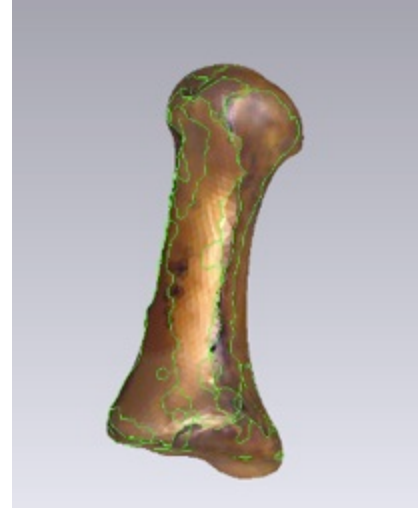


UFR Sciences & Techniques Côte Basque
Université de Pau et des Pays de l'Adour

Licence Biologie des Organismes

Recherche d'un nouveau protocole de modélisation 3D des métatarses.

Roy Gabriel



Stage effectué du 11 Mars au 13 Mai 2013 à
Université de Montréal, C.P. 6128 Succ. Centre-Ville Montréal, Québec, CANADA
sous la direction scientifique de Mme Drapeau Michelle

Université 
de Montréal

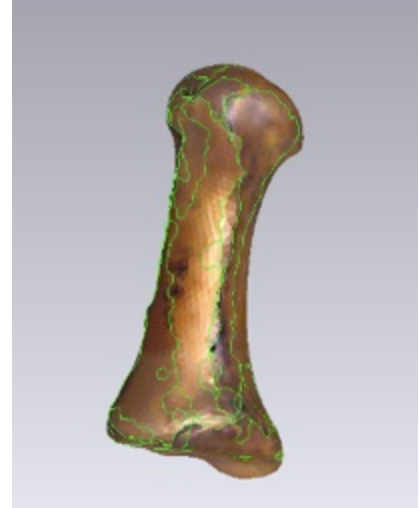
"Le présent rapport constitue un exercice pédagogique qui ne peut en aucun cas engager la responsabilité de l'Entreprise ou du Laboratoire d'accueil"

UFR Sciences & Techniques Côte Basque
Université de Pau et des Pays de l'Adour

Licence Biologie des Organismes

Recherche d'un nouveau protocole de modélisation 3D des métatarses.

Roy Gabriel



Stage effectué du 11 Mars au 13 Mai 2013 à
Université de Montréal, C.P. 6128 Succ. Centre-Ville Montréal, Québec, CANADA
sous la direction scientifique de Mme Drapeau Michelle

Université 
de Montréal

"Le présent rapport constitue un exercice pédagogique qui ne peut en aucun cas engager la responsabilité de l'Entreprise ou du Laboratoire d'accueil"

Résumé

Cette étude présente la mise en place d'un protocole standardisé et hautement reproductible, visant à scanner des métatarses afin d'obtenir des modèles 3D. Le but de ce protocole est de calculer la torsion des métatarses en utilisant les surfaces articulaires proximales et distales. Un des objectifs est d'essayer de diminuer la décision humaine dans ce protocole, par rapport à une autre technique utilisée ultérieurement : le Microscribe, où c'est à l'opérateur de déterminer les axes principaux des articulations. Alors que cette dernière méthode consiste en la prise de deux points sur les surfaces articulaire proximales et distales des os, la modélisation 3D permet d'obtenir un modèle représentant l'os en question, et ainsi de prendre différentes mesures. Cette démarche s'inscrit dans un cadre plus large de recherche portant sur le calcul de la torsion des métatarses et leur comparaison entre l'homme moderne, nos ancêtres et les Grands Singes. Après avoir expérimenté plusieurs possibilités nous sommes parvenus à l'établissement d'un protocole de modélisation satisfaisant. Cependant, malgré tous les apports de la technologie 3D, il subsiste tout de même quelques points négatifs. En effet, il apparaît que la décision humaine ne se fait pas moins présente, au contraire. De plus, le temps de manipulation est bien supérieur à celui nécessaire à la méthode Microscribe.

Mots-clés : anthropologie ; modélisation 3D ; métatarses ; pied ; bipédie ; arche longitudinale.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont rendu la réalisation de ce rapport possible.

Tout d'abord, ma maîtresse de stage Madame Michelle Drapeau pour l'accueil qu'elle m'a offert à mon arrivée. Je voudrai aussi la remercier pour ses conseils et sa disponibilité. Ses encouragements, lors de ce stage, m'ont permis d'enrichir mes connaissances en anthropologie et en modélisation, permettant ainsi la réalisation de ce rapport.

J'adresse des remerciements tout particuliers à Mademoiselle Emeline Raguin, qui a fait preuve de patience avec moi et qui m'a beaucoup aidé dans la relecture de ce rapport et sans qui ce rapport n'aurais sans aucun doute jamais vu le jour.

Je voudrais également remercier les autres personnes avec qui j'ai eu la chance de travailler au département d'anthropologie de l'Université de Montréal : Mesdemoiselles Marine Puech, Judith Forgue-Marceau, Laurence Dumouchel et Messieurs Rémi Toupin et Ronan Mehault. Votre accueil très chaleureux et à votre disponibilité m'ont permis de me sentir tout à fait à l'aise durant ce stage.

Enfin, pour leur présence, ainsi que pour leurs encouragements, leur aide et leurs conseils, je voudrais remercier ma famille et mes amis proches.

Liste des annexes :

Annexe 1 : Tableau de répartition des tâches

Annexe 2 : Calendrier des tâches

Glossaire

*(Les notions présentées ici se rapportent aux mots en caractères **gras** dans le rapport)*

Anisotrope : désigne une substance ou un corps dont les propriétés (mécaniques, optiques, etc.) varient suivant les trois dimensions de l'espace.

Distal : se dit de la portion d'un élément anatomique la plus éloignée d'un organe de référence, ou du tronc.

Dorsal : qui se rapporte à la région du dos ou au revers de certains organes et de certaines régions du corps (dessus de la main et du pied par exemple).

Dorsiflexion : désigne le mouvement de flexion du pied, au cours duquel la partie dorsale du pied est rapprochée du tibia et où la pointe du pied se trouve en hauteur.

Mamillaire : qui a la forme d'un mamelon.

Médial : désigne ce qui est proche de l'axe de symétrie du corps, s'oppose à latéral.

Proximal : se réfère à ce qui est plus proche du centre ou de la ligne médiane du corps ou d'un organe, s'oppose à distal.

Plantaire : fait référence à la plante du pied par opposition à dorsal.

Tubérosité : une tubérosité est une éminence d'un os qui donne insertion à un muscle ou à un ligament.

Viscoélastique : désigne la réaction à la contrainte d'une matière se comportant comme si elle était composée d'un solide élastique et d'un fluide visqueux où l'écoulement serait dépendant de certains paramètres (température, charge, gradient d'application de la charge).

Table externe / interne : ces tables correspondent à la portion osseuse se chevauchant au niveau des sutures crâniennes.

Taphonomie : discipline de la paléontologie qui étudie tous les processus qui interviennent après la mort d'un organisme jusqu'à sa fossilisation.

Tomodensitométrie : dite aussi scanographie ou simplement scanner pour l'appareil, c'est une technique d'imagerie médicale qui consiste à mesurer l'absorption des rayons X par les tissus puis, par traitement informatique, à numériser et enfin reconstruire des images 2D ou 3D des structures anatomiques.

Table des matières

1- INTRODUCTION	1
2- MISE EN CONTEXTE	2
2.1) L'ANTHROPOLOGIE BIOLOGIQUE	2
2.2) DESCRIPTION DES METATARSEES	3
2.3) DESCRIPTION DE L'ECHANTILLON	4
2.4) BIOMECHANIQUE DE L'OS	5
2.5) TRAVAUX ULTERIEURS	5
3- MATERIEL ET METHODE	7
3.1) MODELISATION TRIDIMENSIONNELLE	7
4- RESULTATS ET DISCUSSION	10
5- CONCLUSION GENERALE	14

1- Introduction

L'anthropologie est une science qui analyse l'humain sous ses différentes formes (comportementale, biologique, linguistique et archéologique). Les anthropologues (archéologues, bio-anthropologues, ethnolinguistes et ethnologues) utilisent diverses techniques, propres à chaque domaine, pour analyser ce phénomène humain. L'anthropologie biologique a connue une révolution technique au cours de ces deux dernières décennies. On parle maintenant d'anthropologie virtuelle (VA). Celle-ci fait appel aux technologies numériques ainsi qu'aux connaissances d'experts dans divers domaines. Ces nouvelles méthodes de mesures utilisent des données telles que le volume ou la surface des éléments scannés. L'anthropologie virtuelle permet d'analyser les os sous différents angles et avec une meilleure reproductibilité. Six champs composent l'anthropologie virtuelle : la numérisation, l'observation des structures « cachées » (comme les sinus), la comparaison des formes, reconstruction des spécimens, réalisation de spécimens électroniques et le partage des données (Weber, 2013).

