences*, 5(1), 56-59. <https://doi.org/10.4103/0975-1475.114552>

Matros, E., Momoh, A., & Yaremchuk, M. J. (2009). The aging midfacial skeleton : Implications for rejuvenation and reconstruction using implants. *Facial Plastic Surgery: FPS*, 25(4), 252-259. <https://doi.org/10.1055/s-0029-1242037>

- Mendelson, B. C., Hartley, W., Scott, M., McNab, A., & Granzow, J. W. (2007). Age-Related Changes of the Orbit and Midcheek and the Implications for Facial Rejuvenation. *Aesthetic Plastic Surgery*, 31(5), 419-423. <https://doi.org/10.1007/s00266-006-0120-x>
- Mendelson, B., & Wong, C.-H. (2012). Changes in the Facial Skeleton With Aging : Implications and Clinical Applications in Facial Rejuvenation. *Aesthetic Plastic Surgery*, 36(4), 753-760. <https://doi.org/10.1007/s00266-012-9904-3>
- Merrot, O., Vacher, C., Merrot, S., Godlewski, G., Frigard, B., & Goudot, P. (2005). Changes in the edentate mandible in the elderly. *Surgical and Radiologic Anatomy: SRA*, 27(4), 265-270. <https://doi.org/10.1007/s00276-005-0323-x>
- Milroy, C. M. (1999). Forensic Taphonomy : The Postmortem Fate of Human Remains. *BMJ : British Medical Journal*, 319(7207), 458.
- Mitteroecker, P., & Gunz, P. (2009). Advances in Geometric Morphometrics. *Journal of Evolutionary Biology*, 36(2), 235-247. <https://doi.org/10.1007/s11692-009-9055-x>
- Mohite, D., Chaudhary, M., Mohite, P., & Patil, S. (2011). Age assessment from mandible : Comparison of radiographic and histologic methods. *Romanian journal of morphology and embryology = Revue roumaine de morphologie et embryologie*.
- Morrison, S. D., Vyas, K. S., Motakef, S., Gast, K. M., Chung, M. T., Rashidi, V., Satterwhite, T., Kuzon, W., & Cederna, P. S. (2016). Facial Feminization : Systematic Review of the Literature. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 137(6), 1759-1770. <https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000002171>
- Murail, P., Brůžek, 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. BMSAP*, 17(3-4), 167-176. <https://doi.org/10.4000/bmsap.1157>
- Mustafa, A., Abusamra, H., Kanaan, N., Alsalem, M., Allouh, M., & Kalbouneh, H. (2019). Morphometric study of the facial skeleton in Jordanians : A computed tomography scan-based study. *Forensic Science International*, 302, 109916. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.109916>
- Mydlová, M., Dupej, J., Koudelová, J., & Velemínská, J. (2015). Sexual dimorphism of facial appearance in ageing human adults : A cross-sectional study. *Forensic Science International*, 257, 519.e1-519.e9. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.09.008>
- Nagi, R., Aravinda, K., Rakesh, N., Jain, S., Kaur, N., & Mann, A. K. (2019). Digitization in forensic odontology : A paradigm shift in forensic investigations. *Journal of Forensic Dental Sciences*, 11(1), 5-10. https://doi.org/10.4103/jfo.jfds_55_19
- Nakatsuka, Y., Yamashita, S., Nimura, H., Mizoue, S., Tsuchiya, S., & Hashii, K. (2010). Location of main occluding areas and masticatory ability in patients with reduced occlusal support. *Australian Dental Journal*, 55(1), 45-50. <https://doi.org/10.1111/j.1834-7819.2009.01174.x>
- Netter, F. H. (2011). *Atlas d'anatomie humaine*. Elsevier Masson.

- Newton, J. P., Yemm, R., Abel, R. w., & Menhinick, S. (1993). Changes in human jaw muscles with age and dental state. *Gerodontology*, 10(1), 16-22.
<https://doi.org/10.1111/j.1741-2358.1993.tb00074.x>
- Nicholson, E., & Harvati, K. (2006). Quantitative analysis of human mandibular shape using three-dimensional geometric morphometrics. *American Journal of Physical Anthropology*, 131(3), 368-383. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20425>
- Nidugala, H., Bhargavi, C., Avadhani, R., & Bhaskar, B. (2013). Sexual dimorphism of the craniofacial region in a South Indian population. *Singapore Medical Journal*, 54(8), 458-462. <https://doi.org/10.11622/smedj.2013154>
- Nikita, E. (2014). Age-associated Variation and Sexual Dimorphism in Adult Cranial Morphology : Implications in Anthropological Studies. *International Journal of Osteoarchaeology*, 24(5), 557-569. <https://doi.org/10.1002/oa.2241>
- Nikita, E., & Michopoulou, E. (2018). A quantitative approach for sex estimation based on cranial morphology. *American Journal of Physical Anthropology*, 165(3), 507-517. <https://doi.org/10.1002/ajpa.23376>
- Noble, J., Cardini, A., Flavel, A., & Franklin, D. (2019). Geometric morphometrics on juvenile crania : Exploring age and sex variation in an Australian population. *Forensic Science International*, 294, 57-68. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.10.022>
- Novotny, V., Iscan, M. Y., & Loth, S. R. (1993). *Morphologic and osteometric assessment of age, sex and race from the skull*. In : Iscan, M.Y., Helmer,R.P (Eds.), *Forensic Analysis of the Skull : Craniofacial Analysis, Reconstruction and Identification*. Wiley-Liss, New York, pp.71–88. Wiley-Liss.
- Oettlé, A. C., Becker, P. J., de Villiers, E., & Steyn, M. (2009). The influence of age, sex, population group, and dentition on the mandibular angle as measured on a South African sample. *American Journal of Physical Anthropology*, 139(4), 505-511. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21009>
- Oettlé, A. C., Pretorius, E., & Steyn, M. (2005). Geometric morphometric analysis of mandibular ramus flexure. *American Journal of Physical Anthropology*, 128(3), 623-629. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20207>
- O'Higgins, P. (2000). The study of morphological variation in the hominid fossil record : Biology, landmarks and geometry. *Journal of Anatomy*, 197(Pt 1), 103-120. <https://doi.org/10.1046/j.1469-7580.2000.19710103.x>
- Oikonomopoulou, E.-K., Valakos, E., & Nikita, E. (2017). Population-specificity of sexual dimorphism in cranial and pelvic traits : Evaluation of existing and proposal of new functions for sex assessment in a Greek assemblage. *International Journal of Legal Medicine*, 131(6), 1731-1738. <https://doi.org/10.1007/s00414-017-1655-x>
- Oliveira, R. N. de, Daruge, E., Daruge Junior, E., & Galvão, L. C. C. (1995). Determinação do sexo através de mensurações mandibulares. *Revista da Associação Brasileira de Odontologia*, 3(4), 241-244.

Orthlieb, J.-D., Deroze, D., Lacout, J., & Maniere-Ezvan, A. (2006). Occlusion pathogène et occlusion fonctionnelle : Définitions des finitions. *L'Orthodontie Française*, 77(4), 451-459. <https://doi.org/10.1051/orthodfr/200677451>

Ozturk, C. N., Ozturk, C., Bozkurt, M., Uygur, H. S., Papay, F. A., & Zins, J. E. (2013). Dentition, bone loss, and the aging of the mandible. *Aesthetic Surgery Journal*, 33(7), 967-974. <https://doi.org/10.1177/1090820X13503473>

Parr, N. M., Passalacqua, N. V., & Skorpinski, K. (2017). Investigations Into Age-related Changes in the Human Mandible. *Journal of Forensic Sciences*, 62(6), 1586-1591. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13475>

Pecora, N. G., Baccetti, T., & McNamara, J. A. (2008). The aging craniofacial complex : A longitudinal cephalometric study from late adolescence to late adulthood. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 134(4), 496-505. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2006.11.022>

Pelin, C., Öktem, H., & Kürkçüoğlu, A. (2018). Age estimation using mandibular dimensions : A preliminary study. *Euras J Anthropol* 9(2), 41-48.

Perini, T. A., Oliveira, G. L. de, Ornellas, J. dos S., & Oliveira, F. P. de. (2005). Technical error of measurement in anthropometry. *Revista Brasileira de Medicina Do Esporte*, 11(1), 81-85. <https://doi.org/10.1590/S1517-86922005000100009>

Pessa, J. E., Slice, D. E., Hanz, K. R., Broadbent, T. H. J., & Rohrich, R. J. (2008). Aging and the Shape of the Mandible. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 121(1), 196. <https://doi.org/10.1097/01.prs.0000293864.94138.ae>

Pessa, J. E., Zadoo, V. P., Mutimer, K. L., Haffner, C., Yuan, C., DeWitt, A. I., & Garza, J. R. (1998). Relative Maxillary Retruson as a Natural Consequence of Aging : Combining Skeletal and Soft-Tissue Changes into an Integrated Model of Midfacial Aging. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 102(1), 205.

Pessa, J. E., Zadoo, V. P., Yuan, C., Ayedelotte, J. D., Cuellar, F. J., Cochran, S. C., Mutimer, K. L., & Garza, J. R. (1999). Concertina Effect and Facial Aging : Nonlinear Aspects of Youthfulness and Skeletal Remodeling, and Why, Perhaps, Infants Have Jowls. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 103(2), 635.

Peyre, E. (2004). La mandibule humaine adulte : Variation intra-population et essai d'interprétation morphologique. *Biométrie Humaine et Anthropologie - revue de la Société de biométrie humaine*, 22(3-4), 205-227.

Phenice, T. W. (1969). A newly developed visual method of sexing the os pubis. *American Journal of Physical Anthropology*, 30(2), 297-301. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330300214>

Piquet, M.-M. (1956). Étude sur la robustesse de la mandibule. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 7(3), 204-224. <https://doi.org/10.3406/bmsap.1956.9725>

Polanski, J. M. (2011). Morphological Integration of the Modern Human Mandible during Ontogeny. *International Journal of Evolutionary Biology*, 2011, 545879. <https://doi.org/10.4061/2011/545879>

Pretorius, E., Steyn, M., & Scholtz, Y. (2006). Investigation into the usability of geometric morphometric analysis in assessment of sexual dimorphism. *American Journal of Physical Anthropology*, 129(1), 64-70. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20251>

Quatrehomme, G. (2015). *Traité d'Anthropologie médico-légale*. De Boeck Superieur.

Radulesco, T., Michel, J., Mancini, J., Dessi, P., & Adalian, P. (2018). Sex Estimation from Human Cranium : Forensic and Anthropological Interest of Maxillary Sinus Volumes. *Journal of Forensic Sciences*, 63(3), 805-808. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13629>

Raffone, C., Baeta, M., Lambacher, N., Granizo-Rodríguez, E., Etxeberria, F., & de Pancorbo, M. M. (2021). Intrinsic and extrinsic factors that may influence DNA preservation in skeletal remains : A review. *Forensic Science International*, 325, 110859. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2021.110859>

Rai, B., Krishan, K., Kaur, J., & Anand, S. C. (2008). Technical note : Age estimation from mandible by lateral cephalogram: a preliminary study. *The Journal of Forensic Odonto-Stomatology*, 26(1), 24-28.

Raia, P., Boggioni, M., Carotenuto, F., Castiglione, S., Di Febbraro, M., Di Vincenzo, F., Melchionna, M., Mondanaro, A., Papini, A., Profico, A., Serio, C., Veneziano, A., Vero, V. A., Rook, L., Meloro, C., & Manzi, G. (2018). Unexpectedly rapid evolution of mandibular shape in hominins. *Scientific Reports*, 8(1), 7340. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25309-8>

Raustia, A. M., Pirttiniemi, P., Salonen, M. A. M., & Pyhtinen, J. (1998). Effect of edentulousness on mandibular size and condyle-fossa position. *Journal of Oral Rehabilitation*, 25(3), 174-179. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2842.1998.00222.x>

Richard, M. J., Morris, C., Deen, B. F., Gray, L., & Woodward, J. A. (2009). Analysis of the anatomic changes of the aging facial skeleton using computer-assisted tomography. *Ophthalmic Plastic and Reconstructive Surgery*, 25(5), 382-386. <https://doi.org/10.1097/IOP.0b013e3181b2f766>

Richtsmeier, J. T., Paik, C. H., Elfert, P. C., Cole, T. M., & Dahlman, H. R. (1995). Precision, repeatability, and validation of the localization of cranial landmarks using computed tomography scans. *The Cleft Palate-Craniofacial Journal: Official Publication of the American Cleft Palate-Craniofacial Association*, 32(3), 217-227. https://doi.org/10.1597/1545-1569_1995_032_0217_pravot_2.3.co_2

Robertson, J. M., Kingsley, B. E., & Ford, G. C. (2017). Sexually Dimorphic Faciometrics in Humans From Early Adulthood to Late Middle Age : Dynamic, Declining, and Differentiated. *Evolutionary Psychology: An International Journal of Evolutionary Approaches to Psychology and Behavior*, 15(3), 1474704917730640. <https://doi.org/10.1177/1474704917730640>

Rogers, T. (1991). *Sex determination and age estimation : Skeletal evidence from St. Thomas' cemetery Belleville, Ontario*. Thèse.

Rogers, T. L. (2005). Determining the sex of human remains through cranial morphology. *Journal of Forensic Sciences*, 50(3), 493-500.

Rosas, A., & Bastir, M. (2002). Thin-Plate Spline Analysis of Allometry and Sexual Dimorphism in the Human Craniofacial Complex. *American journal of physical anthropology*, 117, 236-245. <https://doi.org/10.1002/ajpa.10023>

- Rouvière, H., & Delmas, A. (1985). *Anatomie Humaine descriptive, topographique et fonctionnelle. Tome 1 : Tête et cou*. Masson.
- Saini, R., & Saini, V. (2016). Sexual Dimorphism of North Indian Crania and its Forensic Application. *Journal of Forensic Medicine and Legal Affairs*, 01(02). <https://doi.org/10.19104/jfml.2016.108>
- Saini, V., Srivastava, R., Rai, R. K., Shamal, S. N., Singh, T. B., & Tripathi, S. K. (2011). Mandibular ramus : An indicator for sex in fragmentary mandible. *Journal of Forensic Sciences*, 56 Suppl 1, S13-16. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2010.01599.x>
- Sarnat, B. G., Brodie, A. G., & Kubacki, W. H. (1953). Fourteen-year report of facial growth in case of complete anodontia with ectodermal dysplasia. *A.M.A. American Journal of Diseases of Children*, 86(2), 162-169. <https://doi.org/10.1001/archpedi.1953.02050080171004>
- Scheuer, L. (2002). Application of osteology to forensic medicine. *Clinical Anatomy*, 15(4), 297-312. <https://doi.org/10.1002/ca.10028>
- Schllicher, W., Nielsen, I., Huang, J. C., Maki, K., Hatcher, D. C., & Miller, A. J. (2012). Consistency and precision of landmark identification in three-dimensional cone beam computed tomography scans. *European Journal of Orthodontics*, 34(3), 263-275. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjq144>
- Schmittbuhl, M., Le Minor, J. M., Taroni, F., & Mangin, P. (2001). Sexual dimorphism of the human mandible : Demonstration by elliptical Fourier analysis. *International Journal of Legal Medicine*, 115(2), 100-101.
- Schmittbuhl, M., Le Minor, J.-M., Schaaf, A., & Mangin, P. (2002). The human mandible in lateral view : Elliptical fourier descriptors of the outline and their morphological analysis. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger*, 184(2), 199-207. [https://doi.org/10.1016/S0940-9602\(02\)80021-8](https://doi.org/10.1016/S0940-9602(02)80021-8)
- Schoetensack, O. (1908). *Der Unterkiefer des Homo Heidelbergensis : Aus den Sanden von Mauer bei Heidelberg* (Leipzig, Germany: Wilhelm Engleman). Good Press.
- Schwartz-Arad, D., Ofec, R., Eliyahu, G., Ruban, A., & Sterer, N. (2016). Long Term Follow-Up of Dental Implants Placed in Autologous Onlay Bone Graft. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 18(3), 449-461. <https://doi.org/10.1111/cid.12288>
- Sella-Tunis, T., Pokhojaev, A., Sarig, R., O'Higgins, P., & May, H. (2018). Human mandibular shape is associated with masticatory muscle force. *Scientific Reports*, 8(1), 6042. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24293-3>
- Shaw, R. B. J., & Kahn, D. M. (2007). Aging of the Midface Bony Elements : A Three-Dimensional Computed Tomographic Study. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 119(2), 675. <https://doi.org/10.1097/01.prs.0000246596.79795.a8>
- Shaw, R. B., Katzel, E. B., Koltz, P. F., Kahn, D. M., Girotto, J. A., & Langstein, H. N. (2010). Aging of the Mandible and Its Aesthetic Implications: *Plastic and Reconstructive Surgery*, 125(1), 332-342. <https://doi.org/10.1097/PRS.0b013e3181c2a685>
- Shaw, R. B., Katzel, E. B., Koltz, P. F., Yaremchuk, M. J., Girotto, J. A., Kahn, D. M., & Langstein, H. N. (2011). Aging of the facial skeleton : Aesthetic implications and rejuvenation strategies. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 127(1), 374-383. <https://doi.org/10.1097/PRS.0b013e3181f95b2d>

