



HAL
open science

Apport des techniques d'imagerie dans l'identification et la caractérisation des pratiques de modifications artificielles du crâne dans les populations du Centre-Ouest de la Mésoamérique

Sélim Natahi

► **To cite this version:**

Sélim Natahi. Apport des techniques d'imagerie dans l'identification et la caractérisation des pratiques de modifications artificielles du crâne dans les populations du Centre-Ouest de la Mésoamérique. Anthropologie biologique. Université de Bordeaux, 2019. Français. NNT : 2019BORD0418 . tel-03763509

HAL Id: tel-03763509

<https://theses.hal.science/tel-03763509v1>

Submitted on 29 Aug 2022

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

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

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE Sciences et environnements
SPÉCIALITÉ Anthropologie biologique

Par Sélim Natahi

**APPORT DES TECHNIQUES D'IMAGERIE DANS L'IDENTIFICATION ET LA
CARACTÉRISATION DES PRATIQUES DE MODIFICATIONS ARTIFICIELLES
DU CRÂNE DANS LES POPULATIONS DU CENTRE-OUEST DE LA
MÉSOAMÉRIQUE**

*Sous la direction de : Priscilla BAYLE
et la co-direction de : Grégory PEREIRA*

Soutenance prévue le 19 décembre 2019

Membres du jury :

*Mme TIESLER Vera, Professeur, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida
M. BRAGA José, Professeur, Université de Toulouse 3 Paul Sabatier
Mme BAYLE Priscilla, Maître de conférence, Université de Bordeaux
M. PEREIRA Grégory, Directeur de recherche, CNRS Paris
M. MITTEROECKER Philipp, Maître de conférence, Universität Wien
Mme THOMAS Aline, Maître de conférence, Musée de l'Homme, Paris
M. MAUREILLE Bruno, Directeur de recherche, CNRS Bordeaux*

*Rapporteuse
Rapporteur
Directrice
Co-directeur
Examineur
Examinatrice
Président*

Résumé

Les modifications artificielles du crâne désignent les pratiques par lesquelles un(e) praticien(ne) modifie le crâne d'un nourrisson à la naissance par massage ou apposition d'un appareil céphalique indépendant ou associé à un berceau. Ces pratiques avaient pour but d'intervenir sur la forme physiologique d'un crâne afin de le transformer et le modeler selon une convenance. L'importance de la diversité des formes témoigne directement des différences de techniques employées au cours de ce processus culturel. En Mésoamérique, ces techniques montrent une diversité de formes particulièrement importante, interprétable à la lumière de la mosaïque de cultures qui y foisonnèrent. Au sein de cette aire culturelle, le Centre-Ouest mésoaméricain ne fait pas exception et montre également nombre d'occurrences attestant leur emploi. Certains indices laissent présager que leur expression pouvait être sous-tendue par la volonté d'apposer l'identité culturelle d'un groupe à l'individu qui en serait le porteur. Puisque transcrivant vraisemblablement cette appartenance, leur identification et leur caractérisation constituent un enjeu de taille dans le contexte de l'archéologie de la région, mais aussi à plus large échelle (i.e., celle des Amériques). Toutefois, au cours de la période postclassique (900 – 1500 apr. J.-C.) et en lien probable avec un phénomène migratoire d'importance, de nouveaux types de pratiques semblent voir le jour et se caractérisent par des formes plus discrètes, difficilement discernables de la variation physiologique « naturelle ». Les doutes quant à la réalité de l'existence de ces formes traduisent les limites dont peuvent souffrir les méthodes traditionnelles d'identification et de différenciation des pratiques de modifications artificielles crâniennes. Le recours à des méthodes de morphométrie tridimensionnelle, employées sur des données obtenues par scanner de surface et tomographie, offre la possibilité de palier certaines limites inhérentes aux systèmes de classification morphoscopiques traditionnellement utilisés. En combinant des méthodes d'analyse de la forme du crâne, de la distribution d'épaisseur de la voûte et de la covariation de ces paramètres par morphométrie géométrique, nous avons pu confirmer l'existence de formes de modifications *a minima* à la période postclassique, et mettre en évidence leur nature variée. L'obtention de ces formes répond certainement à d'autres intentions que celle d'apposer une identité visuelle sur le crâne d'un individu. Par ailleurs, la quantification fine des différences chez des individus appartenant non seulement à la période postclassique, mais aussi aux périodes préclassiques (600 av. J.-C. – 300 apr. J.-C.) et classiques/épiclassiques (300 – 900 apr. J.-C.), a permis de mesurer la variabilité de ces formes, dont les différences de degrés de standardisation peuvent traduire la diversité des techniques utilisées pour leur obtention ; techniques qui avaient pourtant été considérées comme homogènes sur la base des systèmes traditionnels de classification. Enfin, ce travail ouvre la voie à une approche intégrée combinant analyses morphoscopiques et morphométriques afin de faciliter la reconnaissance et la différenciation de ces pratiques répandues dans de nombreuses populations, et ce y compris pour des crânes dont l'intégrité osseuse a été altérée taphonomiquement.

Mots-Clefs : Modifications artificielles du crâne, Modifications artificielles du crâne *a minima*, Morphométrie géométrique 3D, Semilandmarks, Variation de conformation, Epaisseur de la voûte crânienne, Bioarchéologie, Anthropologie biologique.

Abstract

Artificial cranial modifications is the practice of transforming the skull of a newborn via daily massages or the implementation of a cephalic device independent of or associated to a cradle. These practices were performed in order to shape or mold the skull in a specific way. The variation in resulting forms directly relates to the differences in the utilized techniques. In West Mesoamerica, where the diversity of these practices has been evaluated, some studies suggest a relationship between types of modifications and ethnic identity. Therefore, identifying and differentiating artificial cranial modifications is a major concern for the regional archaeology. However, it is presumed that along the Postclassic period (900 – 1500 AD), more subtle variants of artificial cranial modifications were used. The visual examination systems traditionally employed to identify and characterize artificial cranial modifications fail to provide a clear cut-off between these forms and the physiological “natural” variation. The quantification of fine variations between individuals addressed by 3D morphometrics analyses (i.e., geometric morphometrics and the study of the cranial vault thickness) using images obtained via surface laser scanning and computed tomography procedures are likely to overcome the limits of the traditional classificatory systems. In this work, we have demonstrated the efficiency of fine shape changes quantification in evidencing and differentiating mild forms of artificial cranial modification from the Postclassic period. The form trends found in this study suggest they may relate to cultural considerations other than a visual statement of an identity. Furthermore, analyses of shape changes, cranial vault thickness arrangement and their covariation have also been performed among individuals from the Preclassic (600 BC – 300 AD), Classic/Epiclassic (300 – 900 AD) and Postclassic periods. We have shown high amounts of variation within certain artificial cranial modification variants identified visually, which suggest they may result from different technical processes. Finally, the integrated approach combining visual examination and morphometrics has provided valuable information for the recognition and differentiation of the widespread practices of artificial cranial modifications, including when the bone preservation is poor.

Keywords: Artificial cranial modification, mild forms of artificial cranial modification, 3D geometric morphometrics, Semilandmarks, Cranial vault thickness, Shape variation, Mesoamerica, Bioarchaeology, Biological Anthropology.

PACEA, UMR 5199, Université de Bordeaux, Bâtiment B8, allée Geoffroy Saint-Hilaire, 33615 Pessac cedex, France

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier Vera TIESLER ainsi que José BRAGA pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce manuscrit. Mes remerciements s'adressent aussi à Aline THOMAS, Philipp MITTEROECKER et Bruno MAUREILLE pour avoir accepté d'être les examinateurs de ce travail.

Je remercie mes directeurs de thèse, Priscilla BAYLE et Grégory PEREIRA de m'avoir encadré durant ces trois années. Plus spécifiquement, merci Priscilla pour ton enthousiasme ainsi que pour tes relectures et corrections de derniers instants. Grégory, merci pour les opportunités et la confiance que tu m'as accordées pour ce sujet.

Je tiens à remercier tout particulièrement Michael COQUERELLE, pour son intérêt, son aide précieuse dans l'analyse des données, ainsi que pour son soutien qui dure depuis le début de cette thèse.

Cette recherche n'aurait pas pu voir le jour sans le soutien financier du LaScArBx, qui m'a accordé une bourse de doctorat ainsi qu'un environnement adéquat pour les analyses et les voyages. Je remercie également l'ANR MESOMOBILE pour avoir soutenu ce projet en apportant un soutien financier à nombre d'analyses. Enfin, j'adresse également mes remerciements au CEMCA, qui, en plus de m'avoir accueilli, a facilité l'accès aux collections et a également mis en place les moyens logistiques et financiers pour me permettre de réaliser une partie des analyses entreprises dans ce travail de thèse.

Merci aux membres de mon comité de thèse : Viviana TORO-IBACACHE, Paul O'HIGGINS, Yann HEUZE et Francesco D'ERRICO pour leur implication et les conseils prodigués qui ont permis le bon déroulement de cette thèse. Merci également à Vera TIESLER et Jorge GOMEZ-VALDES pour leurs conseils.

Merci au laboratoire PACEA de m'avoir accueilli et offert un environnement de travail favorable.

Je tiens à remercier tout particulièrement les membres administratifs du laboratoire PACEA : Jean-François CARO, Nathalie KELLAY, Catherine MOREL-CHEVILLET, et Régine WORTMANN pour leur efficacité et l'aide précieuse apportée au quotidien dans les démarches administratives et l'organisation des missions.

Je voudrais également remercier les personnes et organismes de recherche ayant facilité le bon déroulement de ce travail : Gisselle GARCIA et Kristen MABLE, Stefan NAJI, Hannah TABOADA, Rolf QUAM, Eric DELSON, et Jeffrey LAITMAN d'avoir fait en sorte que je puisse parvenir à transporter et scanner certains individus des collections du Musée d'Histoire Naturelle de New-York. Merci à Bernard TALLET et Françoise LESTAGE, directeurs du CEMCA ainsi qu'à tous les membres de cet organisme pour leur gentillesse et ces bons moments passés ensemble : Sofia NOYOLA, Marcella LEÓN, Martín DEL CASTILLO, Mauricio VALLARTA, Viviane ANDRÉ, Rodolfo AVILA. Je remercie l'ensemble du laboratoire de l'ISEM de Montpellier pour leur accueil et gentillesse. Merci à Renaud LEBRUN pour sa pédagogie et son aide dans la manipulation des micro-CT. Enfin, merci à Patrice COURTAUD pour m'avoir permis d'accéder aux collections de l'ostéothèque de Pessac.

Merci aux échanges, conseils et discussions prolifiques et intéressantes que j'ai pu entretenir au sein du laboratoire avec Frédéric SANTOS, Yann HEUZE, Clément ZANOLLI, et Ronan LEDEVIN mais aussi à l'extérieur notamment lors de colloques internationaux avec Susan ANTÓN, Matthew SKINNER, Philipp MITTEROECKER, Corey RAGSDALE, Julien CLAUDE. Merci à Gilles GESQUIERE et Jean DUMONCEL pour m'avoir permis l'accès au logiciel Endex.

Merci à l'ensemble des postdoctorants de PACEA : Jessica JOGANIC, Pierre GUYOMARC'H, Antony COLOMBO, Maïté RIVOLLAT, Mona LE LUYER, Emmy BOCAEGE, Vito SPARACELLO, Irene DORI, Véronique FORBES et aux doctorants de PACEA : Marie MATU, Mathilde SAMSEL, Claire-Elise FISCHER, Caroline PARTIOT, Marion BINDE,

Anthony SECHER. Merci aux anciens et actuels doctorants d'ArchAm pour ces bons moments passés ensemble depuis maintenant pas mal d'années : Marion FOREST, Aurélie MANIN, Elsa JADOT, Alejandra CASTAÑEDA, Elodie BEAULIEU, Rémi MEREUZE, Julien HIQUET. Merci également à tous les membres du laboratoire ArchAm de m'avoir soutenu depuis la licence et de m'avoir toujours accueilli parmi eux avec beaucoup de bienveillance : Brigitte FAUGERE, Véronique DARRAS, Claire ALIX, Juliette TESTARD, Liliana STALENQ, Nicolas GOEPFERT, Dominique MICHELET et Eric TALADOIRE.

Un énorme merci aux autres collègues doctorants et postdoctorants de l'international pour leur soutien, leur aide et leurs relectures dans les derniers temps de cette thèse : Helen FEWLASS, Thomas DAVIES, Elena ZAVALA, Adeline LE CABEC et Zewdi TSEGAI.

Merci aux copains qui ont agrémenté les soirées en rires et convivialité : Marie et Max, Caro et Aurélien, Laure, Monica, Marion, Greg et Sofia, Antonin et Marie, Karo et Baloo, Isa et Lilian, Arnaud, Lisa et Max, Raph et Pamina, Alban, Emilio, Romain, Johnatan, Sandra, Delphine, Malo, Pierre et Manon. Enfin, merci infiniment à mes collègues et amis : Isaac BARRIENTOS et Osiris QUEZADA pour leur accueil, leur aide, leur soutien et les belles soirées mexicaines passées ensemble.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers ma famille bordelaise : Stéphanie, Christophe, Léa et Théo, pour tous ces moments passés ensemble à Bordeaux. Je remercie aussi chaleureusement ma famille de Paris : Yves et Martine, Pascale, pour leur soutien.

Enfin je souhaite remercier mes parents pour leur soutien indéfectible et leur enthousiasme sans lequel je n'aurais jamais pu compléter ce travail.

Alexandra, merci...