De nos jours, l'imagerie 3D est de plus en plus présente dans divers domaines et l'anthropologie n'y échappe pas. En effet, cette technique est de plus en plus utilisée pour étudier les structures osseuses. Les premiers résultats ont été obtenus en utilisant la scanographie X dès le début des années 80 (Tate & Cann, 1982). Depuis, beaucoup de chercheurs ont appliqué cette modalité d'imagerie qui permet de bien discerner les structures osseuses avec une bonne résolution pour les systèmes médicaux courants. Cependant, il existe encore de nombreux problèmes de réglage pour obtenir des images de très bonne qualité (Badawi-Fayad *et al.*, 2005). Dans le domaine de l'anthropologie biologique, de la paléoanthropologie ou encore de l'anthropologie judiciaire, les outils de l'imagerie médicale et de la 3D sont devenus incontournables. En effet, ils apportent de nouvelles possibilités d'analyses des os ne provoquant aucune dégradation du spécimen. C'est d'ailleurs dans ces différents domaines d'étude que ces nouvelles techniques numériques ont permis ces dernières années les avancées les plus significatives (Ponce de Leon *et al.* 2008 ; Zollikofer & Weissmann 2008 ; Neubauer *et al.* 2009 ; Silcox *et al.* 2009 ; Smith *et al.* 2009 ; Weaver & Hublin 2009). Les méthodes tridimensionnelles apportent des résultats supplémentaires que ne peuvent fournir les méthodes 2D. Les intérêts de l'approche 3D en anthropologie se situent tant au niveau de l'amélioration du diagnostic qu'au niveau didactique et de diffusion des connaissances. En effet, en plus des observations directes sur des os ou des dents, ou autres sources secondaires d'ordre iconographique ou médico-historique, l'anthropologue peut maintenant avoir accès à un 3^e jeu d'informations issues des techniques d'imagerie 3D (Coqueginot *et al.*, 2009).

Ultimement, le but de l'étude présentée ici est de comparer deux méthodes permettant de calculer la torsion des métatarses. De façon plus immédiate, il s'agit de mettre en place un nouveau protocole standardisé et reproductible pour calculer cette torsion. Le pied est particulièrement intéressant à étudier puisque c'est la région anatomique qui est en contact direct avec le sol pendant la locomotion (Drapeau et Harmon, 2013). Le pied humain est dérivé de celui des singes pour faciliter la bipédie, dans laquelle il agit comme un levier stable et propulsif (avec l'intégration du premier orteil) pendant la transmission du poids et la **dorsiflexion** (Morton, 1922, 1924; Elftman et Manter, 1935a,b; Oxnard et Lisowski, 1980; Lewis, 1980, 1989).

2- Mise en contexte

2.1) L'anthropologie biologique

L'anthropologie biologique est un domaine de l'anthropologie qui traite de la variabilité humaine, d'un point de vue biologique, entre les hommes modernes, nos ancêtres et nos proches cousins. Cette "histoire naturelle de l'humanité au travers du temps et de l'espace", comme le définissait déjà Robert Martin au début du siècle passé (Martin 1914), implique une variété de disciplines comme l'anatomie fonctionnelle, la physiologie, l'ostéologie, l'évolution humaine, la primatologie, la génétique des populations, l'embryologie, la démographie, la systématique et beaucoup d'autres (Weber, 2013). Souvent, l'anthropologie biologique est séparée au sein des universités en plusieurs champs : l'anthropologie culturelle (ethnographie), linguistique et l'archéologie, permettant toute sorte de combinaisons (Stanford et al. 2009).

L'anthropologie biologique en tant que science institutionnelle est très jeune, étant donné qu'elle tourne autour de notre espèce. Bien que plusieurs spécialistes, parmi eux les célèbres Adrien von Spieghel (1578-1628), G.L. Leclerc Comte de Buffon (1707-1788), J.F. Blumenbach (1752-1840), souvent appelés "les pères de l'anthropologie", ou Carl Linné (1707-1778) le créateur de la nomenclature binomiale, ont étudiés la variabilité phénotypique humaine et qu'ils étaient en partie conscients que la diversité apparaissait dans et entre les populations humaines modernes. Ce n'est donc pas avant le milieu du XIX^e siècle que l'on s'intéressa vraiment à cette science. La raison de cette agglomération d'idées et de données dans des structures bien établies (les populations humaines modernes) est assez simple : s'intéresser à la variabilité biologique des populations n'a de sens que si l'idée de l'évolution biologique et du caractère changeant des espèces et des populations est acceptable. Wallace (1858), Darwin (1859), Mendel (1866) et beaucoup d'autres ont tracé la voie s'écartant de l'idée religieuse de l'origine de l'homme, ce qui a ouvert les esprits à la compréhension de notre histoire biologique.

Les nouvelles technologies en imagerie 3D ont permis de nouvelles avancées d'un point de vue analytique. Les techniques Microscribe et la modélisation tridimensionnelle ont déjà permis d'étudier des ossements sous une nouvelle approche et dans divers domaines de l'anthropologie. En anthropologie biologique, par exemple, Bigoni et al (2010) ont utilisés le Microscribe afin de montrer le dimorphisme sexuel chez l'homme à partir de la forme des crânes. La modélisation 3D a quant à elle été mise à contribution par Coqueugniot et al (2009), en paléopathologie. Il s'agissait d'un sujet masculin âgé d'une cinquantaine d'années, daté du début du XX^e siècle. Celui-ci présentait des lésions crâniennes attribuées macroscopiquement à une syphilis osseuse. Après avoir effectué un examen par scanner, les sections du crâne ont été examinées coupe par coupe, dans les 3 plans de l'espace (sagittal, frontal et axial). Elles montrent finalement l'association de lésions destructives (*caries sicca*) et de processus de cicatrisation (cicatrices **mamillaires**) typiques de la syphilis osseuse, confirmant ainsi le premier diagnostic. Sans aucune manipulation du crâne et donc sans risque d'endommager ce spécimen fragile, il est clairement visible sur la reconstruction 3D de ce

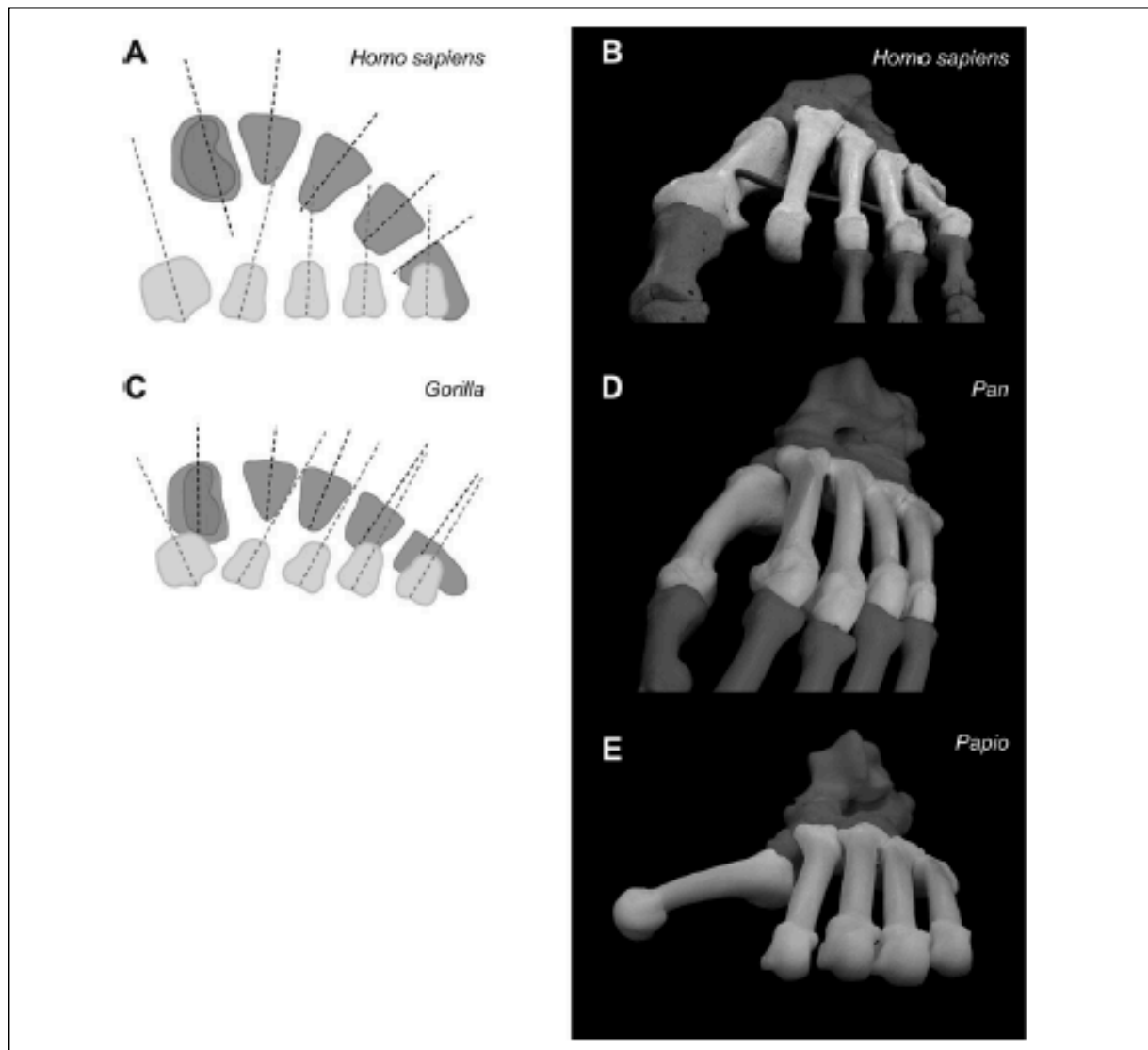


Figure 1 : bases et têtes des métatarsiens chez l'homme (A, B), chez les grands singes d'Afrique (Gorille pour le C et Chimpanzé pour le D) et chez les cercopithécidés (E). A et C montrent la torsion, avec les bases en gris foncé et les têtes en gris clair (modifié de Morton, 1922) B, D et E montrent les métatarses articulés avec les tarses (Drapeau et Harmon, 2013)