- Shinogaya, T., Bakke, M., Thomsen, C. E., Vilmann, A., Sodeyama, A., & Matsumoto, M. (2001). Effects of ethnicity, gender and age on clenching force and load distribution. *Clinical Oral Investigations*, 5(1), 63-68. <https://doi.org/10.1007/s007840000099>
- Sholts, S. B., Flores, L., Walker, P. L., & Wärmländer, S. K. T. S. (2011). Comparison of coordinate measurement precision of different landmark types on human crania using a 3D laser scanner and a 3D digitiser : Implications for applications of digital morphometrics. *International Journal of Osteoarchaeology*, 21(5), 535-543. <https://doi.org/10.1002/oa.1156>
- Short, L. J., Khambay, B., Ayoub, A., Erolin, C., Rynn, C., & Wilkinson, C. (2014). Validation of a computer modelled forensic facial reconstruction technique using CT data from live subjects : A pilot study. *Forensic Science International*, 237, 147.e1-147.e8. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.12.042>
- Simon, M. N., & Marroig, G. (2015). Landmark precision and reliability and accuracy of linear distances estimated by using 3D computed micro-tomography and the open-source TINA Manual Landmarking Tool software. *Frontiers in Zoology*, 12, 12. <https://doi.org/10.1186/s12983-015-0101-5>
- Sinthubua, A., Ruengdit, S., Das, S., & Mahakkanukrauh, P. (2017). A new method for sex estimation from maxillary suture length in a Thai population. *Anatomy & Cell Biology*, 50(4), 261-264. <https://doi.org/10.5115/acb.2017.50.4.261>
- Siparsky, P. N., Kirkendall, D. T., & Garrett, W. E. (2014). Muscle Changes in Aging. *Sports Health*, 6(1), 36-40. <https://doi.org/10.1177/1941738113502296>
- Slice, D. (2007). Geometric Morphometrics. *Annual Review of Anthropology*, 36. <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.34.081804.120613>
- Steyn, M., & İşcan, M. Y. (1998). Sexual dimorphism in the crania and mandibles of South African whites. *Forensic Science International*, 98(1-2), 9-16.
- Suazo, I., & Matamala, D. (2012). Age effect in the morphological traits performance for sex determination in human skulls and mandibles. *International Journal of Morphology*, 30, 296-301.
- Tallgren, A. (1972). The continuing reduction of the residual alveolar ridges in complete denture wearers : A mixed-longitudinal study covering 25 years. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 27(2), 120-132. [https://doi.org/10.1016/0022-3913\(72\)90188-6](https://doi.org/10.1016/0022-3913(72)90188-6)
- Tanikawa, C., Zere, E., & Takada, K. (2016). Sexual dimorphism in the facial morphology of adult humans : A three-dimensional analysis. *Homo: Internationale Zeitschrift Fur Die Vergleichende Forschung Am Menschen*, 67(1), 23-49. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2015.10.001>
- Taylor, A. B. (2002). Masticatory form and function in the African apes. *American Journal of Physical Anthropology*, 117(2), 133-156. <https://doi.org/10.1002/ajpa.10013>
- Taylor, A. B., & Vinyard, C. J. (2013). The relationships among jaw-muscle fiber architecture, jaw morphology, and feeding behavior in extant apes and modern humans. *American Journal of Physical Anthropology*, 151(1), 120-134. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22260>

Toledo Avelar, L. E., Cardoso, M. A., Santos Bordoni, L., de Miranda Avelar, L., & de Miranda Avelar, J. V. (2017). Aging and Sexual Differences of the Human Skull. *Plastic and Reconstructive Surgery. Global Open*, 5(4), e1297. <https://doi.org/10.1097/GOX.0000000000001297>

Tomaszewska, I. M., Frączek, P., Gomulska, M., Pliczko, M., Sliwińska, A., Sałapa, K., Chrzan, R., Kowalski, P., Nowakowski, M., & Walocha, J. A. (2014). Sex determination based on the analysis of a contemporary Polish population's palatine bones : A computed tomography study of 1,200 patients. *Folia Morphologica*, 73(4), 462-468. <https://doi.org/10.5603/FM.2014.0069>

Tozoğlu, U., & Cakur, B. (2014). Evaluation of the morphological changes in the mandible for dentate and totally edentate elderly population using cone-beam computed tomography. *Surgical and Radiologic Anatomy: SRA*, 36(7), 643-649. <https://doi.org/10.1007/s00276-013-1241-y>

Tunis, T. S., Sarig, R., Cohen, H., Medlej, B., Peled, N., & May, H. (2017). Sex estimation using computed tomography of the mandible. *International Journal of Legal Medicine*, 131(6), 1691-1700. <https://doi.org/10.1007/s00414-017-1554-1>

Ungar, P. S., & Sponheimer, M. (2011). The diets of early hominins. *Science (New York, N.Y.)*, 334(6053), 190-193. <https://doi.org/10.1126/science.1207701>

Vacher, C. (2004). Anatomie du vieillissement craniofacial. *EMC - Dentisterie*, 1(3), 201-213. <https://doi.org/10.1016/j.emcden.2004.02.002>

Valenzano, D. R., Mennucci, A., Tartarelli, G., & Cellerino, A. (2006). Shape analysis of female facial attractiveness. *Vision Research*, 46(8-9), 1282-1291. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2005.10.024>

Vallabh, R., Zhang, J., Fernandez, J., Dimitroulis, G., & Ackland, D. C. (2019). The morphology of the human mandible : A computational modelling study. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*. <https://doi.org/10.1007/s10237-019-01133-5>

Velemínská, J., Bigoni, L., Krajíček, V., Borský, J., Šmahelová, D., Cagáňová, V., & Peterka, M. (2012). Surface facial modelling and allometry in relation to sexual dimorphism. *Homo: Internationale Zeitschrift Fur Die Vergleichende Forschung Am Menschen*, 63(2), 81-93. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2012.02.002>

Velemínská, J., Danková, S., Břízová, M., Červenková, L., & Krajíček, V. (2018). Variability of facial movements in relation to sexual dimorphism and age: Three-dimensional geometric morphometric study. *Homo: Internationale Zeitschrift Fur Die Vergleichende Forschung Am Menschen*, 69(3), 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2018.06.004>

Vinay, V., Gowri S R, M., & J, A. (2013). Sex determination of human mandible using metrical parameters. *Journal of Clinical and Diagnostic Research: JCDR*, 7(12), 2671-2673. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2013/7621.3728>

Waldron, T. (1987). The relative Survival of the Human Skeleton : Implications for Palaeopathology. *Death, Decay and Reconstruction : Approaches to Archaeology and Forensic Science*, 55-64.

Walker, P. L. (2008). Sexing skulls using discriminant function analysis of visually assessed traits. *American Journal of Physical Anthropology*, 136(1), 39-50. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20776>

- Walsh, J. S. (2018). Normal bone physiology, remodelling and its hormonal regulation. *Surgery (Oxford)*, 36(1), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.mpsur.2017.10.006>
- Wang, Y., He, J., Decker, A. M., Hu, J. C., & Zou, D. (2016). Clinical outcomes of implant therapy in ectodermal dysplasia patients : A systematic review. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 45(8), 1035-1043. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2016.03.011>
- Webster, M., & Sheets, H. D. (2010). A practical introduction to landmark-based geometric morphometrics. *Quantitative Methods in Paleobiology*, 16, 163-188.
- Weitz, J., Wolff, K.-D., Kesting, M. R., & Nobis, C.-P. (2018). Development of a novel resection and cutting guide for mandibular reconstruction using free fibula flap. *Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery: Official Publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, 46(11), 1975-1978. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2018.09.007>
- Williams, B. A., & Rogers, T. L. (2006). Evaluating the Accuracy and Precision of Cranial Morphological Traits for Sex Determination. *Journal of Forensic Sciences*, 51(4), 729-735. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2006.00177.x>
- Windhager, S., Mitteroecker, P., Rupić, I., Lauc, T., Polašek, O., & Schaefer, K. (2019). Facial aging trajectories : A common shape pattern in male and female faces is disrupted after menopause. *American Journal of Physical Anthropology*, 169(4), 678-688. <https://doi.org/10.1002/ajpa.23878>
- Xie, Q.-F., & Ainamo, A. (2004). Correlation of gonial angle size with cortical thickness, height of the mandibular residual body, and duration of edentulism. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 91(5), 477-482. <https://doi.org/10.1016/S0022391304001118>
- Yamaguchi, K., Hara, K., Nakagawa, K., Namiki, C., Ariya, C., Yoshimi, K., Nakane, A., Kubota, K., Furuya, J., & Tohara, H. (2020). Association of aging and tooth loss with masseter muscle characteristics : An ultrasonographic study. *Clinical Oral Investigations*, 24(11), 3881-3888. <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03255-y>
- Yamaguchi, K., Tohara, H., Hara, K., Nakane, A., Kajisa, E., Yoshimi, K., & Minakuchi, S. (2018). Relationship of aging, skeletal muscle mass, and tooth loss with masseter muscle thickness. *BMC Geriatrics*, 18(1), 67. <https://doi.org/10.1186/s12877-018-0753-z>
- Yamashita, A. L., Iwaki Filho, L., Ferraz, F. W. da S., Ramos, A. L., Previdelli, I. T. D. S., Pereira, O. C. N., Tolentino, E. de S., Chicarelli, M., & Iwaki, L. C. V. (2021). Accuracy of three-dimensional soft tissue profile prediction in orthognathic surgery. *Oral and Maxillofacial Surgery*. <https://doi.org/10.1007/s10006-021-00988-2>
- Zaafrane, M., Ben Khelil, M., Naccache, I., Ezzedine, E., Savall, F., Telmon, N., Mnif, N., & Hamdoun, M. (2018). Sex determination of a Tunisian population by CT scan analysis of the skull. *International Journal of Legal Medicine*, 132(3), 853-862. <https://doi.org/10.1007/s00414-017-1688-1>
- Zedníková Malá, P., Krajíček, V., & Velemínská, J. (2018). How tight is the relationship between the skeletal and soft-tissue facial profile : A geometric morphometric analysis of the facial outline. *Forensic Science International*, 292, 212-223. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.09.014>

Zelditch, M. L., Swiderski, D. L., Sheets, H. D., & Fink, W. L. (2004). Geometric Morphometrics for Biologists. In *Geometric Morphometrics for Biologists* (p. vii). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012778460-1/50000-4>

Zheng, J., Ni, S., Wang, Y., Zhang, B., Teng, Y., & Jiang, S. (2018). Sex determination of Han adults in Northeast China using cone beam computer tomography. *Forensic Science International*, 289, 450.e1-450.e7. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.05.036>

ANNEXE



Sex estimation in the cranium and mandible: a multislice computed tomography (MSCT) study using anthropometric and geometric morphometry methods

Claudia Gillet¹ · Leonor Costa-Mendes^{1,2} · Camille Rérolle^{1,3} · Norbert Telmon^{1,4} · Delphine Maret^{1,2} · Frédéric Savall^{1,4}

Received: 12 April 2019 / Accepted: 5 November 2019 / Published online: 2 January 2020

© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2020

Abstract

Introduction The purpose of this study was to analyze the respective contribution of the skull and mandible to sex estimation in an entire cranium using metric and geometric morphometric methods and multislice computed tomography (MSCT) analysis.

Materials The study sample comprised 120 individuals aged 23 to 84 years and divided into three groups (whole sample and over or under 40 years of age).

Methods Forty-eight osteometric landmarks were positioned using Osirix®, 34 for the cranium and 14 for the mandible. The data were analyzed using univariate analyses and logistic regression using backward stepwise selection with cross-validation of the classification results. Generalized procrustes analysis (GPA) was used, and Goodall's *F* test and Mahalanobis D^2 matrices allowed an assessment of statistical significance.

Results The classification accuracy of cranium models ranged from 87% to 88.3%, and from 68% to 81.4% for the mandibular models. With geometric morphometry, accuracy was of 94–100% for the cranium and 84.2% for the mandible.

Discussion We conclude that the mandible had a higher accuracy rate for individuals over 40 years than individuals under 40 years of age, although the accuracy of geometric morphometry did not differ significantly between the age groups. The cranium, however, presented greater predictability for all the parameters assessed.

Keywords Forensic science · Forensic anthropology · Sex estimation · Geometric morphometry · Skull · Mandible

Introduction

Sexual diagnosis is the first step in the process of identification, and it is the most crucial aspect of anthropological

Claudia Gillet and Leonor Costa-Mendes contributed equally to this article.

✉ Frédéric Savall
fredsavall@hotmail.fr

¹ Laboratoire d'Anthropobiologie AMIS, UMR 5288 CNRS, Université Paul Sabatier, Allées Jules Guesde, 31000 Toulouse, France

² UFR Odontologie de Toulouse, Centre Hospitalier Universitaire, 3 Chemin des Maréchaux, 31062 Cedex 9, Toulouse, France

³ Service de Médecine Légale, Centre Hospitalier Universitaire Trousseau, Avenue de la République, 37170 Chambray-lès-Tours, France

⁴ Service de Médecine Légale, Centre Hospitalier Universitaire Rangueil, Avenue du Professeur Jean Poulhès, 31059 Toulouse, France

examination in archaeology or forensic medicine in order to correctly estimate age, ancestry, and stature. The pelvis is an accurate indicator of sex; however, its fragility means it is often not preserved post-mortem [1]. The skull is therefore frequently used for sex estimation, since it is the second most dimorphic bone of the skeleton [2, 3]. The mandible is the largest, strongest bone in the face and is therefore usually well preserved in forensic and archaeological contexts. However, it can be separated from the cranium following taphonomic processes, which means that the cranium and mandible are seldom found together, or both intact. Despite the large number of studies on this subject, the majority of previous investigations used either the cranium or the mandible for sex estimation. There is therefore a paucity of comparative studies of both structures and a lack of consensus regarding which structure presents the higher level of sexual dimorphism since, depending on the study, classification accuracy rates can be higher for the mandible [4] or for the cranium [5]. Consequently, the effect caused by the absence of one of these structures in the process of sex diagnosis remains unknown.

Several methods can be employed for sex estimation: qualitative (descriptive) methods, semi-quantitative (scoring) methods, or quantitative (measurement) methods [3]. While size may be an important component of sexual dimorphism in the cephalic extremity and has been well documented by traditional measurement methods, anatomic differences between females and males can also be attributed to size-independent features such as shape and form. The emergence of geometric morphometric methods in the past years has enabled the study of the dimorphism of conformation of these anatomical structures, allowing the comparison of objects by their shape only, and not by their size. Geometric morphometrics have been successfully applied in several studies as part of a sexual dimorphism analysis of the skull or the mandible, but, to our knowledge, the use of these methods for the study of both the cranium and mandible, in the same sample, has only been employed by Rosas and Bastir [6]. Furthermore, the combination of metric and geometric morphometric methods has been used for the analysis of cranial sexual dimorphism [7], but not for the analysis of the mandible and of both structures in the same individual. Multislice computed tomography (MSCT) confers more accurate results to geometric morphometrics than those obtained using other methods [8, 9]. Indeed, MSCT enables a greater reproducibility in the placement of landmarks.

Toledo Avelar et al. showed that aging has an impact on facial dimorphism, particularly on the bony structures [10]. Dimorphism has mainly been studied in large and varied age groups. Previous studies have focused on dimorphism in young people [11–13]; however, few have focused on skull dimorphism according to the individuals' age [14]. We know that there is bone resorption with aging, especially due to the loss of oestrogen [15]. These alterations in the conformation of bones could change the bias in the analysis of sex determination according to age.

The main aim of our study was to analyze the role of the cranium and mandible in the sexual dimorphism of the cephalic extremity and to compare their respective contribution to sexual diagnosis since, in forensic and archaeological contexts, both structures are seldom found, or are seldom intact. Our secondary aim was to evaluate whether age had an impact on the sexual dimorphism of the face and mandible in our sample. For this purpose, we studied both size and shape sexual dimorphism using a combination of metric and geometric morphometric methods from MSCT examinations.

Materials

Reference sample

We carried out a retrospective study of craniums from adult patients undergoing clinical MSCT scans in our institution between 2015 and 2018 (Toulouse, France). The MSCT examinations were requested in a clinical context of vascular

disease. Patients with a history of bone disease or trauma were excluded. A total of 120 MSCT examinations were included, corresponding to 63 male individuals (mean age 48 years, minimum age 25 years, maximum age 82 years, and standard deviation (SD) 15.5) and 57 female individuals (mean age 47 years, minimum age 23 years, maximum age 84 years, and SD 15.7) (Fig. 1). Measurements and images were recorded without access to any demographic data. Sex and age were recorded at the time of the computed tomography (CT) acquisition.

According to French law, the results of medical imaging examinations may be used retrospectively without the patient's consent when these examinations have been carried out for clinical purposes and when they have been recorded anonymously (article 40-1, law 94-548 of July 1, 1994).

MSCT

MSCT images were obtained using a picture archiving and communication system (PACS, McKesson Medical Imaging Group, Richmond, BC, Canada) used by our institution. Examinations were performed on a Sensation 16 Scanner (General electric medial system, Erlangen, Germany) with 16×1.5 mm collimation. The image matrix was 512×512 pixels. A head filter was used. Depending on the purpose of the examination, axial reconstructions were performed every 0.6 mm.

Post-processing and statistical analysis

Scans were saved as Digital Imaging and COmmunications in Medicine (DICOM) files, and post-processing was performed using OsiriX Medical Imaging software (Pixmeo, Geneva, Switzerland) v.5.9 64-bit®. Calculations and statistical analyses were carried out using R 3.0.2 software version 1.1.463© [16].

Methods

Landmark selection and positioning

Based on standard anthropometric techniques, 48 osteometric landmarks were selected on the cranium ($n = 34$) and the mandible ($n = 14$) (Table 1). The landmarks chosen were those used by classic osteometric methods for bone sexing, in order to allow comparisons with previously published results [17–20]. The landmarks were type I or type II landmarks [21]. The landmarks were positioned using Osirix® DICOM Viewer on the MSCT reconstructions using the multiplanar reconstructions (MPR) mode. The corresponding 3D coordinates (x , y , and z) for each landmark were subsequently recorded. All the landmarks used are listed in Table 1.