Table des matières

Remerciements	1
Table des figures	9
Liste des tableaux	13
Liste des annexes.....	13
Introduction	15
1 Identification et caractérisation des types et techniques de modifications artificielles du crâne	19
1.1 Identification et caractérisation d'une pratique de modification artificielle du crâne par l'analyse morphoscopique.....	20
1.1.1 Les systèmes de classification.....	21
1.1.2 Différencier les modifications artificielles du crâne	26
1.1.3 Les caractères morphologiques non-métriques	31
1.2 Identifier et caractériser les modifications artificielles du crâne via l'analyse morphométrique	35
1.2.1 Les mesures linéaires et angulaires	36
1.3 La morphométrie géométrique	38
2 Morphogenèse crânienne et modalités de croissance dans le cadre de modifications artificielles du crâne	41
2.1 Données embryologiques et anatomiques du neurocrâne.....	41
2.1.1 Le neurocrâne	41
2.1.2 Les méninges.....	44
2.1.3 Les cloisons de la dure-mère	44
2.2 Ontogénie postnatale	47
2.3 Ontogénie mécaniquement contrainte dans le cas de modifications artificielles du crâne	53
2.3.1 Les matrices fonctionnelles.....	53
2.3.2 Les matrices fonctionnelles et la modification intentionnelle du crâne	55
2.3.3 Croissance suturale et contraintes mécaniques	59
3 Présentation des sites archéologiques étudiés	63
3.1 Sites préclassiques	63
3.1.1 Les sites Chupícuaro de la vallée d'Acámbaro	63
3.2 Sites classiques	64

3.2.1	Les sites du bassin de Zacapu	64
3.3	Les sites postclassiques	65
3.3.1	Les sites du bassin de Zacapu	65
3.3.2	La vallée de Pátzcuaro.....	68
3.4	Synthèse sur l'évolution des modifications artificielles du crâne dans le Centre Ouest de la Mésoamérique	69
4	Matériels et méthodes.....	73
4.1	Echantillon.....	73
4.2	Estimation de l'âge au décès et détermination du sexe	74
4.2.1	Influence de l'âge sur la conformation neurocrânienne et sur l'épaisseur de la voûte	75
4.2.2	Estimation de l'âge au décès	76
4.2.3	Influence du sexe sur la conformation neurocrânienne et sur l'épaisseur de la voûte	76
4.2.4	Détermination du sexe.....	77
4.3	Acquisitions et traitement des données 3D.....	78
4.3.1	Acquisitions de données surfaciques via scanner laser	79
4.4	Traitement des données surfaciques via scanner laser	80
4.5	Acquisitions tomодensitométriques	81
4.6	Traitement des données issues de la tomодensitométrie	85
4.7	Acquisitions microtomодensitométriques	87
4.8	Traitement des données issues de la microtomодensitométrie.....	89
4.9	Analyses des formes et conformations via morphométrie géométrique.....	91
4.9.1	La morphométrie	91
4.9.2	Concepts	92
4.9.3	Allométrie.....	93
4.10	La morphométrie géométrique.....	94
4.10.1	Déformations morphologiques et fonction de spline en plaque mince ou thin plate spline (TPS).....	98
4.11	Semilandmarks.....	101
4.12	La superposition Procrustes	105
4.13	Espace de conformation et dimensionnalité	107
4.14	Estimation de données manquantes	110
4.15	Traitement statistique et analyse en composantes principales.....	114
5	Résultats	119

5.1	Neurocranial shape variation among Tarascan populations: Evidence for varying degrees in artificially modified crania in pre-Hispanic West Mexico (1200–1400 AD)...	119
	Neurocranial shape variation among Tarascan populations: Evidence for varying degrees in artificially modified crania in pre-Hispanic West Mexico (1200–1400 AD).....	120
5.2	Evaluating the efficiency of isolated calvaria bones shape changes in the identification and differentiation of artificial cranial modification techniques among pre-Hispanic west Mesoamerican populations.....	150
5.3	Identification and characterization of artificial cranial modifications among pre-Hispanic West Mesoamerican populations using covariation analysis of cranial vault thickness arrangement and calvaria bones shapes.....	183
6	Synthèse et perspectives.....	215
	Bibliographie.....	Erreur ! Signet non défini.
	Annexes.....	257

Table des figures

Figure 1.1 Exemples de ports de charges et d'utilisation du mecapal. (a) Statuette représentant un porteur. Culture des tombes à puits, Colima (modifié d'après Morante López, 2009). (b) Illustration f46_v issue de la Relación de Michoacán (modifié d'après Alcalá, 2008). (c) Photographie d'un petatero de la ville de México, source : Instituto Nacional de Antropología e Historia. (d) Photographie représentant des enfants portant des charges à l'aide de mecapals, Etat de México, source : Instituto Nacional de Antropología e Historia. (e) Photographie représentant des enfants mayas transportant du bois à l'aide de mecapals, Yucatán, México, source : Instituto Nacional de Antropología e Historia.....	24
Figure 1.2 Exemples des trois grands types de modifications artificielles du crâne de la classification d'Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938). (a) Individu issu de la sépulture 1 du site JR24 présentant une modification de type tabulaire oblique. (b) Individu A de la sépulture 13 du site de Loma Alta présentant une modification de type tabulaire droite. (c) Individu de la culture Paracas présentant une modification de type annulaire (modifié d'après Ferros et al., 2014).....	27
Figure 1.3 Schémas illustrant les principaux variants observés par Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938) pour les modifications artificielles de types tabulaires droits (a – g) et tabulaires obliques (h – l). (a) Forme extrême du type tabulaire droit (b) Forme intermédiaire du type tabulaire droit. (c) Forme plano-frontale du type tabulaire droit. (d) Forme plano-lambdatique. (e) Variante parallépipédique (ou tabulaire supérieure). (f) Forme pseudo-annulaire. (g) Forme bilobée ou trilobée. (h) Forme extrême du type tabulaire oblique. (i) Forme intermédiaire du type tabulaire droit. (j) Forme curvo-frontal. (k) Forme curvo-occipital. (l) Forme bilobée ou trilobée.	29
Figure 1.4 Illustrations des différents types d'appareillage utilisés dans l'obtention de formes tabulaires. (a) Modification artificielle du crâne par apposition d'un appareil céphalique indépendant sur le crâne d'un enfant Shipibo, Pérou (modifié d'après Farabee, 1922). (b) Modification artificielle du crâne obtenu par utilisation d'un berceau sur un enfant Chinook, Etats-Unis d'Amérique (modifié d'après Catlin, 1857).....	30
Figure 1.5 Exemples des différences d'intensité dans l'expression du sulcus sagittal : (a) léger. (b) modéré. (c) important	32
Figure 1.6 Exemple de sulcus postcoronal.....	32
Figure 1.7 Exemple de dépression supra-iniaque.....	33
Figure 1.8 Exemple d'os sutural surnuméraire, ou « wormien ».	35
Figure 1.9 Profil médio-sagittal illustrant les principales mesures prises en compte dans l'étude de Falkenburger (1938).	36
Figure 1.10 Exemple de quadrilatère de Klaatsch appliqué par Romano (1965) au cas n°4 du site de l'Isla del Idolo, Veracruz (modifié d'après Romano, 1965).....	38
Figure 2.1 Bloc craniofacial d'un individu adulte et descriptions des os composant le neurocrâne (modifié d'après Drake et al. 2015). (a) Norma lateralis. (b) Norma occipitalis. (c) Norma verticalis en vue exocrânienne. (d) Norma verticalis en vue et endocrânienne.	42

Figure 2.2 Schéma illustrant les différentes parties du bloc craniofacial.....	42
Figure 2.3 Bloc craniofacial d'un individu nouveau-né en norma lateralis.	43
Figure 2.4 Cloisons de la dure-mère et représentation des étages supra et infra-tentoriels. (a) Coupe sagittale. (b) Norma verticalis de la cavité endocrânienne.	46
Figure 2.5 Schémas illustrant les différents modes de croissance neurocrâniens. (a) La croissance suturale. (b) La croissance par modelage osseux.	48
Figure 2.6 Illustrations montrant l'utilisation d'appareils céphaliques rigides associés à des berceaux, soumettant l'enfant à des forces de compressions constantes à l'origine des formes tabulaires obliques (a) Modifié d'après Catlin (1857) (b) Modifié d'après Meyer (1881).....	58
Figure 3.1 Carte du Centre-Ouest mésoaméricain répertoriant les sites archéologiques.....	66
Figure 3.2 Evolution chronologique des types de modifications artificielles du crâne établi par Pereira (2018) à l'aide de la méthode du sériographe développée par Desachy (2004).	69
Tableau 1 Corpus de crânes considéré	73
Figure 4.1 Exemple d'utilisation du scanner surfacique NextEngine [®] (modifié d'après White, 2015). Le crane est déposé sur une plateforme tournante, permettant ainsi aux rayons laser de scanner la surface avec un angle de 360 degrés	80
Tableau 2 Paramètres des acquisitions tomодensitométriques par individus	82
Figure 4.2 Acquisitions de données tomодensitométriques au Mount Sinai Hospital, New York	84
Figure 4.3 Acquisitions de données tomодensitométriques à la clinique C.T. Scanner del Sur, Mexico.....	84
Figure 4.4 Processus d'acquisition des données tomодensitométriques et des modèles 3D constituant notre étude. Les cranes sont tout d'abord scannés, puis les images obtenues sont reconstruites dans un logiciel de traitement de données d'imagerie (dans notre cas, Avizo [®]) avant leur segmentation et la reconstitution des surfaces 3D.....	85
Figure 4.5 Illustration de la procédure automatique par laquelle le logiciel Endex génère les surfaces 3D des endocastes (modifié d'après Subsol et al., 2010). (a) Placement de la surface sphérique au centre de la cavité endocrânienne. (b) Déformation de la surface sphérique en direction de la surface endocrânienne. (c) Après itérations, obtention de la surface 3D représentant l'endocaste.	86
Figure 4.6 Cartographie des variations d'épaisseurs de la voûte crânienne de l'individu Mich31_sep24 pour l'os frontal, les deux os pariétaux et l'os occipital. Les couleurs chaudes représentent des épaisseurs importantes tandis que les couleurs froides des épaisseurs plus fines.	87
Tableau 3 Paramètres des acquisitions microtomодensitométriques par individus.....	88
Figure 4.7 Procédure d'acquisition des données microtomодensitométriques. Les dents sont tout d'abord enroulées dans une mousse avant d'être placées sur le lit d'acquisition. Les images sont ensuite reconstruites à l'aide du logiciel Avizo [®] , lequel permet également à la segmentation des différents tissus (email, dentine et pulpe).....	89

Figure 4.8 Processus d'extraction de la surface 3D représentant la jonction email-dentine en fonction du plan basal.	90
Figure 4.9 Positionnement des plans basal et bucco-lingual afin d'extraire la coupe à partir desquelles les épaisseurs d'email au niveau des faces linguales et buccales seront calculées. Les traits noirs représentent chaque mesure (elles ont été prises tous les 0.25 mm).	91
Figure 4.10 Illustrations des différences (a) de tailles, (b) de conformations et (c) de formes.	92
Figure 4.11 Illustration des trois types d'allométrie : ontogénique, statique et évolutive (modifié d'après Klingenberg, 1996).	94
Figure 4.12 Illustrations des grilles de déformations proposées par Dürer (gauche ; modifié d'après Dürer, 1528) et d'Arcy Thompson (modifié d'après d'Arcy Thompson, 1917).	95
Figure 4.13 Illustrations des différents types de landmarks proposé par Bookstein (1991). ...	96
Figure 4.14 Exemple d'atlas de référence (ou template) utilisé pour notre étude.	97
Figure 4.15 Atlas de référence (ou template) utilisé dans l'étude des quantifications des différences de conformations de la jonction émail-dentine pour les deuxièmes molaires supérieures (modifié d'après Le Luyer, 2016).	98
Figure 4.16 Illustrations de changements morphologiques décrits par la composante affine ou uniforme (modifié d'après D'arcy Thompson, 1917).	99
Figure 4.17 Illustrations, par le biais d'une grille de déformation, de la composante non-uniforme liée aux différences de configurations entre un individu représentant l'atlas de référence (ou template ; représenté par les points rouges) et un individu cible (représenté par les points verts).	100
Figure 4.18 (a) Illustration de la déformation d'une image par TPS le long des axes négatifs et positifs d'une composante principale. (b) Illustration de la déformation d'une surface 3D par TPS le long d'une trajectoire de croissance (modifié d'après Mitteroecker & Gunz, 2013).	101
Figure 4.19 Représentation des différentes étapes de glissement de semilandmarks sur un individu cible avec le critère de minimisation de l'énergie de courbure. (a) positions originales des deux semilandmarks. (b) phase de relaxation (glissement le long des tangentes). (c) projection sur la surface 3D.	104
Figure 4.20 Représentation des différentes étapes constituant l'analyse Procrustes généralisée : la translation, la mise à l'échelle et la rotation.	106
Figure 4.21 (a) Schéma d'un triangle représenté par trois coordonnées à deux dimensions (b) Représentation de l'espace de conformation de Kendall pour différentes conformations de triangles décrites par trois coordonnées à deux dimensions.	108
Figure 4.22 Illustration de l'espace de conformation de Kendall, de l'espace de pré-conformation et de l'espace tangent ainsi que des différentes projections d'un individu A au sein de ces différents espaces.	109
Figure 4.23 Exemple de reconstruction d'une surface 3D après estimation des données manquantes. (a) surface 3D originelle de l'individu Mich 31_sep37-10 (b) surface 3D reconstruite de l'individu Mich 31_sep37-10.	113

Figure 4.24 Schéma des différentes étapes qui constituent l'analyse en composantes principales.	115
Figure 6.1 Projection des individus appartenant au groupe NJ3 sur les deux premières composantes issues des analyses en composantes principales réalisées sur : (a) des individus présentant des modifications tabulaires droites fronto-occipitales et un groupe de contrôle. (b) des individus présentant des modifications tabulaires droites plano-lambdatiques.	Erreur !
Signet non défini.	
Figure 6.2 (a) Analyse en composantes principales (ACP) comparant les conformations des deuxièmes molaires supérieures chez des individus classiques/épiclassiques avec deux individus du site de Malpais Prieto. (b) Illustration des différences de conformation que caractérise la deuxième composante (PC 2).....	222
Figure 6.3 Variations topographiques d'épaisseurs d'émail des côtés linguaux et buccaux des deuxièmes molaires supérieures.....	223
Figure 6.4 Cartographies en 3D de l'épaisseur de l'émail chez deux individus classiques/épiclassiques et les deux individus de Malpaís Prieto.	224
Figure 6.5 Illustration du protocole de reconstitution virtuelle des crânes prélevés en blocs sur le site de Rincón de las Flores.....	228
Annexe 1 Liste des individus considérés dans notre travail.....	257
Annexe 2 Supplementary information du premier article.....	261
Annexe 3 Supplementary information Table S1 du deuxième et troisième article présentant les paramètres d'épaisseur de coupe et de taille des pixels des acquisitions tomodensitométriques.....	267
Annexe 4 Compte-rendu de l'ouvrage de Jérôme Thomas : Les Incas et la déformation intentionnelle du crâne. Un marqueur social, culturel, ethnique et religieux.....	268
COMPTE RENDU / REPORT	268

Liste des tableaux

Tableau 1 Corpus de crânes considéré	73
Tableau 2 Paramètres des acquisitions tomодensitométriques par individus	82
Tableau 3 Paramètres des acquisitions microtomодensitométriques par individus	88

Liste des annexes

Annexe 1 Liste des individus considérés dans notre travail.....	257
Annexe 2 Supplementary information du premier article	261
Annexe 3 Supplementary information Table S1 du deuxième et troisième article présentant les paramètres d'épaisseur de coupe et de taille des pixels des acquisitions tomодensitométriques	267
Annexe 4 Compte-rendu de l'ouvrage de Jérôme Thomas : Les Incas et la déformation intentionnelle du crâne. Un marqueur social, culturel, ethnique et religieux.....	268

Introduction

Le corps humain a régulièrement constitué le support et l'objet d'expressions de pratiques culturelles variées (scarifications, tatouages, mutilations dentaires ou encore perçage de parties du corps). Parmi celles-ci, les modifications artificielles du crâne consistent en des pratiques au cours desquelles une personne intervient sur la croissance du crâne d'un enfant en bas âge afin d'en modifier la forme. Ces pratiques dont les plus vieux témoignages remontent au Pléistocène supérieur en Australie (Brothwell, 1975 ; Brown, 1981 ; Antón & Weinstein, 1999 ; Durband, 2008 ; Brown, 2010 ; Durband, 2014) et dans le Nord-Est de la Chine (Wu, 1961 ; Brothwell, 1975 ; Ni et al., 2019 ; Zhang et al., 2019), ont été largement répandues parmi les populations du passé et subactuelles, et témoignent de différents modes d'intervention dans leur exécution. La modification artificielle du crâne qu'elle ait été obtenue par apposition de coiffes, de tablettes, de berceaux, d'appareils céphaliques plus élaborés ou encore par le biais de massages quotidiens de la voûte crânienne, répond à des considérations profondément ancrées dans les croyances et le mode d'appartenance social ou symbolique des populations l'ayant pratiquée. Si nombre d'auteurs ont exclusivement considéré ses modalités d'expression comme résultant de la volonté d'attribuer une identité visuelle à un individu, que celle-ci puisse renvoyer à la revendication de l'identité culturelle d'un groupe (e.g., Özbek, 2001 ; Torres-Rouff, 2002 ; Blom, 2005 ; Ricci et al., 2008 ; Hakenbeck, 2009 ; Lozada, 2011 ; Tiesler, 2014 ; Mayall et al., 2017 ; Fernandes et al., 2019 ; Mayall & Pilbrow, 2019) ou à l'affirmation d'un statut social privilégié (e.g., Marcus & Flannery, 2004 ; Ricci et al., 2008 ; Geller, 2011b ; Khudaverdyan, 2011 ; Sharapova & Razhev, 2011 ; Okumura, 2014), des études plus approfondies font état de considérations plus complexes à leur égard. En effet, d'autres auteurs voient aussi parmi les intentions qui sous-tendent les pratiques de modifications artificielles du crâne, des considérations liées aux soins du nourrisson, à la cosmogonie ou à des rites de passage d'un âge à un autre (e.g., Tiesler, 2014 ; Duncan, 2018 ; Tiesler & Lozada, 2018).