crâne pathologique que la surface de la **table externe** est considérablement remodelée principalement sur l'os frontal et les os pariétaux le long de la suture sagittale. L'imagerie médicale et la 3D ont permis, sans manipulation directe des pièces osseuses, de proposer dans ce cas, un diagnostic qui était impossible sans accès aux structures internes. Ceci illustre bien que de tels résultats ne peuvent être acquis par des méthodes morphométriques classiques et fournissent des données originales :

- sur l'extension et la sévérité de la pathologie,
- sur la compréhension du mécanisme pathologique.

Ces deux exemples montrent l'importance et l'intérêt de la technologie 3D dans le milieu de l'anthropologie. Ainsi, ces deux méthodes sont mises à profit dans l'étude présente. Comme il l'a été mentionné précédemment, celle-ci s'intéresse à la mise au point d'un protocole standardisé afin de calculer la torsion des métatarses.

2.2) Description des métatarses

Plusieurs parties composent le squelette du pied. On distingue la racine du pied (les tarses), le milieu du pied (les métatarses) et les orteils. On compte sept tarses : le talus, le calcaneum, l'os naviculaire, l'os cuboïde, et les trois cunéiformes. Le pied est composé des cinq métatarsiens, et les orteils sont formés de 2 à 3 phalanges chacun. Les métatarsiens sont les os longs du pied, ils sont dits « tubulés ». De plus, leur courbure est décrite comme une « convexité dorsale ». Ils sont organisés en trois parties : la base (partie **proximale**), le corps et la tête (partie **distale**). Le premier métatarsien est plus court et plus gros que les autres. Au niveau de la « **tubérosité** du premier métatarsien » (du côté **plantaire** de la base) il peut être articulé latéralement avec le deuxième métatarsien, et à l'arrière avec l'os cunéiforme **médial**, par une surface articulaire arquée. Les métatarsiens II, III et IV sont plus minces. Le côté dorsal de leur base est plus large que le côté plantaire. Ils sont articulés les uns avec les autres par les surfaces articulaires latérales, et avec les os cunéiformes et l'os cuboïde proximement. La tête de ces métatarsiens est plus étroite latéralement, ce qu'il leur donne un aspect presque cylindrique. Ce qui démarque le cinquième métatarsien des autres, est la tubérosité présente sur sa face latérale de la base.

Chez les grands singes la torsion des métatarses reflète le mode de locomotion (Drapeau et Harmon 2013). Les grands singes qui grimpent à la verticale réalisent un mouvement d'inversion avec leurs pieds et ont la tête du premier métatarsien tournée vers les autres orteils et les métatarses latéraux sont « inversés », c'est-à-dire, tournés vers le gros orteil (**Figure 1**). Il est donc intéressant d'étudier si chez l'homme la torsion des métatarses est aussi marquée avec la posture bipède, et si l'environnement et les habitudes culturelles (port de chaussures) peuvent influencer leur torsion.



Figure 2 : De haut en bas : Localisation des tranchées de fouilles devant le parvis de la basilique Notre-Dame, fouilles dans la tranchée de la rue Saint-Sulpice et exemples d'inhumation perturbée. Reproduit avec l'accord d'Arkéos (2008)

2.3) Description de l'échantillon

Le matériel utilisé provient du cimetière Notre-Dame, collection entreposée au Département d'anthropologie de l'Université de Montréal. Il s'agit, plus spécifiquement des os de métatarses droits et gauches, ayant une bonne conservation des deux extrémités articulaires. Aux XVII^e et XVIII^e siècles, Montréal est une colonie européenne en pleine expansion. Sa localisation stratégique pour le commerce de la fourrure en fait la porte d'entrée vers l'ouest (K. Pehr et *al*, 1977). Beaucoup de personnes s'y installent et certains y meurent.

Des fouilles archéologiques ont eu lieu entre 2001 et 2006 au nord et à l'est de la basilique Notre-Dame (**Figure 2**). Ces activités ont été réalisées dans le cadre de plusieurs mandats confiés à la firme archéologique Arkéos inc., par la ville de Montréal.

En tout, ce sont les restes d'au moins 193 individus qui ont été mis au jour. Leur étude, ainsi que celle des contextes d'inhumation révèle une multitude de détails importants sur les premiers habitants de Montréal, sur la vie quotidienne et la mort à cette époque. Ces informations se situent tant au niveau des cycles de vie (enfance, adolescence, âge adulte), des coutumes et des mœurs, qu'au niveau de la compréhension et de la connaissance des espaces sacrés et des gestes funéraires. Divers éléments sont documentés, par exemple, l'aspect des fosses (individuelles ou communes), les enterrements dans l'église, la modestie des cercueils, l'usage d'un linceul pour envelopper les corps et le peu d'objets accompagnant les morts. Tout ceci contribue à mettre en exergue une vie exigeante physiquement et d'une mortalité infantile particulièrement élevée.

L'implantation d'un quadrillage, au dessus des aires à fouiller, a permis leur enregistrement horizontal et vertical. Il est possible qu'un même puits contienne plusieurs sépultures, dans ce cas la sépulture prend le numéro du puits dans laquelle se trouve la tête de l'individu. Un numéro de sépulture a été attribué selon diverses circonstances. Par exemple, si les éléments anatomiques sont en connexion, si au contraire plusieurs éléments anatomiques sont disloqués mais appartiennent au même individu et qu'ils ont été déposés en une seule occasion (par exemple, à la suite d'une exhumation accidentelle lors d'une inhumation ultérieure, les os sont replacés à proximité), ou encore, si au cours d'un même événement plusieurs éléments appartenant à plus d'un individu ont été déplacés et remis en terre (par exemple, si plusieurs crânes ont été placés à un même endroit sans qu'il ne soit possible de les associer avec les squelettes postcrâniens).

Les couches de sols situées au-dessus des sépultures sont excavées à la pelle. Dès lors que des ossements ou des fragments de bois (cercueil) sont mis à jour, les fouilles se poursuivent à la truelle, jusqu'à dégagement complet de la fosse, du cercueil ou du squelette.

Une fois la sépulture dégagée, plusieurs fiches d'enregistrement sont utilisées pour documenter le mode d'inhumation. Des croquis, des photographies et des commentaires plus spécifiques viennent compléter ces fiches.

Les os recueillis sont placés avec les restes du squelette correspondant dans des caisses numérotées selon un code précis et individuel. Chaque partie du corps est placée dans un sac plastique sur lequel est mentionné le contenu (mains droite, pied gauche, etc.), ainsi que la date d'exhumation.

Grâce à ces activités, 125 squelettes en position anatomique ont été dégagés, ainsi que de nombreux restes désarticulés. Ces ossements proviennent de personnes décédées entre 1691 et

1796. Cependant, il est important de préciser que dans le cadre de cette étude ce ne sont pas les os des 193 personnes qui ont été utilisés. En effet, lors des divers travaux d'agrandissement de la première église Notre-Dame, les corps ont été exhumés et transférés vers d'autres caves. Certains os ont été malmenés, abîmés ou même séparés des squelettes. Ceux-ci ne sont donc pas tous complets ou individualisés. En tout, 120 os ont été utilisés, ce qui représente une quarantaine d'individus.

Néanmoins, un biais intervient au niveau des angles de torsion. En effet, les surfaces articulaires sont utilisées pour les calculer, et sur certains os ces surfaces sont partiellement dégradées, ce qui fausse les valeurs. Les résultats obtenus sont donc des estimations.

Il est important de préciser que l'échantillon est constitué d'ossements de personnes adultes ayant au moins 20 ans. En effet, les surfaces articulaires composent les épiphyses qui fusionnent avec la diaphyse à 20 ans seulement.

2.4) Biomécanique de l'os

La connaissance des caractéristiques mécaniques des os est indispensable pour comprendre le phénomène de torsion. L'os est un organe dur et résistant, constitué essentiellement de tissu osseux, défini dans sa forme et dans sa taille (Perrott, 1984).