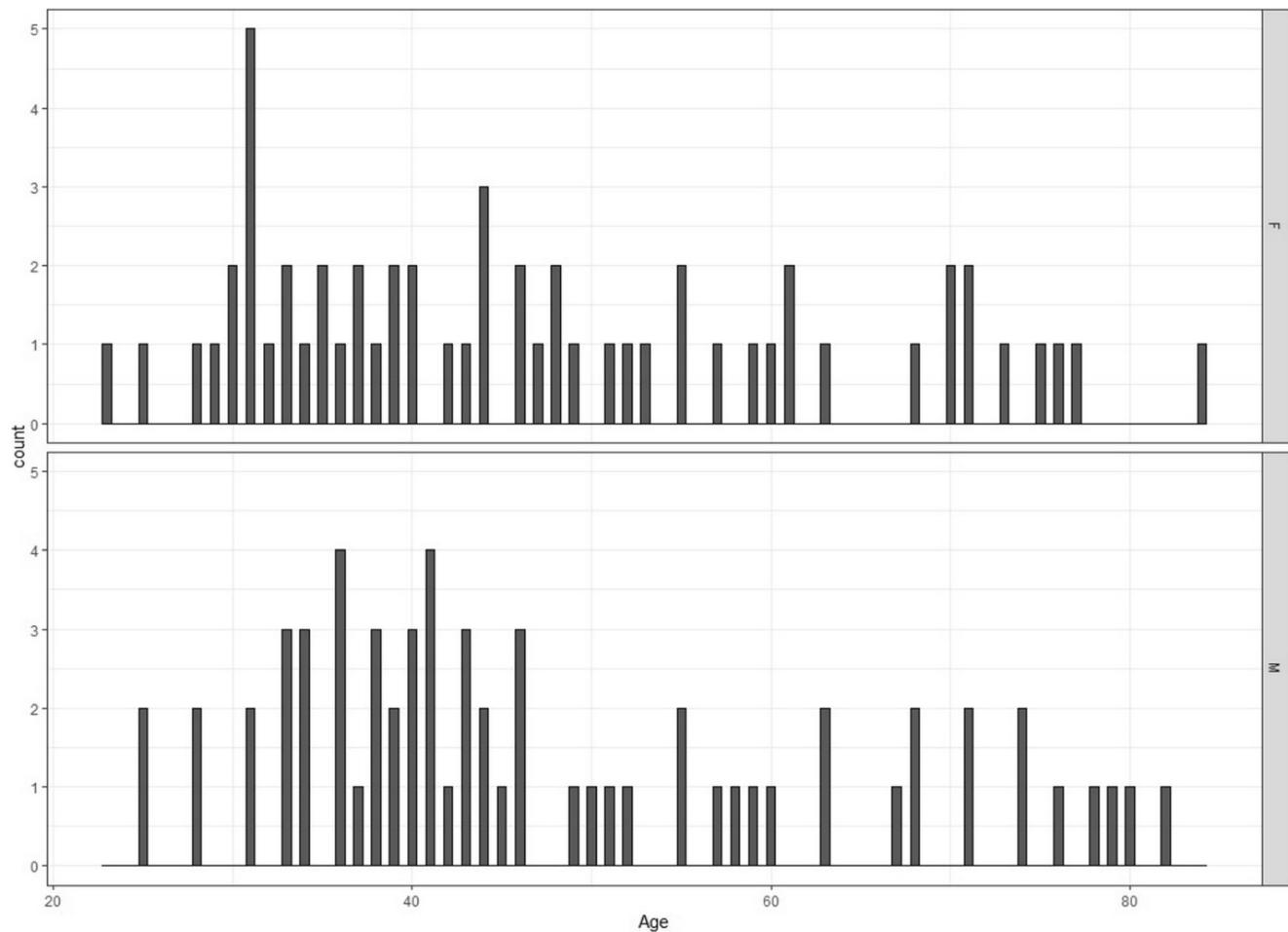


Fig 1 Histogram of the distribution of the 120 individuals used in this study (upper histogram, female distribution; lower histogram, male distribution) Figure 1 contains poor quality of text inside the artwork. Please do not re-use the file that we have rejected or attempt to increase its resolution and re-save. It is originally poor, therefore, increasing the

resolution will not solve the quality problem. We suggest that you provide us the original format. We prefer replacement figures containing vector/editable objects rather than embedded images. Preferred file formats are eps, ai, tiff and pdf. Thank you. I put the figure as an attachment.

Precision studies

The data used in this study was collected by one observer. To assess inter-observer error, a second observer carried out one analysis of 40 (20 males and 20 females) randomized specimens from the sample. To assess intra-observer error, the same observer carried out a second analysis of the same 40 specimens 1 month after the first analysis. The intra- and inter-observer error was calculated based on the generalizability theory (GT); the reliability of relative interpretations is referred to as the generalizability coefficient (G). A G-coefficient close to 1 indicates high reliability [22].

Craniometric parameters and univariate analysis

One angle and 26 distances were calculated from the 3D coordinates of the landmarks of interest Table 2. These parameters corresponded to the measurements traditionally reported in the literature on skeletal sex determination (Table 3). Size-related

sexual dimorphism was investigated by comparing the male and female mean values for each craniometric parameter using parametric (student's *t* test) or non-parametric (Mann-Whitney U and Aspin Welsh) statistical tests, taking a *p* value < 0.05 as significant and < 0.2 as an accepted value for the multivariate analysis. Student's *t* test was used for the variables following a normal distribution and Mann-Whitney U / Aspin Welsh tests for the variables that didn't follow a normal distribution.

The sexual size dimorphism (SSD) was calculated using the Lovich Gibbon's ratio as the ratio between the male and female mean values [23]. The first fifteen distances with the highest ratio were used for the logistic regression on our 120 individuals.

Multivariate analysis

Three data sets of measurements were taken into account: cranium and mandible measurements together, cranium measurements, and mandible measurements. To investigate whether age has an impact on the sexual dimorphism

Table 1 Cranium landmark definitions

Landmark	Name	Definition
N	Nasion	The midline point where the two nasal bones and the frontal bone intersect
Ns	Nasospinale	The point at which a horizontal line tangential to inferior margins of the nasal aperture is intersected by the medial plane
Al	Alare	The most lateral point of the nasal aperture
Ju	Jugale	The point at the highest depth of the notch between the temporal and frontal processes of the zygomatic bone
Pr	Prosthion	The most anterior point in the midline of the alveolar processes of the maxillae
Zy	Zygion	The most laterally positioned point on the zygomatic arches
Zm	Zygomaxillare	The most inferior point on the zygomaticomaxillary suture
Fo	Fronto-zygomaticorbital	Intersection of the frontozygomatic suture and the lateral margin of the orbit
Mf	Maxillo-frontale	The point where the anterior lacrimal crest of the maxilla meets the frontomaxillary suture
Ec	Ectoconchion	The most lateral point on the orbital margin
Os	Superior orbital margin	Intersection of the superior margin of the orbit and the normal to the line between the maxillofrontale and ectoconchion
Oi	Inferior orbital margin	Intersection of the inferior margin of the orbit and the normal to the line between the maxillofrontale and ectoconchion
Ecm	Ectomolare	The most lateral point on the outer surface of the alveolar margins of the maxilla, often at the second molar position
Po	Porion	The uppermost point on the margin of the external acoustic meatus
Ms	Mastoidale	The most inferior point on the mastoid process
G	Glabella	Eminence of the frontal bone located between the two eyebrows, above the nose
Ba	Basion	The midline point on the anterior margin of the foramen magnum
		For some measurements, the point is located on the most posterior point of the foramen's anterior rim and is sometimes distinguished as the endobasion
B	Bregma	The ectocranial point where the coronal and sagittal sutures intersect
O	Opisthion	The midline point of the posterior margin of the foramen magnum
Op	Opisthocranion	The point at the rear of the skull. The midline ectocranial point at the farthest chord length from the glabella
Fml	Foramen magnum lateral	The most lateral point of the margin of the foramen magnum

of the cephalic extremity, different age groups were examined: individuals aged 23 to 84 (whole sample) and individuals under and over 40 years of age, respectively ($n = 50$ for individuals under 40 years and $n = 70$ for individuals over 40 years). A multiple logistic regression using backward stepwise selection was applied to these three data sets for the whole sample and for individuals under and over 40 years of age. This procedure enabled

the selection of the most accurate combination of variables and eliminated the mandible measurements from the cranium + mandible data sets. Thus, we kept a total of six models: model 1 (cranium measurements) and model 2 (mandible measurements) each for the whole sample and for individuals under and over 40 years of age. In order to validate the generated models, we calculated the posterior probabilities and sex bias and performed a leave-

Table 2 Mandible landmark definitions

Landmark	Name	Definition
Cs	Condylion sup	The most superior point on the mandibular condyle
Mn	Mandibular Notch	The most inferior point on the mandibular notch
Co	Coronion	The most superior point on the coronoïd process
Go	Gonion	The most lateral external point of the junction of the horizontal and ascending rami of the lower jaw
Id	Infradentale	The midline point of the superior tip of the septum between the mandibular central incisors
Mns	Mandibular symphysis	The deepest point of the mandibular symphysis curvature (between the infradentale and pogonion landmarks)
Pg	Pogonion	The most anterior midline point on the chin of the mandible
Gn	Gnathion	The most inferior midline point on the mandible
Ml	Mentale	The most inferior point at the margin of the mandibular mental foramen

Table 3 The univariate statistics and the mean male and female values of the cranium and mandibular measurements

Measurement	Landmark	P value	Males mean values \pm SD	Females mean values \pm SD
Mastoidal height	Ms_Po	< 0.001	34.14 \pm 3.45	29.99 \pm 3.07
Mandibular symphysis height	Gn_Id	< 0.001	32.25 \pm 4.21	29.43 \pm 3.64
Ramus height	Cs_Go	< 0.001	58.96 \pm 6.56	54.34 \pm 6.36
Bigonial breadth	Go_Go	< 0.001	94.94 \pm 7.12	87.52 \pm 5.25
Bicondylar breadth	Cs_Cs	< 0.001	104.16 \pm 6.29	96.77 \pm 6.14
Bizygomatic breadth	Zy_Zy	< 0.001	131.73 \pm 5.20	122.73 \pm 4.08
Nasal height	N_Ns	< 0.001	55.85 \pm 3.46	52.06 \pm 3.03
Bimastoïdale	Ms_Ms	< 0.001	109.86 \pm 4.11	102.47 \pm 3.90
Corpus length	Go_Pg	< 0.001	90.31 \pm 5.29	84.69 \pm 6.07
Palate breadth	Ecm_Ecm	< 0.001	60.69 \pm 4.38	57.14 \pm 3.22
Foramen magnum breadth	Fml_Fml	< 0.001	33.37 \pm 2.74	31.49 \pm 2.52
Cranial base length	Ba_N	< 0.001	104.98 \pm 4.75	99.40 \pm 4.05
Upper facial height	N_Pr	< 0.001	73.15 \pm 5.41	69.37 \pm 4.24
Nasal breadth	A1_A1	0.0015	24.74 \pm 2.16	23.47 \pm 2.15
Foramen magnum length	Ba_O	< 0.001	38.65 \pm 2.40	36.73 \pm 2.47
Frontal chord	B_N	< 0.001	114.12 \pm 5.20	108.66 \pm 4.46
Bimaxillary breadth	Zm_Zm	< 0.001	90.08 \pm 5.68	85.67 \pm 4.48
Bijugal breadth	Ju_Ju	< 0.001	108.49 \pm 4.07	103.85 \pm 3.55
Frontal breadth	Fo_Fo	< 0.001	98.56 \pm 4.00	94.42 \pm 3.54
Maximum cranial length	G_Op	< 0.001	183.36 \pm 7.59	175.95 \pm 5.85
Basion-bregma height	Ba_B	< 0.001	137.24 \pm 5.79	131.81 \pm 4.68
Basion-nasospinale length	Ba_Ns	< 0.001	95.29 \pm 4.73	91.79 \pm 4.62
Nasio-occipital length	N_Op	< 0.001	181.65 \pm 7.27	175.06 \pm 5.74
Basion-prosthion length	Ba_Pr	0.002	98.00 \pm 5.46	94.75 \pm 5.80
Orbital breadth	Ec_Mf	0.022	42.56 \pm 2.26	41.64 \pm 2.13
Orbital height	Oi_Os	0.3923	-	-
Gonial angle	Cs_Go_Pg	0.405	-	-

one-out cross-validation (LOOCV). The sex bias was calculated by subtracting the male correct prediction percentage from the female correct prediction percentage.

Morphometric geometric analyses

To study sexual dimorphism of shape and conformation, the cranium (neurocranium and viscerocranium) and the mandible were analyzed individually with a generalized procrustes analysis (GPA). The GPA minimizes the sum of the squared distances between homologous landmarks by translating, rotating, reflecting, and scaling them to best fit [9]. Scaling is performed according to the centroid size (CS), the square root of the sum of the squared Euclidean distances from each landmark to the centroids, which is the mean of the landmark coordinates. Using GPA, a consensus configuration, or mean shape configuration, was produced for men and women so that differences between the male and female configurations could be compared. These superimposed mean

male and female landmark configurations (consensus configuration shape) were represented graphically as wireframes, that is, as lines between landmarks with a 3D representation, individually for men and women. The landmark coordinates were analyzed for the entire cranium, separate bones, and bone complexes using a principal components analysis (PCA) to describe major trends in shape variation within the sample. To determine whether the shape distances were statistically significant, a *p* value was also calculated using the Goodall's *F* test and Mahalanobis *D*² matrices. The Goodall's *F* test allows testing for an overall shape difference between groups and takes into account all the sample variables, and Mahalanobis distances (*D*²) measure the distances between group centroids on a scale that is adjusted to the within-group variance in the direction of the group difference [21]. To assess the performance of sexual discrimination for the cranium and mandible, a canonical variate analysis (CVA) was then conducted using procrustes residuals.

Results

Precision studies

Our results present a good reproducibility. The G-coefficient for the inter-observer variability was $G = 0.997$, and the G-coefficient for the intra-observer variability was $G = 0.999$.

Univariate analysis

Mastoidal height (Ms_Po), mandibular symphysis height (Gn_Id), ramus height (Cs_Go), and bигonial breadth (Go_Go) measurements presented the highest sexual dimorphism ratios. The results of the univariate analysis and the mean male and female values are shown in Table 3. The results for all the landmark measurements were significant ($p < 0.05$) except for the orbital height and gonial angle measurements, indicating a marked sexual dimorphism in the cephalic extremity of the study sample.

Multivariate analysis

Two main models were calculated from the three data sets (cranium and mandible measurements, cranium measurements only, and mandible measurements only). When cranial and mandibular measurements were tested, the most accurate model generated from these data sets retained only cranial variables (model 1). This model (cranium) had the highest cross-validated accuracy: 88.3% for the whole sample and 88% and 87% for individuals under and over 40 years, respectively. The second model, obtained from mandibular variables, presented an overall accuracy of 77.5% after cross-validation. The level of accuracy rose to 81.4% for the group over 40 years of age. Sex bias was higher for the mandibular model in the entire sample and the under 40 age group.

The sex bias and accuracy rates before and after LOOCV are given in Table 4, in addition to measurements selected by the logistic regression using backward stepwise selection.

Morphometric geometric analyses

Shape analysis showed an overall greater sex prediction effectiveness for the cranium model.

The PCA indicated a significant sexual dimorphism of mandibular and cranial shape in our sample. The first two principal components, PC1 and PC2, accounted for 27.59% of the variance measured for the cranium and 45.07% for the mandible. The pattern of shape variation between males and females is summarized in Fig. 2.

Goodall's F and Mahalanobis distance were tested. The Mahalanobis distance between the male and female groups was 7.6 for the cranium and 2.0 for the mandible in the whole sample. The F test showed a greater accuracy of the cranium model for all

age groups. Canonical variate analysis (CVA) revealed that sex was correctly assigned in 97.5% of individuals for the cranium and 84.2% of individuals for the mandible (Table 5).

Discussion

The main purpose of this study was to evaluate the contribution of the cranium and mandible to sex estimation of the cephalic extremity and to assess if the absence of one of these structures had an impact on the identification process. We combined both metric and geometric morphometric methods to evaluate size- and shape-related sexual dimorphism separately.

Traditional anthropometric measurements have been widely employed for craniofacial and mandibular sexual dimorphism analysis. In our sample, the univariate analyses revealed a significant difference between males and females for all the measurements except orbital height and gonial angle. Oettlé et al. [24] also found that the gonial angle is not very reliable, despite the fact that this measurement has been used extensively in the literature [25, 26].

The mandible appears to be a reliable structure for sex estimation, with an accuracy ranging from 60% to 88% [4, 27, 29]. In a defined population such as the Brazilian population, the mandible presented an accuracy of 89.7% with a bias of -7.5 [30]. In a Malaysian population, the mandible presented a 78.5% accuracy after cross-validation in a sample of 79 individuals aged 18 to 74 [31]. In our study, metric analyses were performed on the cranium and the mandible of a French population. The five mandibular measurements selected after multiple logistic regression analysis for the whole sample ($n = 120$) showed a similar accuracy: 77.5% after cross-validation and bias = -16.1. Bias indicates a feminization of the mandible model, including when the accuracy rate is higher. Other authors have reported the same tendency: Kharoshah et al. [26], Dong et al. [28], and Mahakkanukrauh et al. [32] found that measurements of female mandibles were better assigned to their sex category than those of males.