L'abondance des pratiques de modifications crâniennes dans le cadre de l'archéologie préhispanique en a fait le sujet de nombreuses études sur l'ensemble du continent américain. La Mésoamérique n'y fait pas exception d'autant que les conditions environnementales ainsi qu'un cadre légal favorable en font un des derniers terrains en Amérique du Nord où les investigations archéologiques permettent la mise au jour de nouveaux restes humains. La Mésoamérique désigne une aire culturelle au sein de laquelle ont fleuri des cultures diverses mais ayant tout de même partagé une certaine unité culturelle définie par plusieurs traits

(Kirchhoff, 1943, 1960). Les pratiques de modifications du crâne comptent parmi ceux-ci et nombreux sont les exemples qui attestent de la fréquence importante de cette pratique ainsi que de sa grande diversité de formes dans le monde mésoaméricain (Tiesler, 2014). Diverses opérations conduites dans le Centre-Ouest de l'aire mésoaméricaine ont livré des restes humains parmi lesquels des crânes d'individus présentant les signes de ces pratiques (Arnauld et al., 1993 ; Carot, 1993 ; Darras et al., 1999 ; Pereira, 1999 ; David ; Darras & Faugère, 2007). Si leur fréquence d'expression est considérable dans les populations du Centre-Ouest mésoaméricain au cours des périodes préclassiques (600 av. J.-C. – 100 apr. J.-C.) et classiques/épiclassiques (300 – 900 apr. J.-C.), la diversité des formes attestant de l'existence de pratiques différentes questionne les valeurs qui en sous-tendent les expressions. Dans le bassin de Zacapu, au cours du Postclassique moyen (1200 – 1400 apr. J.-C.) l'apparition d'individus ne présentant aucune trace de modifications intervient au cœur même d'une période marquée par de profondes transformations culturelles et sociales (Pereira et al., in press). Les changements importants caractérisés par les nouvelles modalités d'occupation du territoire sont interprétées comme les conséquences de l'installation d'une nouvelle population dans la région (Faugère-Kalfon, 1996 ; Michelet et al., 2005 ; Forest, 2014 ; Pereira et al., in press). Cette information indiquerait alors une valeur identitaire attribuée aux pratiques de modifications artificielles du crâne dans la mesure où l'arrivée d'une nouvelle population en perturbe fortement la fréquence d'expression. Toutefois, un tel constat est à nuancer car pour cette même période Pereira (1999, 2018), suspecte l'existence de formes possiblement atténuées et difficilement perceptibles à l'œil nu, mettant par là même en évidence les limites des systèmes typologiques traditionnels grâce auxquels les formes marquées étaient jusqu'alors reconnues et caractérisées.

L'appréhension à des niveaux plus fins de la variabilité des formes de modifications crâniennes artificielles constituait donc un enjeu. Le récent développement des techniques d'imagerie 3D non-destructive et leur actuelle facilité d'accès pouvaient donc offrir l'opportunité de parvenir, non seulement à mieux circonscrire des formes jusque-là difficilement discernables, mais aussi à caractériser la variation des pratiques de modifications afin d'interroger leur standardisation. Ainsi, l'étude des différences de conformation par morphométrie géométrique, en utilisant plusieurs semilandmarks en 3D décrivant précisément la calvaria, paraît tout à fait approprié étant donné la quantification fine des changements morphologiques qu'elle permet (Gunz, 2005 ; Gunz et al., 2005 ; Mitteroecker & Gunz, 2009 ; Gunz & Mitteroecker, 2013). L'exploration des différences d'épaisseurs de la voûte crânienne, accessibles à partir d'analyses

tomodensitométriques, est également à priori tout à fait adaptée à l'identification et à la caractérisation des diverses formes (e.g., Khonsari et al., 2013). En outre, son étude doit également permettre d'apporter de nouveaux éléments de réponse dans la compréhension des impacts des pratiques de modification crâniennes artificielles sur la croissance du neurocrâne.

Nous nous sommes donc efforcés à caractériser finement les changements de conformation de certains types de modifications artificielles du crâne, et nous en avons renseigné la variation morphologique afin d'en discuter la standardisation au sein d'un échantillon de n=96 individus provenant de n=8 sites différents et datés entre 300 av. J.-C. et 1500 apr. J.-C. Une importance a également été accordée à la présentation de nouveaux outils permettant un apport certain dans l'identification et la caractérisation de ces pratiques. Nous avons ainsi testé les trois hypothèses suivantes :

1. Des formes de modifications artificielles crâniennes *a minima* (Pereira, 2018) sont-elles apparues dans le bassin de Zacapu au cours du Postclassique moyen (900 – 1500 apr. J.-C.) et correspondent-elles bien à des faits culturels réels ?
2. Un os isolé de la calvaria présente-t-il un potentiel informatif pour reconnaître et différencier les pratiques de modifications artificielles du crâne ?
3. Des différences de variations d'épaisseurs de la voûte crânienne sont-elles observables entre des individus non-modifiés et des individus présentant des modifications artificielles du crâne mais observables aussi d'un type de modification à un autre ? Mettent-elles en évidence les lieux d'exercice des forces générées par l'appareil céphalique ?

Afin de valider ou infirmer ces trois hypothèses, nous avons défini les trois objectifs suivants et y avons répondu :

En procédant à une quantification fine des différences de conformations du neurocrâne parmi des individus provenant du bassin de Zacapu pour la période postclassique moyenne, et des individus constituant un groupe de contrôle.

En mesurant les différences parmi et entre cinq types de modifications artificielles crâniennes et une série d'individus non-modifiés.

En évaluant la covariation entre la conformation des os de la calvaria et leurs épaisseurs de voûte respectives.

Notre recherche est tout d'abord constituée d'un premier chapitre consacré à l'identification et la caractérisation des pratiques de modifications artificielles du crâne. Dans un second temps, nous nous sommes penchés sur la morphogenèse du crâne afin d'en présenter des éléments susceptibles d'enrichir notre compréhension des mécanismes biologiques à l'œuvre dans le cas d'une croissance mécaniquement contrainte (comme celle intervenant lors des modifications artificielles du crâne). Dans un troisième temps, nous nous attacherons à présenter le corpus des sites sélectionnés pour cette étude. A l'issue de ce dernier chapitre, nous dresserons une synthèse sur l'évolution des pratiques des modifications artificielles du crâne dans le Centre-Ouest de la Mésoamérique. Un quatrième chapitre sera destiné à la présentation de notre matériel d'étude ainsi qu'à celle des méthodes utilisées dans ce travail. Nos résultats s'articulent autour de trois articles dont le premier a été publié dans l'*American Journal of Physical Anthropology* et dont les deux autres sont actuellement en cours de révision. Enfin une dernière partie sera réservée à la synthèse générale des résultats et à la présentation de nouvelles perspectives de cette recherche.

1 Identification et caractérisation des types et techniques de modifications artificielles du crâne

Avant d'aborder le cœur de ce chapitre, nous proposons de faire un point sur la terminologie employée pour caractériser la pratique par laquelle un crâne sera modifié. Nombreux sont les auteurs désignant ces pratiques sous le terme de déformations intentionnelles ou artificielles du crâne (e.g., Delisle, 1880 ; Ambialet, 1893 ; Dingwall, 1931 ; Blackwood & Danby, 1955 ; Moss, 1958 ; Björk & Björk, 1964 ; Delaire & Billet, 1964 ; Ossenberg, 1970 ; El-Najjar & Dawson, 1977 ; Brown, 1981 ; Antón, 1989 ; Dean, 1995 ; Dean O'Loughlin, 1996 ; Antón & Weinstein, 1999 ; Del Papa & Perez, 2007 ; Durband, 2008 ; Cocilovo et al., 2011 ; Geller, 2011a ; Khonsari et al., 2013 ; Cottin et al., 2017). Le terme de déformation nous paraît impropre à désigner ces techniques. En effet, le verbe déformer provient étymologiquement du latin *dēfōrmō*, lequel possède deux sens : il renvoie dans un premier temps à l'action de donner une forme ou de façonner, mais aussi à l'action de rendre difforme, de défigurer ou d'enlaidir (Gaffiot, 2016). Devant la polysémie du terme de déformation et à l'instar de plusieurs auteurs (e.g., Gill, 1985 ; Blom, 2005 ; Daems & Croucher, 2007 ; Fletcher et al., 2008 ; Duncan, 2009 ; Pomeroy et al., 2010 ; Tiesler, 2012a, 2014 ; Valentin et al., 2016 ; Alvarado Viñas & Manzanilla, 2018 ; Pereira, 2018 ; Serna et al., 2019 ; Zhang et al., 2019), nous préférons donc l'emploi du terme de modification dont l'étymologie latine (i.e., *mōdīficō*) renvoie à l'action de régler ou ordonner selon une mesure (Gaffiot, 2016). L'emploi de ce terme s'avère plus approprié dans la mesure où il correspond mieux aux concepts qui sous-tendent l'exécution d'une telle pratique et atteste de la volonté de donner une forme prédéterminée à la tête, comme le confirment certaines études faisant état de standardisation dans les formes de crânes obtenues (e.g., Kuzminsky et al., 2016 ; Mannheim et al., 2018 ; Velasco, 2018). Ce terme est aussi plus inclusif. En effet, si certaines pratiques aboutissent à la transformation en profondeur de la forme d'un crâne, d'autres (comme celles s'apparentant au soin apporté au nouveau-né) consisteront à intervenir sur sa forme dans des mesures moindres, n'aboutissant pas à un aspect « déformé » du crâne. C'est le cas par exemple des massages (cf. *infra*) dont la pratique consiste bel et bien à intervenir sur un crâne pour en arrondir ou en allonger la forme sans pour autant aboutir à une apparence « déformée » manifestement différente de la forme d'un crâne libre de toutes contraintes. Notons également que plusieurs auteurs (e.g., Cheverud & Midkiff, 1992 ; Torres-Rouff & Yablonsky, 2005 ; Scherer, 2018 ; Velasco, 2018 ; Tiesler, 2019) font appel au terme de modelage crânien (« *shaping* » ou « *reshaping* » dans le texte) afin de souligner le caractère intentionnel de la pratique. Les termes de modification artificielle ou de modelage

crânien devraient, à notre sens, être plus valorisés et supplanter celui de déformation dont le terme est encore trop facilement usité.

1.1 Identification et caractérisation d'une pratique de modification artificielle du crâne par l'analyse morphoscopique

L'analyse morphoscopique est la méthode la plus communément utilisée pour identifier et caractériser les modifications artificielles du crâne (e.g., Tiesler, 1998 ; Pereira, 1999 ; Torres-Rouff, 2002 ; Varela & Cocilovo, 2002 ; Knudson & Torres-Rouff, 2009 ; Tiesler, 2010). Cette analyse procède d'un examen visuel de la morphologie du crâne, qui permettra, *in fine*, non seulement d'attester du caractère modifié, mais aussi d'apporter des informations quant à la caractérisation du type de modification artificielle du crâne.

L'existence de plans de compression constitue un premier élément diagnostique déterminant dans l'identification d'une modification artificielle du crâne (Dembo & Imbelloni, 1938). Leur identification repose sur l'observation des différentes courbures du neurocrâne (i.e., plates, convexes ou même concaves ; Dembo & Imbelloni, 1938). Les plans de compression vont non seulement permettre de repérer les régions anatomiques sur lesquelles ont été appliqués les moyens de contention, mais ils pourront aussi rendre compte, selon leur degré d'aplanissement, de l'intensité de la modification crânienne (Tiesler, 2014). D'autres spécificités anatomiques peuvent également dénoter d'une modification crânienne. Les tendances à l'ultra-brachycéphalie ou à l'ultra-dolichocéphalie¹, ou encore l'expression de certains caractères morphologiques non-métriques, constituent autant de facteurs en mesure de renseigner sur le caractère modifié d'un crâne (Tiesler, 2014, p. 71). Bien que les termes d'ultra-brachycéphalie et d'ultra-dolichocéphalie renvoient à l'analyse métrique puisqu'ils caractérisent des crânes en fonction de leur indice crânien horizontal (Bräuer, 1988), ils peuvent tout de même être facilement appréciés visuellement dans le cadre des modifications artificielles du crâne tant certaines formes présentent de manière évidente l'une de ces caractéristiques (Tiesler, 2014).

¹ Plus spécifiquement, l'ultra-brachycéphalie renvoie à un développement plus important du crâne latéralement que longitudinalement tandis que la dolichocéphalie fait référence à un crâne plus long que large (Bräuer, 1988).

