

Dimorphisme sexuel et base du crâne : combinaison d'une approche conventionnelle et d'une approche photogrammétrique dans le recueil des variables

Marie-Audrey Say-Liang-Fat

▶ **To cite this version:**

Marie-Audrey Say-Liang-Fat. Dimorphisme sexuel et base du crâne : combinaison d'une approche conventionnelle et d'une approche photogrammétrique dans le recueil des variables. Chirurgie. 2014. dumas-01083866

HAL Id: dumas-01083866

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01083866

Submitted on 18 Nov 2014

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

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

Université de Bordeaux
Collège des Sciences de la Santé
UFR des Sciences Odontologiques

Année 2014 Thèse n°52

Thèse pour l'obtention du
DIPLOME D'ETAT de DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement
Par SAY-LIANG-FAT Marie Audrey
Née le 27 Avril 1987 à Saint-Denis - La Réunion
Le 13 Novembre 2014

Dimorphisme sexuel et base du crâne : Combinaison d'une approche conventionnelle et d'une approche photogrammétrique dans le recueil des variables

Directeur de thèse

Mr BOU Christophe

Membres du jury

Président	Mme M.-J. BOILEAU	Professeur des Universités
Directeur	Mr C. BOU	Maître de Conférences des Universités
Rapporteur	Mme K. LEVET	Assistant Hospitalo-Universitaire
Assesseur	Mr E. D'INCAU	Maître de Conférences des Universités

UNIVERSITE DE BORDEAUX

Président	M. Manuel TUNON de LARA

COLLEGE DES SCIENCES DE LA SANTE
UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE D'ODONTOLOGIE

Directeur	M. Jean-François PELI	58-01
Directeur Adjoint – Chargé de la Formation initiale	M. Yves DELBOS	56-01
Directeur Adjoint – Chargé de la Recherche	M. Jean-Christophe FRICAIN	57-02
Directeur Adjoint - Chargé des Relations Internationales	M. Jean-François LASSERRE	58-02

ENSEIGNANTS DE L'UFR

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

Mme Caroline	BERTRAND	Prothèse dentaire	58-02
Mlle Marie-José	BOILEAU	Orthopédie dento-faciale	56-02
M. Jean	DAVID	Prothèse dentaire	58-02
Mme Véronique	DUPUIS	Prothèse dentaire	58-02
M. J-Christophe	FRICAIN	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

Melle Elise	ARRIVÉ	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
Mme Cécile	BADET	Sciences biologiques	57-03
M. Etienne	BARDINET	Orthopédie dento-faciale	56-02
M. Michel	BARTALA	Prothèse dentaire	58-02
M. Cédric	BAZERT	Orthopédie dento-faciale	56-02
M. Jean-Pierre	BLANCHARD	Prothèse dentaire	58-02
M. Christophe	BOU	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
Mlle Sylvie	BRUNET	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02
M. Sylvain	CATROS	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02
M. Stéphane	CHAPENOIRE	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
M. Jacques	COLAT PARROS	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
M. Reynald	DA COSTA NOBLE	Parodontologie	57-01
M. François	DARQUE	Orthopédie dento-faciale	56-02
M. François	DE BRONDEAU	Orthopédie dento-faciale	56-02
M. Yves	DELBOS	Odontologie pédiatrique	56-01
M. Raphael	DEVILLARD	Odontologie conservatrice- Endodontie	58-01
M. Emmanuel	D'INCAU	Prothèse dentaire	58-02
M. Bruno	ELLA NGUEMA	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
M. Dominique	GILLET	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M. Jean-François	LASSERRE	Prothèse dentaire	58-02
M. Yves	LAUVERJAT	Parodontologie	57-01
Mme Odile	LAVIOLE	Prothèse dentaire	58-02
M. Jean-Marie	MARTEAU	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02

Mme Javotte	NANCY	Odontologie pédiatrique	56-01
Mme Dominique	ORIEZ	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M. Jean-François	PELI	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M. Philippe	POISSON	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
M. Patrick	ROUAS	Odontologie pédiatrique	56-01
Mlle Maud	SAMPEUR	Orthopédie dento-faciale	56-02
M. Cyril	SEDARAT	Parodontologie	57-01
Mlle Noélie	THEBAUD	Sciences biologiques	57-03
M. Eric	VACHEY	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01

ASSISTANTS

M. Terence	BARSBY	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
Mme Aurélie	BARSBY-EL-KHODER	Prothèse dentaire	58-02
Mme Mélanie	BOES-HULLMAN	Orthopédie dento-faciale	56-02
M. Julien	BROTHIER	Prothèse dentaire	58-02
M. Mathieu	CLINKEMAILLIE	Prothèse dentaire	58-02
M. Mathieu	CONTREPOIS	Prothèse dentaire	58-02
M. Guillaume	CRESTE	Prothèse dentaire	58-02
Mme Hélène	DENOST	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
Mlle Aurélie	DUARTE	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M. Guillaume	FENOUL	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
Mlle Geraldine	FERRERO-MOURGUES	Orthopédie dento-faciale	56-02
M. Nicolas	GLOCK	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
Melle Sandrine	GROS	Orthopédie dento-faciale	56-02
Melle Amandine	LAVAUD	Odontologie pédiatrique	56-01
Melle Alice	LE NIR	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
Mme Karine	LEVET	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
Melle Maria-Gabriela	MARC	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M. Matthieu	MEYER	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02
Melle Darrène	NGUYEN	Sciences biologiques	57-03
Melle Virginie	PANNEREC	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02
Melle Candice	PEYRAUD	Odontologie pédiatrique	56-01
M. Jean-Philippe	PIA	Prothèse dentaire	58-02
M. Mathieu	PITZ	Parodontologie	57-01
M. Cyril	VIDAL	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M. François	VIGOUROUX	Parodontologie	57-01

MAJ 01/04/2014

A notre Présidente de Jury,

Madame le Professeur BOILEAU Marie-José

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur d'Etat en Odontologie

Docteur en Sciences Odontologiques

Titulaire du C.E.S. en Orthopédie Dento-Faciale

Titulaire du C.E.S. en Anthropologie

Titulaire du C.E.S. en Informatique médicale et générale

Titulaire du DERSO

Professeur des Universités - Praticien Hospitalier

Responsable de la sous-section d'ODF

Responsable de l'enseignement du CECSMO et du DUO

Responsable de l'unité médicale Pellegrin du Département d'Odontologie et de Santé Buccale

Nous vous remercions vivement de nous avoir fait l'honneur de présider notre thèse.

Madame, veuillez trouver ici l'expression de notre profond respect et de nos plus sincères remerciements.

A notre Directeur de Thèse,

Monsieur le Docteur BOU Christophe

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur en Sciences Odontologiques

Maître de conférences des Universités - Praticien Hospitalier

Expert judiciaire Cour d'appel de Bordeaux

Membre UMR 5199 / PACEA - A3P

Nous vous remercions de la confiance que vous nous avez accordée en acceptant d'encadrer ce travail. Ce projet n'aurait pu aboutir sans votre sollicitude, vos multiples conseils, votre éternelle patience et votre inoxydable bonne humeur.

Soyez assuré, Monsieur, de notre gratitude et de notre plus sincère admiration. Votre carrière professionnelle est pour nous une perpétuelle inspiration.

A notre Rapporteur,

Madame le Docteur LEVET Karine

Docteur en Chirurgie Dentaire

Titulaire du C.E.S. en identification odonto-légale

Titulaire du D.U. méthodologie pratique en identification

Assistant Hospitalo-Universitaire Bordeaux

Nous vous remercions chaleureusement d'avoir accepté cette fonction de rapporteur et sommes touchés de votre disponibilité et de l'intérêt que vous avez porté à notre travail

Madame, vous trouverez dans ces lignes nos plus sincères remerciements pour le temps que vous accordé à la lecture de notre thèse.

A notre juge,

Monsieur le Docteur D'INCAU Emmanuel

Titulaire d'un doctorat de l'Université Bordeaux 1 Mention Anthropologie biologique

Docteur en Chirurgie Dentaire

Titulaire d'un C.E.S. en Odontologie prothétique mention prothèse conjointe

Titulaire d'un C.E.S. en Odontologie prothétique mention prothèse adjointe partielle

Titulaire d'un C.E.S. en Odontologie prothétique mention prothèse adjointe complète

Titulaire d'un D.U. en Réhabilitation orale et implantologie clinique

Titulaire d'une maîtrise de Sciences Biologiques et Médicales

Titulaire d'un Diplôme d'Etudes Approfondies en Anthropologie Biologique

Maître de conférences des Universités - Praticien Hospitalier

Responsable de la Formation Odontologique Continue de l'UFR de Bordeaux

Nous avons été touchés de votre accueil et de votre curiosité envers notre sujet de recherche et sommes honorés de vous compter parmi les membres de notre jury.

Veuillez croire, Monsieur, en mes respectueux remerciements.

Au Dr FROMENT Alain, Directeur des collections anthropologiques du Muséum National d'Histoire Naturelle, et à toute son équipe. Je leur suis reconnaissante de m'avoir permis d'étudier les illustres collections de référence du Musée de l'Homme. C'est avec plaisir que j'adresse mes remerciements aux techniciennes du Muséum pour leur implication et leur bonne humeur. J'espère avoir de nouveau l'honneur et la joie de travailler à leurs côtés.

A Mr SANTOS Frédéric, enseignant de statistiques à l'Université de Bordeaux. Sans son aide inestimable, la partie « traitement des données et interprétation des résultats » aurait été moins fournie et beaucoup plus nébuleuse.

A mes amis, qui m'ont accompagnée sur ce très long parcours du combattant.

- A Caroline, nos après-midi de travail devant Les Frères Scott, me manqueront.
- A Bérengère, et dire que nos looooooongues années à la BU sont enfin terminées…
- A Laetitia, et dire qu'il te reste encore de looooooongues années à la BU…
- A Paul, qui ne m'a pas conviée à sa soutenance (mais c'est vrai nous ne sommes que cousins).
- A Laury et Emeric, qui ne cessent de me rassurer sur mon retour dans un cabinet dentaire.

Merci également d'avoir débroussaillé le très épineux sentier de l'installation du chirurgien dentiste. Entre l'URSSAF, l'inscription à l'Ordre, la CPE, la CPAM… Je suis sûre d'oublier des étapes, mais je compte sur vous.

A mes frère et soeur, ainsi qu'à leur famille, qui ne craignent pas de me confier leur santé bucco-dentaire. Je leur adresse mes plus chaleureux remerciements. Merci d'avoir été présents et encourageants pendant ces très nombreuses années.

Mes derniers et plus profonds remerciements vont à mes parents, pour qui mon bonheur est une priorité. Je leur suis immensément reconnaissante de m'avoir permis de faire des études, d'explorer différents domaines de recherches, d'avoir des doutes, de changer d'avis et de me chercher. Merci de m'avoir soutenue, indéfectiblement et patiemment. Ma réussite professionnelle est la vôtre.

A tous, un grand merci et une pluie de samoussas !

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION 11

2. RAPPELS 12

2.1 État des connaissances 12

2.2 Établissement de nouveaux indicateurs : principe de la photogrammétrie 14

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES 18

3.1 Matériel 18

3.1.1 Échantillon d'étude 18

3.1.1.1. Collection Cantacuzène 18

3.1.1.2.Collection Olivier 18

3.1.2. Appareil photographique 19

3.1.3. Ordinateur 19

3.1.4. Instruments de mesure 19

3.1.5. Pour la photogrammétrie 20

3.1.5.1. Mire 20

3.1.5.2. Legos 20

3.1.5.3. Support 20

3.2. Méthode 21

4. RÉSULTATS 33

4.1. Statistiques univariées 33

4.1.1. Variables quantitatives 33

4.1.1.1. Forme des processus mastoïdes 33

4.1.1.2. Orientation des processus mastoïdes 33

4.1.1.3. Forme des condyles occipitaux 34

4.1.1.4. Forme du foramen magnum 35

4.1.2. Variables quantitatives 35
4.1.2.1. Statistiques descriptives 35
4.1.2.2. Tests de normalité 36
4.1.2.3. Comparaison de moyennes 36
4.1.2.4. Comparaison de médianes 36
4.2. Statistiques multivariées 37
4.2.1. Arbre de décision 37
4.2.1.1. Principe 37
4.2.1.2. Application 39
4.2.2. Régression logistique 40
4.2.2.1. Principe 40
4.2.2.2. Application 41
4.3. Erreur intra-observateur 43
4.3.1. Variables qualitatives 43
4.3.2. Variables quantitatives 43

5. DISCUSSION 45
5.1. Avantages du protocole 45
5.2. Inconvénients et limites du protocole 45
5.3. Résultats 46
5.4. Biais méthodologiques 48
5.5. Étiologies recherchées 51

6. CONCLUSION 53

ANNEXES 54

BIBLIOGRAPHIE 58

1. INTRODUCTION

En anthropologie, comme en médecine légale, la détermination du sexe est une étape clé, car elle conditionne le reste de l'étude anthropologique. Cependant, il faut noter que la précision de la diagnose sexuelle est fortement assujettie à l'état de conservation des ossements. En effet, Krogman et İşcan ont montré qu'elle est de 100 % si le squelette est conservé dans son intégralité, de 98 % en présence du bassin osseux et du crâne, de 95 % si seul le pelvis est observable, de 80 à 90 % si l'étude ne s'appuie que sur l'analyse du crâne (29). Ces chiffres s'expliquent par le fait que le dimorphisme sexuel, bien que présent sur la majorité des ossements, varie en fonction des zones squelettiques (13, 24, 41). Un des enjeux en anthropologie médico-légale, est de révéler et quantifier le degré de dimorphisme sexuel de chacune de ces régions anatomiques, afin de répondre aux catastrophes naturelles, agressions physiques, incendies, crash aériens, érosions.... qui conduisent à l'étude de restes humains en états de conservation très variés (24). De nombreuses études anthropologiques ont donc été menées sur la plupart des os humains : mandibule, face, os longs... (7, 19, 31). Le crâne serait, après le pelvis, la deuxième région la plus dimorphique du squelette, les caractères discriminants étant la taille et la robustesse (29). Par ailleurs, le crâne, et en particulier le basicrâne, est généralement bien conservé, de part sa robustesse, sa structure compacte et sa position anatomique privilégiée, protégée par une large masse de tissus mous (13, 34, 41). La base du crâne apparaît donc comme une zone d'intérêt majeure pour étudier le dimorphisme sexuel.

L'objectif de notre travail est double.

Il s'agit d'établir de nouvelles méthodes de diagnose sexuelle grâce à des analyses statistiques multivariées, en exploitant simultanément différentes structures anatomiques de la base du crâne. D'une part, l'ostéométrie permettra le recueil de variables décrites dans les publications. D'autre part, de nouveaux indicateurs seront définis grâce à la photogrammétrie.

Le second objectif est de valider l'apport de la photogrammétrie en anthropologie.

Après un rappel des résultats des études précédentes et du principe de la photogrammétrie, le protocole de recueil des données sera détaillé. Nous exposerons ensuite les résultats des analyses statistiques, qui seront discutés dans la dernière partie de notre travail. Enfin, nous décrirons l'intérêt de la photogrammétrie dans le travail de l'anthropologue.