D'après la loi de Wolff, l'os se forme et se résorbe en fonction des contraintes mécaniques qu'il subit. C'est un matériau **anisotrope** et **viscoélastique** et la direction de la charge qui lui est appliquée fait varier sa résistance. L'os est plus résistant en compression qu'en tension, et les contraintes supportées par l'os *in vivo* varient en fonction de l'activité musculaire (P.Meyrueis et *al*, 2004).

L'os est composé de deux phases : la matrice et l'os minéral, c'est donc un élément composite. Le collagène offre une bonne résistance en traction mais une résistance quasi nulle en compression. D'après Zioupos et Currey (1999), avec l'âge la modification du collagène entraîne une diminution des propriétés mécaniques de l'os. A l'inverse, la partie minérale est plus résistante en compression qu'en traction. En somme, l'os tire sa résistance à la compression de son composant minéral et sa résistance à la traction de son composant collagène.

En ce qui concerne la forme et la structure tubulaire de l'os, elles ne résultent pas d'un caprice de la nature. Son architecture en anneau répond parfaitement aux contraintes et offre une meilleure résistance. Pour s'en convaincre il suffit de prendre une feuille de papier. Il faut très peu de force pour réussir à la plier. En revanche, si on la roule en forme de tube cela demande plus d'effort pour la courber. La forme cylindrique est celle qui offre le plus de résistance par rapport à une quantité de matière donnée (P.Meyrueis et *al*, 2004).

L'os est un élément plastique, qui s'adapte à son environnement. Par ailleurs, des travaux précédents ont permis de montrer l'évolution de la torsion des métatarses chez les hominidés.

2.5) Travaux ultérieurs

Cette étude s'inscrit dans un projet plus large sur la torsion des métatarses, entre les grands singes et l'homme. Drapeau et Harmon (2013) ont montré que chez les grands singes la torsion des métatarses reflète le mode de locomotion. L'absence de capacité préhensile, la rigidité du pied humain et la présence d'une arche longitudinale s'observent par la torsion des

métatarses. En effet, la base des métatarses médiaux se retrouve surélevée par rapport à leur tête et ne permet pas le même mouvement que les métatarses des singes, qui ont des pieds plus plats. Le pied des singes est caractérisé par une **éversion** du premier métatarse. Les autres sont beaucoup moins tordus. Le cinquième métatarse est relativement droit par rapport au deuxième. Ce *pattern* est relativement marqué chez l'Orang Outan. En revanche, le pied humain est caractérisé par des métatarses I et II relativement droits, et des métatarses III, IV et V avec une forte éversion. Ces *patterns* sont, comme attendus, le reflet de l'hallux divergent et préhensile et du phénomène d'inversion du pied des singes. Lors de ces travaux, la technique utilisée est celle du Microscribe.

Le Microscribe est un digitaliseur 3D de bureau. C'est un bras articulé de précision dont le fonctionnement est basé sur des encodeurs optiques situés à chaque articulation et relié à un ordinateur par port USB. Celui-ci permet de relever des points dans l'espace et de produire des modèles à partir des coordonnées recueillies. Un logiciel, qui connaît la dimension du bras articulé, calcule l'emplacement du bout de la sonde. Il mesure donc l'emplacement des points choisis par l'utilisateur et les coordonnées XYZ sont directement insérées dans le logiciel. L'orientation dorso-plantaire de la base des métatarses est déterminée par l'enregistrement de deux points au milieu de la base, l'un dorsalement et l'autre plantairement. Sur le terrain, Microscribe peut s'avérer être la technique la plus fiable. Cependant, c'est un instrument fragile et cher qui nécessite une assistance technique importante (électricité, ordinateur portable) (**Figure 3**).

Pour l'ensemble de l'échantillon et pour les fossiles complets, les coordonnées tridimensionnelles des têtes et des bases ont été collectées avec Microscribe 3DX et une précision de 0,23mm. L'orientation dorsoplantaire des bases des métatarses a été déterminée par l'enregistrement de deux points au milieu de la base (**Figure 4**), l'un dorsalement et l'autre plantairement. La même chose a été faite avec les têtes. Les points tridimensionnels ont été ensuite réalignés grâce au logiciel GRF-ND (Slice, 1992-1994) de telle sorte que les valeurs X, Y et Z varient respectivement dans les plans anatomiques dorsoplantaire, proximodistal et médiolatéral. L'angle entre les lignes qui définissent l'orientation de la tête et de la base dans le plan frontal représente l'angle de torsion des métatarses (**Figure 5**). La troisième dimension (l'axe Y) est ignorée dans la mesure où elle correspond à la diaphyse et n'apporte aucune information dans la mesure de la torsion. Or cette étude avait pour but de comparer cette méthode, où le chercheur doit avoir une certaine expérience pour prendre les mesures adéquatement, avec une méthode plus automatisée, laissant peu de place à la décision humaine et à la variation interobservateur.

La surface articulaire plantaire de la tête, particulièrement sur l'hallux, est caractérisée par une crête qui n'est pas nécessairement centrée médiolatralement, mais ce relief n'a pas été pris en compte dans le calcul de la torsion. Pour le V^e métatarsien, l'axe dorso-plantaire de la base a été défini selon le point le plus plantaire et selon le point le plus dorsal le long de la surface articulaire avec le IV^e métatarse, d'après Martin et Saller (1957). Les angles négatifs reflètent un phénomène d'inversion de la tête par rapport à la base et les valeurs positives révèlent une éversion de la tête. Un métatarse qui n'a pas de torsion a une valeur d'angle de 0.

Le but de cette étude est, ultimement, de comparer deux méthodes qui permettent de calculer cette torsion et de déterminer si l'analyse tridimensionnelle standardisée de la torsion des métatarses est comparable à une analyse où le chercheur doit lui-même déterminer les axes principaux des articulations (sans création de modèles 3D).

L'objectif premier est d'apporter un protocole de modélisation 3D facilement reproductible et hautement standardisé pour les études de ce genre.

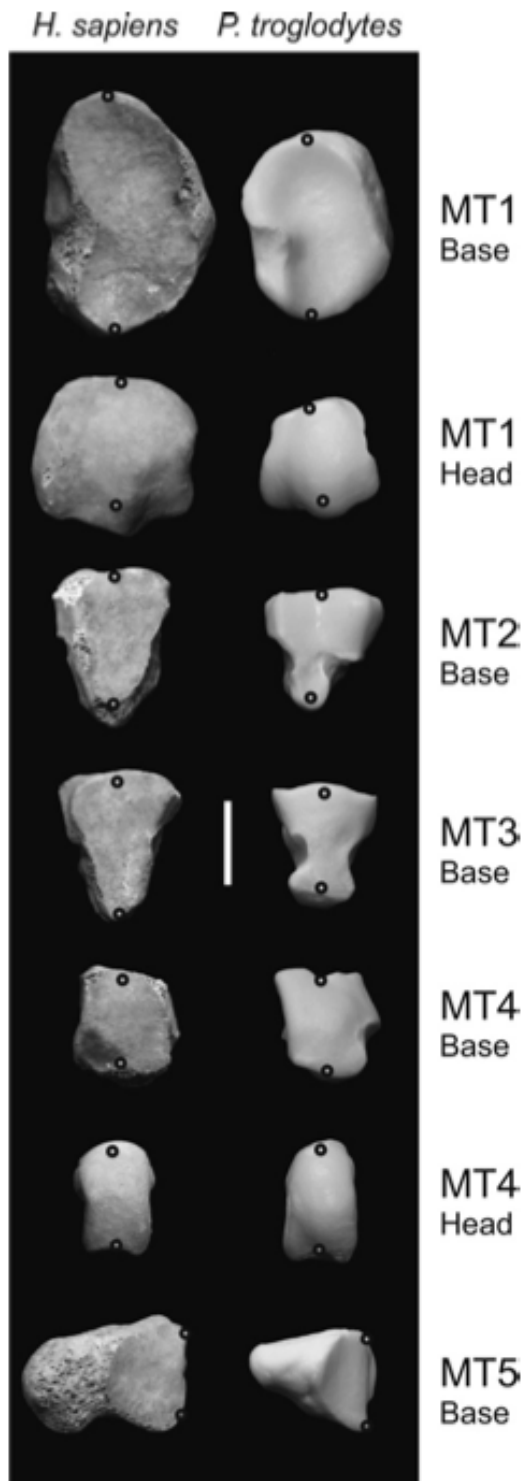


Figure 4 : photographie de la tête (head) et de la base des métatarses gauches chez l'homme et chez le chimpanzé (la barre blanche égale 1cm). Les cercles représentent les points enregistrés à l'aide du digitaliseur Microscribe et définissent l'axe dorsoplantaire de la tête et de la base des métatarses. Pour le V^e métatarsien, l'axe plantodorsal est défini par l'articulation avec le IV^e métatarsien, d'après Martin et Saller (1957). D'après Drapeau et Harmon (2013)



Figure 3 : Microscibe sur le terrain. D'après Sladek et al (2012).