1.1.1 Les systèmes de classification

De nombreux systèmes de classification ont été proposés pour identifier et différencier les modifications artificielles du crâne. Les premières typologies ont surtout consisté à définir des classes afin d'y répertorier les différentes formes de crânes (as proposed by Morton, 1839 ; Gosse, 1855 ; Lenhossék, 1878 ; Topinard, 1879). Virchow (1888, 1892) fut le premier à avoir émis l'idée que cette classification ne devait pas uniquement reposer sur des critères purement typologiques des formes des crânes. Ce dernier a proposé que cette classification en types devait aussi être accompagnée d'une réflexion sur la nature des appareils destinés à en modifier la forme. Dans la lignée de cette idée, plusieurs auteurs ont alors proposé des systèmes de classification plus ou moins aboutis et transposables d'un contexte culturel à un autre (Hrdlička, 1912 ; Dembo & Imbelloni, 1938 ; Falkenburger, 1938 ; Neumann, 1942 ; Weiss, 1962). Pour une description de chacun d'entre eux, nous renvoyons le lecteur à Duncan & Hofling (2011, pp. 199-200), Tiesler (2014, pp. 64-68), Tiesler & Gómez-Valdés (2018, pp. 89-93). Comme suggéré par plusieurs auteurs (e.g., Romano, 1965, 1974 ; Tiesler, 2014 ; Watson & García, 2016), le système proposé par l'anthropologue argentin José Imbelloni (1938) semble être le plus adapté à l'analyse des formes mésoaméricaines. Il comporte plusieurs atouts en comparaison avec les autres travaux. Tout d'abord, il est applicable simplement et n'est donc pas limité par des contraintes techniques importantes². La classification en types est fondée sur des exemples ethnographiques et ethnohistoriques permettant d'associer une forme au type spécifique d'appareil céphalique utilisé pour la produire. Il ne se limite pas aux types les plus évidents et permet ainsi la prise en compte de formes plus « hybrides » (certaines formes peuvent montrer des caractéristiques appartenant à deux types différents ; cf. *infra*). Ce système procède non seulement à l'aide d'une analyse morphoscopique mais est également accompagné de certaines mesures linéaires et angulaires, conférant à la classification une plus grande objectivité. Enfin, ce système peut être parfaitement adapté au contexte culturel mésoaméricain (Tiesler, 2014).

L'identification d'une pratique de modification artificielle du crâne ne repose pas uniquement sur la performance des analyses visuelles ou métriques à dissocier la forme d'un crâne de la variation physiologique. En effet, plusieurs facteurs peuvent intervenir sur la forme d'un crâne sans qu'une quelconque pratique de modification artificielle ne soit intervenue sur ce dernier.

² Ce n'est par exemple pas le cas du système proposé par Falkenburger (1938) pour lequel les mesures des différents *clivi* du crâne (mesures déterminantes pour distinguer certaines formes ; cf. *infra*), ont été obtenues à partir d'un appareil fabriqué par l'auteur.

L'identification et la caractérisation de pratiques de modifications artificielles au sein d'un corpus doivent toujours être précédées par une première étape d'analyse et d'identification des individus présentant un crâne dont la déformation est attribuable à des causes différentes d'une quelconque pratique culturelle de modification crânienne. Ainsi, nous proposons de brièvement décrire les différents facteurs susceptibles d'intervenir sur la morphologie d'un crâne, lui conférant par conséquent une morphologie déformée.

1.1.1.1 Un facteur d'ordre pathologique

Certaines pathologies peuvent affecter la forme du crâne. C'est par exemple le cas de la microcéphalie (e.g., Falk et al., 2007), de la trisomie 21 (e.g., Lestrel & Roche, 1976), de l'hydrocéphalie (e.g., Mitteroecker et al., 2004 ; Larysz et al., 2013) ou encore des craniosynostoses (e.g., Heuzé et al., 2012). Ces deux dernières pathologies créent des dysmorphologies conférant au crâne un aspect déformé. L'hydrocéphalie peut être identifiée par une augmentation anormalement élevée du volume endocrânien (e.g., Tillier et al., 2001). Dans les cas présentant cette pathologie, l'augmentation des volumes des ventricules cérébraux et de l'espace sous-arachnoidien répond à une accumulation excessive de liquide céphalo-rachidien, causant ainsi une importante pression intracrânienne (Richards & Antón, 1991). Les empreintes laissées par les sillons des vaisseaux méningés moyens ainsi que les sinus veineux sont alors plus profonds (Richards & Antón, 1991 ; Tillier et al., 2001). Les craniosynostoses ou l'agénésie de certaines sutures³ sont généralement identifiables par l'observation d'une ou plusieurs sutures crâniennes entièrement oblitérées (Aufderheide et al., 1998). Par ailleurs, des dysmorphologies importantes sont également identifiables au niveau facial (Richtsmeier, 2002 ; Perrine et al., 2019) et permettent ainsi d'en attester le caractère.

1.1.1.2 La plagiocéphalie positionnelle

La plagiocéphalie positionnelle est souvent présentée comme un possible facteur de confusion à l'origine de la production « non-intentionnelle de crânes déformés » (Moss, 1958 ; Antón, 1989 ; Clark et al., 2007 ; Ross & Ubelaker, 2009 ; Pomeroy et al., 2010). Il convient donc de définir et de discuter brièvement des caractéristiques propres à cette condition. La plagiocéphalie, au sens large, désigne une déformation de la tête intervenant à des périodes pré ou postnatales sous l'effet de forces externes s'exerçant sur la partie postérieure du crâne (e.g.,

³ L'oblitération complète d'une ou plusieurs sutures peut résulter d'une craniosynostose (fusion prématurée) ou d'une agénésie d'une ou plusieurs sutures. Leur étiologie étant différente, il convient de les différencier (Barnes, 1994).

Joganic et al., 2009 ; Meraviglia et al., 2014). Plus spécifiquement, il fait référence à l'aplatissement d'un des deux côtés du crâne. Il en résulte donc une morphologie crânienne asymétrique (Rogers, 2011). Cette dysmorphologie est fréquemment observée chez les nouveau-nés présentant un torticolis congénital, (i.e., ce terme désigne une affection des muscles du cou ; Rogers et al., 2009).

La plagiocéphalie positionnelle entraîne une asymétrie du crâne et/ou de la face ne résultant pas de la fusion prématurée de sutures (i.e., craniosynostoses ; Meraviglia et al., 2014). Le positionnement préférentiel du nouveau-né en décubitus dorsal pour les périodes de sommeil, a été recommandé par *l'American Academy of Pediatrics* en raison de son lien avec la diminution du risque de mort subite du nouveau-né (Fleming et al., 1990 ; Dwyer et al., 1991 ; American Academy of Pediatrics, 2000, 2005). Cette politique a résulté en la multiplication des cas de plagiocéphalies positionnelles et donc montré une forte association entre cette position du nouveau-né et l'apparition de ce signe clinique (Argenta et al., 1996 ; Turk et al., 1996 ; Morrison & Chariker, 2006). Ce dernier résulte de la tendance pour certains nouveau-nés à privilégier un des deux cotés sur lequel dormir, aboutissant ainsi à un aplatissement du côté reposant sur le support et à la création d'un degré d'asymétrie aux niveaux neurocrânien et facial important (Gardner et al., 1977 ; Turk et al., 1996 ; Pollack et al., 1997).

Démontrer l'existence d'une plagiocéphalie positionnelle au sens strict est ambitieux dans la mesure où une telle affirmation revient à préjuger de la nature non-intentionnelle de la morphologie « déformée » d'un crâne. De nombreux auteurs ont fait référence à ce type de déformations pour définir le caractère involontaire de certaines d'entre elles (e.g., Neumann, 1942 ; Blackwood & Danby, 1955 ; Brothwell, 1963 ; Gerszten & Gerszten, 1995 ; Dean O'Loughlin, 2004 ; Rhode & Arriaza, 2006 ; Perez, 2007 ; Khudaverdyan, 2016). Transposer l'absence d'intentionnalité observée dans le registre médical au registre archéologique mésoaméricain semble compliqué et d'autant plus périlleux que de nombreux témoignages attestent de la grande importance accordée à la forme du crâne dans les sociétés mésoaméricaines (e.g., López Austin, 2004 ; Tiesler, 2014 ; Duncan, 2018 ; Natahi et al., 2019). Il est donc plus raisonnable d'éviter l'exclusion d'individus présentant des caractéristiques compatibles avec un diagnostic de plagiocéphalie positionnelle. En effet, il est peu probable qu'un tel signe, dans le contexte de l'archéologie mésoaméricaine et plus largement préhispanique, résulte d'un effet indésirable.

1.1.1.3 Un facteur lié à une activité physique : le port de charges

Le mecapal (tiré du Nahuatl *mecapalli*) désigne un appareillage utilisé en Mésoamérique mais aussi dans les Andes, et servant à transporter des charges sur le dos (Figure 1.1). Ce dernier est constitué d'un bandeau en cuir, en coton ou en fibre de maguey (*ixtle*), placé sur le front ou sur la portion haute de la voûte de l'individu. Les deux cordes attachées à l'élément antérieur le relient à la charge placée dans le dos de l'individu (Figure 1.1 ; Morante López, 2009). Notons qu'il existe plusieurs types de mecapal différents et que tous ne sont donc pas disposés de la même manière sur le crâne de l'individu.

Plusieurs témoignages rendent compte du fait que l'utilisation de cet appareillage pouvait commencer très tôt chez les enfants (Figure 1.1d). Ainsi, Mendieta (1870, pp. 111-112) estime qu'à l'âge de cinq ou six ans, certains enfants aztèques portaient déjà des charges importantes par l'intermédiaire de ce système.



Figure 1.1 Exemples de ports de charges et d'utilisation du mecapal. (a) Statuette représentant un porteur. Culture des tombes à puits, Colima (modifié d'après Morante López, 2009). (b) Illustration f46_v issue de la Relación de Michoacán (modifié d'après Alcalá, 2008). (c) Photographie d'un petatero de la ville de México, source : Instituto Nacional de Antropología e Historia. (d) Photographie représentant des enfants portant des charges à l'aide de mecapals, Etat de México, source : Instituto Nacional de Antropología e Historia. (e) Photographie représentant des enfants mayas transportant du bois à l'aide de mecapals, Yucatán, México, source : Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Identifier des individus ayant utilisé ce système sur la base unique de leurs restes osseux est problématique en raison de la méconnaissance des incidences que ce type d'appareil peut avoir sur le corps humain. Khudaverdyan (2016) a associé l'expression de certains critères morphologiques (i.e., notamment la dépression post-coronale) comme favorisant l'identification de cette activité. Il nous semble toutefois difficile d'établir cette relation de cause à effet en l'absence d'un référentiel fiable pour lequel les effets de ces systèmes de charge sur la voûte du crâne seraient clairement identifiés et décrits. A notre connaissance, seule une étude a fait état des transformations morphologiques que l'utilisation du mecapal pouvait occasionner sur le bloc crânio-facial ainsi que sur les vertèbres cervicales et les premières thoraciques (Gervais, 2001). Dans l'étude de Gervais (2001), sept hommes issus de populations Maya-Quichés du Guatemala et porteurs de profession ont été exposés à des analyses radiographiques qui ont mis en évidence que le port de charges par le système du mecapal avait bel et bien des effets sur certaines structures anatomiques. En effet, Gervais (2001) a constaté un aplatissement frontal marqué pour quatre individus et un aplatissement plus discret pour un individu parmi les sept. Dans les autres particularités notables exprimées chez ces hommes, elle mentionne une agénésie des *sini* frontaux pour trois d'entre eux, une hypoplasie de l'arc postérieur de l'atlas pour quatre des sept sujets, une diminution de la hauteur des corps vertébraux dans cinq cas et une courbure anormale de la partie cervicale de la colonne dans quatre cas.

Soulignons pour finir que chez certaines populations comme les Arawaks du Pérou, la modification artificielle du crâne pouvait aussi avoir une fonction utilitaire consistant à faciliter le port de ce système (e.g., Farabee, 1922, p. 20).

1.1.1.4 Un facteur d'ordre taphonomique

Si l'ensemble des facteurs précédemment décrits interviennent sur la morphologie du crâne de l'individu du temps de son vivant, soulignons qu'un facteur d'ordre *postmortem* peut également avoir une incidence significative sur la forme d'un crâne et conduire à sa déformation (e.g., Laitman & Heimbuch, 1982 ; Franciscus & Trinkaus, 1988 ; Haglund & Sorg, 1996 ; Gunz et al., 2009 ; Jurda et al., 2015 ; Schotsmans et al., 2017). Le poids du sédiment exercerait alors des forces de compression sur le crâne de l'individu et serait en mesure d'en déformer le tissu osseux. Ces déformations seraient caractérisées par des discontinuités localisées sur le bloc crâniofacial (Weber & Bookstein, 2011 ; Tiesler, 2014).

Une fois les cas de figures précédemment évoqués identifiés, attester d'une pratique de modification artificielle d'un crâne va donc reposer sur l'identification visuelle ou métrique de certaines formes compatibles avec les systèmes de classification pré-établis (Dembo & Imbelloni, 1938). Par ailleurs, la récurrence d'une même forme sera un critère supplémentaire qui favorisera sa caractérisation en tant que pratique.

1.1.2 Différencier les modifications artificielles du crâne

Dembo & Imbelloni (1938) distinguent deux grands types de modifications crâniennes : la modification tabulaire et la modification annulaire. Ces deux types de modifications se définissent par la nature de l'appareil céphalique qui les produit. La modification annulaire fait appel à l'utilisation de matériaux souples (e.g., cordes, bandeaux, coiffes étroites, bonnets) enroulés autour de la tête de l'enfant et soumettant cette dernière à une croissance dans le sens longitudinal (la croissance étant limitée latéralement). La modification tabulaire, quant à elle, résulte d'un emploi d'appareils céphaliques plus rigides sur les parties frontales et occipitales du crâne et contraint ce dernier à une croissance plutôt latérale (Dembo & Imbelloni, 1938 ; Figure 1.2). Ces deux catégories comptent divers sous-types. Ces derniers résultent de la diversité importante des appareils céphaliques employés. En Mésoamérique où la modification de type annulaire n'est pas attestée (Pereira, 1999, p. 152 ; Tiesler, 2014), la grande majorité des formes s'inscrivent donc dans la catégorie tabulaire⁴. Ainsi, nous ne détaillerons ci-après que les formes appartenant à cette dernière catégorie. Imbelloni (1938) distingue deux types de modifications tabulaires sur la base de l'orientation des plans de compression crâniens : la modification tabulaire droite et la modification tabulaire oblique. L'auteur associe ces deux morphologies respectives à deux pratiques de modifications relativement différentes⁵. Elles se

⁴ Bien que certains auteurs fassent part de l'existence de modifications de type annulaire en Mésoamérique (e.g., Gómez-Valdés et al., 2007), il est impropre d'employer ce terme dans la mesure où, pour la plupart de ces cas, l'utilisation de moyens de contention souples (bandes ou cordes) semble avoir été couplée avec des moyens de contention rigides (e.g., tablettes ou planches en bois ; Tiesler, 2012a, 2014). Dans ces cas, plutôt que de parler de modification annulaire, il convient de parler de modification pseudo-annulaire ou pseudo-circulaire (Romano, 1965). D'autres cas assimilables morphologiquement aux types annulaires décrits par Dembo & Imbelloni (1938) ont été identifiés au sein de la collection de l'ingénieur Federico Adolfo Solórzano Barreto (Bautista & Ortega, 2005). Toutefois, l'absence de données quant à l'origine de ces pièces ne permet pas d'attester avec certitude de l'existence de ces formes en Mésoamérique.