2. RAPPELS

2.1. État actuel des connaissances

Il existe deux approches méthodologiques concernant la diagnose sexuelle. L'approche morphologique consiste à coter certains paramètres dimorphiques observés sur le crâne. De fait, la caractérisation de ces traits est facile à réaliser mais subjective et dépend directement de la formation et de l'expérience de l'opérateur. L'approche morphométrique propose de sexer un individu en prenant des mesures sur les os qui lui appartiennent. Cette méthode est donc plus objective, moins opérateur-dépendante et est validée par des calculs statistiques. Dans les deux cas, le diagnostic ne peut être certain, et il faut considérer le taux d'erreur de la méthode. (3, 26, 28, 42, 46)

Ces deux approches ont été appliquées sur diverses zones du squelette et notamment, au niveau de la base du crâne. Suazo *et al.* testent la précision de l'index condylaire de Baudoin dans la détermination du sexe. Ils concluent qu'il existe une différence significative entre hommes et femmes dans les dimensions des condyles occipitaux. Cependant, l'indice de Baudoin, avec une précision de 41,39 %, ne peut être utilisé dans la diagnose sexuelle. (44)

Plusieurs auteurs se sont intéressés au foramen magnum. Günay et Altinkök trouvent une corrélation significative mais faible entre les caractéristiques métriques du foramen magnum et le sexe. Raghavendra *et al.* et Edwards *et al.* parviennent aux mêmes conclusions puisque la précision de leurs méthodes varie entre 67,6 et 88 %. Ces résultats sont en adéquation avec les études précédentes, et les auteurs s'accordent à dire que leurs équations ne fournissent qu'une information supplémentaire et ne doivent être employées que sur des fragments de crâne, lorsque les autres méthodes sont inapplicables. (14, 19, 34)

D'autres auteurs ont exploré le pouvoir discriminant du condyle occipital et du foramen magnum conjointement, grâce à une approche morphométrique. Selon leurs résultats, il existe une différence significative entre hommes et femmes. Les équations discriminantes obtenues présentent une précision entre 70,3 et 85 %. Ces résultats concordent avec les précédentes publications. Les auteurs, jugeant les taux d'erreurs trop élevés, ne recommandent ces méthodes qu'en dernier

recours, sur des crânes fragmentés, et le résultat doit être considéré comme une information complémentaire. (17, 18, 22, 47, 48)

De nombreuses méthodes ont été développées à partir de l'étude du processus mastoïde. Paul Broca décrit, en 1875, le signe de Broca. Un crâne, pourvu de molaires maxillaires, posé sur une surface plane, repose sur les processus mastoïdes dans le cas d'un homme et sur les condyles occipitaux ou sur une autre partie du crâne s'il s'agit d'une femme. Ceci est lié à la morphologie plus volumineuse, plus robuste du processus mastoïde masculin (13). Suzuki met en évidence un autre critère de diagnose sexuelle et crée une classification basée sur la forme et l'orientation du processus mastoïde. Hoshi complète et teste cette classification, ainsi que le signe de Broca, et obtient un taux de bon classement de 57,9 % et 53,1 % respectivement. Ces deux méthodes sont donc peu fiables. (23)

De Paiva et Segre élaborent une nouvelle approche fondée sur le triangle mastoïdien. Ce triangle est défini par trois points crâniométriques : porion (point pair, situé sur la verticale médiane du méat acoustique externe, sur le rebord externe et le plus supérieur de celui-ci), astérion (point pair, situé à la rencontre des os pariétal, temporal et occipital) et mastoïdale (point pair le plus inférieur du processus mastoïde). L'auteur parvient alors à sexer un crâne en comparant l'aire totale des deux triangles droit et gauche à des valeurs seuils. Il s'agit d'une technique facile à réaliser et rapide. Par ailleurs, elle ne nécessite ni entraînement, ni formation particulière. L'erreur inter-observateur est donc faible. De plus, le sexe est estimé avec un intervalle de confiance de 95 % (10, 13, 16, 25, 28, 43). Suite à cette étude, plusieurs auteurs ont éprouvé cette technique sur différents échantillons. Certains chercheurs (16, 41) montrent une différence significative entre hommes et femmes concernant l'aire du triangle mastoïdien. La méthode de De Paiva et Segre constitue pour eux une technique à utiliser en médecine légale. Inversement, d'autres auteurs (4, 25, 26, 28, 43) démontrent que le pouvoir discriminant du triangle mastoïdien, bien que certain, est trop faible pour être fiable. Ils remettent donc en question l'applicabilité de cette méthode, notamment dans le cas d'un crâne isolé. L'écart entre les résultats pourrait s'expliquer par une variabilité interpopulationnelle du dimorphisme sexuel et de la position de l'astérion. De plus, les auteurs se sont permis de modifier le protocole. En effet, afin d'augmenter la précision des mesures, celles-ci sont prises directement sur le crâne et non sur une copie xérographique. Enfin, l'emplacement de l'astérion serait corrélée à l'âge.

Divers auteurs ont testé l'efficacité d'une méthode morphométrique sur les dimensions du processus mastoïde. En effet, Bernard et Moore-Jansen et Sujarittham *et al.* (3, 45) démontrent la pertinence d'utiliser des techniques métriques au niveau de la mastoïde au lieu des approches non métriques. Les résultats sont prometteurs puisque les chercheurs obtiennent des taux de fiabilité entre 76,7 et 90 % (10, 24, 36, 45, 46).

Ces résultats sont très encourageants. La base du crâne constitue effectivement une zone d'intérêt pour la diagnose sexuelle. Le pouvoir discriminant du foramen magnum, des condyles occipitaux et du processus mastoïde est attesté. Toutes ces études s'accordent à montrer que les valeurs métriques sont supérieures chez l'homme par rapport à la femme, et ce, indépendamment de la population de référence. Par ailleurs, les résultats sont bien meilleurs lorsque les équations considèrent plusieurs variables simultanément. Néanmoins, un problème concerne la description des variables. En effet, il n'y a pas de consensus sur la définition des dimensions du processus mastoïde, ce qui complique la comparaison entre les différentes études. Par ailleurs, une attention particulière devra être portée sur les biais éventuels. La sélection des individus devra respecter un sexe-ratio équilibré, et seuls les adultes matures, âgés de plus de vingt ans, seront étudiés. En revanche, les résultats seront interprétés en tenant compte de la population de référence et de son origine géographique car il existe une variabilité interpopulationnelle.

2.2. Établissement de nouveaux indicateurs : principe de la photogrammétrie

En complément des indicateurs précédemment décrits, nous proposons de définir et étudier de nouveaux paramètres sur la base d'un modèle tridimensionnel, obtenu par photogrammétrie. Cette démarche a pour objectif l'élaboration d'une nouvelle méthode de diagnose sexuelle.

La photogrammétrie est un procédé qui suscite un grand intérêt. Le principe est basé sur la vision stéréoscopique, c'est-à-dire la perception du relief tridimensionnel à partir d'images bidimensionnelles. La technique est fondée sur la reconnaissance de points de liaison entre plusieurs images acquises selon différents points de vue. C'est l'alignement des photographies ou stéréopréparation.

La conception d'un modèle tridimensionnel à partir d'images bidimensionnelles est le résultat de plusieurs étapes indispensables. L'ensemble de ces étapes peut être réalisé via un service disponible sur internet (arc3D, photofly...) ou grâce à des logiciel sous licence commerciale

(Photomodeler, Photoscan). Les services WEB sont très simples d'utilisation et gratuits mais exigent une connexion internet fiable et suffisante pour la communication des images de l'opérateur. De plus, le paramétrage des outils n'est pas possible et ne s'adapte pas toujours aux besoins de l'utilisateur. Les logiciels sous licence commerciale offrent ces possibilités mais peuvent être relativement onéreux (33). Dans le cadre de ce mémoire, nous avons opté pour cette dernière solution et avons choisi le logiciel Agisoft PhotoScan (figure 1).

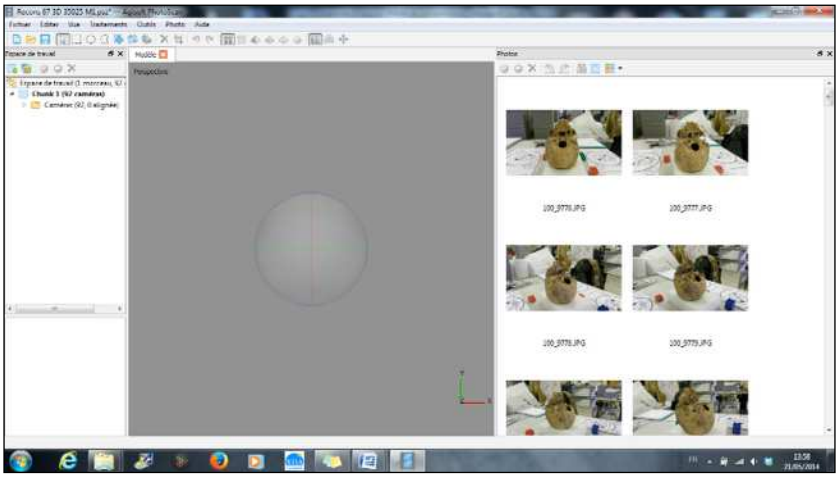


Figure 1 : interface graphique du logiciel Agisoft Photoscan (A. Say-Liang-Fat)

En premier lieu, un certain nombre de photographies de l'objet à reproduire, sont prises sous différents angles de vue. L'ensemble des images est importé dans un logiciel spécialisé dans la reconstruction photogrammétrique, de type Agisoft Photoscan. Le logiciel cherche des points homologues entre les images, et ainsi pourra aligner les photographies qui se recouvrent partiellement, et les situer dans l'espace, autour de l'objet considéré (figure 2). Considérant un couple d'images, la reconnaissance de six points de liaison est nécessaire pour que le modèle soit construit. Cette opération est appelée stéréopréparation ou alignement des photographies (8, 32).

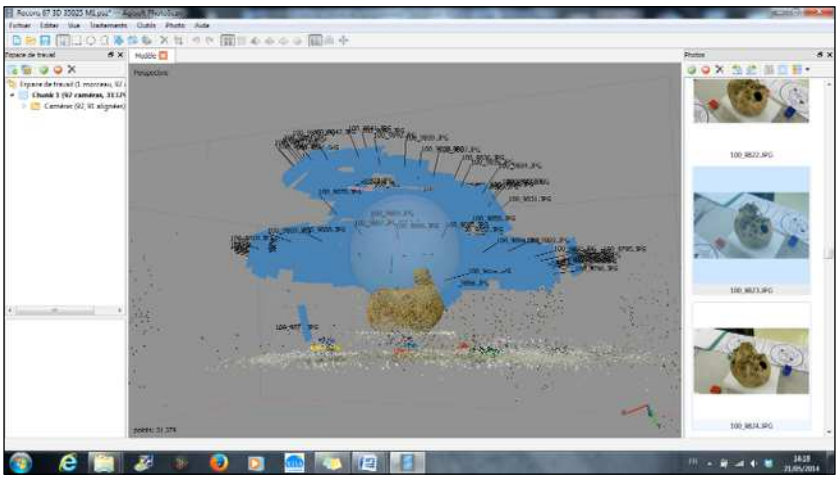


Figure 2 : alignement des photographies (A. Say-Liang-Fat)

Puis, les coordonnées bidimensionnelles de ces points de liaison sont transformées en coordonnées tridimensionnelles, pour obtenir un nuage de points de l'objet considéré (figure 3).

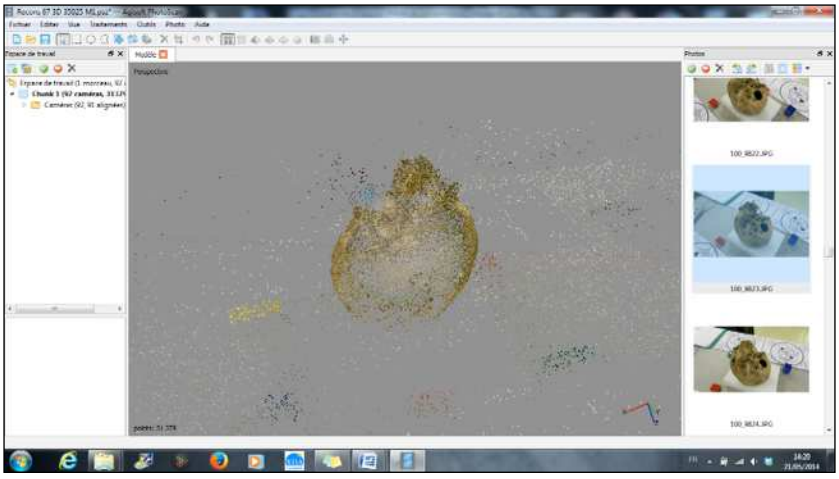


Figure 3 : création d'un nuage de points (A. Say-Liang-Fat)

Enfin, le logiciel crée le modèle sous forme de maillage en trois dimensions, appelé mesh (figure 4), et ajoute la texture (figure 5) (8, 32).

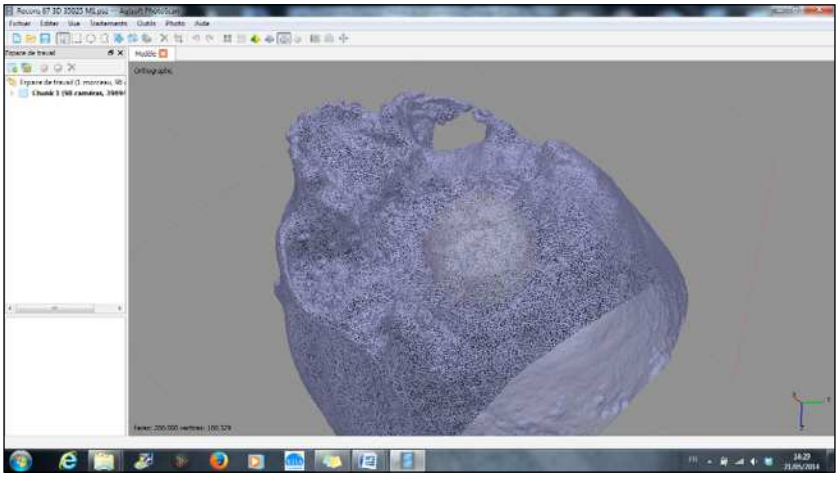


Figure 4 : visualisation des triangles composant le mesh, par agrandissement du modèle (A. Say-Liang-Fat)

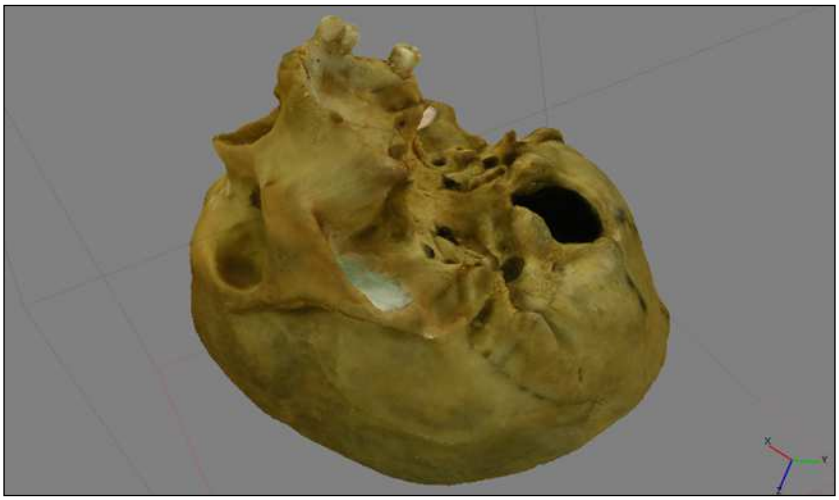


Figure 5 : modèle texturé (A. Say-Liang-Fat)

Plusieurs auteurs se sont interrogés sur la précision du modèle obtenu par photogrammétrie. Il s'agit d'une question délicate puisqu'elle dépend de différents facteurs : conditions d'acquisition, définition des images et type d'objet. Néanmoins, Schewe et Ifert parlent d'une précision de 0,1 mm pour les reconstructions faciales. Et pour Katz et Friess, la photogrammétrie a une précision comparable à celle des scanners surfaciques. (3, 27, 40)

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1. Matériel

3.1.1. Échantillon d'étude

Notre échantillon d'étude comprend quatre-vingt-dix individus, quarante-neuf hommes et quarante et une femmes, ayant entre vingt et soixante-quatorze ans, issus de deux collections de référence du musée de l'Homme, la collection Cantacuzène et la collection Olivier. Dans le cadre de notre étude, nous n'avons sélectionné que les adultes, en tentant de respecter un sexe-ratio équilibré. Cependant, nous avons choisi d'exclure tous les ossements présentant une mauvaise conservation, des sutures synostosées, une pathologie ou une position trop ambigüe de l'astérion.