Before and after cross-validation, our accuracy for the cranium model was, respectively, 90% (bias -2.3) and 88.3% (bias -5.5). Other authors have found similar results. With their most precise model after cross-validation, Franklin et al. [33] obtained 90% accuracy and a bias of -2.1, and Zaafrane et al. [20] obtained 90.04% accuracy and a bias without cross-validation of -2.9. However, in our study and for the individuals aged 23 to 84 ($n = 120$), the most accurate model did not contain mandible measurements. Therefore, the mandible does not improve the efficiency of the discrimination models and even increases their error rate. These results are consistent with those found by Steyn and İşcan [5], who showed that the cranium had a better prediction accuracy than

Table 4 Accuracy of the multivariate models (LOOCV = leave-one-out cross-validation)

Model	Accuracy (%)	Sex bias	LOOCV Accuracy (%)	Sex bias
Entire sample (n = 120)				
Model 1 (Cranium): (0.205 x Zy_Zy) + (0.211 x Ba_N) - (0.244 x N_Pr) + (0.270 x Ms_Ms) + (0.364 x Ms_Po) + (0.531 x N_Ns) - 98.666	90	-2.3	88.3	-5.5
Model 2 (Mandible): (0.142 x Go_Pg) + (0.226 x Gn_Id) + (0.152 x Go_Go) + (0.154 x Cs_Cs) + (0.190 x Cs_Go) - 59.104	84.2	-0.07	77.5	-16.1
Individual ≤ 40 years				
Model 1 (Cranium): (0.466 x Ba_O) + (0.344 x Ms_Po) + (0.310 x Zy_Zy) - 67.913	90	-4	88	-8
Model 2 (Mandible): (0.188 x Gn_Id) + (0.142 x Go_Pg) + (0.230 x Cs_Go) + (0.171 x Cs_Cs) - 48.671	78	4	68	-16
Individual > 40 years				
Model 1 (Cranium): (0.289 x Zy_Zy) + (0.333 x Ms_Po) + (0.337 x Ms_Ms) + (0.522 x N_Ns) - 110.670	88.6	-3.8	87	-6.4
Model 2 (Mandible): (0.200 x Cs_Cs) + (0.302 x Go_Pg) + (0.198 x Cs_Go) + (0.336 x Gn_Id) + (0.234 x Go_Go) - 89.145	82.9	3	81.4	-5.4

the mandible: 85.7% versus 81.5% in white South Africans. In a mixed population of South African black and white individuals, the difference was even more pronounced, with average accuracies of 98% for the cranium and 74–87% for the mandible [34]. Dayal et al. [4], however, found that the highest accuracy (85%) was obtained from the analysis of mandibular measurements, whereas the accuracy of a stepwise analysis using all cranial measurements was 80.8%. Franklin et al. [29, 35] also found a greater level of sex classification with mandibular rather than cranial measurements in the same

sample population. These differences can be explained by the fact that the assessment of sexually dimorphic features relies on group-specific standards and skeletal characteristics vary among different populations. To our knowledge, there was no previous study of sexual dimorphism of the skull in a southern European population; therefore, we cannot compare our results to former standards.

Another purpose of this study was to evaluate a possible age effect on the sexual dimorphism of the cranium and mandible. Walsh [15] explained that bone resorption due to a

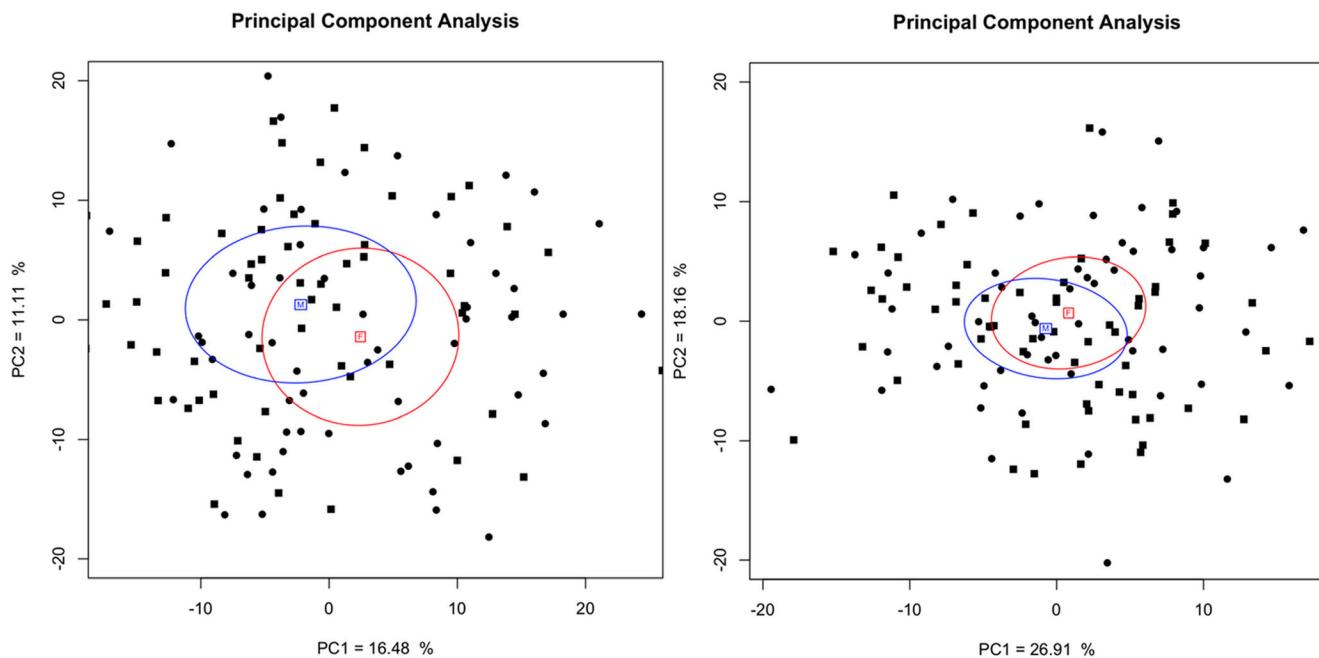


Fig 2 PCA obtained for the mean shape of the cranium (left panel) and mandible (right panel) of males and females (male, blue circles; female, red circles). The ellipses correspond to 68% confidence intervals

Table 5 Result of the Mahalanobis distance, Goodall's F test, and canonical variate analysis (CVA) for sex estimation (n = 120)

Model	Mahalanobis distance	Goodall's F	P value	CVA (%)
Individual n = 120				
Cranium	7.6	3.32	0.001**	97.5
Mandible	2.0	1.97	0.045*	84.2
Individual ≤ 40 years				
Cranium	3.5	2.02	0.019*	94
Mandible	5.4	1.45	0.136	-
Individual >40 years				
Cranium	6.1	2.13	0.009**	100
Mandible	2.9	1.27	0.25	-

decrease in hormone levels occurs with age. Guyomarc'h et al. [14] demonstrated with discriminant function analyses that the influence of age is significant on bone morphology in individuals both under or over 40 years of age. Therefore, we chose this cut-off for the study. In our whole sample, we noticed that the most accurate model of the skull selected by the backward stepwise analysis did not include the mandibular distances. It would therefore appear that the mandible is not of significant interest when the entire cranium model can be used. However, the accuracy of our results for the mandible increases for individuals aged over 40 years (68% under 40 years and 81.4% over 40 years), whereas it remains equivalent for both age groups for the cranium model. One hypothesis could be that these results are due to a conformational modification of the mandible with age [10]. However, it is also possible that the decrease in hormone levels [15], such as oestrogen, causes a stronger resorption of the facial bones in females than males. This would increase the dimorphism between the sexes and rectify the bias.

In the second part of our study, we analyzed the differences in the shape of the bones between males and females using a geometric morphological analysis. Whereas traditional methods capture only one aspect of cranial and mandibular variation, i.e., size variation, geometric morphometrics enables the study of multiple non-metrical features, such as structure shape, which are not easily captured by linear measurements. The differences observed between the sexes depend on size, robustness, and gracility but also on the differences in bone conformation. Geometric morphometrics allows the elimination of the size criterion and reduces observer bias and error, therefore offering higher accuracy [8, 9, 25]. Also, morphometric methods based on coordinates obtained from general procrustes analysis facilitate the application of multivariate statistics that allow quantification of shape resemblance and visualization of morphological differences [36]. Moreover, the removal of size from the analysis renders the PCA more sensitive to subtle shape differences [2].

Our geometric morphometric results indicate a significant difference between sexes ($p = 0.001$ for the cranium and $p =$

0.045 for the mandible). The accuracy rate of sexual dimorphism was increased compared to the metric analysis: 97.7% for the cranium and 84.2% for the mandible. These findings are in accordance with previous studies, supporting the fact that GMM (geometric morphometric) methods provide a better estimation of changes in cranial morphology than linear methods. Kimmerle [37] found an accuracy of 89.65% for black American and 86.65% for white American cranium parameters after including a centroid size analysis. Green and Curnoe [38] reported similar results, with the highest accuracy (86.8%) when using both shape and centroid size in the discriminant analysis of Southeast Asian skulls. Franklin et al. [13] obtained an accuracy of sex estimation of 87.5% using mandibular geometric morphometrics after cross-validation. The addition of centroid size values increased the accuracy to 97.5%. For the individuals under and over 40 years of age, our results revealed an absence of significance for the mandible shape. However, the cranium remains the most reliable model to discriminate males and females with 97.5% accuracy.

Geometric morphometric methods can also be of interest when faced with fragmentary skeletal remains. In these cases, traditional linear measurements methods can be difficult to apply and sexing accuracy decreases [20]. With GMM methods, by examining shape differences of complex structures, a high sex estimation accuracy can still be obtained without analyzing the whole cranium [39].

We made the choice to use MSCT examinations as support for our research since nowadays MSCT is commonly used in many forensic departments and is increasingly used in the field of forensic identification (virtual anthropology) [40, 41]. Using MSCT to investigate the craniofacial sexual dimorphism could present some considerable advantages. Firstly, the collection of data is easier and more precise than with dry bones, especially when there are a large number of samples. It also allows the creation of virtual standards that can more easily be applied in forensic contexts, where the discovered skulls are not always dry. Secondly, MSCT enables the study of quantitative features but also morphometry geometry

studies by landmarks allocation. Nevertheless, our study has some limitations. The number of individuals is not high enough for the under 40 age group, and the precise ethnicity of the individuals is unknown. We also noted that a small number of distance variables didn't follow a normal distribution, as is expected for biological distance variables. This is probably due to the relative small size of our sample. We therefore used adapted statistical tests for these variables (Mann-Whitney U and Aspin Welch tests). Although the number of individuals in our study is consistent with previous investigations [6, 13] and allowed the comparison of sexual dimorphism of the cranium and the mandible, our sample size is too small to establish population-specific standards for the French population. For that purpose, the same methods need to be applied to a larger number of MSCT examinations. This could be the object of a future investigation.

Our research allowed us to study the sexual dimorphism of crania and mandibles of a large panel of individuals aged 23 to 84 years, separated into three groups: whole sample ($n = 120$), individuals under 40 years of age, and individuals over 40 years of age. We focused on metric and geometric morphometric analyses of craniofacial bones, taking an overall approach to sex estimation. Our results showed that the cranium was the most dimorphic structure, regardless of which analysis method was used and the age of the subject. Analysis of the mandible, however, did not increase sex estimation accuracy when the whole skull was considered. Despite these results, we observed an increase in the accuracy rate of the mandible for the individuals over 40 years of age, even though the results of the geometric morphometrics analyses were not significant. Although the mandible does not appear to be the most dimorphic structure of the cephalic extremity in our sample, it remains a useful tool in the absence of an intact skull.

References

1. Scheuer L (2002) Application of osteology to forensic medicine. *Clin Anat* 15:297–312. <https://doi.org/10.1002/ca.10028>
2. Bigoni L, Velemínská J, Brůžek J (2010) Three-dimensional geometric morphometric analysis of cranio-facial sexual dimorphism in a Central European sample of known sex. *HOMO* 61:16–32. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2009.09.004>
3. Quatrehomme G (2015) Identification du disparu. In: Quatrehomme G (ed) *Traité d'anthropologie médico-légale*. De Boeck Supérieur, Louvain-la-Neuve, pp 99–1182
4. Dayal MR, Spocter MA, Bidmos MA (2008) An assessment of sex using the skull of black South Africans by discriminant function analysis. *HOMO* 59:209–221. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2007.01.001>
5. Steyn M, İşcan MY (1998) Sexual dimorphism in the crania and mandibles of South African whites. *Forensic Sci Int* 98:9–16. [https://doi.org/10.1016/S0379-0738\(98\)00120-0](https://doi.org/10.1016/S0379-0738(98)00120-0)
6. Rosas A, Bastir M (2002) Thin-plate spline analysis of allometry and sexual dimorphism in the human craniofacial complex. *Am J Phys Anthropol* 117:236–245. <https://doi.org/10.1002/ajpa.10023>
7. Franklin D, Cardini A, Flavel A, Kuliukas A (2012) The application of traditional and geometric morphometric analyses for forensic quantification of sexual dimorphism: preliminary investigations in a Western Australian population. *Int J Legal Med* 126(4):549–558. <https://doi.org/10.1007/s00414-012-0684-8>
8. Bifeld MF, Dedouit F, Sans N, Rousseau H, Rougé D, Telmon N (2013) Ontogeny of size and shape sexual dimorphism in the ilium: a multislice computed tomography study by geometric morphometry. *J Forensic Sci* 58:303–310. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12037>
9. Bookstein FL (1991) Morphometric tools for landmark data: geometry and biology. Cambridge University Press, Cambridge
10. Toledo Avelar LE, Cardoso MA, Santos Bordoni L, de Miranda AL, de Miranda Avelar JV (2017) Aging and sexual differences of the human skull. *Plast Reconstr Surg - Global Open* 5:e1297. <https://doi.org/10.1097/GOX.0000000000001297>
11. Coquerelle M, Bookstein FL, Braga J, Halazonetis D, Weber GW, Mitteroecker P (2011) Sexual dimorphism of the human mandible and its association with dental development. *Am J Phys Anthropol* 145:192–202. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21485>
12. Coqueugniot H, Giacobini G, Malerba (2002) L'utilisation de caractères morphologiques dans la diagnose sexuelle des mandibules d'enfants. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* <http://bmsap.revues.org/483>
13. Franklin D, Oxnard CE, O'Higgins P, Dadour I (2007) Sexual dimorphism in the subadult mandible: quantification using geometric morphometrics. *J Forensic Sci* 52:6–10. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2006.00311.x>
14. Guyomarc'h P, Dutailly B, Charlton J, Santos F, Desbarats P, Coqueugniot H (2014) Anthropological facial approximation in three dimensions (AFA3D): computer-assisted estimation of the facial morphology using geometric morphometrics. *J Forensic Sci* 59:1502–1516. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12547>
15. Walsh JS (2015) Normal bone physiology, remodelling and its hormonal regulation. *Surgery (Oxford)* 33:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.mpsur.2014.10.010>
16. RStudio, Inc (2009–2018) RStudio: integrated development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>
17. Giles E (1964) Sex determination by discriminant function analysis of the mandible. *Am J Phys Anthropol* 22:129–135. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330220212>
18. Giles E, Elliot O (1963) Sex determination by discriminant function analysis of crania. *Am J Phys Anthropol* 21:53–68. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330210108>
19. Vezzetti E, Marcolin F, Tomincasa S et al (2016) Facial landmarks for forensic skull-based 3D face reconstruction: a literature review. In: De Paolis LT, Mongelli A (eds) *Augmented reality, virtual reality, and computer graphics*. Springer International Publishing, Cham, pp 172–180
20. Zaafraane M, Ben Khelil M, Naccache I, Ezzedine E, Savall F, Telmon N, Mnif N, Hamdoun M (2018) Sex determination of a Tunisian population by CT scan analysis of the skull. *Int J Legal Med* 132:853–862. <https://doi.org/10.1007/s00414-017-1688-1>
21. Zelditch LM, Swiderski DL, Sheets DH (2012) *Geometric morphometrics for biologists*, 2nd edn. Elsevier/Academic Press, New York
22. He Q, Duan Y, Karsch K, Miles J (2010) Detecting corpus callosum abnormalities in autism based on anatomical landmarks. *Psychiatry Res* 183:126–132
23. Smith RJ (1999) Statistics of sexual size dimorphism. *J Hum Evol* 36(4):423–458
24. Oettlé AC, Pretorius E, Steyn M (2009) Geometric morphometric analysis of the use of mandibular gonial eversion in sex determination. *HOMO* 60:29–43. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2007.01.003>