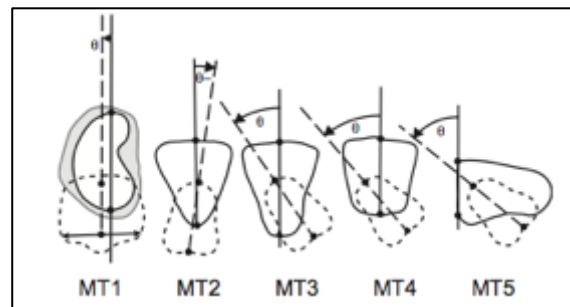


Figure 5 : mesure de la torsion de la tête des métatarses (MT) pour un pied gauche. Les bases sont représentées par les lignes continues et les têtes par les lignes en pointillés. Pour chaque métatarsaire l'angle de torsion de la tête est mesuré comme étant l'angle entre la ligne traversant la base et la tête de l'os (figure 3). Les valeurs positives reflètent une éversion et les valeurs négatives une inversion. Une valeur de 0 révèle qu'il n'y a aucune torsion de la tête par rapport à la base. D'après Drapeau et Harmon (2013).

3- Matériel et Méthode

3.1) Modélisation tridimensionnelle

La connaissance de l'anatomie du pied permet de mieux comprendre les phénomènes **taphonomiques** et pathologiques qu'il subit (A.Larguey et *al*, 2007). Cependant, les méthodes d'imagerie 2-D comme les rayons-X ne suffisent plus pour certaines analyses anatomiques, qui requièrent que l'information soit enregistrée et mesurée tridimensionnellement. C'est pourquoi l'utilisation de la 3D a été préférée dans cette étude.

Le scan laser est un nouvel outil utilisé pour représenter les structures biologiques en modèles 3D contenant des informations géométriques et topographiques. C'est une méthode de capture de données 3D simple et semi-automatisée. Cela permet de générer une description numérique d'un objet. Un moyen simple de décrire un objet numériquement est de mettre en place une gamme de coordonnées correspondante aux points relevés sur la surface de l'objet (Bernardini et Rushmeier, 2002).

En principe, on peut le faire à la main en mesurant la distance entre différents points d'une surface par rapport à un point fixe dans l'espace. Le point choisi représentera l'origine d'un système tridimensionnel et il ne restera qu'à convertir les points mesurés en coordonnées sur les axes X, Y et Z. Le scanner effectue toutes ces tâches pour l'opérateur en projetant un faisceau laser sur un objet. Comme le laser bouge sur la surface de l'objet, les informations, comme la distance par rapport à l'objet, sont enregistrées tout le long du processus par un capteur (en général une caméra), qui suit la réflexion du laser sur la surface (Bernardini et Rushmeier 2002 ; Kappelman 1998 ; Zollikofer et Ponce de Leon 2005).

Le plus souvent, la position et l'orientation du laser et des capteurs sont ajustées par triangulation. Donc, les points collectés sont convertis en valeurs 3D (X, Y et Z) grâce au système de coordonnées du scanner. Le résultat se présente sous la forme d'un nuage de points 3D qui représente une collection de données géométriques sur la surface de l'objet.

Généralement, les points voisins sont connectés par une ligne droite ce qui donne un maillage en triangles (parfois en quadrilatères) sur plusieurs couches. En changeant la position de l'objet à scanner et en répétant le processus, il est possible d'obtenir des scans additionnels de l'objet en question. Les portions de surfaces qui se chevauchent, entre plusieurs scans, sont assemblées pour former un modèle 3D (Bernardini et Rushmeier 2002 ; Kappelman 1998). Cet assemblage peut se faire manuellement ou automatiquement, dépendant du logiciel utilisé. En général, cette tâche nécessite l'alignement de plusieurs scans. Après cela, ils sont fusionnés pour former un maillage en une seule couche. Les scanners laser sont, généralement, vendus avec un logiciel permettant de réaliser ces étapes relativement facilement.

Les utilisations appropriées du scan laser impliquent directement de s'intéresser aux surfaces. La visualisation superficielle bénéficie de la capacité de manipuler le modèle sur un écran d'ordinateur, le faisant voir sous tous les angles extrêmement facilement, sans aucune crainte d'abîmer ou de maltraiter l'objet réel. De plus, la plupart des applications 3D tiennent compte du contrôle numérique complet de l'éclairage et des autres conditions qui améliorent significativement la visualisation. Ces avantages justifient l'utilisation du modèle 3D malgré

le fait qu'il s'agit d'une approximation de l'objet réel. Si cette technique est utilisée pour la recherche ou des buts éducatifs, la visualisation de données biologiques superficielles 3D est un outil puissant. Si le scan laser est utilisé pour la visualisation des formes (et des surfaces), la quantification, ou tous les deux, la capacité d'archiver des données est un avantage supplémentaire (Rowe et Razdan 2003). Des données 3D scannées ne sont pas juste une approximation d'une certaine surface réelle ; ils sont une approximation d'une certaine surface réelle à un moment particulier dans le temps. Donc, il résulte automatiquement du scan laser la création d'archives numériques de surfaces 3D et des objets. De telles données peuvent être utilisées si l'objet réel n'est plus accessible (par exemple, prendre des mesures supplémentaires) ou elles peuvent être utilisées pour comparer comment les propriétés superficielles d'un objet ont changé au fil du temps, si l'objet est scanné plus d'une fois (Byrne et Garcia 2007).

Une règle générale lorsqu'on utilise la modélisation 3D, c'est qu'il faut être patient, flexible et prêt à expérimenter. En effet, il faut être flexible et vouloir expérimenter dans chaque étape : le positionnement de l'objet par rapport au scanner, le nettoyage, l'alignement et la fusion des scans. Une des premières étapes implique un peu d'imagination et une prise de décision. En effet, il va falloir déterminer comment placer l'objet par rapport au scanner et au capteur. Il est possible qu'il faille expérimenter plusieurs positions différentes avant de trouver la bonne, ce qui explique le temps que peut prendre la création d'un modèle 3D. Etant donné que l'on prend des scans avec différentes orientations, différentes parties de la surface seront plus perpendiculaires par rapport au laser. Cela signifie que les données acquises d'un mauvais scan, à cause de son positionnement, peuvent être acquises plus précisément d'un autre scan. C'est ici qu'une bonne imagination arrive à point nommé. Chaque portion de la surface de l'objet, qui ne sera pas dans la ligne de vue du laser et du capteur, ne sera pas capturée, ce qui se traduira par la formation de trou dans le modèle (Bernardini et Rushmeier 2002 ; Zollikofer et Ponce de Leon 2005). En raison de la triangulation utilisée par le laser et par le capteur, les surfaces qui sont perpendiculaires à la direction du laser sont capturées avec plus de précision (Kappelman 1998).

Une bonne stratégie consiste à placer l'objet de telle manière qu'il y ait un maximum de surface capturée perpendiculairement au laser, ce qui minimisera le taux de surface qui ne sera pas capturée.

Une fois que le scannage est terminé, il est préférable d'examiner chaque scan et d'éliminer les zones qui n'appartiennent pas à l'objet initial. Par exemple, de la pâte à modeler peut-être utilisée pour stabiliser l'objet et elle se verra sur le scan. Il faut donc supprimer tous les éléments qui peuvent paraître étrangers.

Plusieurs logiciels permettent de sélectionner des points sur la surface qui est partagée par deux scans. Un algorithme, est utilisé pour aligner les scans entre eux. Les scanners laser qui utilisent des plateaux tournants sont avantageux dans la mesure où le logiciel connaît la distance entre le plateau et le capteur. Les scans peuvent alors être alignés automatiquement. Une fois satisfait par l'alignement des scans, il faut les fusionner tous ensemble. Cela implique d'utiliser un algorithme qui calcule un maillage final constitué que d'une seule couche, qui représente la surface scannée. Ensuite, il faut repositionner l'objet et répéter ces différentes étapes afin de générer un autre scan qui prendra en compte les zones manquantes sur le premier scan. Enfin, les deux maillages obtenus sont alignés et fusionnés, ce qui donne un modèle 3D de l'objet. S'il reste des zones manquantes sur le modèle, il faut prendre un scan supplémentaire et l'ajouter aux précédents en suivant les mêmes étapes. Sinon, on peut choisir de combler les trous de petite taille grâce à un algorithme spécialisé.



Figure 6 : Scanner 3D de type NexEngine. A gauche le scanner avec les capteurs et les caméras. A droite, le plateau tournant sur lequel est placé l'os.

Il est important de garder à l'esprit qu'un modèle 3D est une représentation approximative de l'objet réel. Attention de ne pas tomber dans le piège de penser que le nuage de points et que le maillage initialement acquis sont les représentations les plus précises de l'objet. La précision du modèle 3D dépend non seulement des particularités du scanner, mais aussi des logiciels et des algorithmes utilisés dans les différentes étapes. Des procédures de modélisation supplémentaires comme le "remplissage de trou" (holes filling) et le "lissage" (smoothing) aboutiront souvent à un modèle 3D qui est meilleur pour la visualisation et dans des buts analytiques. Cela peut aussi donner une représentation numérique plus précise de l'objet réel (Tocheri, 2009).