3.1.1.1. Collection Cantacuzène

Trente hommes et vingt-deux femmes de la collection Cantacuzène ont été étudiés. Cette collection a été nommée d'après le donateur, Georges Cantacuzène (Gheorghe Grigore Cantacuzino, en roumain). Il s'agit d'un prince et homme politique roumain du XIX^{ème} siècle, membre de la Société d'Anthropologie de Paris. De 1857 à 1860, cet homme a prélevé cent soixante-trois crânes dans différents hôpitaux européens (hongrois, grec, italien...), sur des corps non réclamés, puis en a fait don à la Société d'Anthropologie de Paris. Ces crânes sont accompagnés de renseignements précieux sur l'identité du défunt : provenance géographique, nom, sexe, âge, profession... Il s'agit aujourd'hui d'une collection de référence concernant le dimorphisme sexuel (50).

3.1.1.2. Collection Olivier

Dix-neuf hommes et dix-neuf femmes de notre échantillon d'étude proviennent de la collection Olivier, autre collection de référence du musée de l'Homme. Constituée dans les années 1960 par le professeur Georges Olivier, elle comprend cent six squelettes d'individus laissés sans sépulture dans les morgues de Paris. Ces ossements sont entrés dans les collections du musée en 2004, avec une description biologique de l'individu : sexe, âge et stature (20).

3.1.2. Appareil photographique

La photogrammétrie requiert un équipement simple. Un appareil photographique numérique compact est parfaitement approprié pour prendre les photographies (33, 52). Dans notre cas, il s'agit d'un Kodak EasyShare M420 (figure 6).



Figure 6 : appareil photographique ayant servi à la photogrammétrie (A. Say-Liang-Fat)

3.1.3. Ordinateur

Tout le traitement informatique a été effectué à l'aide d'un MacBook Pro, doté d'un processeur 2,3 GHz Intel Core i5. Plusieurs logiciels ont été installés sur cet ordinateur : R et Open Office pour le traitement statistique ; Agisoft PhotoScan, MeshLab et AMIRA pour la construction et la manipulation du modèle tridimensionnel.

3.1.4. Instruments de mesure

Toutes les mesures ont été prises avec les mêmes instruments : un céphalomètre, avec la précision d'un millimètre, et un pied à coulisse électronique, avec la précision d'un centième de millimètre.

3.1.5. Pour la photogrammétrie

Divers éléments sont utiles pour optimiser la construction du modèle photogrammétrique.

3.1.5.1. Mire

Plusieurs mires, composées de cercles et de lignes, sont posées à plat, autour de l'objet d'étude. Les mires facilitent l'alignement des images en multipliant les points d'appariement entre les photographies. De plus, elles peuvent servir à étalonner le modèle grâce aux distances entre les différents cercles et segments (52).

3.1.5.2. Legos

Les briques de Lego possèdent plusieurs spécificités qui expliquent leur utilisation lors de la photogrammétrie. Il est très facile de se procurer ce jouet très populaire et peu onéreux. De plus, il est fabriqué avec une précision de 0,002 mm afin d'assurer un assemblage irréprochable, ce qui assure des surfaces aux dimensions parfaitement calibrées, planes et perpendiculaires entre elles. Toutes ces qualités font du Lego un excellent référentiel volumétrique et colorimétrique, particulièrement utile lors de l'alignement des images et de la calibration métrique de l'espace (1, 5, 8, 51, 52).

3.1.5.3. Support

Le support, fourni par le musée de l'Homme, est un bloc de polystyrène. Il mesure 223 mm de longueur et 153 mm de largeur et présente une concavité centrale, de 100 mm de diamètre, pour recevoir la partie pariéto-occipitale du crâne.

3.2. Méthode

Nous avons défini un protocole précis et l'avons appliqué de façon égale sur l'ensemble de l'échantillon d'étude.

Notre protocole débute par une séance photographique, où deux temps sont à distinguer : la première série de photographies est anthropologique tandis que la deuxième est à visée photogrammétrique.

Dans un premier temps, chaque crâne est photographié selon les points de vue anthropologiques classiques : norma verticalis, norma frontalis, norma lateralis, norma basilaris et norma occipitalis.

Puis, divers éléments sont placés sur le plan de travail. Le crâne est installé sur le support, le massif facial orienté vers le haut. Les mires et les blocs de Lego sont disposés autour de lui (figure 7).

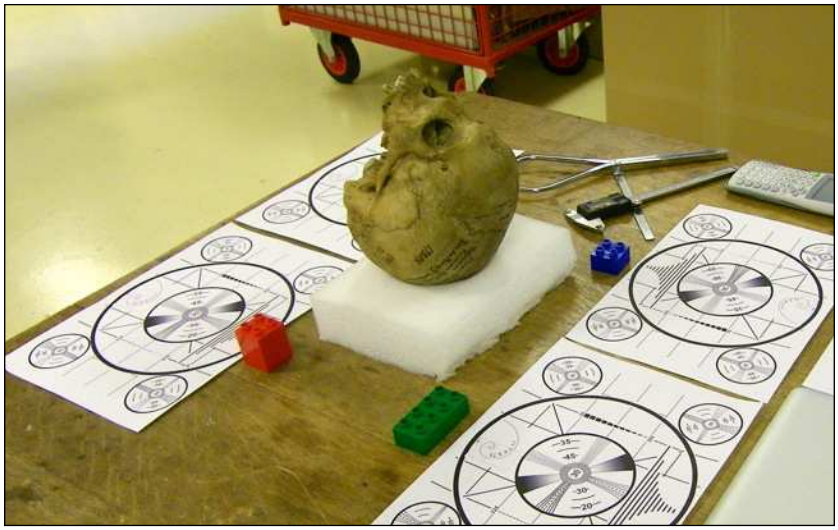


Figure 7 : installation des différents éléments nécessaires à la photogrammétrie (A. Say-Liang-Fat)

Nous pouvons ensuite prendre les photographies qui serviront à reconstruire le modèle tridimensionnel. Il faut environ quatre-vingt-dix photographies par crâne. Les points de vue doivent

être assez proches pour permettre un recouvrement suffisant pour la reconnaissance de points de liaison entre les images. Il faut également que les photographies soient prises à des hauteurs différentes, formant ainsi une cloche photographique (figure 2). D'autre part, l'environnement doit être constant durant toute la procédure. De même, le flash est proscrit de manière à éviter des ombres différentes sur les images. Une lumière naturelle et omnidirectionnelle est préférable. Enfin, nous avons choisi une définition de 7,5 millions de pixels, ce qui nous a semblé le parfait compromis entre une définition maximale et une durée de reconstruction raisonnable (27, 33, 51, 52).

La fiche d'enregistrement, que nous avons établie, est ensuite remplie (figure 8). Il s'agit de mesures de longueurs, de calculs d'aires et de caractérisations qualitatives du crâne. La fiche est divisée en sept parties.

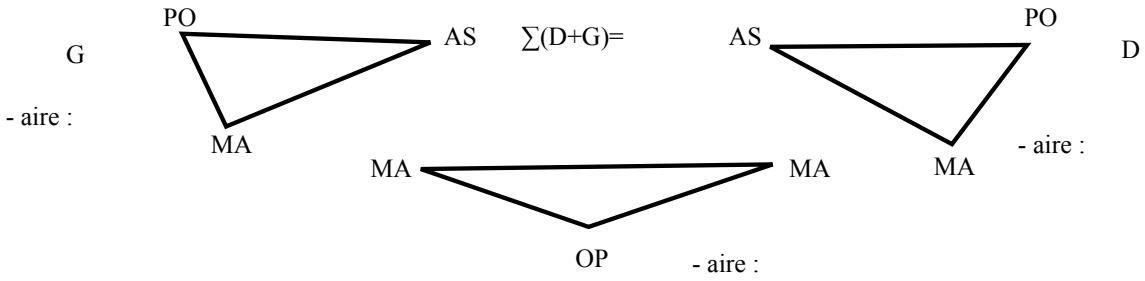
INDIVIDU N° d'étude : N° d'inventaire :

- sexe : ☐ F ☐ M - âge :
- origine géographique :
- paléopathologie :

- longueur maximale : - largeur maximale :
- largeur bizygomatique : - Opisthion - Vertex :

Processus mastoïdien

- forme : - G : ☐ robuste ☐ ND ☐ gracile / D : ☐ robuste ☐ ND ☐ gracile
- volume : - G : - hauteur : -D : - hauteur :
  - largeur : - largeur :
  - diamètre antéro -postérieur : - diamètre antéro-postérieur :
- orientation : - G : ☐ F ☐ N ☐ M / D : ☐ F ☐ N ☐ M



Condyle occipital

- forme : - G : ☐ ovale ☐ forme de rein ☐ forme de S ☐ forme de 8 ☐ triangulaire ☐ rond ☐ bipartite ☐ irrégulier
  - D : ☐ ovale ☐ forme de rein ☐ forme de S ☐ forme de 8 ☐ triangulaire ☐ rond ☐ bipartite ☐ irrégulier
- MLC : G : - D :
- MWC : G : - D :
- BCB : - MnD :
- MxID : - EHC :

Foramen magnum

- LFM : - WFM :
- aire : - formule de Teixeira :
  - formule de Radinsky :
- forme : ☐ oeuf ☐ ovale ☐ rond ☐ tétragonal ☐ pentagonal ☐ hexagonal ☐ irrégulier

Observation

Figure 8 : fiche d'enregistrement des variables (A. Say-Liang-Fat)

La première partie reprend le numéro d'inventaire du crâne, ainsi que le numéro d'étude que nous lui avons attribué.

La deuxième partie renseigne l'identité biologique de l'individu (sexe, âge et origine géographique) et la présence d'éventuelles paléopathologies.

Dans la troisième partie, il s'agit de prendre quatre mesures anthropométriques classiques : longueur et largeur maximales du crâne, largeur bizygomatique et longueur opisthion-vertex. Ces longueurs fournissent une idée de la forme générale du crâne et peuvent également être utilisées pour la calibration métrique du modèle tridimensionnel.

La quatrième partie concerne les processus mastoïdes, qui seront appréciés selon deux approches. L'approche morphologique prend en compte la robustesse ou la gracilité des processus mastoïdes. L'approche morphométrique est relative aux dimensions volumétriques. Nous avons utilisé les définitions de Sumati *et al.* , reprises par Sujarittham *et al.* et par Das Gupta *et al.* (10, 45, 46). Il est à noter que, considérant ces définitions, le crâne doit être orienté selon le plan de Francfort. La hauteur du processus mastoïde (figure 9) est la distance entre le plan de Francfort (plan défini par les porions et les orbitales) et la mastoïdale (point pair le plus inférieur du processus mastoïde).



Figure 9 : hauteur du processus mastoïde (A. Say-Liang-Fat)

La largeur du processus mastoïde est définie par le point le plus haut de l'incisure mastoïdienne sur la face médiale du processus, et le point latéral du processus situé au même niveau (figure 10).



Figure 10 : largeur du processus mastoïde (A. Say-Liang-Fat)

Le diamètre antéro-postérieur est la distance entre le point de rencontre le plus bas entre la partie tympanique et la partie pétreuse de l'os temporal, et le point le plus postérieur du processus mastoïde situé au même niveau (figure 11).



Figure 11 : diamètre antéro-postérieur du processus mastoïde (A. Say-Liang-Fat)

L'orientation du processus mastoïde est cotée selon la classification de Hoshi (23). La forme masculine, appelée M, se caractérise par une concavité présente au-dessus de la base du processus, et un apex dirigé verticalement. Dans ce cas, le processus mastoïde est généralement robuste et rugueuse. La forme féminine se définit par l'absence de concavité et un apex dirigé médialement. Le processus mastoïde est alors le plus souvent gracile et lisse. La forme non déterminée, nommée N, est une forme intermédiaire. L'apex est dirigé verticalement et il n'y a ni concavité, ni convexité (figure 12).

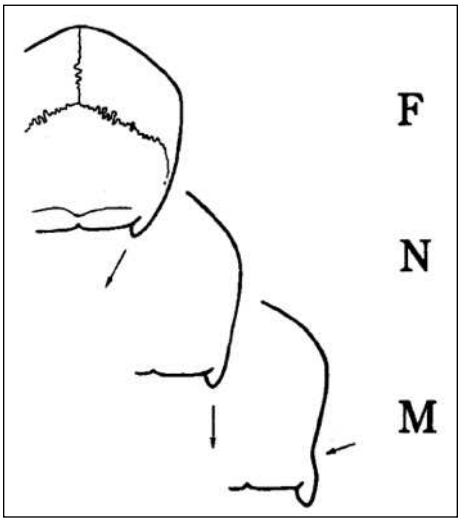


Figure 12 : classification de l'orientation du processus mastoïde (23)

Puis, nous avons appliqué la méthode de De Paiva et Segre (13), complétée par Jain *et al.* (24). Il s'agit d'évaluer le triangle mastoïdien, défini par le porion (point pair, situé sur la verticale médiane du méat acoustique externe, sur le rebord externe et le plus supérieur de celui-ci), l'astérion (point pair, situé à la rencontre des os pariétal, temporal et occipital) et la mastoïdale (point pair le plus inférieur du processus mastoïde). La méthode consiste à mesurer les trois côtés et de calculer l'aire de ce triangle, puis d'en déduire l'aire totale des deux triangles. Jain *et al.* proposent d'en mesurer également les trois angles, et de prendre les mêmes variables (longueur des côtés, angles et aire) sur le triangle reliant les deux mastoïdales et l'opisthion (point impair et médian le plus postérieur du foramen magnum).