25. Franklin D, O'Higgins P, Oxnard CE, Dadour I (2007) Sexual dimorphism and population variation in the adult mandible. *Forensic Sci Med Pathol* 3(1):15–22. <https://doi.org/10.1385/FSMP:3:1:15>
26. Kharoshah MAA, Almadani O, Ghaleb SS, Zaki MK, Fattah YAA (2010) Sexual dimorphism of the mandible in a modern Egyptian population. *J Forensic Leg Med* 17(4):213–215. <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2010.02.005>
27. Marinescu M, Panaiteescu V, Rosu M (2013) Sex determination in Romanian mandible using discriminant function analysis: comparative results of a time-efficient method. *Rom J Leg Med* 21:305–308. <https://doi.org/10.4323/rjlm.2013.305>
28. Dong H, Deng M, Wang W, Zhang J, Mu J, Zhu G (2015) Sexual dimorphism of the mandible in a contemporary Chinese Han population. *Forensic Sci Int* 255:9–15. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.06.010>
29. Franklin D, O'Higgins P, Oxnard CE, Dadour I (2008) Discriminant function sexing of the mandible of Indigenous South Africans. *Forensic Sci Int* 179:84.e1–84.e5. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2008.03.014>
30. de Oliveira GT, Alves MC, Haiter-Neto F (2016) Mandibular sexual dimorphism analysis in CBCT scans. *J Forensic Leg Med* 38: 106–110. <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2015.11.024>
31. Alias A, Ibrahim A, Bakar SNA et al (2018) Anthropometric analysis of mandible: an important step for sex determination. *Clin Ter* 169(5):e217–e223. <https://doi.org/10.7417/CT.2018.2082>
32. Mahakkanukrauh P, Sinthubua A, Prasitwattanaseree S, Ruengdit S, Singsuwan P, Praneatpolgrang S, Duangto P (2015) Craniometric study for sex determination in a Thai population. *Anat Cell Biol* 48(4):275–283. <https://doi.org/10.5115/acb.2015.48.4.275>
33. Franklin D, Cardini A, Flavel A, Kuliukas A (2013) Estimation of sex from cranial measurements in a Western Australian population. *Forensic Sci Int* 229:158.e1–158.e8. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.03.005>
34. Yaşar Işcan M, Steyn M (1999) Craniometric determination of population affinity in South Africans. *Int J Leg Med* 112(2):91–97. <https://doi.org/10.1007/s004140050208>
35. Franklin D, Freedman L, Milne N (2005) Sexual dimorphism and discriminant function sexing in indigenous South African crania. *HOMO* 55(3):213–228. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2004.08.001>
36. Noble J, Cardini A, Flavel A, Franklin D (2019) Geometric morphometrics on juvenile crania: exploring age and sex variation in an Australian population. *Forensic Sci Int* 294:57–68. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.10.022>
37. Kimmerle EH, Ross A, Slice D (2008) Sexual dimorphism in America: geometric morphometric analysis of the craniofacial region. *J Forensic Sci* 53:54–57. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2007.00627.x>
38. Green H, Curnoe D (2009) Sexual dimorphism in Southeast Asian crania: a geometric morphometric approach. *HOMO* 60:517–534. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2009.09.001>
39. Bejdová Š, Dupej J, Krajíček V, Velemínská J, Velemínský P (2018) Stability of upper face sexual dimorphism in central European populations (Czech Republic) during the modern age. *Int J Legal Med* 132(1):321–330. <https://doi.org/10.1007/s00414-017-1625-3>
40. Poulsen K, Simonsen J (2015) Computed tomography as routine in connection with medico-legal autopsies. *Forensic Sci Int* 171:190–197. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2006.05.041>
41. Dedouit F, Savall F, Mokrane F-Z et al (2014) Virtual anthropology and forensic identification using multidetector CT. *Br J Radiology* 87:20130468. <https://doi.org/10.1259/bjr.20130468>

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

RESEARCH ARTICLE

Sexual dimorphism of the mandibular conformational changes in aging human adults: A multislice computed tomographic study by geometric morphometrics

Leonor Costa Mendes^{1,2*}, Julien Delrieu^{1,2}, Claudia Gillet¹, Norbert Telmon^{1,3}, Delphine Maret^{1,2}, Frédéric Savall^{1,3}

1 Laboratoire d'Anthropobiologie AMIS, UMR 5288 CNRS, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, **2** UFR d'Odontologie de Toulouse, Toulouse, France, **3** Service de Médecine Légale, CHU Toulouse Rangueil, Toulouse, France

* leonor.c.mendes@gmail.com



OPEN ACCESS

Citation: Costa Mendes L, Delrieu J, Gillet C, Telmon N, Maret D, Savall F (2021) Sexual dimorphism of the mandibular conformational changes in aging human adults: A multislice computed tomographic study by geometric morphometrics. PLoS ONE 16(6): e0253564. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253564>

Editor: Paolo Piras, Università di Roma, ITALY

Received: December 2, 2020

Accepted: June 9, 2021

Published: June 22, 2021

Copyright: © 2021 Costa Mendes et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: The data that support the findings of this study are openly available in Open Science Framework at [http://doi.org/10.17605/OSF.IO/KB3HG](https://doi.org/10.17605/OSF.IO/KB3HG).

Funding: The authors received no specific funding for this work.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

Abstract

The aging process has an impact on mandibular bone morphology and can therefore affect shape sexual dimorphism. Understanding the effect of senescence on mandibular shape changes is particularly important to correctly estimate the sex of an individual and predict age-related conformational modifications. The purpose of this study was to assess age-related changes in mandibular shape and sexual dimorphism. The study sample comprised 160 Multi Slice Computed Tomography examinations of individuals aged 40 to 79 years. Geometric morphometric analysis of fourteen osteometric landmarks was used to examine sexual dimorphism and patterns of mandibular shape variation with age. Results showed that mandibular sexual dimorphism of shape remained significant with aging. Conformational changes occurred between 50 and 70 years and were different for male and female individuals. Females presented earlier and more marked age-related shape changes than males. These observations suggest that mandibular senescence is a sexually dimorphic process since its onset, rate, and the areas subjected to conformational changes differ from male to female individuals. Senescence-related changes present substantial variability, and further investigation is required to determine precisely the age that marks their onset.

Introduction

The cephalic extremity is a valuable element for adult sexual estimation. Both the facial skeleton and the mandible are highly dimorphic structures and are used in anthropological, archaeological and forensic studies with good classification accuracy rates [1, 2].

It is presently known that certain areas of the cephalic extremity undergo resorption with aging, and that among these areas, some present a stronger predisposition to conformational changes [3, 4]. The morphology of the cranium and upper facial skeleton is affected by the aging process [5], but these changes are particularly visible in the mid and lower face, and have different effects in male and female individuals. The maxilla, and particularly the pyriform

region, are subjected to bone remodeling and resorption, as are the superomedial and inferolateral aspects of the orbital rim, leading to a retrusion of the lower midfacial skeleton [6–10]. On the mandible, morphological changes are also visible with advancing age [11, 12]. However, there appears to be a lack of consensus regarding the trend of mandibular shape variation with aging [13–15].

Following a study by Enlow et al., the assumption that the mandible expands continuously with aging was widely accepted [16]. This was further supported by subsequent investigations, who related that midfacial and mandibular growth continues, although at different rates, through late adulthood [7, 11]. Several authors have indeed reported that mandibular height, width and length had a tendency to increase in older individuals [11, 12, 15, 17]. However, these studies were either composed of small samples [11, 16, 17] or their younger group comprised individuals who had not attained full skeletal maturity [12, 15, 17], inadvertently giving a result of mandibular growth between young and older age groups. Shaw et al., using metric measurements in mature Caucasian individuals, found a decrease in mandibular body height and length, as well as ramus height, with advancing age [18]. The tendency for a senescence-related mandibular atrophy was confirmed by Toledo Avelar et al. [14]. Nonetheless, it appears that certain areas are more subjected to age-related remodelling, such as the symphysis region, the alveolar ridge, the ramus, including the condyle and coronoid process, and the gonial area [3, 12, 14, 16, 18, 19].

The impact of aging in sex estimation accuracy of the facial skeleton has been observed by a few authors with qualitative [20] and quantitative (measurement) [21] methods. There appears to be a general increase in sexual classification accuracy of the cranium and mandible with advancing age, and these changes begin to emerge between 40 and 50 years of age [5, 20–22]. Although aging of specific features of the skeleton and soft tissues of the face has been studied, in particular with regard to facial plastic and reconstructive surgery [23, 24], there is a paucity of information regarding the evolution of sexual dimorphism of the mandible with advancing age, and the effect of age-related changes in mandibular conformational dimorphism remains unclear. Several authors have reported that the most dimorphic mandibular traits are the gonial area, followed by the condylar position, the coronoid process shape and the inclination of the alveolar process in the symphysis area [25–27]. Since senescence has an impact on these areas, we can assume that it could have an effect on mandibular sexual dimorphism.

Knowledge of senescence-related conformational changes with regard to sexual dimorphism is particularly important to correctly estimate the sex of an individual, and can be especially valuable to improve facial age progression techniques for the identification of long-missing persons and facial reconstructions [13].

Two-dimensional measurements, as used in traditional quantitative methods, cannot be used to quantify complex three-dimensional changes of the aging bone [28, 29]. Three-dimensional (3D) geometric morphometrics (GMM) is an accurate and reliable method for sex estimation allowing the study of morphological differences between individuals, particularly nonmetrical features not easily described by linear measurements [27, 30]. The main advantages of this method are that it enables differentiation of variability due to both size and shape, as well as the appreciation of shape conformational changes without subjective bias [1].

The primary aim of our study was to determine whether there exist age-related changes in mandibular shape. Our secondary aim was to assess if mandibular sexual dimorphism of conformation remains significant throughout middle and old age, following the analysis of these shape changes. We addressed the hypothesis that males and females present different mandibular conformational changes with aging. For this purpose, we used geometric morphometric analysis to study the mandibular shape variation of Multi Slice Computed Tomography (MSCT) examinations.

Materials and methods

Reference sample

Craniofacial multi-slice computed tomography (MSCT) scans of adult patients, performed between august 2014 and may 2019, were collected from the Toulouse University Hospital radiology archives (CHU Rangueil, Toulouse). The MSCT examinations were requested in a clinical context of vascular disease. Patients with a known history of facial pathology or trauma were excluded. A total of 160 MSCT scans were included, corresponding to 80 male and 80 female individuals, aged 40 to 79 years. Each age group presented an homogeneous and sequential distribution, and the mean age of the male and female individuals was 59,5 years and standard deviation (SD) 11,6 years ([Table 1](#)).

Data collection and post-processing

MSCT images were obtained using a picture archiving and communication system (PACS, McKesson Medical Imaging Group, Richmond, BC, Canada) used by our institution. Examinations were performed on a Sensation 16 Scanner (General electric medial system, Erlangen, Germany) with 16×1.5 mm collimation. The image matrix was 512×512 pixels, axial slices' thickness was 0.6 mm and voxel size was 15 μm . The CT scans were saved as Digital Imaging and COmmunications in Medicine (DICOM) files. Post-processing was performed using Horos™ Medical Imaging software v.3.3 64-bit and consisted in the application of a bone filter to improve spatial resolution.

Landmark selection and positioning

Based on standard anthropometric techniques and on the literature, 14 osteometric landmarks were selected on the mandible [25, 31, 32] ([Fig 1](#)). The chosen landmarks were type I landmarks (points whose structural location presents a strong homology and that are therefore easy to identify repetitively, *e.g.* juxtaposition of tissues, intersection of three sutures, foramina), or type II landmarks (points defined by geometric criteria, *e.g.* the tip of a structure, the point of maximum curvature along a structure) [30]. Type I and type II landmarks are used in classic osteometric methods for bone sexing thus allowing comparisons with previously published results. The landmarks were selected to represent the overall shape of the symphyseal region, the ramus and the inferior border of the mandible.

The landmarks were positioned using Horos™ DICOM Viewer (v.3.3 64-bit). The point tool was used to place the landmarks on the mandibular MSCT reconstructions using the multi-planar reconstruction (MPR) mode ([Fig 2A](#)). Their correct location was then validated on the

Table 1. Sample size and age group composition.

Age group (years)	Sample size	
	Male	Female
40–44	10	10
45–49	10	10
50–54	10	10
55–59	10	10
60–64	10	10
65–69	10	10
70–74	10	10
75–79	10	10

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253564.t001>

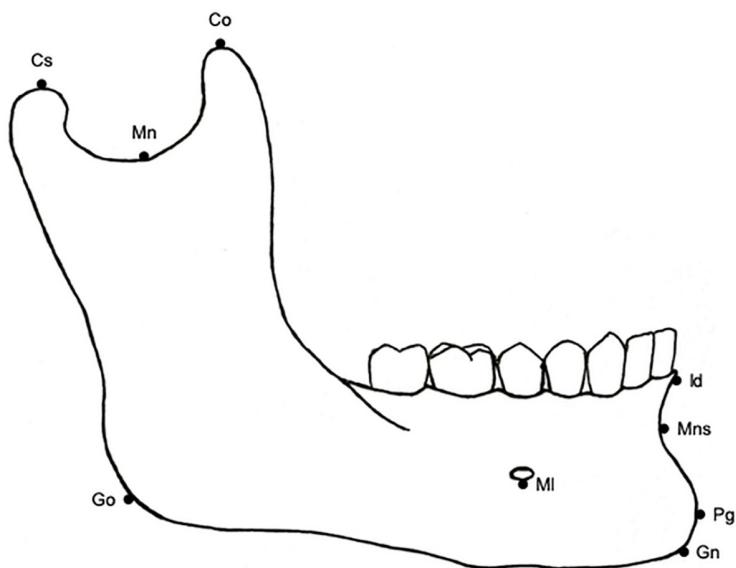


Fig 1. Mandibular landmarks used in the present study. Landmark's definitions are listed in Table 2.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253564.g001>

three-dimensional volume rendering mode (Fig 2B). The corresponding 3D coordinates (x , y , and z) for each landmark were subsequently recorded. All the landmarks used are listed in Table 2.

Morphological 3D analysis

Calculations and statistical analyses were carried out using R 3.0.2 software version 3.6.1[®] [33], the *shapes* (v1.2.5; Dryden, 2019) [34], *geomorph* (v3.2.1; Adams, Collyer & Kaliontzopoulou, 2020) [35] packages, as well as the *mshape*, *procGPA*, *procD.lm*, *procdist* and *CVA* functions. The data and R code that support the findings of this study are openly available in Open Science Framework at <http://doi.org/10.17605/OSF.IO/KB3HG> [36].

Repeatability. Geometric morphometric methods rely on the accurate identification and placement of landmarks on biological specimens. A landmark presenting a strong homology is a landmark that can repeatedly be identified with precision and that can provide information about shape changes along any of the three axes. In order to validate the accuracy and reproducibility of the landmark placement method used in this study, the assessment of inter and intra-observer agreement is desirable [37], so that any researcher can repeat the presented protocol. Intra-rater and inter-rater reliability of landmark selection was tested using the

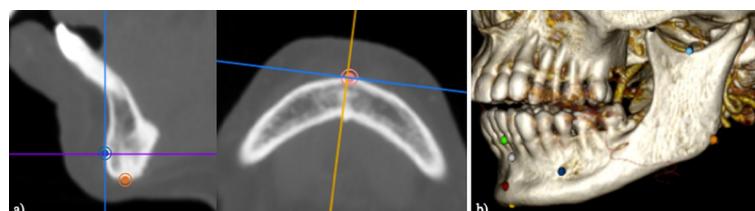


Fig 2. Landmark placement in Horos DICOM Viewer. (a) Multiplanar reconstruction on Horos showing the placement of the Pogonion (Pg) landmark. (b) 3D volume rendering displaying the mandibular landmarks as coloured dots.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253564.g002>

Table 2. Mandible landmark definitions.

Landmark	Name	Definition
Cs	Condylion superior	The most superior point on the mandibular condyle
Mn	Mandibular notch	The most inferior point on the mandibular notch
Co	Coronion	The most superior point on the coronoid process
Go	Gonion	The most lateral external point of the junction of the horizontal and ascending rami of the lower jaw
MI	Mentale	The most inferior point at the margin of the mandibular mental foramen
Id	Infradentale	The midline point of the superior tip of the septum between the mandibular central incisors
Mns	Mandibular symphysis	The deepest point of the mandibular symphysis curvature (between the infradentale and pogonion landmarks)
Pg	Pogonion	The most anterior midline point on the chin of the mandible
Gn	Gnathion	The most inferior midline point on the mandible

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253564.t002>

Generalizability Theory (GT) as described by Ercan et al. [38]. In GT, the reliability for relative (norm-referenced) interpretations is referred to as the generalizability (G) coefficient (landmark pairs-by-rater-by-subject, $1 \times r \times s$). Two observers performed the landmark selection twice: the first observer (LCM) carried out a second analysis of 40 randomized specimens from the sample (20 males and 20 females), 1 month after the first analysis, and a second observer (JD) completed an analysis of the same 40 specimens. G-coefficients between the two landmark sets from the same rater (intra-observer) and from the two different raters (inter-observer) were calculated. A G-coefficient close to 1 indicates high intra/inter-rater reliability [38–40].

Geometric morphometrics. Landmark-based geometric morphometric analyses were used to address the following two questions: the study of age-related variations of mandibular conformation and the estimation of mandibular sexual dimorphism.

The first step consisted in removing shape-unrelated variations in the sample (such as differences in scale, position and orientation) using generalized Procrustes analysis (GPA) [41] (*shapes* and *geomorph* packages, and *procGPA* function). GPA superimposes specimen landmark coordinates by translating them to a common origin, rotating them according to a least squares criterion aimed at minimizing Procrustes distances, and scaling them to unit centroid size until the coordinates of corresponding points align as closely as possible [30]. Centroid size is obtained by calculating the square root of the sum of the squared Euclidean distances of all landmarks to the centroid of the configuration [30]. This procedure allows the study of mandibular conformational differences independently of size.

To assess age-related conformation variations of the mandible and estimate the period in which mandibular senescence-related shape changes start to become visible, we tested age as a separate variable in different age groups. As our sample was composed of individuals presenting a balanced distribution between 40 and 79 years, we arbitrarily established three cut-offs at 55, 60 and 65 years, and performed a Procrustes ANOVA with permutation procedures to test shape differences between the younger and older age cohorts for both males and females. The statistical significance of differences was tested with Goodall's *F*-test, using Procrustes residuals (*procD.lm* function). A Principal Component Analysis (PCA) of the landmark coordinates was subsequently performed for the whole sample, to summarize the main trends in shape variation between sexes as well as the younger and older age cohorts. In addition, the mandibular aging rate within the sampled age period was also estimated separately for males and females [42]. As our sample is relatively small, we performed a multivariate regression of mandibular shape on age in a moving window of 20 individuals and estimated the average amount of mandibular shape change in units of Procrustes distance per year.

Finally, to compare the differences in mandibular shape between age cohorts, a consensus configuration, or mean shape configuration, was produced and represented graphically as wireframes, that is as lines between landmarks (*mshape* function).

To examine mandibular shape sexual dimorphism and determine whether shape differed between sexes and age groups, sex, age and size were studied as separate variables. Following a common GPA on all data, a regression between shape and sex with age as covariate was then performed, as well as a regression between shape and size with sex as covariate (*procD.lm* function).