Le but de la modélisation est de créer une réplique la plus fidèle possible à l'original. Donc, les données 3D scannées doivent être simultanément précises et justes. Néanmoins, comme la variation est omniprésente en biologie, la fiabilité des résultats est souvent plus importante que la précision. Par exemple, en recherche biologie il est souvent moins important de déterminer précisément que l'aire d'une surface spécifique d'un individu est exactement de $10,03 \pm 0,01 \text{ cm}^2$ (puisque un tel niveau de précision ne change rien aux résultats) et plus important de déterminer que l'aire moyenne d'une surface diffère significativement entre deux ou plusieurs groupes.

Des modèles 3D des métatarses sont réalisés à l'aide d'un scanner de type NextEngine 3D (**Figure 6**). Cette machine travaille avec des lasers et avec des lampes intégrées. Les rayons lasers avancent le long de la surface à scanner ce qui permet aux détecteurs de mesurer la distance entre le scanner et l'objet en question. En même temps, l'objet est éclairé par une lumière blanche permettant à une caméra couleur numérique incorporée de capturer les images de la surface en couleurs. Pour produire des modèles complets, 16 scans sous différents angles sont nécessaires pour chaque métatarse. Le temps requis pour obtenir ces 16 scans est d'environ 45 minutes. Le logiciel de traitement Géomagic Studio 10 est utilisé pour fusionner les différents scans et obtenir le modèle 3D final. Le processus d'assemblage des scans prend approximativement 30 minutes pour un utilisateur expérimenté.

La modélisation tridimensionnelle permet d'obtenir des versions numérisées des os, afin de répondre à divers objectifs. D'une part, ceux-ci étant relativement anciens ils sont pour certains dégradés par endroit. De plus, il est possible qu'ils servent à des études histologiques, qui peuvent parfois endommager les échantillons. Ces versions numérisées permettent ainsi de garder une copie numérisée assez fiable des os dans leur état d'origine s'ils devaient être endommagés par la suite.

Une autre attente par rapport à cette méthode est de supprimer au maximum les décisions humaines et donc d'éviter des biais liés à l'expérience des chercheurs.

L'échantillon étudié se compose de métatarses gauches et droits dont les surfaces articulaires sont suffisamment préservées. Il se peut donc que pour certains individus un seul métatarse soit utilisé. Ceci ne constitue pas un biais dans la mesure où l'asymétrie est très faible au niveau des membres inférieurs, contrairement aux membres supérieurs. Il n'est donc pas obligatoire de prendre des os du côté droit et du côté gauche.

Une fois les scans obtenus j'ai donc conservé les surfaces articulaires (proximales et distales). Là aussi la diaphyse n'est pas prise en compte.

4- Résultats et discussion

Aujourd'hui, la technologie 3D ouvre de nouvelles perspectives de recherche. En effet, elle permet par exemple d'améliorer sensiblement les performances du diagnostic par rapport à l'approche 2D, elle permet encore d'étudier les os à l'aide de nouveaux outils (scanners, logiciels) mais aussi d'assurer la préservation des spécimens originaux. Effectivement, les reconstructions 3D permettent une observation directe des structures internes sans destruction de l'objet original, destruction qui demeure malheureusement aujourd'hui encore une méthode souvent utilisée. De plus, ces nouvelles techniques d'imagerie présentent un grand intérêt didactique. En effet, la progression d'un processus pathologique peut être simulée, l'observation de la pathologie à différentes étapes de sa progression a une indiscutable valeur pédagogique. Dans ce domaine, l'utilisation d'impressions 3D d'os pathologiques ou de reconstructions virtuelles de tissus pathologiques (kystes, tumeurs) qui n'apparaissent qu'en négatif dans l'os, sont autant de moyens pédagogiques permettant la compréhension du développement d'une maladie. Un autre apport de l'utilisation de modèles tridimensionnels est l'ouverture que cela propose. Grâce à ces techniques, il sera plus facile d'obtenir des données qui ne peuvent être mesurées que sur des modèles tridimensionnels tels que : le degré de courbure des surfaces articulaires, l'orientation des zones d'aplatissement de ces surfaces articulaires, l'orientation entre différentes surfaces articulaires d'un même os, le degré de congruité des surfaces articulaires à l'intérieur d'une même articulation, etc.

Enfin, les informations numériques ou les reproductions 3D peuvent être dupliquées et être mises à la disposition de la communauté scientifique plus facilement, plus rapidement et surtout ne nécessitent plus le déplacement de l'objet original. Un des atouts supplémentaires des scan 3D en anthropologie biologique, c'est que cela permet de garder une trace et de continuer les études macroscopiques à un certain degré, puisque de manière générale il y a peu de collections humaines et que bien souvent celles-ci doivent être ré-enfouies.

Ces données peuvent maintenant être stockées de manière pérenne dans le cadre de projets de sauvegarde du patrimoine. Cela permet notamment de ne pas avoir à multiplier les acquisitions **tomodensitométriques** des objets d'études et de les mettre en ligne pour une diffusion directe. La technique de modélisation étant toujours à l'étude, les résultats ne sont pas encore disponibles. Néanmoins, en se basant sur les travaux précédents, on peut raisonnablement penser que les résultats, concernant la torsion des métatarses, se trouveront dans le même ordre de grandeur que ceux acquis avec la méthode Microscribe.

Cependant, malgré le caractère indispensable de la technologie 3D en anthropologie, certains biais apparaissent. En effet, dans le cadre de mesures de précision, comme c'est le cas dans cette étude, cela nécessite une grande rigueur au niveau du protocole. Afin d'obtenir des mesures fiables tout au long de la collecte de données, il est impératif que ce soit la même personne qui manipule les appareils (que ce soit Microscribe ou le scanner 3D). Il est impossible de supprimer la décision humaine dans de tels travaux, mais cela permettra d'en réduire l'impact. Effectivement, avec la technique Microscribe, la décision humaine n'apparaît que lors de la sélection des points sur les surfaces articulaires. En revanche, avec la modélisation tridimensionnelle, la décision humaine est plus fréquente, puisqu'elle agit lors du nettoyage des scans, lors de la sélection des surfaces articulaires, et aussi lors de l'assemblage des scans (l'idée qu'un modèle est satisfaisant peut varier selon l'opérateur). C'est pourquoi cette technique sera peut-être plus fiable, mais moins précise.

Protocole de scannage d'ossements :

- 1) Lancer ScanStudio HD 3D, sélectionner « Edit » → « préférence » (choisir la destination du fichier)

Placer l'os horizontalement sur un carré de pâte noire sur le plateau du scanner. L'os peut être placé verticalement, mais la précision du modèle sera légèrement moins bonne. L'objet à scanner doit être disposé à une distance de 15 à 20 cm du scanner. La pâte noire absorbe les rayons lumineux et empêche ainsi d'avoir des reflets. Cela permet d'obtenir une image plus nette et plus précise.

- 2) Cliquer sur la flèche verte « Scan »
 - a. Positioning 360 degrees
 - b. Divisions 16 scans
 - c. Point/in.².700 (→1.1K)
 - d. Target → Light
 - e. Range → Macro
 - f. Sélectionner la zone de scan sur l'image de droite (prendre une zone suffisamment large pour que l'objet reste dans cette zone lorsqu'il tournera)
- 3) Quand le scan est terminé on obtient une représentation de l'objet avec 16 scans les uns sur les autres. La figure est alors peu précise et plutôt grossière. Il faut donc fusionner les 16 scans afin d'obtenir une représentation 3D ne comprenant qu'une seule surface. Cette surface est en fait composée de la moyenne des points des 16 scans.
 - a. Sélectionner « Fuse » → « Regenerate scans » → « For the selected family »
 - i. Réglages : Simplification à 2 ; Smooth à 5 et Hole filling à 1
 - ii. Sélectionner « Regenerate scans »
 - iii. Pour contrôler le résultat cliquer sur la 3^{ème} boule en bas à droite. Le modèle sera représenté sous la forme d'un maillage de triangles. Un résultat correct présentera des triangles de petite taille, tandis qu'un résultat peu correct aura des triangles plus gros.
- 4) Le modèle obtenu est formé de triangles reliés entre eux rendant la surface ainsi créée irrégulière par endroit. De plus, certains triangles, qui peuvent avoir une position déplaisante et donner une forme erronée de l'objet scanné, vont devoir être supprimés.

Sélectionner « Polish »

- a. Auto Trim
 - i. Maximum Triangle angle → 60 degrees
 - ii. Maximum Triangle size : 0,025 inches
 - b. Auto Trim
- 5) Sélectionner l'icône « Trim » dans la barre d'outils en haut à gauche (Paire de ciseaux) et couper les zones indésirables.
 - 6) Fuse
 - a. Volume merge scans
 - b. Resolution Ratio à 0,9

c. Merge

- 7) Sauvegarder en format « .PLY » pour l'ouvrir avec Géomagic Studio 10
- 8) Comme l'os était à l'horizontal, il manque la face du « dessous » (contre la pâte noire) et la face du « dessus ». Pour les obtenir placer l'os horizontalement sur la pâte noire, devant le scanner, et répéter ces étapes.