La cinquième partie de la fiche d'enregistrement vise à caractériser les condyles occipitaux. La forme des condyles est cotée selon la classification de Naderi *et al.* (30), selon laquelle il existe huit types différents : ovale, en forme de rein, en forme de S, en forme de 8, triangulaire, rond, bipartite et irrégulier (figure 13).

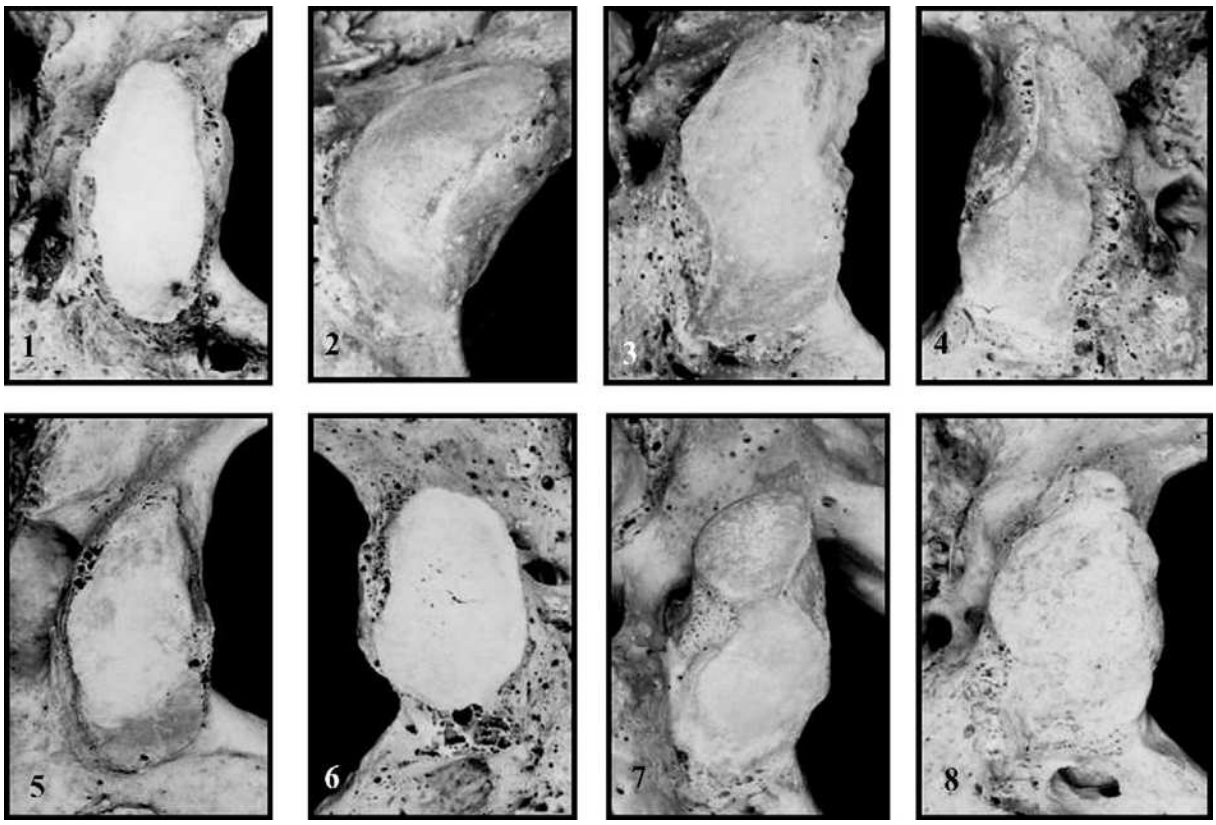


Figure 13 : les différentes formes de condyles occipitaux (30)

La définition des variables quantitatives s'inspirent de l'étude de Holland (22), reprise et complétée par Gapert *et al.* (17). La longueur maximale du condyle, MLC (maximum length of condyle), est la distance entre le point le plus antérieur et le point le plus postérieur de la surface articulaire. La largeur maximale du condyle, MWC (maximum width of condyle), se mesure au niveau de la partie la plus large du condyle, perpendiculairement à la longueur maximale (figure 14).



Figure 14 : dimensions du condyle occipital. (a) MLC, (b) MWC (17)

Une précision doit être apportée concernant les surfaces articulaires bipartites. Á l'instar de Gapert *et al*., nous avons choisi de les traiter comme une facette articulaire unique.

La distance maximale bicondylaire, BCB (maximum bicondylar breadth), est la distance entre les points les plus latéraux des condyles occipitaux. MxID (maximum interior distance between condyles) désigne la distance maximale interne, entre les condyles, et se mesure entre les bords médiaux des surfaces articulaires. MnD (minimum distance between condyles) est la distance minimale intercondylaire (figure 15).

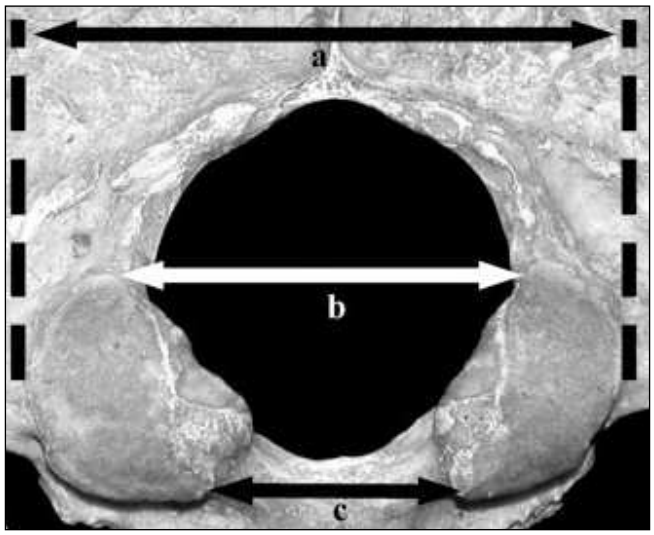


Figure 15 : mesures bicondylaires. (a) BCB, (b) MxID, (c) MnD (17)

La dernière mesure, EHC (external hypoglossal canal distance), est la distance entre les bords médiaux des foramina exocrâniens des canaux hypoglosses (figure 16).



Figure 16 : EHC, distance entre les canaux hypoglosses (17)

La sixième partie de la fiche d'enregistrement reprend les variables concernant le foramen magnum, empruntées aux études de Edwards *et al.* (14), Gapert *et al.* (18) et Raghavendra *et al.* (34). LFM (length of the foramen magnum) est la longueur maximale du foramen magnum, le diamètre antéro-postérieur. Et WFM (width of the foramen magnum) désigne la largeur maximale du foramen, le diamètre transversal, mesuré dans un axe perpendiculaire au diamètre antéro-postérieur (figure 17).

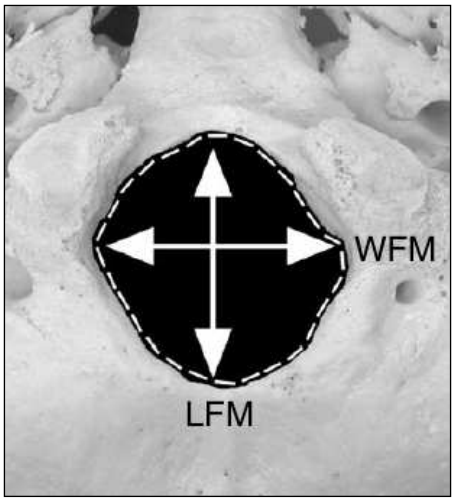


Figure 17 : dimensions du foramen magnum (d'après Gapert et al., 2009b, modifié)

L'aire du foramen est calculée selon deux formules mathématiques. La formule de Teixeira est la suivante : aire = π x ((LFM+WFM)/4)^2. L'aire, selon la formule de Radinsky, est définie par la formule suivante : aire = 1/4 x π x LFM x WFM.

La forme du foramen magnum est décrite d'après la classification d'Edwards *et al.* (14). Il peut être en forme d'oeuf (figure 18a), ovale (figure 18b), rond (figure 18c), tétragonal (figure 18d), pentagonal (figure 18e), hexagonal (figure 18f) ou irrégulier (figure 18g).

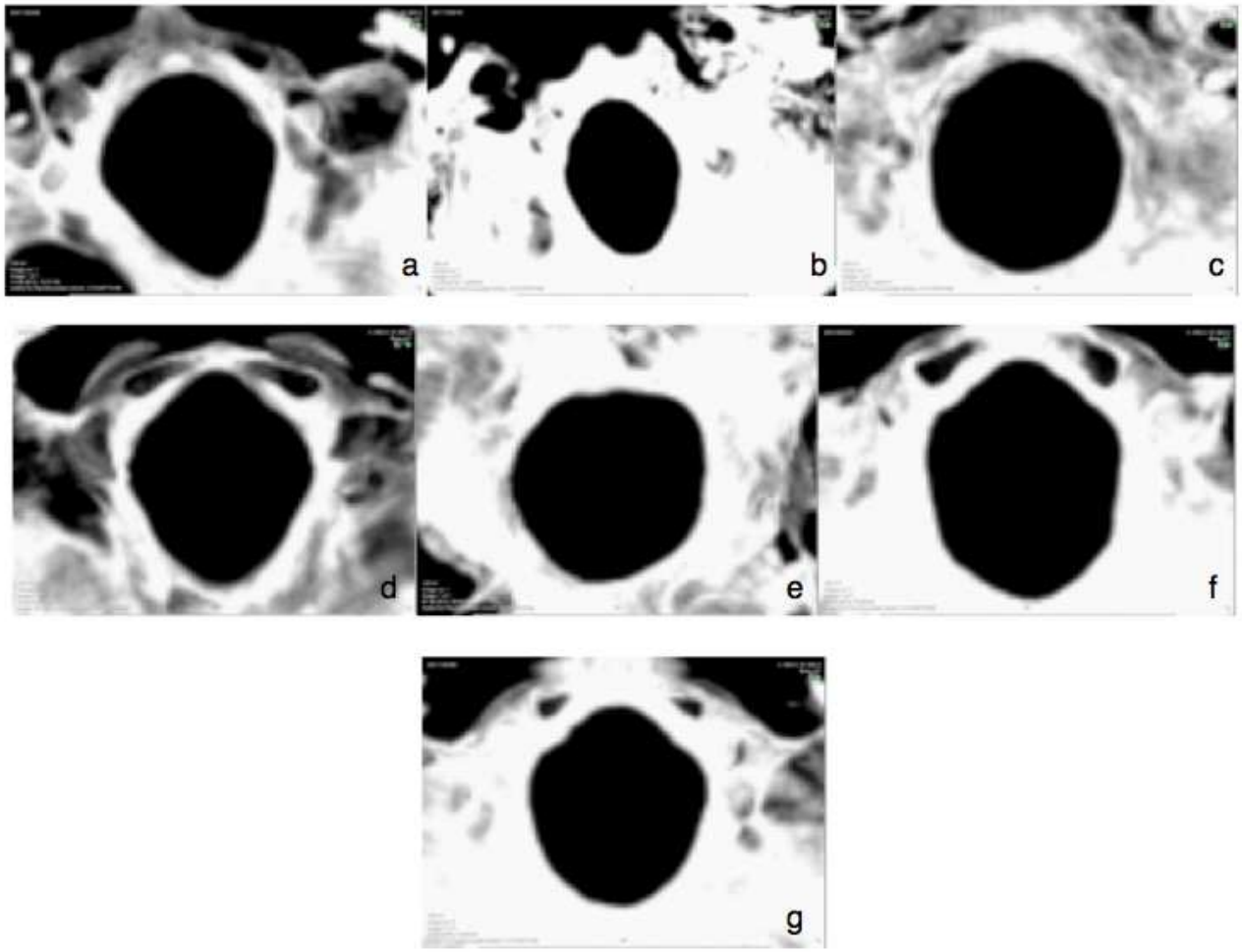


Figure 18 : les sept formes de foramen magnum (14)

La septième et dernière partie de la fiche d'enregistrement est réservée à d'éventuelles observations (stature, profession, variations anatomiques non métriques...).

L'ensemble de ces informations est ensuite compilé dans une base de données informatique.

Toutes ces premières étapes de photographie et de recueil de variables sur le matériel osseux sont «incompressibles», mais toutefois chronophages car elles nécessitent environ une heure et demie par crâne.

Commence ensuite le traitement informatique. La construction du modèle tridimensionnel est effectué à l'aide du logiciel Agisoft PhotoScan. Dans une première phase, un étalonnage du logiciel PhotoScan est effectué, avant la mesure des variables. L'étalonnage sert à quantifier et corriger la distorsion créée par l'objectif de l'appareil photographique. Ceci peut être réalisé de façon simple et rapide grâce à quelques mesures prises au préalable sur le crâne, ou à l'aide d'un objet calibré posé près du crâne. Dans notre cas, il s'agit de blocs de Lego car il offre de nombreux avantages. Cet objet, très peu onéreux, est usiné avec une précision de 0,002 mm, assurant une grande justesse dans les dimensions et l'orthogonalité des surfaces (1).

Après importation des photographies, l'alignement est effectué. Le logiciel fournit une représentation sous forme de points, ou nuage dense, qui permet de sélectionner la région d'intérêt. Puis, une reconstruction de qualité inférieure est effectuée, afin de valider la qualité des photographies. Le résultat est obtenu sous forme de mesh, ou maillage, de l'objet étudié. Si le modèle n'est pas satisfaisant, il faudra répéter l'étape de photographie. Dans le cas contraire, la reconstruction de haute qualité est demandée. Celle-ci dure en moyenne quatre heures.

Le modèle tridimensionnel ainsi produit va subir une phase de post-traitement, possible grâce à deux logiciels, MeshLab et AMIRA. MeshLab est un logiciel gratuit, conçu pour le traitement et l'analyse des maillages surfaciques. Ce logiciel, grâce à ses nombreux outils, permet de vérifier la pertinence et l'exactitude des fichiers. De plus, l'utilisation de certains filtres permet un lissage du modèle, sans modification de son aspect morphométrique (8).

Le fichier est prêt à être exploité par le logiciel Amira. Ce dernier sert à positionner les points de référence au niveau de certains points crâniométriques. Ces points servent au positionnement de plans et lignes de référence utiles à la mesure de nos nouveaux indicateurs angulaires (21). Concernant notre étude, il s'agit du plan de Francfort, défini par les porions et orbitales (points pairs les plus inférieurs du rebord de l'orbite), et le plan médian sagittal, qui passe par le point interincisif supérieur (point impair et médian le plus antérieur de la suture palatine médiane du processus alvéolaire, entre les deux incisives centrales maxillaires), le staphylion (point impair et médian situé sur la tangente aux échancrures postérieures de la lame horizontale de l'os palatin), le basion (point impair et médian le plus antérieur du foramen magnum), l'opisthion (point impair et médian le plus postérieur du foramen magnum) et l'inion (point impair et médian situé à

la rencontre des deux lignes nuchales supérieures). À ces points, s'ajoutent d'autres points crâniométriques : mastoïdales droit et gauche, limites antérieure et postérieure des condyles droit et gauche. Ces points crâniométriques, ainsi que le basion et l'opisthion, ont été considérés par rapport aux deux plans de référence, définissant ainsi des angles (figures 19 et 20) : angle entre le plan de Francfort et la mastoïdale droite, angle entre le plan de Francfort et la mastoïdale gauche, angle entre le plan médian sagittal et la mastoïdale droite...