A GPA followed by a Procrustes ANOVA with permutation tests was used to evaluate shape differences between the sexes in two age groups spanning a twenty-year range (40–59 years and 60–79 years). The magnitude of sexual dimorphism was assessed by calculating Procrustes distances and Mahalanobis distances between the sexes (*mshape* and *procdist* functions). Procrustes distance provides a measure of the differences in the positions of the landmarks in two shapes [30, 43], whereas Mahalanobis distance measures the distances between group centroids based on a scale adjusted to the within-group variance [44]. Goodall's *F*-test, performed on Procrustes residuals, tested the statistical significance of differences between sexes for the younger and older age groups. To compare the differences between male and female configurations, a consensus configuration was produced and represented graphically as wireframes.

Ethical considerations

All data and images used in this study were recorded anonymously, only sex and age were recorded at the time of the computed tomography (CT) acquisition. According to French law, the results of medical imaging examinations may be used retrospectively without the patient's consent when these examinations have been carried out for clinical purposes and when they have been recorded anonymously (article 40–1, law 94–548 of July 1, 1994).

Results

Repeatability

All 14 mandibular landmarks presented a strong inter and intra-observer agreement. The G-coefficient for both intra and inter-observer reliability was $G = 0.94$, indicating high reliability of the landmark selection.

Geometric morphometrics

Age-related changes in mandibular shape. To evaluate age-related conformation variations of the mandible, male and female individuals were studied separately. Permutation tests between age cohorts revealed statistical shape changes for males and females under and over 65 years. In the female sample, results were also statistically significant when the cut-off was placed at 55 and 60 years (Table 3).

For the Principal Components Analysis (PCA), male and female samples were divided into two age cohorts: individuals aged 40 to 54 versus 55 to 79 years for females, and individuals aged 40 to 64 versus 65 to 79 years for males. The first Principal Component axis (PC1) accounted for 40.56% of age-related shape variations. Although considerable variation in individual mandibular shape could be observed, female shape differences between the younger and older individuals were better discriminated than male's along PC1 (Fig 3).

The results of the PCA seemed to indicate that female mandibular shape draws closer to male mandibular shape with aging. In order to support this hypothesis, Procrustes distances were computed between the four age cohorts (younger and older males and females). The

Table 3. Male and female age-related mandibular conformational changes.

Differences between age cohorts Cut-off	Goodall's F	p-value
Males		
55 years (40–54 vs 55–79 years)	1.0951	0.344
60 years (40–59 vs 60–79 years)	1.6681	0.084
65 years (40–64 vs 65–79 years)	2.2903	0.016
Females		
55 years (40–54 vs 55–79 years)	3.261	0.004
60 years (40–59 vs 60–79 years)	3.8611	0.001
65 years (40–64 vs 65–79 years)	3.2856	0.002

The male and female samples are divided into two age cohorts, with a cut-off at 55, 60 and 65 years. Shape comparisons are performed between the younger and older age cohorts for males and females separately.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253564.t003>

results showed that the distance between old females and old males (0.0232; $p = 0.012$) is smaller than the distance between young females and young males (0.0296; $p = 0.001$). Furthermore, the distance between young females and old males (0.0371; $p = 0.001$) is greater than the distance between old females and young males (0.0269; $p = 0.001$).

Males displayed a relatively constant aging rate (the average amount of mandibular shape change per year). For females, however, an acceleration of the aging pattern could be observed from 50 years onwards, with a peak around 60 years of age (Fig 4).

Consensus configuration shapes were created for males and females. Based on previous results (Table 3), mean shape configurations of female individuals were compared before and after 55 years of age. For males, the cut-off was placed at 65 years.

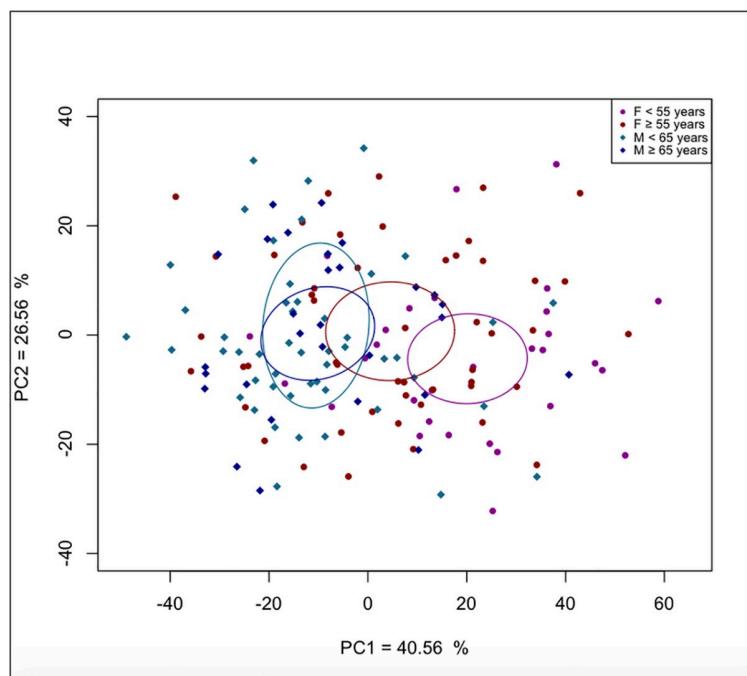


Fig 3. Principal Component Analysis of male and female mandibular shape. Each sex is divided into two age cohorts: 40–64 years vs. 65–79 years for males, and 40–54 years vs. 55–79 years for females. The effect of age on mandibular conformation is more marked for females.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253564.g003>

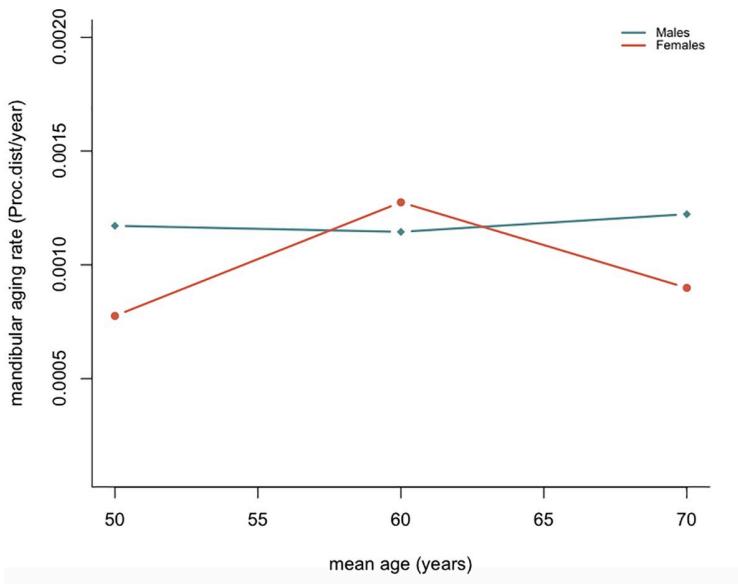


Fig 4. Male and female mandibular aging rates. An acceleration of female mandibular shape changes can be observed between 50–60 years. The rate of conformational changes is estimated in Procrustes distance / year.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253564.g004>

Regarding sex-specific shape variations, both males and females exhibited marked conformational changes in the mandibular symphysis region (Figs 5 and 6). Men presented mostly vertical changes, the upper symphysis following a downward and posterior movement, while

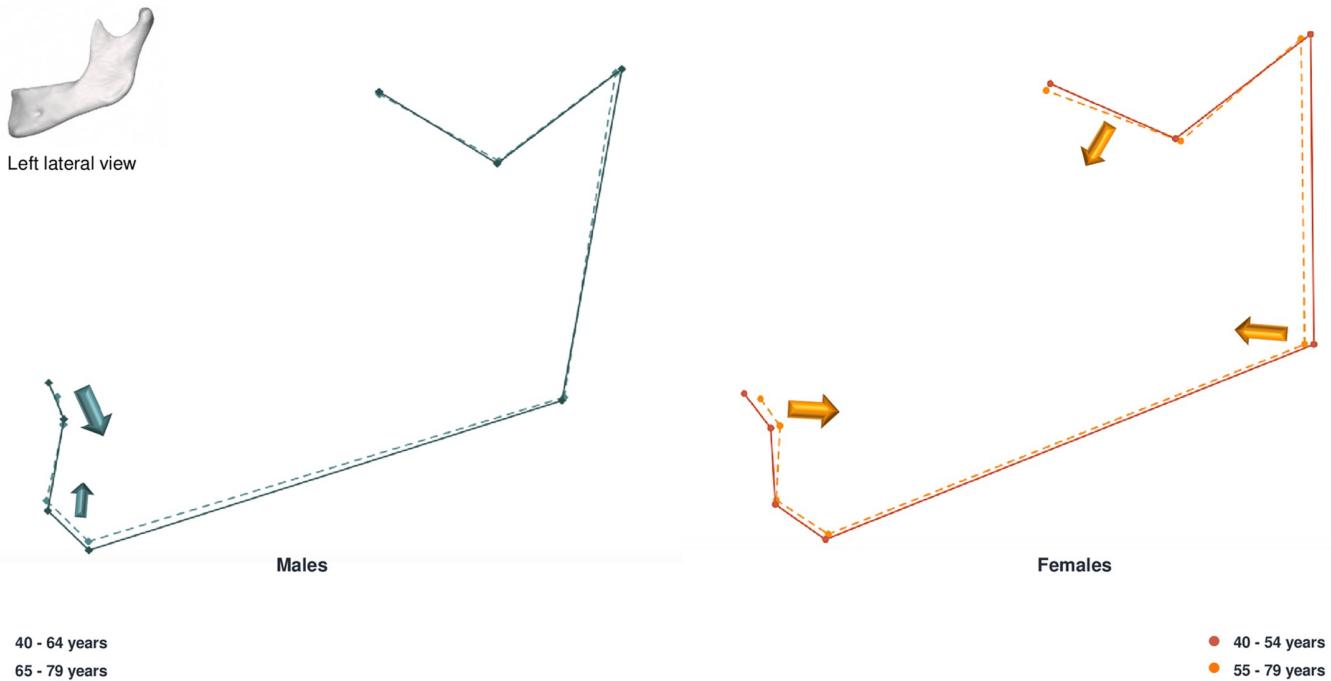


Fig 5. Lateral view of male and female mandibular shape variations with age. On the left: male mean shapes: 40–64 years (solid lines) vs 65–79 years (dashed lines). On the right: female mean shapes 40–54 years (solid lines) vs 55–79 years (dashed lines). The arrows represent the major directions and magnitude of changes in conformation with age.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253564.g005>

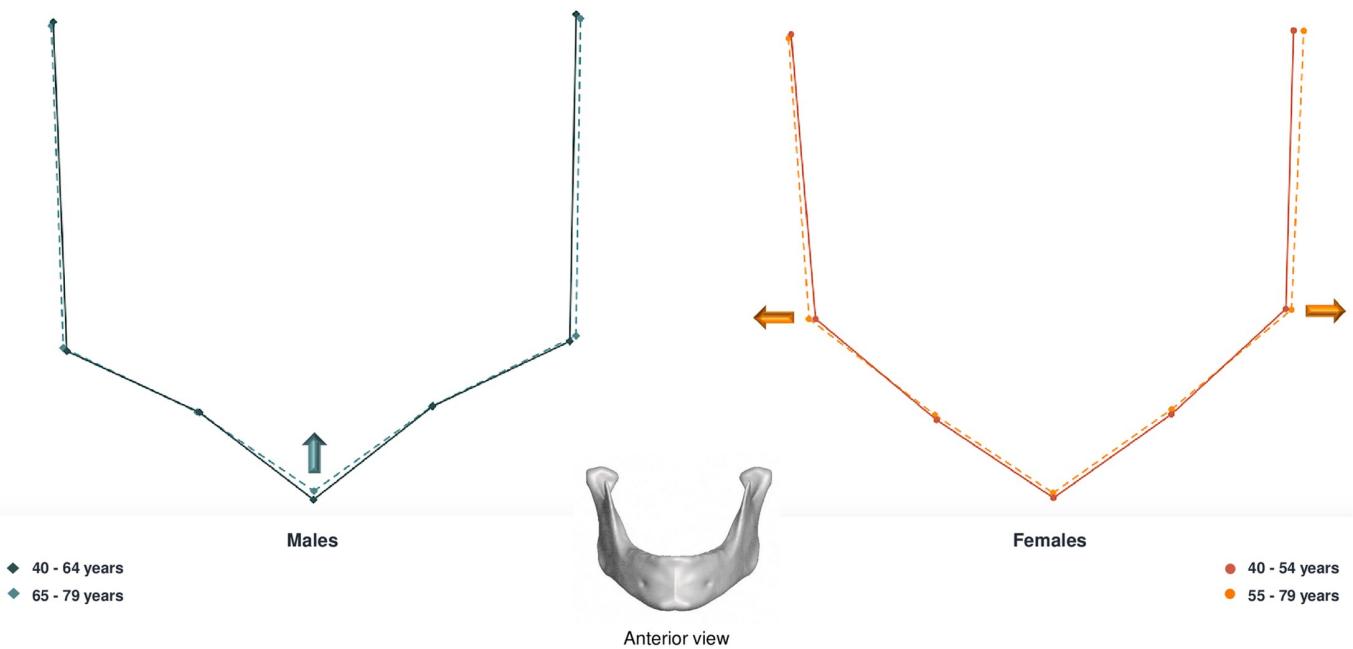


Fig 6. Anterior view of male and female mandibular shape variations with age. On the left: male mean shapes: 40–64 years (solid lines) vs 65–79 years (dashed lines). On the right: female mean shapes 40–54 years (solid lines) vs 55–79 years (dashed lines). The arrows represent the major directions and magnitude of changes in conformation with age.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253564.g006>

the gnathion moved upwards. Women presented vertical, lateral and sagittal changes with aging. The gonion moved laterally, upwards and forwards. There was a retrusion of the symphysis whereas the posterior border of the ramus moved in an anterior direction.

Mandibular shape sexual dimorphism. Both sex, age and size, as separate variables, had a statistically significant effect on mandibular shape ($p < 0.001$). However, the interactions of age and sex and size and sex were not statistically significant ($p = 0.197$) (Table 4).

Procrustes distances, Mahalanobis distances and Goodall's F -test revealed that sexual dimorphism of shape was statistically significant for the whole sample ($p < 0.001$), as well as the two age groups tested (Table 5).

Shape differences were visualized by means of consensus configuration shapes, produced for males and females. The sample was divided in two age groups: 40 to 59 years and 60 to 79 years. The mean female and male mandibular shapes were then superimposed and sexual dimorphism was visualized as wireframe displacements between the younger and older age groups.

Male and female mean shape superimpositions showed differences in the gonial region, the upper and posterior ramus region (coronoid, condyle and mandibular notch), and the

Table 4. Effect of age, sex and interaction of sex, age and size on mandibular shape for the whole sample ($n = 160$).

Variables	Goodall's F	p -value
Sex	5.1496	0.001
Age	4.4970	0.001
Size	7.4342	0.001
Sex: Age	1.3074	0.197
Size: Sex	0.7926	0.685

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253564.t004>

Table 5. Analysis of shape sexual dimorphism for the whole sample (n = 160), and permutation tests between sexes by age groups.

	Mahalanobis distance	Procrustes distance	Goodall's F	p-value
F40-59 / M40-59	3.2974	0.0282	3.9291	0.001
F60-79 / M60-79	2.4278	0.0246	2.9421	0.002
Whole sample (F/M)	2.0781	0.0159	5.0285	0.001

The sample is divided in two age groups (n = 40) both for males and females.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253564.t005>

mandibular symphysis (Figs 7 and 8). In the younger age group (40–59 years), shape differences between males and females were particularly marked in the symphysis area. Females presented more prominent symphysis in the younger age group, but the consensus configurations converged after 60 years. The gonion and condyle were more lateral in males than in females between 40 and 59 years but with advancing age this difference was less pronounced. Overall, the sexual differences observed in the younger group had a tendency to decrease after 60 years of age.

Discussion

Earlier studies have established that the senescence process has an impact on mandibular bone morphology, and that certain areas are more subjected to age-related remodelling, such as the symphysis region, the alveolar ridge, the ramus and the gonial area [3, 12, 14, 16, 18, 19]. As these areas are the most dimorphic within the mandibular bone, there is probably an evolution of mandibular sexual dimorphism with aging.