⁵ Comme le rappelle Tiesler (2014, p. 71), il convient tout de même de souligner que cette typologie est moins bien adaptée à la description de formes observables sur d'autres continents (notamment à la description des formes annulaires) et que son emploi ici est exclusivement réservé à la description des formes mésoaméricaines.

caractérisent toutes les deux par des systèmes de compression antéro-postérieure. On désigne sous le terme de modification tabulaire oblique, une modification présentant des plans de compression antérieurs et postérieurs parallèles (Figure 1.2a) tandis que, dans le cas de la modification tabulaire droite, ces plans sont organisés non parallèlement (Figure 1.2b). Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938) définit plus exactement trois critères permettant de distinguer le type tabulaire droit du type tabulaire oblique. Le premier étant l'observation, en *norma lateralis*, de la disposition générale de l'os occipital (inclinaison, courbure et intensité de la pression). Le deuxième critère est l'obliquité du crâne (pour définir les directions des plans de compression). Enfin, le dernier paramètre est l'aspect externe du plan de compression postérieur. Ainsi, les formes tabulaires droites montrent les critères suivants :

1. Un plan de compression postérieur parallèle ou quasi-parallèle à une droite fictive passant par le basion et le bregma
2. Un plan de compression étendu à la région occipitale mais également à une partie de la région pariétale
3. Un axe de compression formant avec le plan de Francfort⁶ un angle inférieur à 120°

Les formes tabulaires obliques, quant à elles, présentent les critères suivants :

1. Un aplatissement tangentiel à la protubérance occipitale externe
2. Une pression limitée à l'écaille occipitale
3. Un axe de compression postérieur formant avec le plan de Francfort, un angle d'environ 120°

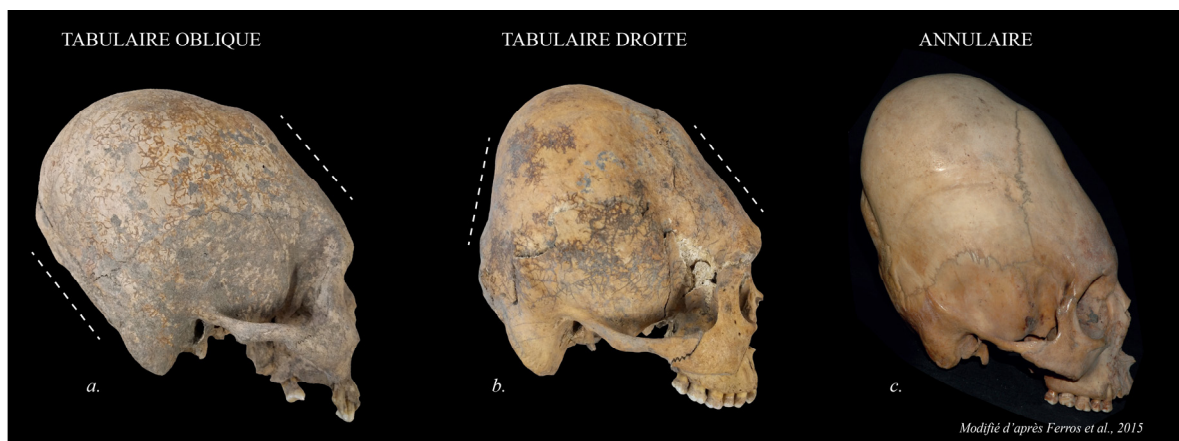


Figure 1.2 Exemples des trois grands types de modifications artificielles du crâne de la classification d'Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938). (a) Individu issu de la sépulture 1 du site JR24 présentant une modification de type tabulaire oblique. (b) Individu A de la sépulture 13 du site de Loma Alta présentant une modification de type tabulaire droite. (c) Individu de la culture Paracas présentant une modification de type annulaire (modifié d'après Ferros et al., 2014).

⁶ Le plan de Francfort désigne le plan passant par les points droits et gauches les plus bas des bords infraorbitaires (i.e., par les deux orbitales) et postérieurement par la partie supérieure d'un des deux méats acoustiques externes (i.e., par le porion).

Chacune de ces deux formes comporte de nombreuses variantes, qui résultent de la grande diversité mais aussi de l'intensité de la modification réalisée. Selon Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938), sept variantes de la modification tabulaire droite peuvent être identifiées (Figure 1.3 a - g):

- a. Les formes extrêmes : un aplatissement important du frontal et de la région du lambda sont observés. On parle aussi de modifications tabulaires droites fronto-occipital.
- b. Les formes intermédiaires : pour ces formes sont similaires aux formes extrêmes dans la mesure où la région frontale et celle au niveau du lambda sont concernées. Toutefois, le degré d'aplanissement de ces zones est moindre en comparaison avec les formes extrêmes.
- c. Les formes plano-frontales : la région frontale est plane alors que l'aplanissement de l'occipital n'est que peu marqué.
- d. Les formes plano-lambdatiques : dans le cas de cette forme, c'est la région occipitale qui montre un degré d'aplanissement important. Le frontal ne montre qu'un faible degré de compression.
- e. La variante parallélépipédique (ou tabulaire supérieure)⁷ : suite à l'utilisation de moyens de contention au niveau du frontal et du lambda mais aussi au niveau des pariétaux ainsi que sur le sommet de la calotte crânienne, la conformation du crâne sera proche de celle d'un cube ou d'un parallélépipède.
- f. La variante pseudo-annulaire ou pseudo-circulaire : cette variante de la modification tabulaire droite se confond avec les formes annulaires. Elle résulte d'un emploi simultané de moyens de contention souples et rigides (e.g., un enfant allongé sur un support plan type berceau et dont la tête serait maintenue à ce dernier à l'aide d'un système de cordes).
- g. Les formes bilobées ou trilobées : cette forme résulte de l'emploi d'un appareil céphalique sur le frontal et l'occipital. Les deux moyens de contention sont maintenus entre eux par un système de ligature parcourant le crâne le long de l'axe antéro-postérieur. Un sillon le long de la suture sagittale est généralement associé à ce type de forme (on parle de *sulcus sagittal* ; cf. *infra*). Les formes trilobées montrent simplement

⁷ Comme suggéré par Romano (1973) puis par Tiesler (2014), l'emploi du terme « parallélépipédique » est associé à l'existence de possibles contraintes latérales aux contraintes antéro-postérieures et supérieures en jeu dans la création de la forme dite parallélépipédique. Ainsi, Romano (1973) a proposé de substituer le terme de « tabulaire supérieur » à celui de « parallélépipédique » afin que cette catégorie permette l'inclusion de formes correspondant à ces mêmes critères mais pour lesquelles des contraintes latérales n'ont pas été identifiées.

un système de ligature supplémentaire parcourant le crâne selon l'axe latéral, au niveau de la suture coronale (on parle de *sulcus coronal* ; cf. *infra*).

Cinq variantes du type tabulaire oblique peuvent être définies (Figure 1.3 h - l) :

- h. Les formes extrêmes : les plans de compression sont très nettement observables sur le crâne et se caractérisent par des aplats fortement marqués identifiables aux endroits où ont été appliqués les moyens de contention.
- i. Les formes intermédiaires : elles sont semblables aux formes extrêmes mais montrent une compression fronto-occipitale peu marquée.
- j. Les formes curvo-frontales : pour ces formes, l'os frontal présente en partie une courbure physiologique.
- k. Les formes curvo-occipitales : pour ces formes, c'est l'os occipital qui montrera une courbure proche de sa courbure physiologique.

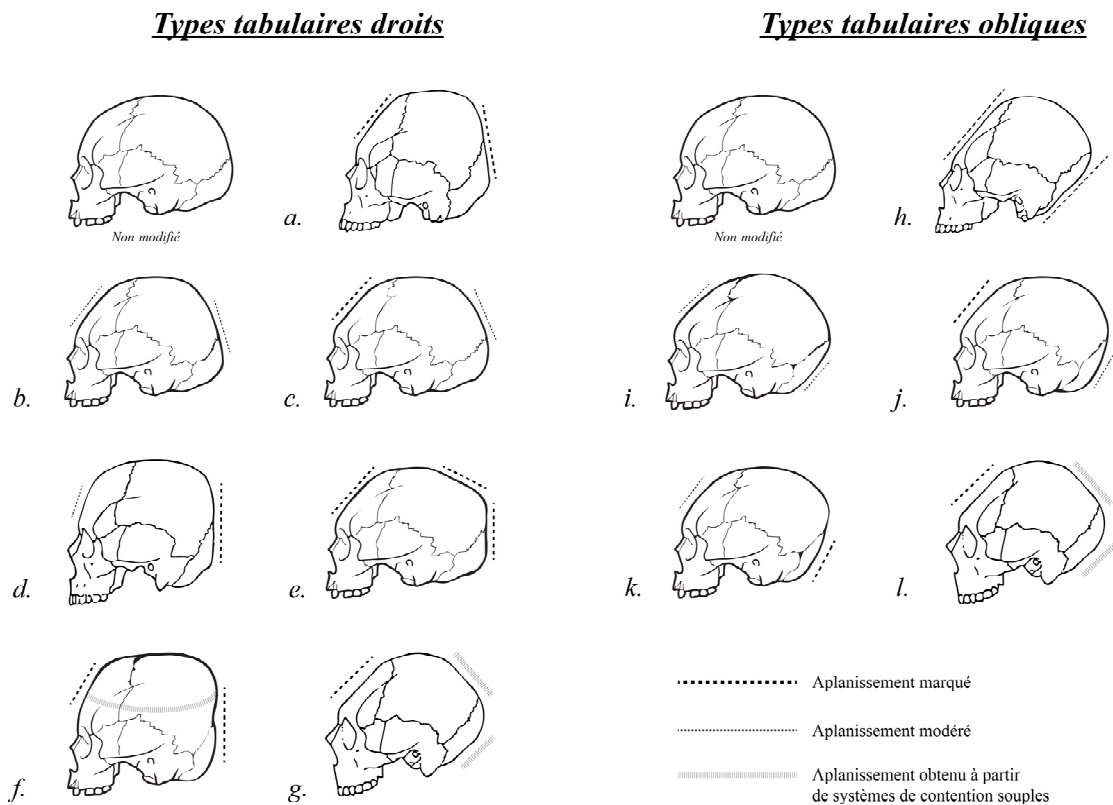


Figure 1.3 Schémas illustrant les principaux variants observés par Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938) pour les modifications artificielles de types tabulaires droits (a – g) et tabulaires obliques (h – l). (a) Forme extrême du type tabulaire droit (b) Forme intermédiaire du type tabulaire droit. (c) Forme plano-frontale du type tabulaire droit. (d) Forme plano-lambdatique. (e) Variante parallélépipédique (ou tabulaire supérieure). (f) Forme pseudo-annulaire. (g) Forme bilobée ou trilobée. (h) Forme extrême du type tabulaire oblique. (i) Forme intermédiaire du type tabulaire droit. (j) Forme curvo-frontal. (k) Forme curvo-occipital. (l) Forme bilobée ou trilobée.

1. Les formes bilobées ou trilobées : à l'instar des formes tabulaires droites bilobées et trilobées, ces crânes présentent des sillons le long de la suture sagittale (pour les formes bilobées) et aussi coronale (pour les formes trilobées) mais montrent des plans de compression parallèles.

Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938) différencie ces deux grands types que sont les types tabulaires droits et tabulaires obliques non seulement à l'aune des différences morphologiques qu'ils présentent, mais aussi dans la mesure où ils résultent de l'emploi d'appareillages bien différents. Ainsi, les variantes tabulaires droites résulteraient de l'usage de berceaux ou d'appareils combinés à des berceaux, tandis que les formes tabulaires obliques seraient associées au port d'appareils céphaliques indépendants (Figure 1.4).

Toutefois, comme le soulignent Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938) et Tiesler (2014, p. 80), cette association ne doit pas non plus se faire de manière automatique. En effet, certaines formes tabulaires obliques peuvent résulter de l'utilisation de berceaux (comme le rapporte Dembo & Imbelloni, 1938, p. 294, où ce cas de figure est illustré par un dessin issu de Meyer, 1881) et certaines formes tabulaires droites de l'apposition d'appareils céphaliques indépendants (Romano, 1974 ; Tiesler, 2010).



Figure 1.4 Illustrations des différents types d'appareillage utilisés dans l'obtention de formes tabulaires. (a) Modification artificielle du crâne par apposition d'un appareil céphalique indépendant sur le crâne d'un enfant Shipibo, Pérou (modifié d'après Farabee, 1922). (b) Modification artificielle du crâne obtenu par utilisation d'un berceau sur un enfant Chinook, Etats-Unis d'Amérique (modifié d'après Catlin, 1857).

Enfin, précisons que certaines formes peuvent n'être incluses dans aucune de ces deux catégories car elles présentent une combinaison de caractères propres à deux types de

modifications différentes. Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938, p. 277) suggère alors de classer celles-ci dans une catégorie à part entière, désignée sous le nom de mimétique.

Cette typologie comporte tout de même quelques limites. Ainsi, il nous semble parfois difficile de distinguer les crânes témoignant d'une modification curvo-frontale, curvo-occipitale ou plano-frontale non seulement les uns des autres mais également de la variabilité physiologique. De plus, l'inclusion du degré de la modification comme catégorie à part entière ne nous semble pas entièrement satisfaisante dans la mesure où rien ne garantit que l'obtention de formes de moindre ou d'extrême intensité résulte de l'utilisation d'appareillages différents. Des facteurs comme l'âge auquel l'appareil est apposé sur la tête de l'individu, la durée d'apposition ou encore l'intensité des forces exercées par celui-ci doivent être également en mesure de produire les différences entre des formes.

La classification des formes bilobées et trilobées au sein de formes tabulaires droites ou obliques peut aussi être critiquée dans une certaine mesure. En effet, certaines formes d'apparences bilobées ne présentent pas de plans de compression postérieurs compatibles avec le type tabulaire droit ou oblique. C'est le cas par exemple des crânes issus des sites de Guadalupe et El Palacio (cf. *infra*).

1.1.3 Les caractères morphologiques non-métriques

En plus de la morphologie générale du crâne, certains auteurs ont également proposé que des critères morphologiques non-métriques puissent participer à renforcer l'identification de modifications artificielles du crâne.

1.1.3.1 Les sulci sagittaux et postcoronaux

Les *sulci* sagittaux et postcoronaux⁸ que décrivent Antón & Weinstein (1999) et Tiesler (2012a, 2014) s'expriment préférentiellement sur des crânes présentant les types bilobés ou trilobés de la classification d'Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938).