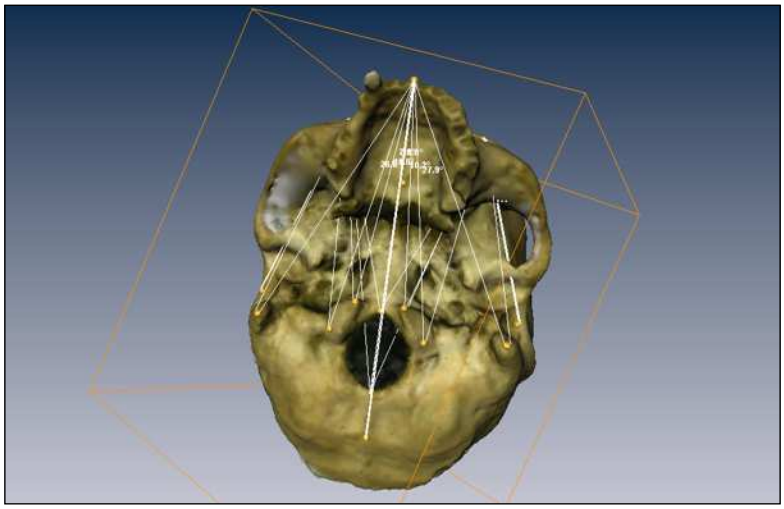


Figure 19 : visualisation des angles mesurés sur le modèle tridimensionnel, en vue inférieure (A. Say-Liang-Fat)

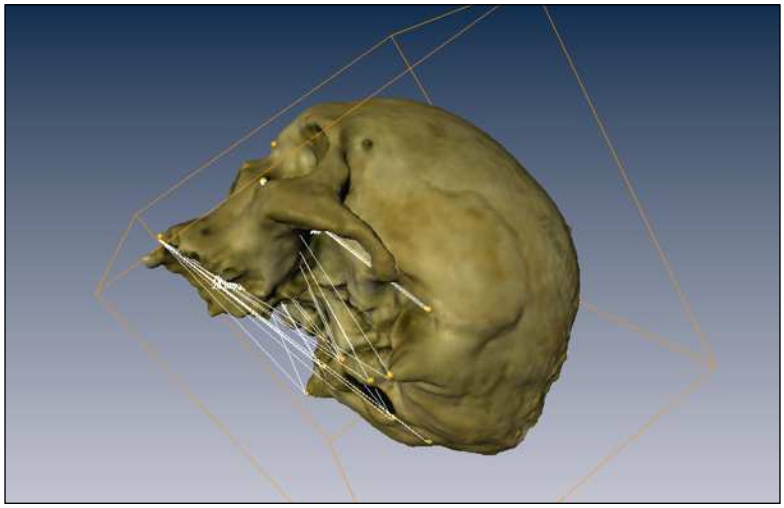


Figure 20 : visualisation des angles mesurés sur le modèle tridimensionnel, en vue latérale gauche (A. Say-Liang-Fat)

4. RÉSULTATS

La dénomination des variables est précisée en annexe 1.

Dans un premier temps, les variables seront étudiées isolément, puis les analyses multivariées seront menées afin de considérer l'ensemble de la base de données.

4.1.Statistiques univariées

4.1.1. Variables qualitatives

4.1.1.1. Forme des processus mastoïdes (tableau 1)

Le p-value du test exact de Fisher (4.693e-08) indique qu'il existe une corrélation entre le sexe et la forme des processus mastoïdes. Cependant, sexer un crâne en considérant la forme des processus mastoïdes est une méthode peu précise, avec un taux d'erreur de 29,44 % dans notre échantillon.

	Homme		Femme	
Forme	mast_forme_G	mast_forme_D	mast_forme_G	mast_forme_D
robuste	35	34	11	13
ND	0	0	0	0
gracile	14	15	30	28
Total	49	49	41	41

Tableau 1 : effectifs des différentes formes de processus mastoïdes gauches et droits

4.1.1.2. Orientation des processus mastoïdes (tableau 2)

Sexer un crâne isolé ne peut être réalisé par la seule cotation de l'orientation du processus mastoïde, car cette méthode montre un taux d'erreur de 44,44 % dans notre échantillon de travail. Néanmoins, le test exact de Fisher démontre la présence d'un lien significatif entre ces deux variables, puisque le p-value est inférieur à 2.2e-16.

	Homme		Femme	
Orientation	mast_orientation_G	mast_orientation_D	mast_orientation_G	mast_orientation_D
M	31	34	2	5
N	13	11	19	21
F	5	4	20	15
Total	49	49	41	41

Tableau 2 : effectifs des différentes orientations des processus mastoïdes gauches et droits

4.1.1.3. Forme des condyles occipitaux (tableau 3)

L'observation de la forme des condyles occipitaux souligne la prépondérance de la forme irrégulière chez les hommes (45,92 %) et chez les femmes (37,04 %), suivie de la forme ovale (26,53 % chez les hommes, 30,86 % chez les femmes).

L'application du test exact de Fisher donne un p-value de 0.967. La forme des condyles occipitaux n'apparaît pas comme un critère de discrimination entre les hommes et les femmes.

	Homme		Femme	
Forme	occ_forme_G	occ_forme_D	occ_forme_G	occ_forme_D
ovale	10	16	13	12
forme de rein	2	1	1	3
forme de S	0	4	1	3
forme de 8	7	4	3	6
triangulaire	1	3	3	1
rond	1	0	1	0
bipartite	2	2	3	1
irrégulier	26	19	16	14
Total	49	49	41	40

Tableau 3 : effectifs des différentes formes de condyles occipitaux gauches et droits

4.1.1.4. Forme du foramen magnum (tableau 4)

Chez l'homme, le profil le plus fréquent est la forme d'oeuf (26,53 %), suivie de la forme ovale et ronde (22,45 %). Par comparaison, le foramen magnum féminin est plus fréquemment ovale (34,15 %), puis rond (21,95 %).

Le test exact de Fisher fournit un p-value égal à 0.5371. Les différences de fréquences observées entre les hommes et les femmes peuvent être imputées au seul biais d'échantillonnage. Il y aurait une indépendance entre la forme du foramen magnum et le sexe.

	mag_forme	
Forme	Homme	Femme
forme d'oeuf	13	8
ovale	11	14
rond	11	9
tétragonal	7	2
pentagonal	1	0
hexagonal	2	3
irrégulier	4	5
Total	49	41

Tableau 4 : effectifs des différentes formes de foramen magnum

4.1.2. Variables quantitatives (annexe 2)

4.1.2.1. Statistiques descriptives

Nos résultats concordent avec les observations des études antérieures. Les crânes masculins semblent avoir des dimensions supérieures à celui des femmes. En effet, parmi les cinquante-six variables recueillies, les moyennes féminines ne sont supérieures à celles des hommes que pour neuf paramètres, qui sont essentiellement des variables angulaires : angle_AS_G, angle_MA_G, angle_MA_D, angle_OP, MxID, PMS_cond_ant_G, PMS_cond_ant_D, PMS_cond_post_G, PMS_cond_ant_D.

4.1.2.2. Tests de normalité

Toute analyse statistique sur des variables quantitatives débute par un test de normalité. Le test de Shapiro-Wilk a été appliqué sur nos cinquante-six variables. Parmi elles, quatorze ne suivent pas la loi normale : aire_D, aire_G, aire_totale, angle_MA_D, AS_MA_D, BCB, EHC, francf_mast_D, mast_largeur_D, mast_largeur_G, MnD, MWCD, PO_AS_D, PO_MA_G.

4.1.2.3. Comparaison de moyennes

Pour les quarante-deux variables qui suivent la loi de normalité, nous pouvons appliquer les tests paramétriques. Le test de Welch permet de comparer les moyennes masculines et féminines de notre échantillon. Les variables pour lesquelles nous constatons une différence significative entre hommes et femmes, sont au nombre de quinze : aire_OP, AS_MA_G, francf_mast_G, MA_MA, mast_AP_D, mast_AP_G, mast_hauteur_D, mast_hauteur_G, MLCG, MWCG, MxID, OP_MA_D, OP_MA_G, PO_AS_G, PO_MA_D. Elles concernent toutes les structures de la base du crâne, mais sont majoritairement en relation avec le processus mastoïde.

4.1.2.4. Comparaison de médianes

En ce qui concerne les quatorze variables incompatibles avec la loi normale, seuls les tests non paramétriques sont applicables. La comparaison des médianes est possible, grâce au test de Wilcoxon bivarié. Onze variables montrent une liaison significative avec le sexe : aire_D, aire_G, aire_totale, AS_MA_D, BCB, francf_mast_D, mast_largeur_D, mast_largeur_G, MWCD, PO_AS_D, PO_MA_G. De nouveau, nous pouvons remarquer que le processus mastoïde porte nombre de ces paramètres.

4.2. Analyses multivariées

La base de données a été soumise à deux types d'analyses multivariées : l'arbre de décision et la régression logistique.

4.2.1. Arbre de décision

4.2.1.1. Principe

Développé en 1984 par Brieman *et al.,* l'arbre de décision est une méthode de traitement des données, qui permet de prédire une variable, le sexe d'un individu par exemple, grâce à l'étude de variables explicatives (le diamètre antéro-postérieur du foramen magnum, la longueur maximale du condyle occipital gauche, la hauteur du processus mastoïde droit...). Cet outil repose sur le CART (Classification and Regression Tree), qui vise à diviser l'échantillon en groupes homogènes d'individus, selon la variable à prédire. Ces groupes sont obtenus par une succession de règles binaires. Le résultat peut être représenté graphiquement par un arbre, illustrant simplement ces décisions binaires (figure 21). Chaque cercle symbolise un noeud de l'arbre. L'échantillon y est séparé en sous-ensemble, selon la valeur de division d'une variable explicative. La valeur prédite et le nombre d'individus dans le groupe sont inscrits dans le cercle. Sur les branches, sont notées la variable qui a servi à créer les sous-ensembles, et la valeur de décision. Les noeuds terminaux sont les feuilles de l'arbre, et sont ici figurés par des rectangles. À chaque feuille correspond une classe (sexe féminin ou masculin, par exemple), définie par la classe la plus représentée dans le groupe. De fait, le taux de mauvais classement peut être facilement calculé. Dans l'exemple, il est de (4+7+0)/(33+20) = 11/53 = 20,8 %.

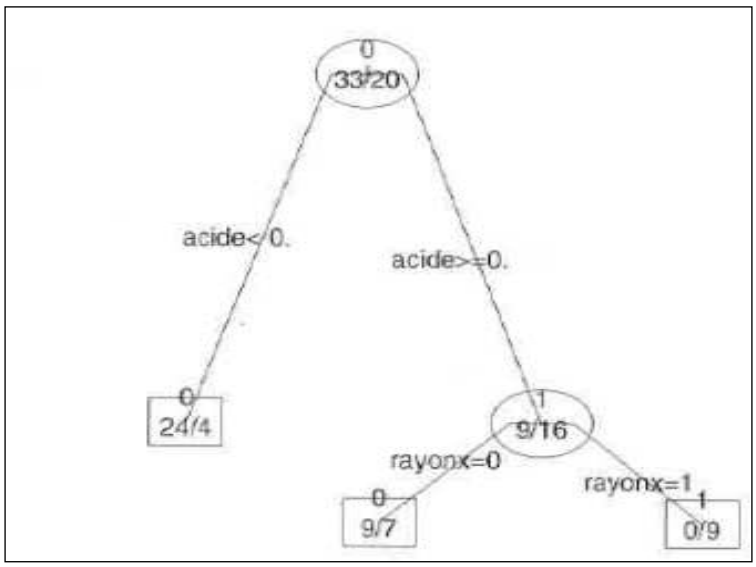


Figure 21 : exemple d'un arbre de décision (9)

L'objectif de l'arbre est de fournir des groupes homogènes, avec un taux d'erreur le plus faible possible, voire nul. Dans ce cas, le noeud terminal est appelé «feuille pure». Il faudrait alors accroître le nombre de noeuds afin de n'obtenir que des feuilles pures. Cependant, il faut garder à l'esprit que, plus un arbre est grand, mieux il décrit l'échantillon, plus il perd en propriété de généralisation. Le risque de mal classer un autre individu est alors augmenté. On parle de surapprentissage ou de surparamétrage. L'élagage de l'arbre permet de trouver un compromis entre la maximisation de l'arbre et l'absence de surparamétrage. Il consiste à éliminer certaines branches de l'arbre pour transformer un noeud intermédiaire en feuille.

Cette méthode présente de nombreux avantages, ce qui explique sa popularité. Sa réalisation est rapide. Le résultat présenté sous forme d'un arbre, est très facile à comprendre et à interpréter. La présence de données manquantes ne représente pas un obstacle à sa mise en oeuvre. Enfin, il faut noter la sélection automatique des variables discriminantes dans un jeu de données, potentiellement vaste.

Le taux d'erreur mentionné plus haut, est calculé sur les données d'entraînement. Il est donc sous-estimé par rapport au taux d'erreur réel, obtenu par validation croisée. Pour tester la précision de l'arbre, nous utiliserons la méthode du leave-one-out. L'arbre est construit en laissant de côté un individu, sur lequel le modèle est testé. Puis on reproduit ce processus autant de fois qu'il y a d'individus dans l'échantillon (9).

4.2.1.2. Application

L'ensemble de la base de données est soumis au logiciel R afin de générer un arbre de décision. L'élagage par validation croisée a permis de conclure que l'arbre optimal est celui qui possède quatre feuilles. L'arbre final est représenté en figure 22.