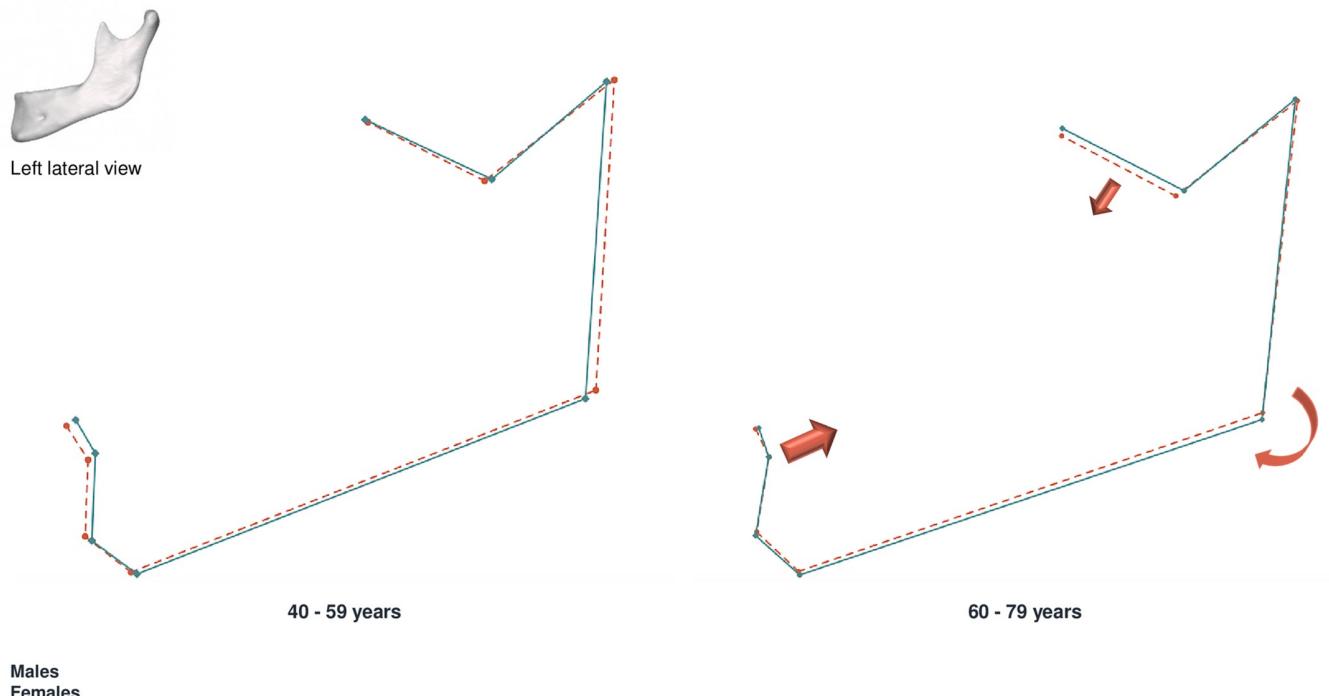


Fig 7. Left lateral view of male (blue) and female (red) mean shape superimposition. On the left: 40–59 year group. On the right: 60–79 year group. Males are represented as solid lines, females as dashed lines. Arrows represent the main trend of variation for female individuals between age groups.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253564.g007>

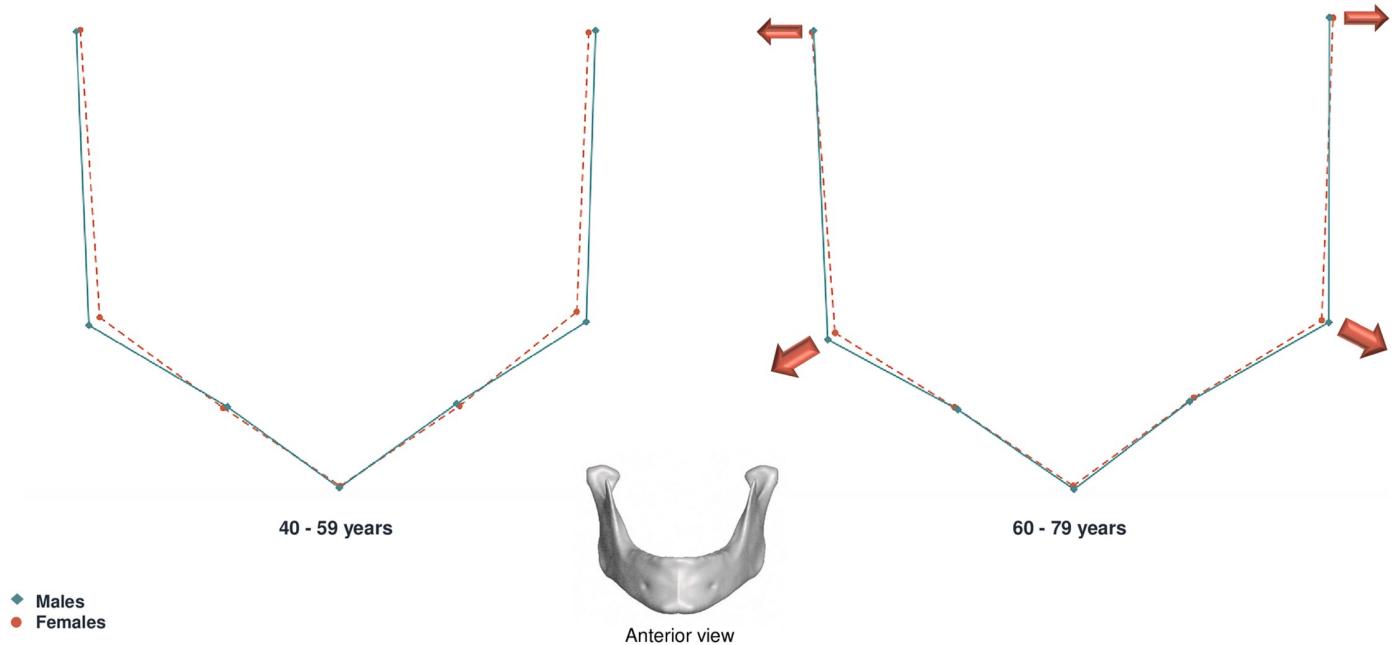


Fig 8. Anterior view of male (blue) and female (red) mean shape superimposition. On the left: 40–59 year group. On the right: 60–79 year group. Males are represented as solid lines, females are represented as dashed lines. Arrows represent the main trend of variation for female individuals between age groups.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253564.g008>

The purpose of our work was therefore to analyze the nature of senescence-related shape changes both within and between sexes, and to assess if sexual dimorphism remained significant in the mandible despite these conformational changes, using geometric morphometrics.

Our results showed, by means of consensus configuration superimpositions, that conformational differences occur with age for both males and females (Figs 5 and 6). Male and female individuals presented marked conformational changes in the symphysis, gonial, coronoid and condylar areas. The global trend of variation followed an eccentric direction in the gonial area and a concentric direction in the symphysis, ramus and condylar regions. Both sexes presented an anterior and inferior resorption of the mandibular body, as found in previous studies [14]. The symphysis was the area where age-related shape changes were most visible. Several authors have found substantial conformational changes of the symphysis with aging. Shaw et al. described a decrease in mandible length leading to similar chin projection for men and women during the middle age years [18]. Toledo Avelar et al. also noted that the chin becomes more prominent, oblique and its height decreases in older individuals [14].

The analysis of shape variations with age for each sex revealed an earlier onset of changes for females, starting at 55 years, whereas for males significant conformational differences seemed to appear from 65 years onwards (Table 3). An earlier set up of the senescence process in women, as well as a faster mandibular aging rate, could account for the greater conformational changes observed in this sample (Fig 4). As the pace of age-related conformation changes appears to be slower for male individuals and they display a later onset of the senescence process, it is possible that marked configurational changes cannot be discerned in our sample, which is limited to individuals aged up to 79 years. Similar aging trajectories have been reported by Windhager et al., who observed a divergence in the facial aging pattern in women and men after menopause (around 50 years), as well as an earlier onset and higher pace of facial aging in females [42].

We know that other facial structures are subjected to earlier changes in women, particularly the midfacial skeleton [6, 24, 45]. Kahn & Shaw observed earlier and more substantial changes in females' orbital aperture, glabellar and pyriform angles [6]. As in our study, women presented in general more extensive bone loss, with resorption starting between the young and middle age groups for females, and between the middle and old age groups for males. These observations indicate that the senescence process differs between male and female individuals, and increases inter-individual shape variability. However, it would also appear that after the onset of the aging process, intra-individual variability can be observed, since all facial structures are not affected simultaneously. Cotofana et al. found that the pace of age-related changes is not homogeneously distributed across the midfacial region: some bony structures present earlier changes than others [23]. In the mandible, it has been described that conformational changes in length start before changes in height [18].

Although senescence had an effect in all individuals, the nature of the shape changes was different in males and females. While the main conformational changes take place in the symphysis area for men, and are particularly marked the alveolar process, the whole mandible is subjected to shape alterations in women. As in men, the most affected area is the mandibular symphysis, in which a marked retrusion is observed after 55 years. Females also display a lateralization of the mandibular ramus, with the gonion and condyle moving outwardly, and an anterior displacement of the gonial and coronoid regions.

Previous studies have similarly found that age-related changes in the mandible differ from male to female individuals, and that the latter present more marked conformational changes [3, 4]. Pecora et al., in a longitudinal cephalometric study, noted that for men changes took mostly place on the anterior portion of the mandible, leading to increased chin prominence with aging. Women, on the other hand, presented more changes in the vertical dimension, with a posterior rotation of the mandible [12]. These observations indicate that the nature of age-related conformational changes is subjected to dimorphism, which corroborates our results.

When analysing mandibular sexual dimorphism in different age groups using geometric morphometrics we observed that sexual dimorphism of shape remained statistically significant ($p < 0.005$) for all age groups (Table 5).

Former studies, using qualitative and quantitative methods, have reached similar conclusions [20, 28, 46]. It has been reported that aging can even have a positive impact on sex diagnosis of the cephalic extremity, with better prediction accuracies after the setting of age-related changes. Suazo and Matamala found an increase in the diagnostic performance of the morphological indicators used for sexual dimorphism of the skull and mandibles of older subjects [20]. Other studies observed an increase in sexual classification accuracy of the mandible [21] and cranium [5] for individuals aged over 40 years. For Gapert et al., accuracy rates in sex estimation of the foramen magnum region rose after 50 years of age, particularly in women [22]. However, most of these studies were based on metric measurements, and therefore considered mainly size rather than shape sexual dimorphism.

In our sample, although sex, age and size undoubtedly had an effect on mandibular shape, the interaction of sex and age was not statistically significant, implying that age did not enhance sexual dimorphism of shape (Table 4). The hypothesis that can be formulated from this observation is that male and female mandibular shapes move in the same direction with aging. This could mean that both sexes have a tendency towards masculinization or feminization. In light of the PCA results and Procrustes distances between age cohorts, it would appear that females move towards males with aging.

In addition, as males tend to present larger features than females, the interaction between size and sex was not statistically significant.

In order to investigate the evolution of shape differences between sexes we divided our sample in two age groups (40–59 years and 60–79 years) (Figs 7 and 8). Mean shape superimpositions between sexes showed that differences occurred with age, and were mainly located in the symphysis, gonial areas, as well as the upper ramus region (coronoid, condyle and mandibular notch). Differences in conformation are particularly marked before 60 years, with females presenting a more projected symphysis. Our results are in agreement with former studies, in which this region appears to be one of the most dimorphic in the mandible, with males presenting a higher, wider symphysis and less projected mental eminence than women [28, 47]. As we saw previously that women present greater shape changes, our results seem to indicate that the female configuration shape draws nearer to the male configuration shape with aging, and that sexual dimorphism of conformation declines with age (Figs 7 and 8). This is further supported by the fact that we found no significant correlation when studying the interaction of sex and age with shape (Table 4). Pessa et al., in a longitudinal study, also observed that shape differences between males and females tended to fade with advancing age [17].

In line with our first aim, our findings reveal that the senescence process leads to mandibular conformational changes with aging. We also confirm that sex-related differences in mandibular shape can be observed during the senescence process, allowing us to accept the hypothesis that males and females present different mandibular conformational changes with aging.

Furthermore, this study shows that the senescence process is not only subjected to variability between genders but also between individuals of the same sex. Aging is a process influenced by multiple external and internal factors, and presents therefore higher heterogeneity than growth and maturation. Mandibular morphology is greatly influenced by external factors such as hormones and muscular shape. The earlier start of conformational changes in women could be explained by the hormonal effect of menopause, since a decrease in hormone levels, particularly oestrogen, causes a stronger resorption of the facial bones, particularly the mandible [42, 48]. Although both sexes are affected by hormonal variations with advancing age, bone turnover increases rapidly in menopausal women, while in men this process is more gradual [48].

Among the factors that could account for interindividual differences during senescence are muscle function and edentulousness. On average, males produce greater muscle forces during mastication, which results in larger mandibles than females, and rougher surfaces of muscle attachments, especially at the coronoid process and gonion [25, 49, 50]. Bakke et al. have reported that bite force decreases significantly with age, and that this process starts earlier and is more pronounced in female individuals [49]. Chrcanovic et al. suggested that maintenance of greater masticatory muscle strength and larger muscles in males with age could explain the differences in mandibular conformation between sexes [51]. On the other hand, we know that tooth loss increases with advancing age [52], and this can also affect masticatory muscle function. Partially or totally edentulous individuals produce lower bite forces than fully dentate individuals due to loss of occlusal contacts [53]. This reduction in muscular activity can lead to mandibular conformational changes, particularly in the areas of masticatory muscle attachment such as the gonial and coronoid regions. In addition, tooth loss leads to resorption of the alveolar process, since its main function is to provide structural support for the dentition [16, 19]. In the anterior mandible, bone loss is vertical and horizontal, moving in a concentric direction, whereas the posterior mandible is mostly subjected to vertical resorption, and horizontal resorption occurs eccentrically [54]. Several authors have stated that dentition is the main determinant of mandibular morphology, since tooth loss affects particularly mandibular body height, length and gonial angle [15, 29, 51, 52, 54]. In our sample, most of the changes in males took place in the mandibular symphysis, more specifically in the alveolar process, while female individuals presented more widespread conformation variations. As information

regarding tooth loss is missing in this sample, we can hypothesize that age-related changes in males could be predominantly derived from tooth loss while, in females, the effect of edentulousness could be less striking due to the influence of other factors such as a decrease in oestrogen levels.

Insight into the facial senescence process is paramount in order to accurately estimate an individual's sex and predict age-related conformational changes. This can be particularly useful in the fields of facial reconstruction and recognition, as well as the identification of long-missing persons by improving facial age progression techniques [13].

The use of geometric morphometrics and MSCT examinations present several advantages in the study of facial skeletal aging and sexual dimorphism. GMM allows the study of shape-specific variations, encompassing complex three-dimensional changes of the aging bone [55]. The same landmarks as those employed in classic archaeologic and anthropometric methods can be used, thus allowing comparisons with previously published results and existing standards, and their collection is facilitated and more precise than with dry bones. Furthermore, MSCT and 3D landmark data enable the creation of facial virtual standards for both the facial skeleton and overlying soft tissues. Several studies have observed that there is a close link between facial soft tissue shape and underlying bone, and that skeletal aging has a direct impact on the cutaneous envelope [56–58]. Thus, accurate prediction of bone conformational changes with aging could allow the estimation of facial soft tissue shape.

In our sample, although mandibular shape changes were clearly visible with aging, we could not precisely determine the age that marked the start of the senescence process. This could be due to the fact that the number of studied subjects is not high enough. Considering that our sample size did not allow the comparison of shape differences at successive age bins as this would result in small samples and therefore loss of statistical power, we established three cut offs at 55, 60 and 65 years in order to study larger groups and target the time span in which age-related shape variations emerge. As our results showed that conformation variations appear to be significant between 50 and 70 years, a larger sample of individuals aged 50 to 70 years and divided into 5 or 10-year age bins would be necessary to refine these results. Another limitation of this study is the fact that the sample is limited to individuals aged up to 79 years. In the event that males present a later onset of the senescence process, the entirety of shape changes cannot be encompassed. Finally, other variables such as dental status should be studied in order to acquire a deeper understanding of mandibular age-related conformational changes.

Conclusion

Our findings revealed that mandibular sexual dimorphism remains present throughout middle and old age. Mandibular senescence appears to be a sexually dimorphic process since its onset, pace, and the areas subjected to variation differ from male to female individuals. Female individuals present faster, more marked and extensive shape changes than males. The mandibular areas mostly affected by age-related variation are the symphysis, gonion and upper ramus. Senescence appears as a highly heterogeneous process, it is therefore difficult to determine with precision the age that marks its onset. In this study, age-related changes seem to occur between 50 and 70 years for males and females, and can be detected earlier in female individuals.

Author Contributions

Conceptualization: Leonor Costa Mendes, Norbert Telmon, Delphine Maret, Frédéric Savall.

Data curation: Leonor Costa Mendes.

Investigation: Leonor Costa Mendes, Julien Delrieu, Claudia Gillet.

Methodology: Delphine Maret, Frédéric Savall.

Supervision: Norbert Telmon, Delphine Maret, Frédéric Savall.

Writing – original draft: Leonor Costa Mendes.

Writing – review & editing: Delphine Maret, Frédéric Savall.