Nous avons maintenant 2 représentations de l'os qu'il va falloir assembler pour obtenir un seul modèle.

Pour assembler les scans :

- 1) Lancer Géomagic Studio 10
- 2) File → Open → Sélectionner le fichier en format « .PLY »
- 3) Manual registration →
 - a. placer les scans dans les deux parties hautes de l'écran et sélectionner au moins 3 points identiques sur chacun des scans
 - b. cliquer sur Register
 - c. si le résultat est correct cliquer sur OK. Pour déterminer si le résultat est satisfaisant, il est nécessaire de vérifier qu'il n'y a pas de trous dans le modèle, notamment au niveau des surfaces articulaires, puisque ce sont ces parties qui seront utilisées par la suite.
- 4) Dans la colonne de gauche, cliquer sur la « boîte bleue » et décocher Holes, Boundaries et Vertex Color. Cela permet une lecture plus claire du modèle (il apparaît en bleu pour l'extérieur et en jaune pour l'intérieur) puisqu'il va falloir, une fois encore, polir sa surface. Les deux scans assemblés se chevauchent par endroits laissant apparaître des triangles, ce qui déforme le modèle. Sélectionner ces triangles gênants et les supprimer.
- 5) Global registration → Apply → OK
- 6) Merge → triangle target 2 500 000 → Apply
- 7) Relax → Apply
- 8) Sauvegarder

Une fois les scans « nettoyés » obtenus il va falloir travailler dessus et donc faire apparaître des formes géométriques et un plan tridimensionnel pour prendre des mesures. Ici, seules les surfaces articulaires nous intéressent, puisque la diaphyse (partie longue de l'os) n'apporte aucune information sur la torsion de la tête de l'os par rapport à la base. Pour ne garder que les surfaces articulaires, il faut procéder de la même manière que pour le nettoyage des os, c'est-à-dire sélectionner les surfaces articulaires (avec l'outil « lasso ») le plus fidèlement possible par rapport à l'os réel. Elles apparaîtront en rouge, ce qui signifie que ce sont elles qui sont sélectionnées pour la suppression. Il faut donc inverser la sélection à l'aide d'un clic droit et de l'outil « Reverse selection ». Les surfaces articulaires apparaissent maintenant en bleu et la diaphyse en rouge, donc c'est elle qui est prête à être supprimée.

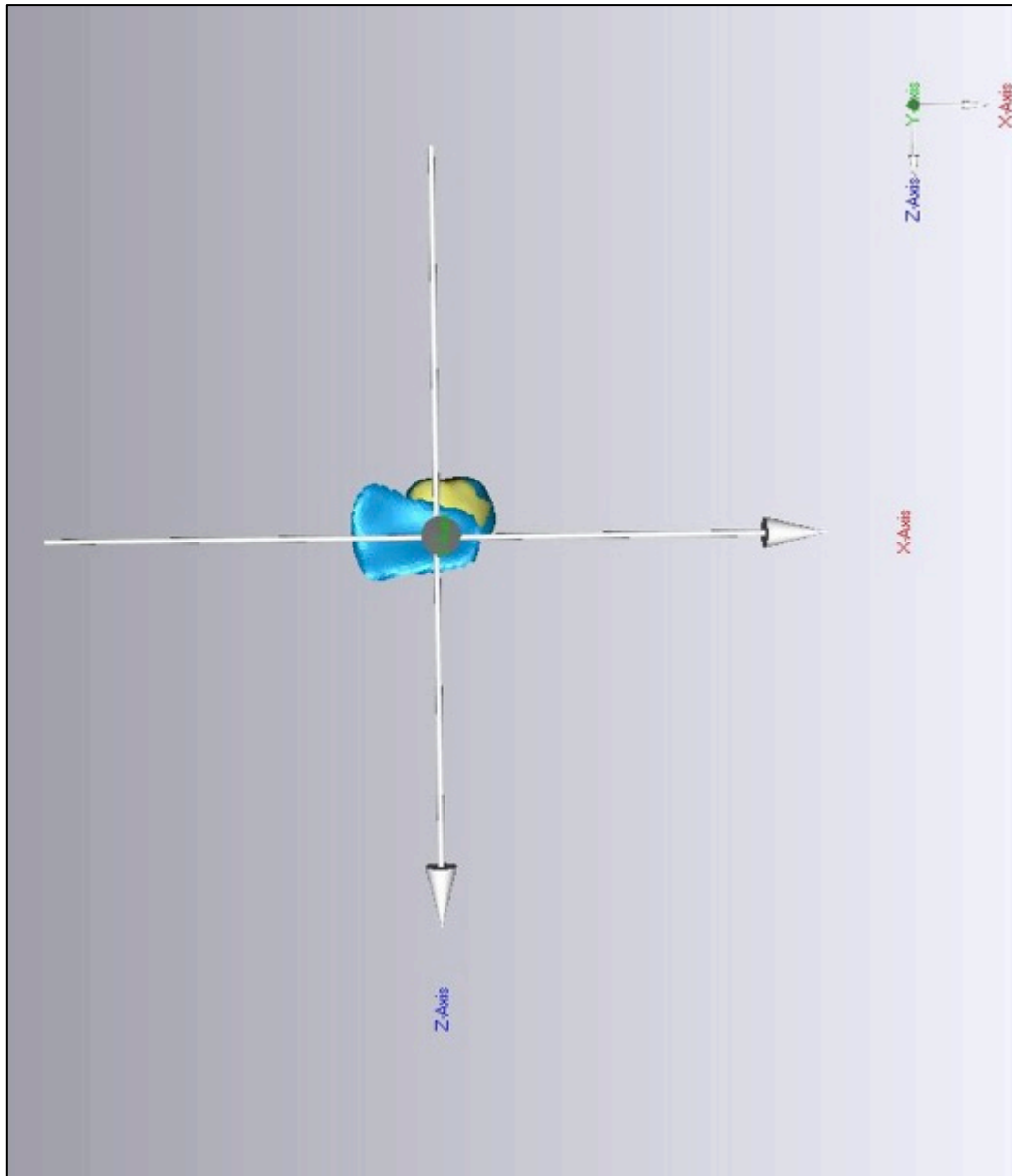


Figure 7 : Alignement des surfaces articulaires d'un métatarse III sur les 3 axes X, Y et Z. L'alignement est dans le sens proximo-distal et suit l'axe Y. Ceci est obtenu après traitement par le logiciel Géomagic Studio 10.

Après avoir obtenu ces scans, il va falloir les travailler en fonction des données que l'on veut. Pour cela :

- 1) Sélectionner la région souhaitée (surface articulaire proximale ou distale) :
 - a. Cliquer sur Create Datums (icône verte)
 - b. Sélectionner Axis (Best Fit et Cylinder) ou Plane (Best Fit et Selected région) pour aligner un axe ou un plan sur la surface articulaire sélectionnée.

Pour aligner un axe sur l'axe dorso-plantaire d'un métatarse, sélectionner la surface articulaire, puis sélectionner « Axis ».
- 2) Aligner le scan final sur les 3 axes (**Figure 7**) :
 - a. Dans la partie de gauche, cliquer sur la quatrième icône (petit ordinateur) et cocher la case World Axes pour faire apparaître un plan à 3 axes (X,Y et Z)
 - b. Tools → Alignement → To world
 - c. Choisir quel axe ou quel plan on veut aligner avec le « world », et cliquer sur « Create Pair »
- 3) Une fois la base alignée sur le « World », sélectionner la surface articulaire de la tête en veillant à ne pas en oublier un bout
- 4) Create Features
- 5) Sélectionner l'outil (ici il s'agirait du cylindre ; si le cylindre est dans le sens proximo-distal il faut rogner les côtés de la surface articulaire)
- 6) Apply → OK

Comme cela a été évoqué précédemment, la modélisation 3D offre plusieurs avantages. D'une part elle permet d'obtenir des modèles entiers avec une bonne précision (selon le matériel utilisé). D'autre part, elle permet la sauvegarde des éléments scannés et évite ainsi leur destruction. S'ajoutent à cela les possibilités de diffusions des modèles, des mesures et des résultats grandement facilitées. Malgré cela, certaines limites apparaissent. En effet, cette méthode est tout de même soumise à la subjectivité de l'opérateur, ce qui peut mener à des résultats plus ou moins justes, tant au niveau de la précision que de la fiabilité. De plus, cette méthode est relativement longue : il faut au moins 1h30 pour obtenir un scan correct pour un utilisateur expérimenté et ce temps peut très facilement aller jusqu'à 3h pour obtenir un modèle très satisfaisant.