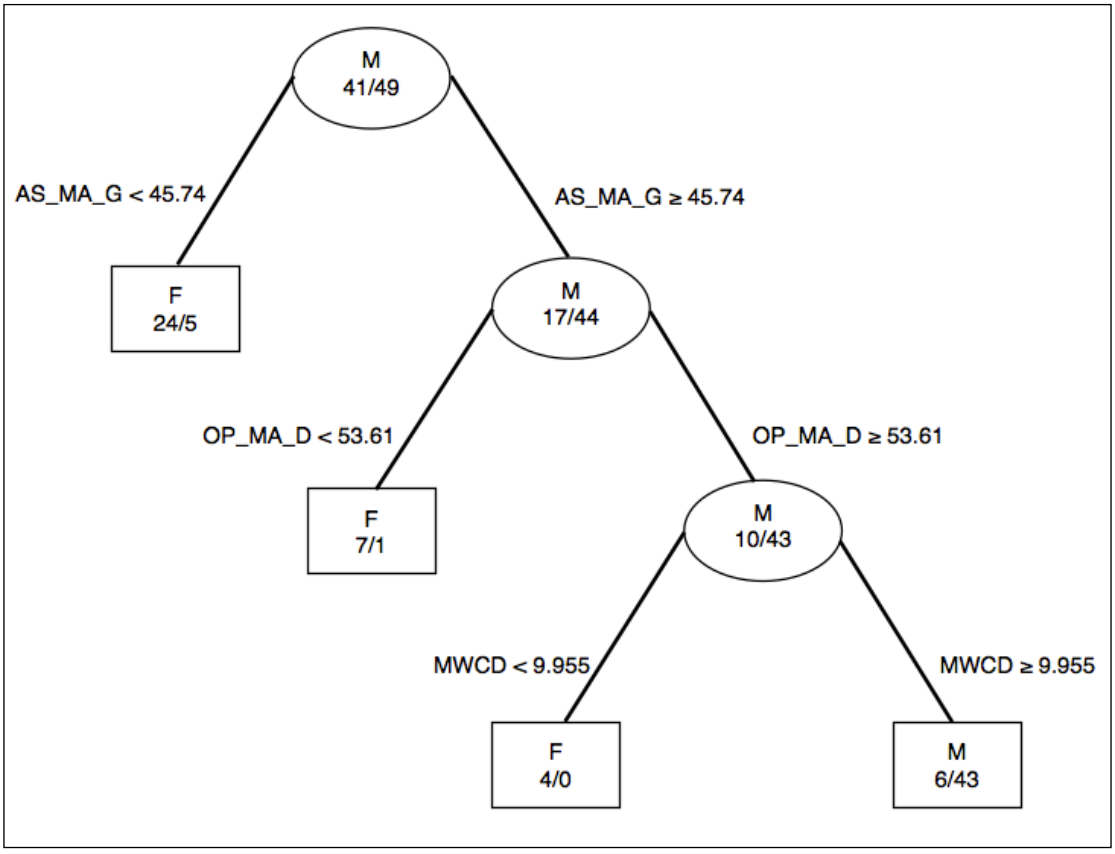


Figure 22 : arbre de décision permettant de prédire le sexe en fonction de trois variables explicatives

En s'appuyant sur ces résultats, sexer un crâne isolé peut être réalisé aisément. Il suffit de recueillir les trois variables sur le matériel osseux et de les comparer aux valeurs seuils fournies par l'arbre. Par exemple, si la distance entre l'astérion gauche et la mastoïdale gauche est supérieure à 45,74 mm, et si la distance entre l'opisthion et la mastoïdale droite est supérieure à 53,61 mm et si la largeur maximale du condyle occipital droit est supérieure à 9,955 mm, alors le sujet est considéré masculin.

L'arbre décisionnel produit une autre information essentielle. Il s'agit du taux d'erreur. Le calcul est simple. C'est le nombre d'individus mal classés dans chaque feuille, considéré par rapport à l'échantillon total : (5+1+0+6)/(41+49) = 13,33 %. Ce taux d'erreur, très satisfaisant, est néanmoins obtenu grâce aux données qui ont permis de construire le modèle. Il sous-estime donc le taux réel. Pour estimer ce dernier, nous avons choisi la méthode du leave-one-out. Les résultats sont les suivants :

	F	M
F	26	15
M	16	33

Tableau 5 : tableau de contingence

Le taux d'erreur réel est de : (15+16)/90 = 34,44 %.

4.2.2. Régression logistique

4.2.2.1.Principe

La base de données peut être explorée d'une façon différente grâce à la régression logistique, permise par le logiciel R. Cet outil vise à prédire une variable qualitative et binaire, en fonction d'un ensemble de variables explicatives, qualitatives et quantitatives. Le modèle est sélectionné par la procédure de sélection pas à pas (stepwise). C'est une procédure automatique qui élimine une à une les variables les moins pertinentes. Cette technique a l'avantage de révéler rapidement les variables les plus discriminantes. Par ailleurs, il est possible de prédire le sexe d'un nouvel individu, et le résultat sera produit en terme de probabilité. La formule pour calculer cette probabilité est la suivante :

$$p(x) = \frac{e^{(b + a_1x_1 + a_2x_2 + \ldots + a_px_p)}}{1 + e^{(b + a_1x_1 + a_2x_2 + \ldots + a_px_p)}}$$

où b est une constante, $a_1, a_2, ..., a_p$ sont des coefficients attribués aux p variables explicatives et $x_1, x_2, ..., x_p$ sont les valeurs de ces variables, recueillies sur le sujet.

La précision du modèle sera testée par validation croisée, par la méthode du leave-one-out (9).

4.2.2.2. Application

La régression logistique fournit un modèle avec vingt-trois variables explicatives. Les variables retenues, linéaires et angulaires, intéressent toutes les structures de la base du crâne. Ces variables, ainsi que les coefficients qui leur sont affectés, sont listés dans le tableau 6.

La probabilité qu'un sujet non sexé soit un homme est donnée par la formule suivante :

$$p(M) = \frac{e^{(b + a_1x_1 + a_2x_2 + ... + a_{23}x_{23})}}{1 + e^{(b + a_1x_1 + a_2x_2 + ... + a_{23}x_{23})}}$$

Variable	Coefficient
mast_AP_G	29,56581
mast_largeur_D	28,561406
mast_AP_D	-28,45559
PO_AS_G	-79,28613
PO_MA_G	332,701687
AS_MA_G	-103,427096
angle_AS_G	-189,465318
aire_D	2,304882
OP_MA_D	155,738869
MA_MA	-90,805361
angle_MA_G	-77,118597
MLCD	97,088226
BCB	45,115426
MnD	54,892492
EHC	-107,995078
LFM	384,196999
mag_aire_teixeira	-117,13822
mag_aire_radinsky	110,938231
francf_mast_G	-196,781342
francf_opisthion_G	229,696847
francf_cond_post_G	-107,905653
PMS_cond_post_G	-96,358497
PMS_cond_post_D	-173,893484
constante	-1723,993918

Tableau 6 : valeurs des paramètres du modèle

Il existe une autre option pour prédire le sexe d'un crâne isolé. Il s'agit, après avoir renseigné les valeurs des variables explicatives, d'utiliser la fonction «predict» du logiciel R.

Le taux de mauvais classement de cette méthode, calculé sur les données d'entraînement est de 0 %. Mais ce taux est généralement sous-estimé par rapport au taux réel, puisqu'il provient des données qui ont permis la construction du modèle. En effet, le taux d'erreur réel fourni par la validation croisée est de 26,14 %.

4.3. Erreur intra-observateur

Afin d'évaluer la répétabilité de nos indicateurs et la pertinence de leurs définitions, il est important d'estimer l'erreur intra-observateur. Une fois les données recueillies sur l'intégralité de notre échantillon de travail, une deuxième série d'observations a été réalisée, sur vingt individus désignés au hasard, par le même opérateur, avec les mêmes instruments de mesure, sur le même lieu de travail. Néanmoins, seules sont concernées les variables recueillies sur le matériel osseux, donc consignées sur la fiche d'enregistrement. Cela exclue les variables angulaires mesurées sur le modèle tridimensionnel.

4.3.1. Variables qualitatives

La répétabilité des variables qualitatives peut être évaluée avec le Kappa de Cohen. Plus ce paramètre est proche de 1, plus les données sont concordantes (37). Les résultats livrent, pour nos sept variables, un coefficient kappa compris entre 0,7059 (pour la forme du processus mastoïde droit) et 1 (pour la forme du foramen magnum). L'accord entre les deux séries d'observations est donc satisfaisant. Ceci a été rendu possible par une description détaillée des différentes classes, illustrées par des photographies ou des dessins.

4.3.2. Variables quantitatives

Le coefficient de concordance mesure l'adéquation entre deux séries d'observations de variables continues. Une valeur proche de 1 indique un accord très fort entre les mesures (38). Appliqué sur nos quarante variables quantitatives, le coefficient de concordance a des valeurs comprises entre 0.7775 (pour l'angle du triangle mastoïdien gauche, dont le sommet est le porion)

et 0.9950 (pour la largeur maximale du foramen magnum). L'accord peut être considéré comme satisfaisant. Ceci permet de valider la définition des indicateurs mesurés.

5. DISCUSSION

5.1. Avantages du protocole

Le protocole que nous avons développé, présente de multiples avantages. La photogrammétrie est une technique non invasive, qui respecte l'intégrité du matériel, à la différence des analyses paléogénétiques qui impliquent le prélèvement d'un fragment osseux. De plus, le matériel requis comprend peu d'éléments, et ceux-ci sont peu onéreux, peu encombrants et légers. Nous pouvons donc souligner sa transportabilité et sa capacité à être emporté par différents agents (plongeur, drone...). Par ailleurs, le temps d'acquisition est plus court que ce que nécessite un scanner surfacique. Enfin, le modèle produit est de très grande qualité. La précision est comparable à celle du scanner surfacique, la texture est, en revanche, supérieure. Ainsi, la reconstruction tridimensionnelle pourra connaître de multiples devenirs: publications, muséographie, support d'enseignement... (27, 33)

5.2. Inconvénients et limites du protocole

En contrepartie, notre protocole est chronophage, car il faut consacrer cinq heures et demie à chaque crâne pour l'acquisition et le traitement des données. Du reste, notre travail d'acquisition au laboratoire a dû subir plusieurs contraintes, qui ont pu perturber les résultats. D'une part, le travail en «open space» laisse supposer la présence de personnes sur les photographies (figure 23). La reconstruction tridimensionnelle peut s'en trouver troublée puisqu'elle exige un environnement parfaitement constant. L'idéal est donc de prendre les photographies, seul et dans une pièce close.



Figure 23 : environnement de travail (A. Say-Liang-Fat)

De même, la luminosité hétérogène du laboratoire, conditionnée par une fenêtre et des tubes néon, n'était pas idéale. Il faut préférer une luminosité homogène, naturelle et omnidirectionnelle. Enfin, le support utilisé, parce qu'il est blanc et lisse, crée des zones difficiles à reconstruire, d'où la présence de bruit à la jonction entre le crâne et le support. La solution pourrait être l'utilisation d'un trépied pour soutenir l'os. De plus, la situation haute du crâne pourrait rendre possible l'acquisition de la voûte et de la base en une seule série de photographies.

5.3. Résultats

Dans l'optique de déterminer le sexe à partir de fragments osseux, une grande partie des os humains ont fait l'objet d'études anthropologiques. La base du crâne, en particulier, a interpellé de nombreux chercheurs et les études se sont succédées, démontrant que les structures du basicrâne sont effectivement empreintes de dimorphisme sexuel. Toutefois, les différentes méthodes établies ont des précisions variables selon les articles, oscillant entre 41,39 et 90 %. L'écart observé entre les publications peut être corrélé aux différences de populations étudiées, méthodologies et analyses statistiques. De plus, la comparaison est perturbée par l'absence de consensus sur la définition des trois dimensions du processus mastoïde (43).

Nos résultats, dans la lignée de ces travaux, ont confirmé l'intérêt de l'étude de la base du crâne. Le dimorphisme sexuel s'exprime effectivement au niveau des trois régions anatomiques étudiées (le processus mastoïde, le foramen magnum et le condyle occipital). Inspirés par les travaux antérieurs, nous avons procédé selon deux approches.

L'approche morphologique a attesté le lien significatif existant entre le sexe et l'aspect général du processus mastoïde (forme et orientation), mais la précision des méthodes s'est montrée insuffisante, car le taux d'erreur oscille entre 29,44 et 44,44 %.

L'approche morphométrique a permis de faire plusieurs constats à partir de nos données. Les analyses statistiques univariées, menées sur les moyennes et médianes, ont mis en évidence, pour la moitié des variables quantitatives, un lien significatif avec le sexe. Pour ces variables, réparties sur l'ensemble de la base du crâne, les dimensions sont significativement supérieures chez l'homme, à l'exception de MxID. D'autre part, deux types d'analyses multivariées ont été menées sur notre base de données. Le taux d'erreur de nos méthodes varie entre 26,14 et 34,44 %. C'est la méthode

générée par la régression logistique qui présente une meilleure précision (73,86 %) pour notre échantillon.

Mais, se pose la question du seuil de précision acceptable pour appliquer la méthode. Aucune valeur ne fait l'unanimité parmi les chercheurs. Selon Franklin *et al.* (15) et Kemkes et Göbel (28), le seuil de 75 % est tout à fait raisonnable. Williams et Rogers (49) l'élèvent à 80 % et Bruzek et Murail (6) à 95 %, en admettant que ce n'est pas toujours possible.

En confrontant nos résultats à ces considérations, il semble plus prudent d'interpréter le résultat de notre équation discriminante comme une information complémentaire.

Dans l'objectif d'évaluer l'intérêt de la photogrammétrie, et de nos indicateurs en particulier, nous avons voulu soumettre notre base de données à la régression logistique, en ôtant les variables angulaires mesurées sur le modèle. Le taux d'erreur, après validation croisée, est abaissée à 24,44%, nous amenant à remettre en question la pertinence de nos paramètres. La définition et l'analyse d'autres variables pourraient constituer un axe de recherche ultérieur.

Toutefois, la photogrammétrie offre de nombreux avantages, justifiant un vaste domaine d'applications. Le modèle tridimensionnel obtenu est d'une grande précision et facilement exploitable. Néanmoins, seule la morphologie externe est reproduite. Le même résultat peut être réalisé avec un scanner surfacique, cependant les bénéfices de la photogrammétrie sont indéniables. Tout d'abord, la texture du modèle est de meilleure qualité avec la photogrammétrie. Par ailleurs, l'équipement requis pour la photogrammétrie comprend un appareil photo et les logiciels sous licence commerciale, ce qui est bien moins onéreux que le scanner surfacique car celui-ci peut valoir jusqu'à 50 000 euros. Concernant l'acquisition, l'opérateur ne nécessite qu'un appareil photo, un objet servant à étalonner le modèle et éventuellement un support pour l'objet étudié. De fait, la photogrammétrie est une technique qui convient parfaitement au travail de terrain. De plus, la légèreté du matériel photogrammétrique lui donne la possibilité d'être fixé à différents vecteurs (drone, cerf volant, plongeur...). Il est donc exploitable à différentes échelles et dans différentes conditions. Ceci est évidemment impossible avec un scanner surfacique étant donné son poids, oscillant entre trois et quarante kilogrammes et la nécessité d'une source d'énergie. Notons également que l'acquisition pour la photogrammétrie ne prend que vingt minutes tandis qu'il faudra quarante-cinq minutes avec un scanner surfacique (27, 33).

La photogrammétrie présente néanmoins certains inconvénients. Les matières analysées doivent être texturées, tandis le scanner surfacique fonctionne sur presque tout type de matériaux. Enfin, le temps de traitement des données est très long pour la photogrammétrie. Il dépend du nombre de photographies, de la définition de l'image et du processeur de l'ordinateur mais il faut compter environ quatre heures pour traiter quatre-vingt images. Par comparaison, il ne faudra que quinze minutes pour obtenir un modèle avec le scanner. Par ailleurs, Katz et Friess (27) rapportent la présence récurrente de bruit dans certaines zones : au niveau des orbites, du foramen magnum, de l'os pariétal et des bords de l'os zygomatique. Nous avons pu faire le même constat sur l'ensemble de nos reconstructions. L'origine de ces zones perdues devra faire l'objet d'un travail ultérieur. En revanche, les auteurs ont noté une reproductibilité comparable entre les deux procédés.