Le *sulcus* sagittal constitue une dépression, un sillon ou un méplat (selon l'intensité et la superficie sur laquelle il s'exprime) qui se manifeste dans la partie postérieure de la suture sagittale avec un maximum de profondeur généralement observé au niveau de l'obélium (Figure 1.5 ; Patte, 1937). Son expression sur les formes bilobées ou trilobées est associée au passage

⁸ Ce caractère peut également être rencontré sous le terme de « dépression rétro-coronale » (e.g., Riquet, 1962 ; Dastugue & Torre, 1965 ; Pereira, 1999).

d'un élément de ligature parcourant le neurocrâne le long du plan médio-sagittal et reliant les éléments de contention antérieurs et postérieurs (Gosse, 1855 ; Martínez Baca, 1897 ; Dembo & Imbelloni, 1938 ; Stewart, 1948 ; Pereira, 1999 ; Tiesler, 2014). Il correspond donc à l'empreinte laissée par l'un des composants de l'appareil céphalique.



Figure 1.5 Exemples des différences d'intensité dans l'expression du sulcus sagittal : (a) léger. (b) modéré. (c) important

Le *sulcus* postcoronal se caractérise par un sillon localisé postérieurement le long de la suture coronale (Figure 1.6 ; Patte, 1937)⁹. Selon Tiesler (1999, 2012b), son degré d'expression serait proportionnel au degré de modification d'un crâne (i.e., son expression étant la plus marquée sur les crânes très modifiés). Son étiologie reste discutée puisque Tiesler (1999) affirme que son expression résulterait d'une réponse physiologique différentielle de la croissance suturale dans des conditions de contraintes mécaniques tandis que Khudaverdyan (2016, 2018) estime qu'il constituerait la trace d'un des éléments de contention de l'appareil céphalique.



Figure 1.6 Exemple de sulcus postcoronal.

⁹ Dans ses formes les plus marquées, le sillon peut conduire à l'apparition d'une petite dépression située en arrière du bregma (cf. Antón & Weinstein, 1999 ; Tiesler, 2014, p. 44) et donc d'un renflement de ce dernier point. Bien que ces deux caractères soient liés, l'emploi du terme de « *sulcus* postcoronal » fera exclusivement référence dans le cadre de ce manuscrit à la présence d'un sillon localisé postérieurement et le long de la suture coronale.

1.1.3.2 La dépression supra-iniaque

Ce caractère est une dépression située au-dessus ou dans les pourtours de la région de l'inion (Figure 1.7). Elle est de forme circulaire ou ovalaire et présente des superficies et profondeurs variables d'un individu à l'autre. Précisons que des auteurs comme Antón & Weinstein (1999) différencient la dépression supra-iniaque des dépressions dites occipitales sans ne donner plus de précision. Il n'est pas clair de percevoir si cette distinction a pour objectif de la différencier du caractère autapomorphe néandertalien¹⁰ ou si les auteurs font référence à d'autres formes de dépressions localisées en différentes régions de l'os occipital.

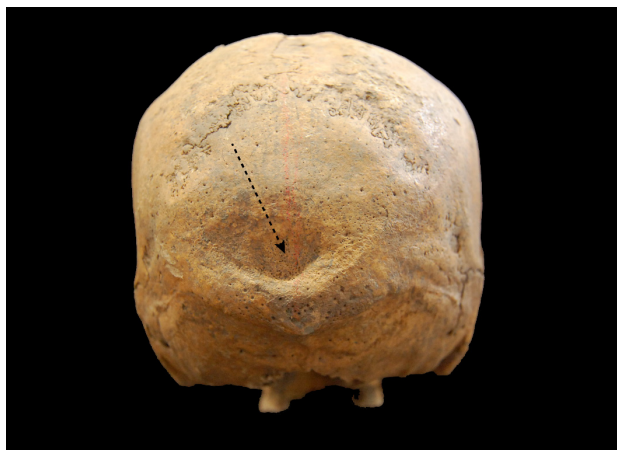


Figure 1.7 Exemple de dépression supra-iniaque.

Son étiologie est également débattue. Certains auteurs ont évoqué que cette dépression puisse constituer le processus cicatriciel d'une trépanation par raclage (Lagunas Rodríguez, 1974 ; Weiss, 1981 ; Kato et al., 2007). A l'instar de Verano (2016), l'argument nous semble peu recevable notamment au vu des contre-arguments apportés par Stewart (1976), Velasco-Suarez et al. (1992) ou encore Tiesler (2012b). En effet, l'association préférentielle entre modifications artificielles du crâne et expression de ce caractère montrée par plusieurs auteurs devrait plutôt indiquer une origine biomécanique (Goldstein, 1940; Holliday, 1993; Magitot, 1885; Stewart, 1976; Tiesler, 2012a, 2012b; Weiss, 1981). Ainsi, parmi 40 cas d'individus présentant des modifications fronto-obéliques, Pereira (1999) observe cette modification dans 12 cas et mentionne également la présence de 20 individus présentant des dépressions dans les pourtours du segment iniaque. Aussi, Tiesler (1998 ; 1999, p. 218) l'observe chez plus de 40% d'individus

¹⁰ Bien qu'elle présente des morphologies externes voisines, l'examen de la structure interne la fosse sus-iniaque des Néandertaliens a montré un modèle d'agencement différent de celui des Hommes modernes (Balzeau & Rougier, 2010).

mayas présentant des modifications artificielles du crâne. Enfin, Antón & Weinstein (1999) ont montré à plus large échelle (en considérant un échantillon de 131 individus provenant d'Amérique du Sud) que ce caractère apparaissait avec une fréquence de 25,3% chez les individus présentant une modification de type tabulaire (« *antero-posterior* » dans le texte), 28,1% pour ceux montrant une forme annulaire (« *circumferential* » dans le texte) et 2,3% chez des individus non-modifiés.

1.1.3.3 Les os suturaux

Les os suturaux ou os wormiens sont des os surnuméraires qui apparaissent au niveau d'une des sutures du crâne (Figure 1.8). Traditionnellement comptés parmi les variations anatomiques non-métriques (Hauser & De Stefano, 1989 ; Pilloud & Hefner, 2016), certains auteurs ont désigné leur expression comme préférentielle chez des individus montrant des modifications artificielles du crâne (e.g., Dorsey, 1897 ; Ossenberg, 1970 ; Pucciarelli, 1974 ; El-Najjar & Dawson, 1977 ; Gottlieb, 1978 ; Gerszten, 1993 ; Dean O'Loughlin, 2004 ; Del Papa & Perez, 2007 ; Sanchez-Lara et al., 2007 ; Van Arsdale & Clark, 2012). Bien que d'autres auteurs n'observent pas de différences significatives d'un point de vue de leur expression chez des individus présentant une modification artificielle du crâne (Vives & Bertranpetit, 1986 ; Antón et al., 1992 ; Wilczak & Ousley, 2009), il semble que leur expression soit plutôt déterminée par des forces de compression/tension en exercice sur les sutures, comme le suggèrent Antón et al. (1992). Ce constat fait suite à une série d'observations pour lesquelles des différences significatives en terme d'expression d'os wormiens ont été trouvées entre des individus présentant des modifications de type tabulaire (« *antero-posterior* » dans le texte) et des individus non-modifiés (Antón et al., 1992 ; Van Arsdale & Clark, 2012). En revanche, quand Antón et al. (1992) comparent l'expression de ces os wormiens entre des individus présentant une modification de type annulaire (« *circumferential* » dans le texte) et des individus non-modifiés, aucune différence significative n'est observée. Antón et al. (1992) expliquent ce phénomène par les contraintes biomécaniques différentielles que chacun des deux types exercent sur les sutures. Ils suggèrent ainsi que, dans le cadre de modifications tabulaires, des forces de tension importantes œuvrent sur certaines sutures, contribuant ainsi à la formation d'os wormiens.



Figure 1.8 Exemple d'os sutural surnuméraire ou « wormien ».

1.1.3.4 L'asymétrie

Enfin, plusieurs auteurs ont identifié de forts degrés d'asymétrie neurocrânienne chez les individus présentant des modifications artificielles du crâne (Neumann, 1942 ; Romano, 1974 ; Kohn et al., 1995 ; Tiesler, 1998 ; Clark et al., 2007 ; Pomeroy et al., 2010). Ils présentent cette caractéristique comme une conséquence directe de la modification artificielle du crâne.

En conclusion, il convient de traiter les éléments d'identification et de caractérisation fournis par Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938) ainsi que les différents caractères morphologiques susnommés comme un faisceau d'indices permettant d'attester du caractère modifié d'un crâne. En effet, chaque élément considéré de manière isolée n'apportera qu'une information limitée sur la nature « déformée » et le type de modification du crâne.

1.2 Identifier et caractériser les modifications artificielles du crâne via l'analyse morphométrique

L'analyse morphométrique est généralement conduite conjointement à l'analyse morphoscopique. Elle va notamment objectiver dans une certaine mesure les observations en les quantifiant, mais permettra également d'apporter un certain nombre d'informations complémentaires susceptibles d'affiner les analyses établies sur la base des critères visuels.

Il convient de distinguer les mesures linéaires et angles utilisés en morphométrie traditionnelle des points-repères (i.e., landmarks) ou contours étudiés en morphométrie géométrique.

1.2.1 Les mesures linéaires et angulaires

Nous ne présenterons que brièvement ces analyses dans la mesure où l'intégralité des résultats obtenus dans ce travail sont issus de la morphométrie géométrique. Nous nous attacherons à les mentionner car nombre d'études actuelles les utilisent afin de discuter de la diversité des formes (e.g., Gómez-Valdés et al., 2018 ; Pereira, 2018 ; Romano, 2018). Par ailleurs, bien que de nombreuses variables linéaires ou angulaires montrent un potentiel informatif dans la différenciation des formes (e.g., angle de Klaatsch ; Figure 1.9), nous ne présenterons ici que celles qui sont, selon nous, les plus informatives pour la mise en évidence de ces différences.

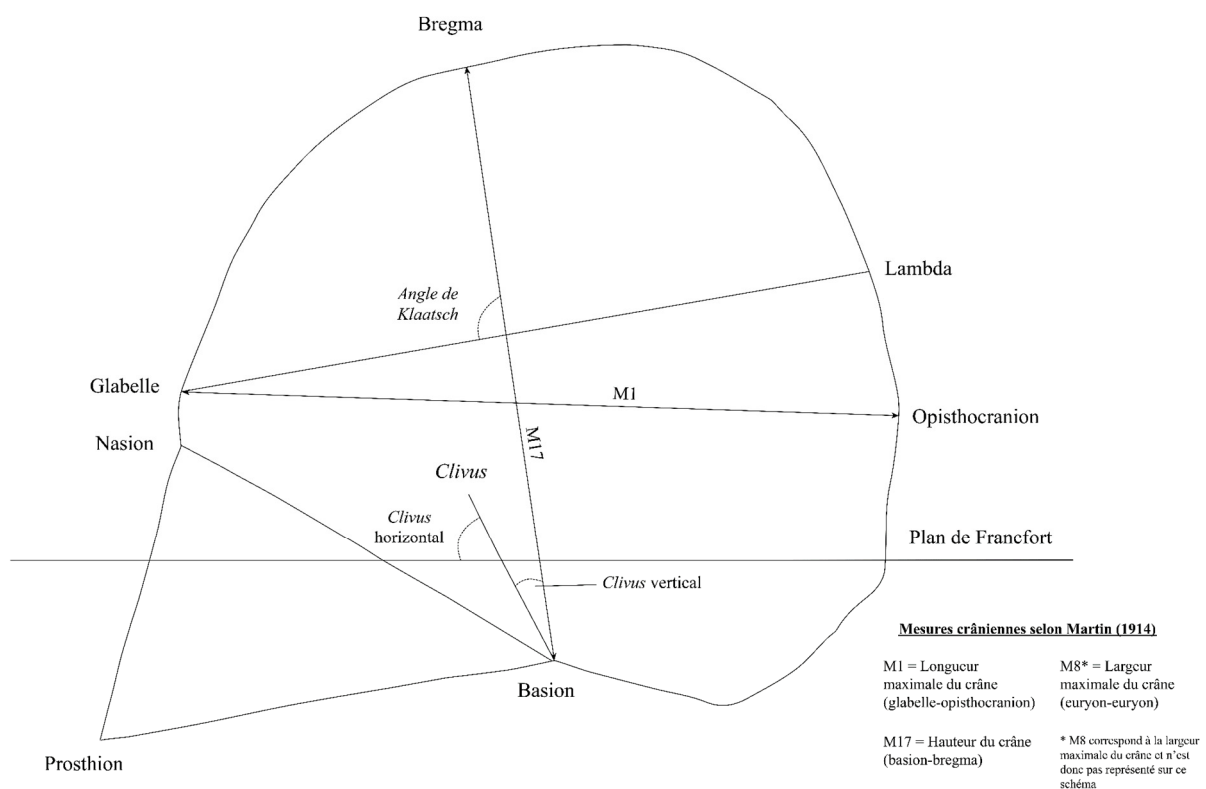


Figure 1.9 Profil médio-sagittal illustrant les principales mesures prises en compte dans l'étude de Falkenburger (1938).

L'étude de Falkenburger (1938) doit être mentionnée car elle fait état de plusieurs mesures permettant de distinguer les types de modifications artificielles du crâne. Dans un premier temps, cet auteur suggère d'utiliser l'indice de largeur sur la longueur (i.e., M8/M1 selon la nomenclature de Martin, 1914 ; Figure 1.9), celui de la hauteur sur la longueur (i.e., M17/M1

selon la nomenclature de Martin, 1914 ; Figure 1.9) et celui de la hauteur sur la largeur (i.e., M17/M8 selon la nomenclature de Martin, 1914 ; Figure 1.9) pour distinguer les formes annulaires des formes tabulaires (« antéro-postérieures » dans le texte). De plus, deux mesures angulaires permettent de discriminer de manière assez satisfaisante la modification tabulaire droite de la modification tabulaire oblique. Ainsi, Falkenburger (1938) a proposé d'étudier certains angles obtenus à partir du *clivus* (Figure 1.9). Le *clivus* constitue une structure de la partie basilaire de l'os occipital, située en arrière du dos de la selle de l'os sphénoïde. Elle est oblique postérieurement et inférieurement et forme donc une pente qui va unir la partie basilaire de l'occipital au dos de la selle de l'os sphénoïde. A partir de ce *clivus*, il va définir deux angles (Figure 1.9) : un angle appelé *clivus* horizontal (défini comme l'angle que constitue le plan de Francfort avec le *clivus*) et un angle appelé *clivus* vertical (défini comme l'angle obtenu entre le *clivus*, le basion et le bregma). Falkenburger (1938) suggère que ces deux angles puissent permettre de distinguer de manière satisfaisante les formes tabulaires droites des formes tabulaires obliques.