References

1. Bigoni L, Velemínská J, Brůzek J. Three-dimensional geometric morphometric analysis of cranio-facial sexual dimorphism in a Central European sample of known sex. *Homo Int Z Vgl Forsch Am Menschen*. 2010; 61: 16–32. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2009.09.004> PMID: 20152969
2. Franklin D, Oxnard C, O'Higgins P, Dadour I. Sexual Dimorphism in the Subadult Mandible: Quantification Using Geometric Morphometrics*. *J Forensic Sci*. 2007; 52: 6–10. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2006.00311.x> PMID: 17209902
3. Doual JM, Ferri J, Laude M. The influence of senescence on craniofacial and cervical morphology in humans. *Surg Radiol Anat*. 1997; 19: 175–183. <https://doi.org/10.1007/BF01627970> PMID: 9381319
4. Richard MJ, Morris C, Deen BF, Gray L, Woodward JA. Analysis of the anatomic changes of the aging facial skeleton using computer-assisted tomography. *Ophthal Plast Reconstr Surg*. 2009; 25: 382–386. <https://doi.org/10.1097/IOP.0b013e3181b2f766> PMID: 19966653
5. Nikita E. Age-associated Variation and Sexual Dimorphism in Adult Cranial Morphology: Implications in Anthropological Studies. *Int J Osteoarchaeol*. 2014; 24: 557–569. <https://doi.org/10.1002/oa.2241>
6. Kahn DM, Shaw RB. Aging of the Bony Orbit: A Three-Dimensional Computed Tomographic Study. *Aesthet Surg J*. 2008; 28: 258–264. <https://doi.org/10.1016/j.asj.2008.02.007> PMID: 19083535
7. Matros E, Momoh A, Yaremchuk MJ. The aging midfacial skeleton: implications for rejuvenation and reconstruction using implants. *Facial Plast Surg FPS*. 2009; 25: 252–259. <https://doi.org/10.1055/s-0029-1242037> PMID: 19924598
8. Mendelson BC, Hartley W, Scott M, McNab A, Granzow JW. Age-Related Changes of the Orbit and Midcheek and the Implications for Facial Rejuvenation. *Aesthetic Plast Surg*. 2007; 31: 419–423. <https://doi.org/10.1007/s00266-006-0120-x> PMID: 17486402
9. Pessa JE, Zadoo VP, Mutimer KL, Haffner C, Yuan C, DeWitt AI, et al. Relative Maxillary Retraction as a Natural Consequence of Aging: Combining Skeletal and Soft-Tissue Changes into an Integrated Model of Midfacial Aging. *Plast Reconstr Surg*. 1998; 102: 205. <https://doi.org/10.1097/00006534-199807000-00034> PMID: 9655429
10. Pessa JE, Zadoo VP, Yuan C, Ayedelotte JD, Cuellar FJ, Cochran SC, et al. Concertina Effect and Facial Aging: Nonlinear Aspects of Youthfulness and Skeletal Remodeling, and Why, Perhaps, Infants Have Jowls. *Plast Reconstr Surg*. 1999; 103: 635. <https://doi.org/10.1097/00006534-199902000-00042> PMID: 9950555
11. Bartlett SP, Grossman R, Whitaker LA. Age-Related Changes of the Craniofacial Skeleton: An Anthropometric and Histologic Analysis. *Plast Reconstr Surg*. 1992; 90: 592. <https://doi.org/10.1097/00006534-199210000-00007> PMID: 1409994
12. Pecora NG, Baccetti T, McNamara JA. The aging craniofacial complex: A longitudinal cephalometric study from late adolescence to late adulthood. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2008; 134: 496–505. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2006.11.022> PMID: 18929267
13. Albert AM, Ricanek K, Patterson E. A review of the literature on the aging adult skull and face: Implications for forensic science research and applications. *Forensic Sci Int*. 2007; 172: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2007.03.015> PMID: 17434276
14. Toledo Avelar LE, Cardoso MA, Santos Bordoni L, de Miranda Avelar L, de Miranda Avelar JV. Aging and Sexual Differences of the Human Skull. *Plast Reconstr Surg Glob Open*. 2017; 5: e1297. <https://doi.org/10.1097/GOX.0000000000001297> PMID: 28507860
15. Parr NM, Passalacqua NV, Skorupski K. Investigations Into Age-related Changes in the Human Mandible. *J Forensic Sci*. 2017; 62: 1586–1591. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13475> PMID: 28251665
16. Enlow DH, Bianco HJ, Eklund S. The remodeling of the edentulous mandible. *J Prosthet Dent*. 1976; 36: 685–693. [https://doi.org/10.1016/0022-3913\(76\)90035-4](https://doi.org/10.1016/0022-3913(76)90035-4) PMID: 1069128
17. Pessa JE, Slice DE, Hanz KR, Broadbent THJ, Rohrich RJ. Aging and the Shape of the Mandible. *Plast Reconstr Surg*. 2008; 121: 196. <https://doi.org/10.1097/01.prs.0000293864.94138.ae> PMID: 18176221

18. Shaw RB, Katzel EB, Koltz PF, Kahn DM, Girotto JA, Langstein HN. Aging of the Mandible and Its Aesthetic Implications: *Plast Reconstr Surg.* 2010; 125: 332–342. <https://doi.org/10.1097/PRS.0b013e3181c2a685> PMID: 20048624
19. Cawood JI, Howell RA. A classification of the edentulous jaws. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 1988; 17: 232–236. [https://doi.org/10.1016/s0901-5027\(88\)80047-x](https://doi.org/10.1016/s0901-5027(88)80047-x) PMID: 3139793
20. Suazo I, Matamala D. Age effect in the morphological traits performance for sex determination in human skulls and mandibles. *Int J Morphol.* 2012; 30: 296–301.
21. Gillet C, Costa-Mendes L, Rérolle C, Telmon N, Maret D, Savall F. Sex estimation in the cranium and mandible: a multislice computed tomography (MSCT) study using anthropometric and geometric morphometry methods. *Int J Legal Med.* 2020; 134: 823–832. <https://doi.org/10.1007/s00414-019-02203-0> PMID: 31897666
22. Gapert R, Black S, Last J. Test of age-related variation in the craniometry of the adult human foramen magnum region: implications for sex determination methods. *Forensic Sci Med Pathol.* 2013; 9: 478–488. <https://doi.org/10.1007/s12024-013-9437-3> PMID: 23584959
23. Cotofana S, Gotkin RH, Morozov SP, Kim SY, Gombolevskiy VA, Laipan AS, et al. The Relationship between Bone Remodeling and the Clockwise Rotation of the Facial Skeleton: A Computed Tomographic Imaging-Based Evaluation. *Plast Reconstr Surg.* 2018; 142: 1447–1454. <https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000004976> PMID: 30204679
24. Robertson JM, Kingsley BE, Ford GC. Sexually Dimorphic Faciometrics in Humans From Early Adulthood to Late Middle Age: Dynamic, Declining, and Differentiated. *Evol Psychol Int J Evol Approaches Psychol Behav.* 2017; 15: 1474704917730640. <https://doi.org/10.1177/1474704917730640> PMID: 28901197
25. Bejdová S, Krajíček V, Velemínská J, Horák M, Velemínský P. Changes in the sexual dimorphism of the human mandible during the last 1200 years in Central Europe. *Homo Int Z Vgl Forsch Am Menschen.* 2013; 64: 437–453. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2013.05.003> PMID: 24004582
26. Dong H, Deng M, Wang W, Zhang J, Mu J, Zhu G. Sexual dimorphism of the mandible in a contemporary Chinese Han population. *Forensic Sci Int.* 2015; 255: 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.06.010> PMID: 26146162
27. Franklin D, O'Higgins P, Oxnard CE, Dadour I. Sexual dimorphism and population variation in the adult mandible. *Forensic Sci Med Pathol.* 2007; 3: 15–22. <https://doi.org/10.1385/FSMP:3:1:15> PMID: 25868885
28. Garvin HM, Ruff CB. Sexual dimorphism in skeletal browridge and chin morphologies determined using a new quantitative method. *Am J Phys Anthropol.* 2012; 147: 661–670. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22036> PMID: 22371071
29. Guevara Perez SV, de la Rosa Castolo G, Thollon L, Behr M. A 3D characterization method of geometric variation in edentulous mandibles. *Morphol Bull Assoc Anat.* 2018; 102: 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.morpho.2018.08.001> PMID: 30197034
30. Bookstein FL. Morphometric tools for landmark data: geometry and biology. Cambridge University Press, Cambridge. 1997
31. Franklin D, O'Higgins P, Oxnard CE, Dadour I. Discriminant function sexing of the mandible of indigenous South Africans. *Forensic Sci Int.* 2008; 179: 84.e1–5. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2008.03.014> PMID: 18467049
32. Nicholson E, Harvati K. Quantitative analysis of human mandibular shape using three-dimensional geometric morphometrics. *Am J Phys Anthropol.* 2006; 131: 368–383. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20425> PMID: 16617436
33. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. <https://www.R-project.org/>.
34. Dryden I. L. shapes package. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Contributed package. Version 1.2.5. 2019. <http://www.R-project.org>.
35. Adams D, Collyer M, Kaliantzopoulou A, Baken E. “Geomorph: Software for geometric morphometric analyses. R package version 3.2.1. 2020. <https://cran.r-project.org/package=geomorph>.
36. Costa Mendes L, Delrieu J, Gillet C, Telmon N, Maret D, Savall F. Geometric morphometric study of aging mandible. [Internet]. OSF; 2020. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/KB3HG>
37. von Cramon-Taubadel N, Frazier BC, Lahr MM. The problem of assessing landmark error in geometric morphometrics: theory, methods, and modifications. *Am J Phys Anthropol.* 2007; 134: 24–35. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20616> PMID: 17503448
38. Ercan I, Ocakoglu G, Guney I, Yazici B. Adaptation of Generalizability Theory for Inter-Rater Reliability for Landmark Localization. *Int J Tomogr Simulation™.* 2008; 9: 51–58.

39. He Q, Duan Y, Karsch K, Miles J. Detecting corpus callosum abnormalities in autism based on anatomical landmarks. *Psychiatry Res.* 2010; 183: 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.psychresns.2010.05.006> PMID: 20620032
40. Ozdemir ST, Sigirli D, Ercan I, Cankur NS. Photographic facial soft tissue analysis of healthy Turkish young adults: anthropometric measurements. *Aesthetic Plast Surg.* 2009; 33: 175–184. <https://doi.org/10.1007/s00266-008-9274-z> PMID: 19089493
41. Gower JC. Generalized procrustes analysis. *Psychometrika.* 1975; 40: 33–51. <https://doi.org/10.1007/BF02291478>
42. Windhager S, Mitteroecker P, Rupić I, Lauc T, Polašek O, Schaefer K. Facial aging trajectories: A common shape pattern in male and female faces is disrupted after menopause. *Am J Phys Anthropol.* 2019; 169: 678–688. <https://doi.org/10.1002/ajpa.23878> PMID: 31189026
43. Rohlf FJ, Slice D. Extensions of the Procrustes Method for the Optimal Superimposition of Landmarks. *Syst Zool.* 1990; 39: 40. <https://doi.org/10.2307/2992207>
44. Zelditch LM, Swiderski DL, Sheets DH. Geometric morphometrics for biologists, 2nd ed. Elsevier/Academic Press, New York. 2012
45. Shaw RBJ, Kahn DM. Aging of the Midface Bony Elements: A Three-Dimensional Computed Tomographic Study. *Plast Reconstr Surg.* 2007; 119: 675. <https://doi.org/10.1097/01.prs.0000246596.79795.a8> PMID: 17230106
46. Garvin HM, Sholts SB, Mosca LA. Sexual dimorphism in human cranial trait scores: effects of population, age, and body size. *Am J Phys Anthropol.* 2014; 154: 259–269. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22502> PMID: 24595622
47. Vallabh R, Zhang J, Fernandez J, Dimitroulis G, Ackland DC. The morphology of the human mandible: A computational modelling study. *Biomech Model Mechanobiol.* 2019. <https://doi.org/10.1007/s10237-019-01133-5> PMID: 30826909
48. Walsh JS. Normal bone physiology, remodelling and its hormonal regulation. *Surg Oxf.* 2018; 36: 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.mpsur.2017.10.006>
49. Bakke M, Holm B, Jensen BL, Michler L, Möller E. Unilateral, isometric bite force in 8–68-year-old women and men related to occlusal factors. *Eur J Oral Sci.* 1990; 98: 149–158. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.1990.tb00954.x> PMID: 2343274
50. Shinogaya T, Bakke M, Thomsen CE, Vilsmann A, Sodeyama A, Matsumoto M. Effects of ethnicity, gender and age on clenching force and load distribution. *Clin Oral Investig.* 2001; 5: 63–68. <https://doi.org/10.1007/s007840000099> PMID: 11355102
51. Chrcanovic BR, Abreu MHNG, Custódio ALN. Morphological variation in dentate and edentulous human mandibles. *Surg Radiol Anat SRA.* 2011; 33: 203–213. <https://doi.org/10.1007/s00276-010-0731-4> PMID: 20878404
52. Ozturk CN, Ozturk C, Bozkurt M, Uygur HS, Papay FA, Zins JE. Dentition, bone loss, and the aging of the mandible. *Aesthet Surg J.* 2013; 33: 967–974. <https://doi.org/10.1177/1090820X13503473> PMID: 24023258
53. Hatch JP, Shinkai RS, Sakai S, Rugh JD, Paunovich ED. Determinants of masticatory performance in dentate adults. *Arch Oral Biol.* 2001; 46: 641–648. [https://doi.org/10.1016/s0003-9969\(01\)00023-1](https://doi.org/10.1016/s0003-9969(01)00023-1) PMID: 11369319
54. Kuć J, Sierpińska T, Gołębiewska M. The relationship between facial morphology and the structure of the alveolar part of the mandible in edentulous complete denture wearers. A preliminary study. *Acta Odontol Scand.* 2015; 73: 57–66. <https://doi.org/10.3109/00016357.2014.950181> PMID: 25183253
55. Mendelson B, Wong C-H. Changes in the Facial Skeleton With Aging: Implications and Clinical Applications in Facial Rejuvenation. *Aesthetic Plast Surg.* 2012; 36: 753–760. <https://doi.org/10.1007/s00266-012-9904-3> PMID: 22580543
56. Coleman SR, Grover R. The Anatomy of the Aging Face: Volume Loss and Changes in 3-Dimensional Topography. *Aesthet Surg J.* 2006; 26: S4–S9. <https://doi.org/10.1016/j.asj.2005.09.012> PMID: 19338976
57. Guyomarc'h P, Dutailly B, Charton J, Santos F, Desbarats P, Coqueugniot H. Anthropological Facial Approximation in Three Dimensions (AFA3D): Computer-Assisted Estimation of the Facial Morphology Using Geometric Morphometrics. *J Forensic Sci.* 2014; 59: 1502–1516. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12547> PMID: 25088006
58. Mydlová M, Dupej J, Koudelová J, Velemínská J. Sexual dimorphism of facial appearance in ageing human adults: A cross-sectional study. *Forensic Sci Int.* 2015; 257: 519.e1–519.e9. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.09.008> PMID: 26548377

TITLE : Sexual dimorphism of the mandible and morphometric analysis from computed tomography examinations : contribution to forensic anthropology

ABSTRACT :

The mandible is a facial bone presenting highly dimorphic features that can be used for sex estimation. As it is the only mobile bone of the cephalic extremity, it can be separated from the cranium in archaeologic or forensic contexts. Furthermore, the mandibular bone is subjected to bone remodeling due to tooth loss and to the mechanical load generated by the masticatory function. The purpose of this work was, on the one hand, to improve the accuracy of sexual estimation techniques using the mandible and, on the other, to gain insight into senescence-related mandibular morphological changes.

Firstly, we studied the role of the mandible in the sexual dimorphism of the cephalic extremity using landmark-based metric and geometric morphometric methods. Our sample was composed of 120 multislice computed tomography scans of individuals aged 23 to 84 years. Our results showed that geometric morphometrics offer a higher sexual classification accuracy compared to traditional metric methods. Moreover, the cranium presented a greater accuracy of sexual estimation than the mandible regardless of the analysis method used. Also, the precision of the mandibular model improved after 40 years of age.

Secondly, we analyzed the effect of aging and tooth loss on the mandibular shape, as well as the impact of these conformational changes on the sexual diagnosis. To that end, 14 mandibular landmarks were positioned on 160 multislice computed tomography scans of individuals aged 40 to 79 years. Our geometric morphometric analyses show that mandibular sexual dimorphism remains significant throughout the aging process and that mandibular shape changes start around 50 years. However, the senescence process affects male and female individuals differently : females present an earlier onset, higher rate and more marked conformational changes, and the areas subjected to conformational changes differ from male to female individuals. Furthermore, tooth loss, and particularly the loss of occlusal contacts, leads to different conformational differences in males and females. Also, it tends to attenuate size sexual dimorphism and enhance shape sexual dimorphism.

KEYWORDS : sexual dimorphism, mandible, shape, geometric morphometrics, aging, sex estimation, forensic science, forensic anthropology

AUTEUR : Leonor COSTA MENDES

TITRE : Dimorphisme sexuel de la mandibule et analyse morphométrique à partir d'examens tomodensitométriques : apport en anthropologie médico-légale

DIRECTEURS DE THÈSE : Frédéric SAVALL et Delphine MARET

LIEU ET DATE DE SOUTENANCE : Toulouse, le 4 janvier 2022

RÉSUMÉ en français

La mandibule est un os du massif facial aux caractères dimorphiques très marqués, pouvant être employé dans l'estimation du sexe d'un individu. Étant le seul os mobile de l'extrémité céphalique, elle peut être séparée du crâne dans des contextes archéologiques ou médico-légaux. Par ailleurs, il s'agit d'un os soumis à des phénomènes de remodelage osseux de par la perte dentaire et les contraintes mécaniques qu'il subit au cours de la fonction masticatoire. L'objectif de ce travail était, d'une part, d'améliorer la performance des techniques d'estimation sexuelle à partir de la mandibule et, d'autre part, d'avoir une meilleure compréhension des changements morphologiques que subit cette structure au cours du vieillissement. Dans un premier temps, nous avons étudié le rôle de la mandibule dans le dimorphisme sexuel de l'extrémité céphalique. Des méthodes métriques et morpho géométriques, basées sur le positionnement informatique de landmarks, ont été employées sur 120 examens tomodensitométriques d'individus âgés de 23 à 84 ans. Nos résultats ont montré que la morphométrie géométrique offre une précision de diagnose sexuelle supérieure à la méthode métrique traditionnelle. Par ailleurs, le crâne présente une plus grande précision d'estimation sexuelle que la mandibule, quelle que soit la méthode d'analyse employée. Enfin, le taux de prédiction correcte du modèle mandibulaire s'améliore à partir de 40 ans. Dans un deuxième temps, nous avons analysé l'effet du vieillissement et de la perte dentaire sur la conformation mandibulaire, ainsi que l'impact de ces changements morphologiques sur l'identification du sexe d'un individu. 14 landmarks mandibulaires ont été placés sur 160 examens tomodensitométriques de sujets âgés de 40 à 79 ans. Nos analyses par morphométrie géométrique montrent que le dimorphisme sexuel mandibulaire demeure significatif avec le vieillissement et que les changements de conformation mandibulaire débutent à 50 ans. En revanche, la sénescence affecte différemment les individus masculins et féminins : le processus semble être plus précoce, plus rapide et plus accentué chez la femme, et les changements de conformation touchent des zones différentes selon le sexe. Par ailleurs, l'édentement, en particulier la perte de calage dentaire, entraîne des modifications de conformation différentes entre hommes et femmes. Il tend ainsi à estomper le dimorphisme sexuel de taille et à accentuer le dimorphisme sexuel de conformation.

MOTS-CLÉS : dimorphisme sexuel, mandibule, conformation, morphométrie géométrique, vieillissement, diagnose sexuelle, médecine légale, anthropologie médico-légale

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE : Anthropobiologie

INTITULÉ ET ADRESSE DU LABORATOIRE : CAGT, 37 allées Jules Guesde, 31000 Toulouse