Nonobstant ces difficultés de reconstruction, la photogrammétrie s'impose comme une alternative incontestable au scanner surfacique (27, 33). Le modèle photogrammétrique obtenu est de grande qualité, relativement facile à manipuler et de grande précision. Il pourra donc être exporté et utilisé en tant que support pédagogique, objet d'étude scientifique ou illustration muséographique.

5.4. Biais méthodologiques

Une des difficultés de notre protocole a été d'identifier l'astérion dans certains cas, notamment en présence d'os wormiens. Dans les cas les plus simples (figures 24 et 25), l'astérion a été placé à une intersection entre le contour de l'os wormien et une suture crânienne, symétriquement au côté controlatéral.



Figure 24 : astérion gauche de l'individu 17484 de la collection Cantacuzène (A. Say-Liang-Fat)



Figure 25 : astérion droit de l'individu 17473 de la collection Cantacuzène (A. Say-Liang-Fat)

Les cas les plus complexes (os wormiens multiples et synostose partielle ou complète des sutures) ont été exclus de l'échantillon d'étude (figures 26 et 27).



Figure 26 : astérion gauche de l'individu 17483 de la collection Cantacuzène (A. Say-Liang-Fat)



Figure 27 : astérion gauche de l'individu 34991 de la collection Olivier (A. Say-Liang-Fat)

En manipulant le modèle tridimensionnel, nous avons été confronté à un autre problème. Il est plus délicat de placer les points crâniométriques sur le modèle, en particulier le porion et les limites antérieures et postérieures des condyles occipitaux. L'apposition de points de repère sur l'os, avant l'acquisition, aurait facilité le travail informatique.

La question qui se pose à présent est l'applicabilité de ces méthodes à des populations actuelles, puisque l'échantillon rassemble des ossements datant des XIX^{ème} et XX^{ème} siècles. L'existence avérée de changements séculiers, notamment dimensionnels, peuvent limiter l'utilisation de nos méthodes aux cas actuels de médecine légale. Il conviendra donc de les tester sur des populations modernes afin d'évaluer la représentativité de notre échantillon (17, 28, 42, 48).

Parallèlement, la variabilité interpopulationnelle vient également perturber l'évaluation du dimorphisme sexuel observé. En effet, les auteurs s'accordent sur l'existence de différences populationnelles, notamment en termes de taille, de forme et de robustesse osseuses, propres à chaque population (14, 26, 36). Plusieurs facteurs sont avancés pour expliquer ces disparités : rythme et direction du processus ontogénique, environnement, activités, fonction masticatrice, facteur socio-économique, facteur génétique... Tous ces éléments perturberaient la croissance crânio-faciale. Certaines structures anatomiques seraient plus sensibles que d'autres, et parmi lesquelles se trouvent le processus zygomatique, la région mastoïdienne et les crêtes de l'os occipital (18, 28, 36). Ainsi, les variables discriminantes peuvent différer d'une population à une autre.

De même, l'emplacement de certains points crâniométriques, dont le porion, semblent refléter une variabilité interpopulationnelle. L'astérion, en particulier, voit sa position évoluer au cours de la vie d'un individu, de façon spécifique à chaque population (10, 26, 28, 36).

De fait, les méthodes, étant issues d'échantillons différents, seraient spécifiques à chaque population. Il apparaît donc inadéquat d'appliquer une méthode sur un crâne non issu de la population d'étude. C'est pourquoi, considérant un crâne isolé, plusieurs auteurs préconisent de déterminer le groupe ethnique avant de tenter la diagnose sexuelle, à l'aide d'une méthode appropriée (même population d'étude, ou à défaut, avec une expression comparable du dimorphisme sexuel). Si ceci n'est pas respecté, l'efficacité de la technique n'est pas assurée (10, 18, 26, 46).

Concernant notre travail, l'échantillon rassemble des individus français, roumains et italiens. Il conviendra de tester nos résultats sur un plus large groupe avant de les appliquer à des cas de médecine légale.

5.5. Étiologies recherchées

Le dimorphisme sexuel exprimé dans les dimensions du foramen magnum serait lié à son développement et apparaîtrait donc à un stade précoce, car la fusion complète de l'os occipital s'observe généralement entre cinq et sept ans. Il semble donc peu vraisemblable de constater une croissance ultérieure liée au développement sexuel secondaire au moment de la puberté. De même, l'influence d'un facteur biomécanique serait nul puisqu'il n'y a pas d'insertion musculaire sur le foramen magnum et que le poids de la tête s'exerce sur les condyles. Un axe de recherche ultérieure pourrait étudier l'influence du développement contemporain des structures nerveuses sur la croissance du foramen magnum (14, 18, 34).

Adjacent au foramen magnum, le condyle occipital connaît également un développement précoce, au cours de l'enfance. Selon Gapert *et al.*, les structures dont la croissance est précoce, sont des indicateurs faiblement dimorphiques à l'âge adulte. Néanmoins d'autres facteurs sont susceptibles de justifier le pouvoir dimorphique des condyles occipitaux. Le poids de la tête et la masse musculaire sont supérieurs chez l'homme, et créent une forte pression sur les facettes articulaires. Les dimensions des surfaces se modifieraient en conséquence. À cela s'ajoutent les facteurs populationnel, sanitaire, alimentaire... Mais, selon les auteurs, ces agents extrinsèques auraient un rôle moins décisif que le facteur génétique (17).

Le processus mastoïde est une zone discriminante majeure. Deux facteurs sont décrits, sources d'un important dimorphisme sexuel.

D'une part, les paramètres liés à l'action musculaire sont d'excellents indicateurs du dimorphisme sexuel. Nous pouvons y inclure, entre autres, l'architecture du crâne, l'apparence générale de la mandibule, l'allure des crêtes de l'os occipital et du processus mastoïde. En effet, la robustesse du processus mastoïde chez l'homme s'explique par l'insertion d'une masse musculaire (muscle sterno-cléido-mastoïdien, ventre postérieur du muscle digastrique et muscle splénius de la tête) plus développée (3, 4, 26, 36).

D'autre part, le processus mastoïde voit sa croissance se poursuivre jusqu'à l'âge adulte (39), potentialisant l'expression du dimorphisme sexuel (26, 36).

Enfin, il semblerait que le dimorphisme sexuel de la base du crâne soit corrélé à un processus ontogénique différentiel selon le sexe. Alors que le dimorphisme sexuel statural n'apparaît qu'à la puberté, le dimorphisme sexuel crânien serait déjà présent à six ans : Baughan et Demirjian (2) constatent que les filles ont un crâne plus petit que celui des garçons au même âge. Concernant le pic de croissance pubertaire du basicrâne, il est presque contemporain du pic statural, mais, plus marqué et plus tardif de deux ans chez les garçons que chez les filles. De plus, la croissance du basicrâne s'arrêterait plus tôt chez les filles (35). Baughan et Demirjian (2) n'observent ce pic de croissance que chez les garçons.

6. CONCLUSION

Le dimorphisme sexuel a une expression crânienne, et basicrânienne en particulier, influant sur la morphologie du foramen magnum, des condyles occipitaux et des processus mastoïdes. Le profil observé est la conséquence de l'action conjointe de plusieurs facteurs (environnemental, populationnel, biomécanique...). Cette zone anatomique a fait l'objet de notre travail, à la recherche d'un nouvelle méthode de diagnose sexuelle. La régression logistique a généré une équation discriminante dont le taux d'erreur est de 26,14 %. Le résultat peut être jugé insatisfaisant et apprécié comme une information complémentaire, considérant un crâne non sexé. Il s'agira, lors une étude ultérieure, d'améliorer la précision de la méthode par l'évaluation de nouveaux indicateurs et l'élimination de biais méthodologiques.

Le deuxième objectif de notre travail était d'estimer l'apport de la photogrammétrie à l'anthropologue. Le procédé permet la création d'un modèle tridimensionnel, fiable, précis, grâce à un matériel peu onéreux et exportable à diverses conditions de travail sur le terrain. De plus, la méthode est relativement simple à mettre en oeuvre mais, nécessite toutefois une formation et un entraînement préalables. La photogrammétrie pourrait donc voir son champ d'applications s'étendre, voire supplanter d'autres techniques, le scanner surfacique notamment.

Annexe 1 : dénomination des variables

Abréviation	Définition
num_etude	Numéro attribué au sujet pendant notre étude
num_inventaire	Numéro porté par le sujet dans les collections du musée de l'Homme
long_max	Longueur maximale du crâne, mesurée entre la glabelle et l'opisthocrânion
larg_max	Largeur maximale du crâne, mesurée entre l'euryon droit et l'euryon gauche
mast_forme_G	Forme du processus mastoïde gauche, décrite en terme de robuste, gracile ou non déterminée
mast_hauteur_G	Hauteur du processus mastoïde gauche, mesurée entre le plan de Francfort et la mastoïdale gauche
mast_largeur_G	Largeur du processus mastoïde gauche, mesurée entre le point le plus haut de l'incisure mastoïdienne sur la face médiale du processus et le point latéral du processus situé au même niveau
mast_AP_G	Diamètre antéro-postérieur du processus mastoïde gauche, défini par le point de rencontre le plus bas entre la partie tympanique et la partie pétreuse de l'os temporal et le point le plus postérieur du processus situé au même niveau
mast_orientation_G	L'orientation du processus mastoïde gauche, peut être féminine, masculine ou neutre
PO_AS_G	Distance entre le porion gauche et l'astérion gauche
PO_MA_G	Distance entre le porion gauche et la mastoïdale gauche
AS_MA_G	Distance entre l'astérion gauche et la mastoïdale gauche
angle_PO_G	Angle du triangle mastoïdien dont le sommet est le porion gauche
angle_AS_G	Angle du triangle mastoïdien dont le sommet est l'astérion gauche
angle_MA_G	Angle du triangle mastoïdien dont le sommet est la mastoïdale gauche
aire_G	Aire du triangle mastoïdien gauche
aire_totale	Somme des aires des triangles mastoïdiens droit et gauche
OP_MA_D	Distance entre l'opisthion et la mastoïdale gauche
MA_MA	Distance entre les mastoïdales droit et fauche
angle_OP	Angle du triangle opisthion-bimastoïdale dont le sommet est l'opisthion
angle_MA_G	Angle du triangle opisthion-bimastoïdale dont le sommet est la mastoïdale gauche
aire_OP	Aire du triangle mastoïdien opisthion-bimastoïdale
occ_forme_G	Forme du condyle occipital gauche

Abréviation	Définition
MLCG	Longueur maximale du condyle occipital gauche
MWCG	Largeur maximale du condyle occipital gauche
BCB	Largeur maximale bicondylaire, mesurée entre les points les plus latéraux des condyles occipitaux
MnD	Distance minimale intercondylaire, mesurée entre les bords médiaux des surfaces articulaires
MxID	Distance maximale interne entre les condyles, mesurée entre les bords médiaux des surfaces articulaires.
EHC	Distance entre les bords médiaux des foramina exocrâniens des canaux hypoglosses
LFM	Longueur maximale du foramen magnum
WFM	Largeur maximale du foramen magnum
mag_aire_teixeria	Aire du foramen magnum, calculée selon la formule de Teixeria : $A=\pi\times((LFM+WFM)/4)$
mag_aire_radinsky	Aire du foramen magnum, calculée selon la formule de Radinsky : $A=1/4\times\pi\times LFM\times WFM$
mag_forme	Forme du foramen magnum
francf_mast_G	Angle défini par le porion, l'orbitale et la mastoïdale gauches
PMS_mast_G	Angle défini par le basion, le point inter-incisif supérieur et la mastoïdale gauche
francf_basion_G	Angle défini par le porion gauche, l'orbitale gauche et le basion
francf_opisthion_G	Angle défini par le porion gauche, l'orbitale gauche et l'opisthion
francf_cond_ant_G	Angle défini par le porion gauche, l'orbitale gauche et la limite antérieure du condyle occipital gauche
francf_cond_post_G	Angle défini par le porion gauche, l'orbitale gauche et la limite postérieure du condyle occipital gauche
PMS_cond_ant_G	Angle défini par le basion, le point inter-incisif supérieur et la limite antérieure du condyle occipital gauche
PMS_cond_post_G	Angle défini par le basion, le point inter-incisif supérieur et la limite postérieure du condyle occipital gauche

Une remarque particulière concerne le plan de Francfort. Celui-ci est théoriquement défini par quatre points crâniométriques : porions droit et gauche, et orbitales droit et gauche. Cependant, l'alignement de ces quatre points n'est pas toujours observé, d'où la définition des variables francf_basion_G et francf_opisthion_G.

Annexe 2 : statistiques descriptives des variables quantitatives
(l'âge est renseigné en années, les distances en millimètres, les aires en millimètres carrés et les angles en degrés)

Variable	Effectif renseigné		Moyenne		Écart-type	
	Homme	Femme	Homme	Femme	Homme	Femme
age	48	36	46,44	45,22	14,41	13,15
mast_hauteur_G	49	41	28,2	25,6	3,05	2,84
mast_largeur_G	49	41	11,89	10	3,27	1,98
mast_AP_G	49	41	21,8	19,23	4,49	4,35
mast_hauteur_D	49	41	28,99	26,25	3,06	3,11
mast_largeur_D	49	41	11,76	10,23	3,19	2,76
mast_AP_D	49	41	22,98	20,83	5,07	4,7
PO_AS_G	49	41	47,65	44,63	3,47	4,06
PO_MA_G	49	41	31,23	28,86	3,25	2,84
AS_MA_G	49	41	51,33	46,66	4,97	5,39
angle_PO_G	49	41	78,08	75,54	6,97	7,63
angle_AS_G	49	41	36,57	36,8	3,86	4,34
angle_MA_G	49	41	65,35	67,66	5,57	6,96
aire_G	49	41	724,7	619,59	111,21	99,55
PO_AS_D	49	41	48,32	44,68	4,22	2,98
PO_MA_D	49	41	31,38	28,8	2,9	3,22
AS_MA_D	49	41	51,41	47,03	5,94	4,48
angle_PO_D	49	41	77,37	76	8,25	7,55
angle_AS_D	49	41	36,84	36,63	4,25	3,94
angle_MA_D	49	41	65,8	67,37	6,04	7,24
aire_D	49	41	734,07	620,75	112,76	90,91
aire_totale	49	41	1455,09	1240,34	215,44	171,76
OP_MA_D	49	41	58,35	55,63	2,8	3,46
OP_MA_G	49	41	59,03	56,24	3,35	3,86
MA_MA	49	41	101,53	97,44	4,65	5,47
angle_OP	49	41	122,08	123,39	7,88	7,56
angle_MA_G	49	41	28,92	28,2	4,09	3,72
angle_MA_D	49	41	29,02	28,41	3,97	4,04
aire_OP	49	41	1483,06	1322,11	225	232,03
MLCG	49	41	24,99	23,77	3,03	2,45