5- Conclusion générale

Comme nous l'avons vu, l'anthropologie biologique est une science jeune et en pleine expansion. Les avancées dans ce domaine sont permises grâce aux technologies de plus en plus perfectionnées, qui permettent d'obtenir des données et de prendre des mesures où l'œil humain atteint ses limites. En plus de cela, ces technologies ont permis d'apprendre de nombreuses choses sur les structures internes, mais aussi sur le développement de certaines pathologies. D'un point de vue pédagogique, il est indéniable que la modélisation 3D représente un support indispensable. Cependant, dans la démarche de modélisation, il est important de garder à l'esprit que la décision humaine sera toujours un facteur non négligeable dans la collecte de ces données et que cela entraînera inmanquablement des biais dans les résultats. C'est pourquoi, il est utile de déterminer si c'est la fiabilité des résultats ou bien la précision qui est plus importante, pour l'étude que l'on réalise. En effet, cela peut orienter l'opérateur vers une méthode plutôt qu'une autre.

Néanmoins, dans cette étude, cette méthode reste tout de même prometteuse et permettra à terme d'obtenir les résultats attendus. Elle demeure encore à ce jour à l'étude, afin de la perfectionner davantage, puisque lors des tests, certains résultats paraissaient peu crédibles.

Bibliographie

- Badawi-Fayard, J., and E-A. Cabanis. "Three-dimensional Procrustes Analysis of Modern Human Craniofacial Form." *The Anatomical Record* no. 290 (2007): 268–276.
- Bernardini, F., and H. Rushmeier. "The 3D Model Acquisition Pipeline." *Comput Graph Forum*. 21 (n.d.): 149–172.
- Bigoni, L., J. Velemínská, and J. Brůžek. "Three-dimensional Geometric Morphometric Analysis of Cranio-facial Sexual Dimorphism in a Central European Sample of Known Sex." *HOMO - Journal of Comparative Human Biology* 61, no. 1 (2010): 16–32.
- Byrne, P.J., and J.R. Garcia. "Autogenous Nasal Tip Reconstruction of Complex Defects : a Structural Approach Employing Rapid Prototyping." *Arch. Facial Plastic Surg.* 9 (2007): 358–364.
- Coqueugniot, H, P Desbarats, B Dutailly, and M Panuel. "Les Outils De L'imagerie Médicale Et De La 3D Au Service Des Maladies Du Passé." *Virtual Retrospect* 4. Archeovision (2009): 177 – 180.
- Drapeau, Michelle S.M., and Elizabeth H. Harmon. "Metatarsal Torsion in Monkeys, Apes, Humans and Australopiths." *Journal of Human Evolution* 64, no. 1 (January 2013): 93–108.
- Elftman, H., and J. Manter. "The Evolution of the Human Foot, with Especial Reference to the Joints." *American Journal of Physical Anthropology* 70 (1935a): 56–67.
- Elftman, H., and J. Manter. "Chimpanzee and Human Feet in Bipedal Walking." *American Journal of Physical Anthropology* 20 (1935b): 69–79.
- Kalm, Pehr, Pierre Morisset, and Guy Trad Bethune. "Voyage De Pehr Kalm Au Canada En 1749" (1977).
- Kappelman, J. "Advances in Three-dimensional Data Acquisition and Analysis. In : Strasser E, Fleagle J, Rosenberger A, McHenry H (eds) Primate Locomotion." *Plenum, New-York* (1998): 205–222.
- Largey, Arnaud. "Three-dimensional Analysis of the Intrinsic Anatomy of the Metatarsal Bones." *The Journal of Foot & Ankle Surgery* 46, no. 6 (2007): 434–441.
- Lewis, O.J.. "The Joints of the Evolving Foot. Part III. The Fossil Evidence." *American Journal of Physical Anthropology* 131 (1980): 275–298.
- Lewis, O.J. "Functional Morphology of the Evolving Hand and Foot." *Oxford University Press* (1989).
- Martin, R., and K. Saller. "Lehrbuch Der Anthropologie." *Gustav Fisher Verlag, Stuttgart.* (1957).
- Meyrueis, P., A. Cazenave, and R. Zimmermann. "Biomechanics of Bones and Treatment of Fractures." *EMC-Rhumatologie Orthopédie* 1 (2004): 64–93.
- Morton, D.J. "Evolution of the Human Foot." *American Journal of Physical Anthropology* 5 (1922): 305–336.
- Morton, D.J. "Evolution of the Human Foot II." *American Journal of Physical Anthropology* 7 (1924): 1–52.
- Neubauer, S.P. Gunz, and J.-J. Hublin. "The Pattern of Endocranial Ontogenetic Shape Changes in Human." *Journal of Anatomy* 215, no. 3 (n.d.): 240–255.
- Oxnard, C.E., and F.P. Lisowski. "Functional Articulation of Some Hominoid Foot Bones : Implications for the Olduvai (Hominid 8) Foot." *American Journal of Physical Anthropology* 52 (1980): 107–117.
- Perrott, J.W. "Anatomie." Edition Vigot (1984): 496.
- Ponce de Leon, L. Golovanova, V. Doronichev, G. Romanova, T. Akazawa, O. Kondo, H. Ishida, and C.P.E. Zollikofer. "Neanderthal Brain Size at Birth Provides Insights into the Evolution

- of Human Life History.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, no. 37 (2008): 13764–13768.
- Rowe, J., and A. Razdan. “A Prototype Digital Library for 3D Collections: Tools to Capture, Model, Analyze, and Query Complex 3D Data.” *Museums Ans the Web, Charlotte NC*. (2003).
- Schneider, W, and K Knahr. “Metatarsophalangeal and Intermetatarsal an- Gle: Different Values and Interpretation of Postoperative Results Depen- Dent on the Technique of Measurement.” *Foot Ankle Int* 19 (1998): 532–536.
- Silcox, M.T., J.I Bloch, D.M., M. Godinot, T.M. Ryan, F. Spoor, and A. Walker. “Semicircular Canalsystem in Early Primates.” *Journal of Human Evolution* 56, no. 3 (2009): 315–327.
- Sladek, Vladimir, Patrik Galeta, and Daniel Sosna. “Measuring Human Remains in the Field: Grid Technique, Total Station, or MicroScribe?” *Forensic Science International* 221, no. 1 (2012): 16–22.
- Slide, D.E. “GRF-ND: Generalized Rotational Fitting of N-dimensional Landmark Data.” *Department of Ecology and Evolution, State University of New York, Stony Brook, New York*. (1992).
- Smith, T.M, K. Harvati, D.J. Reid, J.-J. Hublin, and E. Panagopoulou. “Dental Development and Enamel Thickness in the Lakonis Neanderthal Molar.” *American Journal of Physical Anthropology* 138 (2009): 112–118.
- Stanford, C., J.S. Allen, and S.C. Anton. “Biological Anthropology.” *New-Jersey: Pearson Education Inc.* (2009).
- Subsol, Gérard. “Traitement Automatique D’images Tridimensionnelles Pour L’étude Morphométrique De Fossiles Paléanthropologiques: Le Problème De La Définition Des Repères 3D.” *132e Congrès National Des Sociétés Historiques Et Scientifiques* (2008).
- Tate, J.R., and C.E. Cann. “High-Resolution Computed Tomography for the Comparative Study of Fossil and Extant Bone.” *American Journal of Physical Anthropology* no. 58 (1982): 67–73.
- Thomas, J, M Kunkel, R Lopez, and D Spark. “Radiographic Values of the Adult Foot in Standardized Population.” *The Journal of Foot & Ankle Surgery* 45 (2006): 3–12.
- Tocheri, M.W. “Chapter 4 : Laser Scanning: 3D Analysis of Biological Surfaces.” In *Advanced Imaging in Biology and Medicine.*, 2009.
- Weaver, J.-J. Hublin, and T.D. “Neanderthal Birth Canal Shape and the Evolution of Human Chilbirth.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, no. 16 (2009): 6429–6430.
- Weber, G.W. “Another Link Between Archaeology and Anthropology: Virtual Anthropology.” *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* (2013).
- Zioupou, P., J.D. Currey, and A.J. Hamer. “The Role of Collagen in the Declining Mechanical Properties of Aging Human Cortical Bone†” 45, no. 2 (1999): 108–116.
- Zollikofer, C.P.E., and M.S. Ponce de Leon. “Virtual Reconstruction: a Primer in Computer-assisted Paleontology and Biomedicine.” *Wiley, Hoboken, NJ*. (2005).
- Zollikofer, C.P.E., and J.D. Weissmann. “A Morphogenetic Model of Cranial Pneumatization Based on the Invasive Tissue Hypothesis.” *Anatomical Record* 291, no. 11 (2008): 1446–1454.

Annexes

Annexe 1 – Tableau de répartition des tâches

Intervenant	Idée originale	Bibliographie	Mise en place du protocole	Collecte de données	Analyse	Rédaction
Principal	MD	GR	MD	GR	MD, GR	GR
Secondaires		MD, ER, MP, JFM	GR	JFM		MD, ER

GR : Gabriel Roy, stagiaire

MD : Michelle Drapeau, maître de stage

ER : Elemline Raguin, doctorante

MP : Marine Puech, doctorante

JFM : Judith Forgue-Marceau, doctorante

Annexe 2 – Calendrier des tâches