D'un point de vue morphométrique, Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938) mentionne également les différents angles obtenus à partir du *clivus* comme des indicateurs fiables pour différencier les formes tabulaires droites des formes tabulaires obliques. En outre, il a également mis en évidence des indices permettant de distinguer certaines des six formes au sein de la catégorie tabulaire oblique. Ces mesures reposent principalement sur les indices frontaux-sagittaux et occipitaux-sagittaux (respectivement I22 et I25 selon la nomenclature de Martin, 1914).

De manière générale, l'utilisation de la trigonométrie à partir de certaines mesures crâniennes (on parle aussi de craniotrigonométrie ; e.g., Klaatsch, 1909 ; Imbelloni, 1921 ; Ferembach, 1954 ; Delattre et al., 1964 ; Herrera-Fritot, 1964) a été largement employée à des fins d'identification et de différenciation des modifications artificielles du crâne. Cette méthode consiste à représenter ces mesures graphiquement, au sein d'un quadrilatère (on le désigne sous le nom de quadrilatère de Klaatsch ; Figure 1.10). Elle permet ainsi de multiplier les mesures (par des relations trigonométriques) et d'explorer le potentiel discriminant de certaines variables dans l'identification et la différenciation des types (e.g., Méndez et al., 1997). Cette méthode contribue à étayer et discuter les résultats d'une première étape d'identification et de différenciation des formes obtenues sur la base de l'analyse morphoscopique (e.g., Romano, 1965, 1974 ; Pereira, 2018 ; Tiesler & Lacadena, 2018).

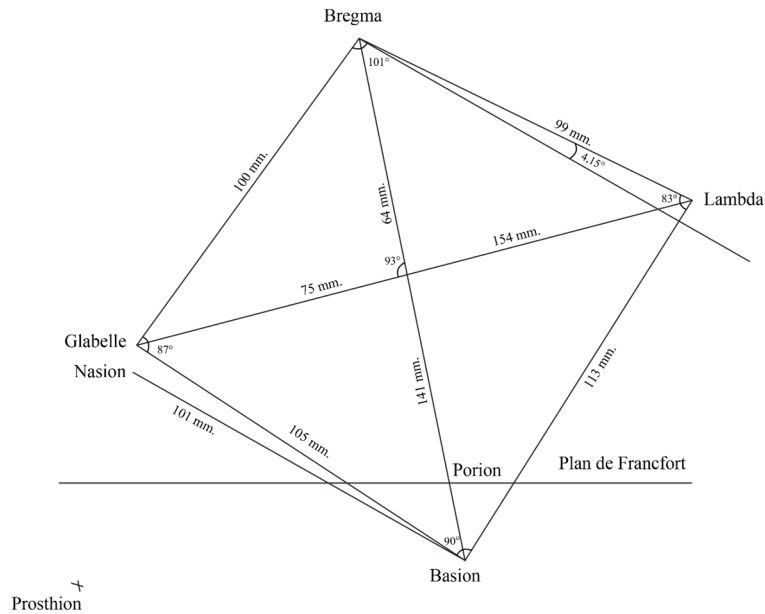


Figure 1.10 Exemple de quadrilatère de Klaatsch appliqué par Romano (1965) au cas n°4 du site de l'Isla del Idolo, Veracruz (modifié d'après Romano, 1965).

Soulignons tout de même l'existence d'autres études ayant tenté de présenter l'utilisation de mesures linéaires à des fins similaires mais de manière plus ponctuelle et sans apporter nécessairement de distinctions plus fines ou une meilleure discrimination que l'examen morphoscopique (e.g., Clark et al., 2007 ; Pomeroy et al., 2010 ; O'Brien & Stanley, 2013).

1.3 La morphométrie géométrique

Les études précédemment mentionnées facilitent la distinction entre types mais ne renseignent que très peu sur la nature des changements généraux de forme entre les individus. C'est l'un des principaux avantages que confère la morphométrie géométrique¹¹. Celle-ci fut en premier lieu appliquée à une série d'individus présentant des crânes artificiellement modifiés (Cheverud et al., 1992 ; Cheverud & Midkiff, 1992). Ces études visaient surtout à établir l'incidence que les pratiques de modifications artificielles du crâne pouvaient avoir sur les différents éléments de la face. Une étude aux problématiques similaires fut entreprise un peu plus tard par Friess & Baylac (2003) via l'utilisation d'une analyse de contours par les séries de Fourier (e.g., Lu, 1965). A notre connaissance, cette étude fut la première à mettre en évidence le pouvoir discriminant de la morphométrie géométrique dans l'identification de modifications artificielles

¹¹ Pour plus de précisions sur la morphométrie géométrique, nous renvoyons le lecteur au chapitre Matériel et méthodes, dans lequel nous en détaillons les principes.

du crâne en comparaison à un échantillon d'individus non-modifiés. Les études ayant fait appel à la morphométrie géométrique se sont par la suite multipliées et mirent en évidence le potentiel de la méthode non seulement pour identifier mais aussi pour différencier les types de modifications artificielles crâniennes (Manríquez et al., 2006 ; Gómez-Valdés et al., 2007 ; Perez, 2007 ; Perez et al., 2009 ; Bucchi et al., 2016 ; Kuzminsky et al., 2016 ; Mayall et al., 2017 ; Mayall & Pilbrow, 2018 ; Serna et al., 2019). Si, pour l'ensemble des études, la morphométrie géométrique n'a pas permis d'augmenter la discrimination entre individus non-modifiés et modifiés obtenue via un examen visuel, son principal intérêt va résider dans la possibilité de quantifier les différences entre les formes. Ainsi, certains auteurs soulignent l'avantage qu'elle offre quant à la possibilité de quantifier l'homogénéité des formes et de discuter, *in fine*, du degré de standardisation des pratiques (Kuzminsky et al., 2016 ; Serna et al., 2019). Enfin, son point fort va résider dans la possibilité de restituer visuellement les changements morphologiques entre différents individus ou groupes d'individus, permettant ainsi de déterminer quelles zones sont sujettes à des transformations morphologiques dans le cadre de certains types de modifications artificielles du crâne (Manríquez et al., 2006 ; Gómez-Valdés et al., 2007 ; Perez, 2007 ; Perez et al., 2009 ; Bucchi et al., 2016 ; Kuzminsky et al., 2016 ; Mayall et al., 2017 ; Mayall & Pilbrow, 2018 ; Serna et al., 2019).

Si les analyses morphoscopiques et morphométriques conduites jusqu'à présent présentent une certaine efficacité dans l'identification et la différenciation des types de modifications artificielles du crâne, elles comportent tout de même certaines limites liées à la nature de certaines pratiques pour lesquelles les variations de formes sont moindres. En effet, qu'elles reposent sur des analyses morphoscopiques, morphométriques ou qu'elles combinent les deux types d'analyses, plusieurs études traduisent les difficultés d'identification de certaines formes de modifications artificielles du crâne plus discrètes et considèrent qu'elles ne présentent pas de frontières claires avec la variation physiologique neurocrânienne (e.g., Neumann, 1942 ; Romano, 1965 ; Brothwell, 1975 ; Friess & Baylac, 2003 ; Clark et al., 2007 ; Pomeroy et al., 2010). Ainsi, Friess & Baylac (2003), mais aussi Tiesler (2014), proposent que les modifications artificielles du crâne ne se limitent pas uniquement aux formes les plus extrêmes mais puissent également se manifester de manière continue sous des formes de divers degrés d'expression, depuis des formes indiscernables de la variation physiologique jusqu'aux types les plus extrêmes (ces formes sont d'ailleurs suspectées en Mésoamérique et plus spécifiquement dans le Centre-Ouest mésoaméricain à la période Postclassique : 900 – 1500

apr. J.-C.). Cet argument est d'ailleurs utilisé par certains auteurs (e.g., Perez, 2007), pour plaider en faveur d'un usage exclusif de la morphométrie au détriment de la typologie. Nous ne pensons pas ces deux types d'analyses incompatibles et privilégierons donc une approche intégrée. En effet, un système typologique comme celui proposé par Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938) a le mérite d'associer un appareil céphalique à une forme neurocrânienne. Bien que la morphométrie, et plus spécifiquement la morphométrie géométrique, permettent de quantifier finement les différences de formes ou conformations (i.e., forme affranchie du facteur de taille), nous pensons que ces analyses doivent tout de même s'appuyer sur un système de classification afin de donner une plus grande profondeur à l'étude, en permettant d'appréhender visuellement les différences de modalités d'action des appareils céphaliques sur le neurocrâne.

2 Morphogenèse crânienne et modalités de croissance dans le cadre de modifications artificielles du crâne

La forte intégration entre cerveau, méninges et éléments osseux du neurocrâne (cf. *infra*) témoigne de la nécessité de présenter ci-après quelques données de neuroanatomie. Celles-ci pourront alors être susceptibles de fournir des éléments de compréhension, de discussion et/ou d'interprétation des modalités de croissance et de développement du neurocrâne sous l'effet de contraintes mécaniques, comme dans le cas des pratiques de modifications artificielles du crâne.

2.1 Données embryologiques et anatomiques du neurocrâne

2.1.1 Le neurocrâne

Le crâne est composé du splanchnocrâne (ou viscérocrâne ; éléments associés à la face) et du neurocrâne. Le neurocrâne est notre région d'intérêt dans la mesure où sa manipulation et l'attention qui lui étaient accordées constituaient le cœur-même des pratiques de modifications artificielles du crâne. Il désigne la partie composée de l'os frontal (os pair avant sa fusion), des deux os pariétaux, des deux os temporaux, de l'os occipital, de l'os sphénoïde et de l'os ethmoïde (Figure 2.1 ; Sperber, 2001). Il est subdivisé en deux parties (Figure 2.2) que l'on différencie en fonction du type d'ossification sous-tendant leur croissance et développement (Enlow & Hans, 1996). On distingue ainsi le desmocrâne (neurocrâne membraneux ou *calvaria*) issu d'une ossification membraneuse (l'os est directement produit à l'intérieur du mésenchyme), et le chondrocrâne (ou neurocrâne cartilagineux) issu d'une ossification endochondrale (l'os se développe à partir d'un cartilage hyalin synthétisé par des cellules mésenchymateuses). Embryologiquement, ces deux ensembles diffèrent également puisque le desmocrâne dérive du mésoderme et des cellules de la crête neurale tandis que le chondrocrâne a une origine exclusivement mésodermique (Sperber, 2001).

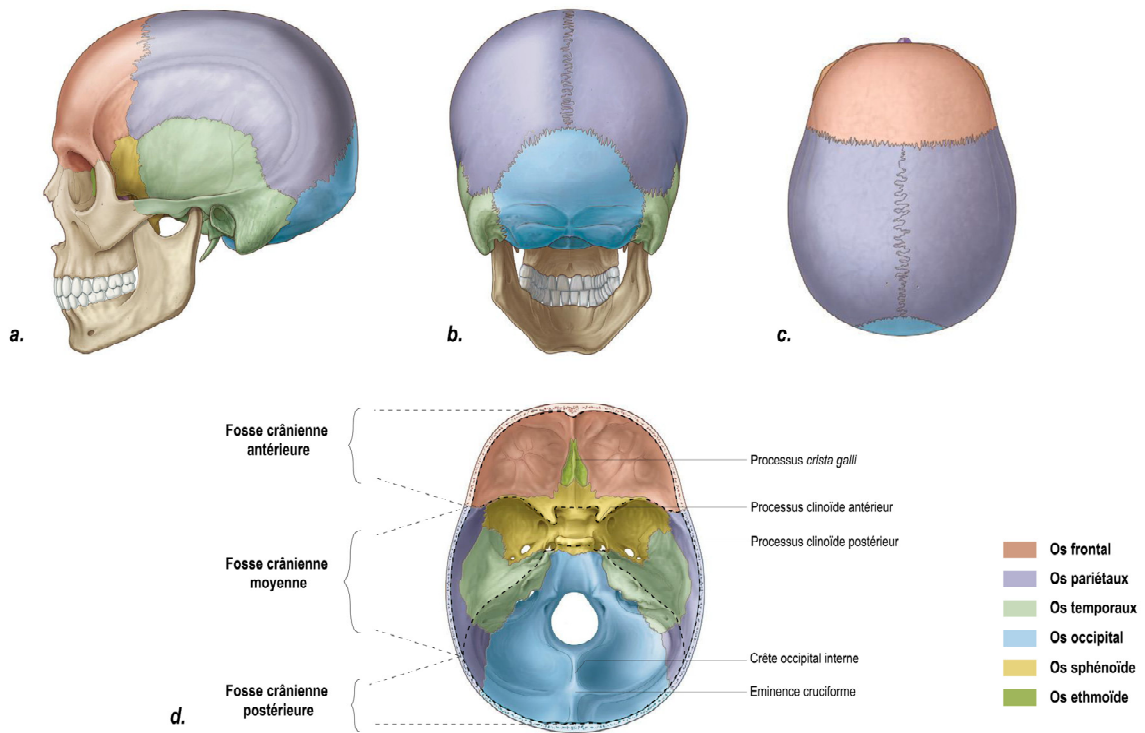


Figure 2.1 Bloc craniofacial d'un individu adulte et descriptions des os composant le neurocrâne (modifié d'après Drake et al. 2015). (a) Norma lateralis. (b) Norma occipitalis. (c) Norma verticalis en vue exocrânienne. (d) Norma verticalis en vue endocrânienne.

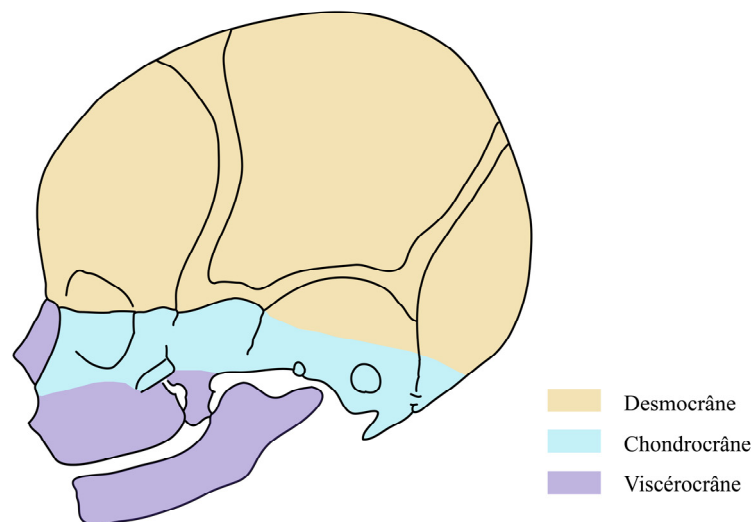


Figure 2.2 Schéma illustrant les différentes parties du bloc craniofacial.