Variable	Effectif renseigné		Moyenne		Écart-type	
	Homme	Femme	Homme	Femme	Homme	Femme
MLCD	49	41	24,71	23,97	2,84	2,45
MWCG	49	41	11,86	10,98	1,51	1,37
MWCD	49	41	11,95	10,91	2,32	1,43
BCB	49	41	52,24	50,36	3,53	3,67
MnD	49	41	20,59	19,85	2,76	2,48
MxID	49	41	36,06	38,69	5,4	3,95
EHC	49	41	33,49	33,14	3,5	2,31
LFM	49	41	35,92	35,2	2,35	2,83
WFM	49	41	30,95	30,09	1,93	2,2
mag_aire_teixeria	49	41	878,95	840,66	97,15	113,72
mag_aire_radinsky	49	41	873,17	834,37	96,22	111,88
francf_mast_G	48	40	18,74	17,79	2,44	1,91
francf_mast_D	48	40	18,31	16,96	2,14	2,26
PMS_mast_G	48	40	28,28	28,16	1,74	1,6
PMS_mast_D	48	40	27,44	27,37	1,85	1,72
francf_basion_G	48	40	43,34	43,14	2,52	2,52
francf_basion_D	48	40	43,1	42,48	2,53	2,48
francf_opisthion_G	48	40	35,94	35,25	2,38	2,15
francf_opisthion_D	48	40	35,53	34,57	2,38	2,2
francf_cond_ant_G	48	40	37,26	37,03	2,61	2,52
francf_cond_ant_D	48	40	36,96	36,34	2,92	2,67
francf_cond_post_G	48	40	31	30,61	2,51	2,36
francf_cond_post_D	48	40	30,5	29,69	2,76	2,02
PMS_cond_ant_G	48	40	8,76	9,27	1,56	1,27
PMS_cond_ant_D	48	40	8,24	8,57	1,57	1,4
PMS_cond_post_G	48	40	11,7	12,13	1,44	1,6
PMS_cond_post_D	48	40	11,41	11,99	1,33	1,51

BIBLIOGRAPHIE

1. BARONTI L., DELLEPIANE M., SCOPIGNO R., Using Lego pieces for camera calibration : a preliminary study, *Proceedings of Eurographics Conference,* 2010, 97-100
2. BAUGHAN B., DEMIRJIAN A., Sexual dimorphism in the growth of the cranium, *American Journal of Physical Anthropology,* 1978, 49 : 383-390
3. BERNARD K.A., MOORE-JANSEN P.H., Quantifying male and female shape variation in the mastoid region of the temporal bone, *Proceedings of the 5th Annual Graduate Research and Scholarly Projects Symposium of the Wichita State University,* 2009, 80-81
4. BHAGYA B., HEMA N., RAMAKRISHNA A., Validation metrics of the mastoid triangle, *Nitte University Journal of Health Science,* 2013, 3 (2) : 44-45
5. BRÜLLMANN D., SEELGE M., SCHÖMER E., SCHULZE R., SCHWANECKE U., Alignment of cone beam computed tomography data using intra-oral fiducial markers, *Computerized Medical Imaging and Graphics,* 2010, 34 : 543-552
6. BRUZEK J., MURAIL P., Methodology and reliability of sex determination from the skeleton, in SCHMITT A., CUNHA E., PINHEIRO J., ed., Forensic anthropology and medicine, Totowa, NJ, Humana Press, 2006, 225-242
7. BUIKSTRA J.E., UBELAKER D.H., Standards for data collection from human skeletal remains, *Arkansas archeological survey research,* 1998, 44 : 19-21
8. CIGNONI P., CORSINI M., DELLEPIANE M., RANZUGLIA G., VERGAUVEN M., VAN GOOL L., MeshLab and Arc3D : photo-reconstruction and processing 3D meshes, *EPOCH Conference on Open Digital Cultural Heritage Systems,* 2008, 1-6
9. CORNILLON P.A., GUYADER A., HUSSON F., JÉGOU N., JOSSE J., KLOAREG M., MATZNER-LOBER E., ROUVIÈRE L., Statistique avec R, Presses universitaires de Rennes, 3ème édition, 2012
10. DAS GUPTA A., BANERJEE A., KUMAR A., RAO S.R., JOSE J., Discriminant function analysis of mastoid measurements in sex determination, *Journal of Life Sciences,* 2012, 4 (1) : 1-5
11. DEMOULIN F., Importance de certaines mesures crâniennes (en particulier de la longueur sagittale de la mastoïde) dans la dénomination sexuelle des crânes, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 1972, XIIe série, tome 9, fascicule 3 : 259-264

12. DEMOULIN F., Georges Olivier (1912-1996), *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris,* 1996, 8 (3-4) : 511
13. DE PAIVA L.A.S., SEGRE M., Sexing the human skull through the mastoid process, *Revista do Hospital das Clinicas ; Faculdade de Medicina da Universidade de Sao Paulo,* 2003, 58 (1) : 15-20
14. EDWARDS K., VINER M.D., SCWEITZER W., THALI M.J., Sex determination from the foramen magnum, *Journal of Forensic Radiology and Imaging,* 2013, 1 : 186-192
15. FRANKLIN D., FREEDMAN L., MILNE N., Sexual dimorphism and discriminant function sexing in indigenous South African crania, *Homo : Journal of Comparative Human Biology,* 2005, 55 : 213-228
16. GANGRADE P., YADAV R., JAIN L.K., Sexing the human skull using mastoid process measurements, *Research and Reviews : Journal of Medical and Health Sciences,* 2013, 2 (1) : 35-39
17. GAPERT R., BLACK S., LAST J., Sex determination from the occipital condyle : discriminant function analysis in an eighteenth and nineteenth century british sample, *American Journal of Physical Anthropology,* 2009, 138 : 384-394
18. GAPERT R., BLACK S., LAST J., Sex determination from the foramen magnum : discriminant function analysis in an eighteenth and nineteenth century british sample, *International Journal of Legal Medicine,* 2009, 123 : 25-33
19. GÜNAY Y., ALTINKÖK M., The value of the size of foramen magnum in sex determination, *Journal of Clinical Forensic Medicine,* 2000, 7 : 147-149
20. GUYOMARC'H P., BRUZEK J., Dimorphisme sexuel du crâne de sujets identifiés (collection Olivier, MNHN, Paris) : évaluation par morphométrie géométrique, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris,* 2010, 22 : 216-229
21. GUYOMARC'H P., SANTOS F., DUTAILLY B., DESBARATS P., BOU C., COQUEUGNIOT H., Three-dimensional computer-assisted craniometrics : a comparison of the uncertainty in measurement induced by surface reconstruction performed by two computer programs, *Forensic Science International,* 2012, 219 : 221-227
22. HOLLAND T.D., Sex determination of fragmentary crania by analysis of the cranial base, *American Journal of Physical Anthropology,* 1986 , 70 : 203-208
23. HOSHI H., Sex difference in the shape of the mastoid process in norma occipitalis and its importance to the sex determination of the human skull, *Okajimas Folia Anatomica Japonica,* 1962, 38 : 309-313

24. JAIN D., JASUJA O.P., NATH S., Sex determination of human crania using mastoid triangle and opisthion-bimastoid triangle, *Journal of Forensic and Legal Medicine,* 2013, 20 : 255-259
25. JAJA N.R., AJUA C.O., DIDIA C., Mastoid triangle for sex determination in adult nigerian population : a validation study, *Journal of Forensic Sciences,* 2013, 58 (6) : 1575-1578
26. KANCHAN T., GUPTA A., KRISHAN K., Estimation of sex from mastoid triangle, *Journal of Forensic and Legal Medicine,* 2013, 20 : 855-860
27. KATZ D., FRIESS M., Technical note : 3D from standard digital photography of human crania - a preliminary assessment, *Americal Journal of Physical Anthropology,* 2014, 154 (1) : 152-158
28. KEMKES A., GÖBEL T., Metric assessment of the «mastoid triangle» for sex determination : a validation study, *Journal of Forensic Sciences,* 2006, 51 (5) : 985-989
29. KROGMAN W.M., İŞCAN M.Y., The human skeleton in forensic medicine, *Springfield Illinois : Charles Thomas Publisher,* 2nde édition, 1986, : 189-243
30. NADERI S., KORMAN E., ÇITAK G., GÜVENÇER M., ARMAN C., ŞENOĞLU M., TETIK S., NURI ARDA M., Morphometric analysis of human occipital condyle, *Clinical Neurology and Neurosurgery,* 2005, 107 : 191-199
31. OLIVIER G., PINEAU H., Détermination du sexe par le poids des os, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris,* 1958, 9 (7-9) : 328-339
32. PATIAS P., Medical imaging challenges photogrammetry, *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,* 2002, 56 : 295-310
33. PIERROT DESEILLIGNY M., CLERY I., Évolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels, *Images et Modèles 3D en Milieux naturels,* 2011, 12 : 51-66
34. RAGHAVENDRA Y.P., ATTIKU Y., KOTIAN M.S., Sex estimation from foramen magnum dimensions in an indian population, *Journal of Forensic and Legal Medicine,* 2012, 19 : 162-167
35. ROCHE A.F., LEWIS A.B., Sex differences in the elongation of the cranial base during pubescence, *The Angle Orthodontist,* 1974, 44 (4) : 279-294
36. SAINI V., SRIVASTAVA R., RAI R.K., SHAMAL S.N., SINGH T.B., TRIPATHI S.K., Sex estimation from the mastoid process among North indians, *Journal of Forensic Sciences,* 2012, 57 (2) : 434-439
37. SANTOS F., Le kappa de Cohen : un outil de mesure de l'accord inter-juges sur des caractères qualitatifs, *Université Bordeaux 1,* 2013

38. SANTOS F., Évaluer les erreurs de mesure an anthropométrie, *Université Bordeaux 1,* 2014
39. SCHAEFER M., BLACK S., SCHEUER L., Juvenile Osteology : a laboratory and field manual, *Elsevier,* 2009
40. SCHEWE H., IFERT F., Soft tissue analysis and cast measurement in orthodontics using digital photogrammetry, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing,* 2000, 33 : 699-706
41. SHAH S., PATEL P., Sexing the human skull using the mastoid process, *Journal of Medical Sciences,* 2013, 2 (2) : 75-78
42. SPRADLEY K., JANTZ R.L., Sex estimation in forensic anthropology : skull versus postcranial elements, *Journal of Forensic Sciences,* 2011, 56 (2) : 289-296
43. SUAZO G.I.C., ZAVANDO M.D.A., SMITH R.L., Sex determination using mastoid process measurements in brazilian skulls, *International Journal of Morphology,* 2008, 26 (4) : 941-944
44. SUAZO G.I., ZAVANDO M., RUSSO P), SMITH R.L., Evalution of the Baudoin condylar index diagnostic test for sex determination, *International Journal of Morphology,* 2010, 28 (1) : 171-174
45. SUJARITTHAM S., VICHAIRAT K., PRASITWATTANASEREE S., MAHAKKANUKRAUH P., Thai human skeleton sex identification by mastoid process measurement, *Chiang Mai Medical Journal,* 2011, 50 (2) : 43-50
46. SUMATI K., PATNAIK V.V.G., PHATAK A., Determination of sex from mastoid process by discriminant function analysis, *Journal of the Anatomical Society of India,* 2010, 59 (2) : 222-228
47. UYSAL S., GOKHARMAN D., KACAR M., TUNCBILEK I., KOSAR U., Estimation of sex by 3D CT measurements of the foramen magnum, *Journal of Forensic Sciences,* 2005, 50 (6) : 1310-1314
48. WESCOTT D.J., MOORE-JANSEN P.H., Metric variation in the human occipital bone : forensic anthropological applications, *Journal of Forensic Sciences,* 2001, 46 (5) : 1159-1163
49. WILLIAMS B.A., ROGERS T.L., Evaluating the accuracy and precision of cranial morphological traits for sex determination, *Journal of Forensic Sciences,* 2006, 51 (4) : 729-735

50. Wikipedia, biographie de Georges Cantacuzène : http://fr.wikipedia.org/wiki/Gheorghe_Grigore_Cantacuzino
51. Archéotech, service web : http://www.archeotech.ch/assets/PDFs/archeo_manuel_photogram_red.pdf
52. Agisoft, logiciel de reconstruction tridimensionnelle : http://www.agisoft.ru/tutorials/photoscan

Vu, Le Président du Jury,

Date, Signature :

Vu, le Directeur de l'UFR des Sciences Odontologiques,

Date, Signature :

Vu, le Président de l'Université de Bordeaux,

Date, Signature :

Marie Audrey SAY-LIANG-FAT **Le 13 Novembre 2014**
Thèse pour l'obtention du DIPLOME d'ETAT de DOCTEUR en CHIRURGIE DENTAIRE 2014 - n°52

Discipline : Odontologie légale

Dimorphisme sexuel et base du crâne : Combinaison d'une approche conventionnelle et d'une approche photogrammétrique dans le recueil des variables

---

Résumé

La fragmentation récurrente des ossements a incité les anthropologues à développer des méthodes de diagnose sexuelle à partir de chacun des os du squelette. Les études de la base du crâne se sont donc succédées, démontrant la présence d'un dimorphisme sexuel au niveau de cette région anatomique. Le premier objectif de ce travail vise à édifier une nouvelle méthode de diagnose sexuelle, établie sur les collections de référence du musée de l'Homme. Les variables sont recueillies au niveau du foramen magnum, des condyles occipitaux et des processus mastoïdiens, par anthropométrie et photogrammétrie. La présence d'un dimorphisme sexuel basicrânien est confirmé. Mais, l'équation discriminante présente un taux d'erreur de 26,14 %, et ne fournit donc qu'une information complémentaire. La réduction du taux d'erreur pourra faire l'objet d'une étude ultérieure par optimisation du protocole. Enfin, la manipulation d'un modèle photogrammétrique, tridimensionnel, précis et fiable, permet de valider son intérêt en anthropologie.

Mots-clés

Odontologie légale, anthropologie, dimorphisme sexuel, base du crâne, photogrammétrie

---

Sexual dimorphism and basicranium : Combination of conventional and photogrammetric approaches to collect the variables

---

Summary

Frequent bone fragmentation leaded the anthropologists to develop methods of sexual diagnosis from each bone of the skeleton. Studies of the basicranium followed, revealing the presence of sexual dimorphism in this anatomical area, often found in good condition. The first aim of this work is to produce a new method, established on the reference collections of the «musée de l'Homme». The variables were collected on the foramen magnum, the occipital condyles and the mastoid processes, by anthropometry and photogrammetry. The presence of cranial sexual dimorphism was confirmed. But, the discriminant equation, given by logistic regression, shows an error rate of 26,14 %, and provides only an additional information. Reducing the error rate could be subject to further study by optimizing the protocol. The second aim is to assess the benefit of photogrammetry. Handling a three-dimensional model, precise and accurate, validates its use in anthropology.

Key-words

Forensic dentistry, anthropology, sexual dimorphism, basicranium, photogrammetry

---

Université de Bordeaux - Collège des Sciences de la Santé
UFR des Sciences Odontologiques
16-20 Cours de la Marne
33082 BORDEAUX CEDEX