A la naissance, les os de la voûte sont séparés par des sutures et des fontanelles (Figure 2.3). On distingue six fontanelles : deux médianes (une antérieure et une postérieure, respectivement désignées comme la fontanelle bregmatique et la fontanelle lambdatique) et quatre latérales (deux antéro-latérales et deux postéro-latérales; on parle ainsi respectivement de fontanelles sphénoïdales et mastoïdiennes). Sperber (2001) leur confère une importance mécanique lors de la parturition dans la mesure où elles faciliteraient le passage du crâne par le canal pelvien. En effet, les fontanelles permettent aux os crâniens de se chevaucher ou de s'éloigner les uns des autres en fonction des contraintes géométriques imposées par la cavité pelvienne lors de l'accouchement.

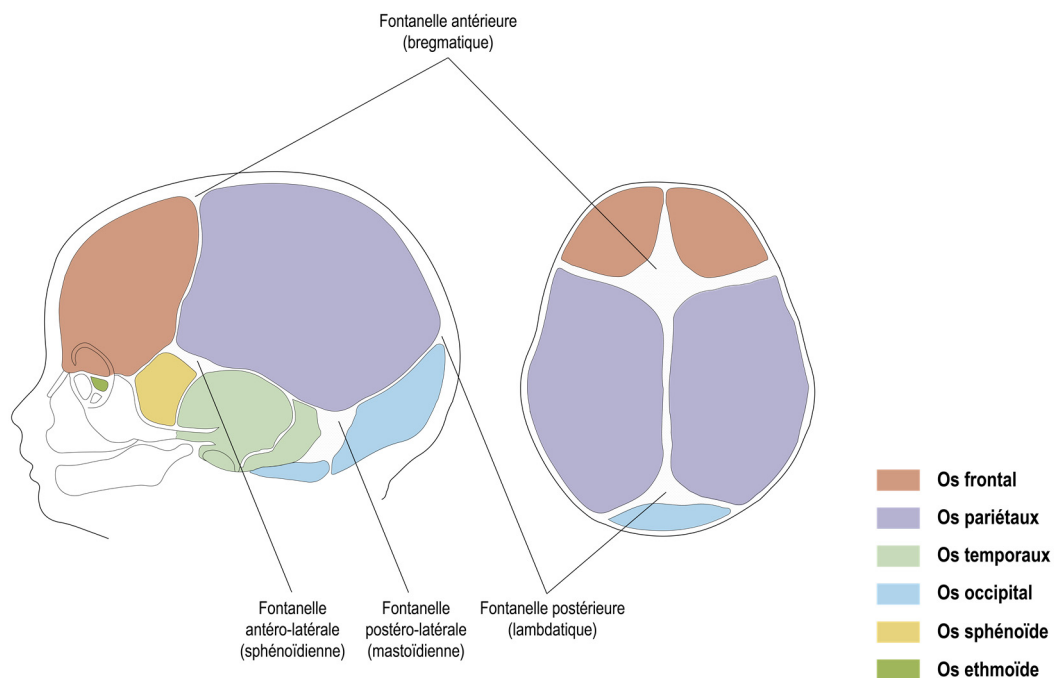


Figure 2.3 Bloc craniofacial d'un individu nouveau-né en norma lateralis.

La fermeture de ces fontanelles aboutira à la jonction des divers os neurocrâniens en un point : le bregma pour la fontanelle antérieure, le lambda pour la fontanelle postérieure, les ptériorions pour les deux fontanelles antéro-latérales et les astériorions pour les deux fontanelles postéro-latérales. L'âge auquel ces fontanelles se referment diffère. Evoquons simplement ici que, bien que variable, nombre d'auteurs s'accordent à estimer une fermeture de la fontanelle postérieure et des fontanelles antéro-latérales aux alentours de deux ou trois mois après la naissance, tandis

que l'on note des fermetures plus tardives pour la fontanelle antérieure et les fontanelles postéro-latérales (aux alentours de la deuxième année ; Scheuer & Black, 2000 ; Rouvière & Delmas, 2002 ; Kamina, 2014). L'ossification du neurocrâne se poursuivra avec la fusion des sutures (considérées comme articulations de type syndesmose) entre les différents os de la voûte.

2.1.2 Les méninges

Le tissu mésenchymateux à partir duquel se développera le neurocrâne se présente sous la forme d'une membrane qui entoure le cerveau embryonnaire. Celle-ci est composée d'une couche interne, l'endoméninge, et d'une couche externe, l'ectoméninge (Figure 2.4 ; Sperber, 2001). L'endoméninge aboutira à la formation de deux méninges que seront la pie-mère et l'arachnoïde. Concernant l'ectoméninge, elle se différenciera en une couche interne qui formera la dure-mère et une lame superficielle qui, quant à elle, constituera le neurocrâne cartilagineux pour la base du crâne et le neurocrâne membraneux pour la *calvaria*, tous deux responsables de l'activité ostéo et chondrogénique (Sperber, 2001). La dure-mère et la *calvaria* vont rester intrinsèquement liées dans la mesure où le feuillet externe de la dure-mère (ou couche périostée) répond à la face interne des os de la voûte (Figure 2.4). Ces interactions entre croissance cérébrale, méninges et croissance suturale sont primordiales à la morphogénèse crânienne comme en témoignent d'ailleurs différentes pathologies qui perturbent ces rapports telles que l'anencéphalie (pour laquelle l'absence du cerveau conduit à une acranie ; Davies & Durán, 2003 ; Frey & Hauser, 2003), la microcéphalie (où l'on observe un crâne plus petit et dans certains cas des oblitérations précoces des sutures crâniennes ; Chervenak et al., 1984) ou encore l'hydrocéphalie (où l'on observe une augmentation de la masse cérébrale ainsi qu'une expansion plus importante des os de la calvaria mais aussi une épaisseur plus fine de ces mêmes os en comparaison avec des os soumis à une croissance et un développement physiologiques ; Morimoto et al., 2003).

2.1.3 Les cloisons de la dure-mère

Comme nous venons de l'évoquer, la dure-mère est composée d'un feuillet externe (ou périosté) et d'un feuillet interne (ou méningé ; Figure 2.4). Le feuillet méningé comporte des expansions

qui correspondent à un repli de la méninge sur elle-même et qui forment quatre cloisons qui vont diviser la cavité crânienne en compartiments (Figure 2.5) :

La *Falx cerebri* (ou faux du cerveau) est la cloison médio-sagittale située dans le sillon longitudinal (Figure 2.5a). En forme de croissant, elle sépare les deux hémisphères cérébraux. Elle s'insère antérieurement sur le processus *crista galli* de l'os ethmoïde (Figure 2.1d) et se confond postérieurement avec le *tentorium cerebelli* (ou tente du cervelet). Pour sa partie supérieure, la faux est attachée aux deux lèvres du sillon du sinus sagittal supérieur. Sa partie inférieure est libre et comprend le sinus sagittal inférieur qui est relié au *tentorium cerebelli*.

Le *Tentorium cerebelli* (ou tente du cervelet) désigne la cloison transversale séparant la cavité endocrânienne en deux étages distincts : un étage infra-tentorial et un étage supra-tentorial (Figure 2.5a). Dans l'étage infra-tentorial logent le tronc cérébral antérieurement et le cervelet postérieurement, tandis que sur la base de l'étage supra-tentorial reposent les lobes occipitaux du cerveau. La tente du cervelet présente deux bords : un antérieur et un postérieur. Le bord antérieur est concave et libre postérieurement et s'insère sur les processus clinoides antérieurs de l'os sphénoïde (Figure 2.5b). Le bord postérieur, convexe, s'insère pour sa partie postérieure le long des lèvres de la gouttière du sinus transverse de l'os occipital, puis suit latéralement les bords supérieurs des deux rochers (que parcourent les sinus pétreux supérieurs) pour finir par s'insérer antérieurement sur les processus clinoides postérieurs.

Le *Falx cerebelli* (ou faux du cervelet) est la cloison qui sépare les deux hémisphères cérébelleux. Sa base est attachée à la partie inférieure et postérieure du *tentorium cerebelli*. Elle s'insère postérieurement sur la crête occipitale interne et s'étend inférieurement jusqu'aux marges latérales du foramen magnum.

La *Diaphragma sellae* (ou diaphragme sellaire, ou encore tente de l'hypophyse) est une cloison plus petite, circulaire et horizontale qui recouvre le plafond de la selle turcique de l'os sphénoïde (Figure 2.5b). Elle est limitée antérieurement par le tubercule de la selle et postérieurement par le dos de la selle. Elle offre une protection à l'hypophyse.

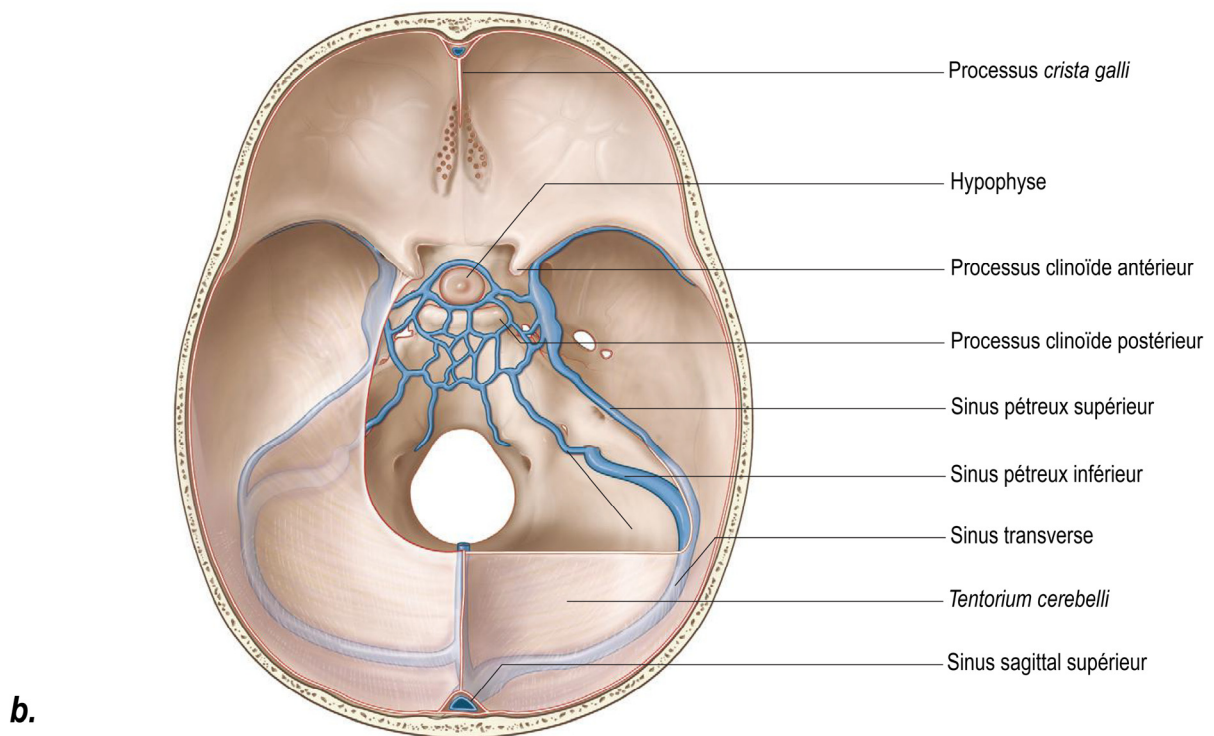
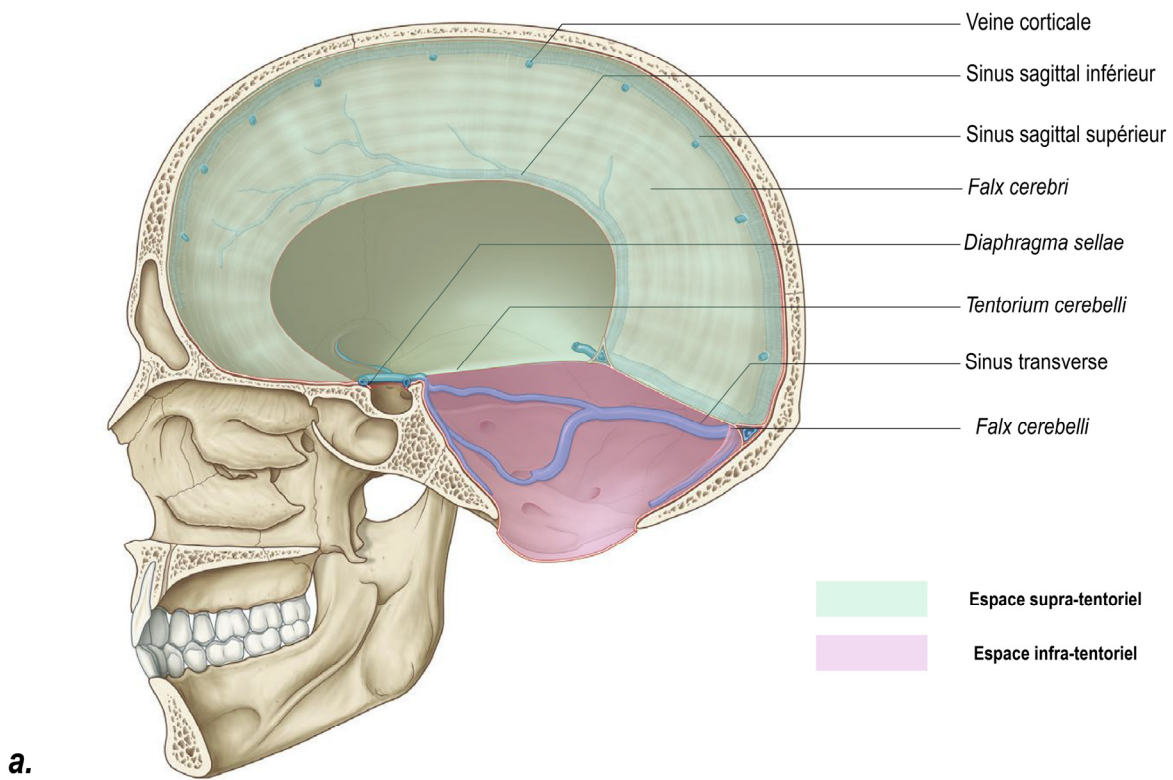


Figure 2.4 Cloisons de la dure-mère et représentation des étages supra et infra-tentoriels. (a) Coupe sagittale. (b) Norma verticalis de la cavité endocrânienne.

2.2 **Ontogénie postnatale**

Etant donné que les pratiques de modifications artificielles du crâne interviennent après la naissance, nous aborderons exclusivement l'ontogénie crânienne postnatale. Nous renvoyons le lecteur s'intéressant à la biologie du développement prénatal à l'ouvrage de Sperber (2001), entre autres. Comme mentionné par ce dernier, la croissance postnatale de la *calvaria* résulte de la combinaison entre croissance suturale, le modelage/remodelage osseux ainsi que l'action centrifuge exercée par l'expansion cérébrale sur les os de la *calvaria*. Les mécanismes de croissance suturale et de modelage/remodelage osseux contribuent de manière différentielle et en des temps différents à la croissance de la *calvaria*. En effet, durant les quatre premières années de vie, la croissance suturale constitue le mode dominant de croissance après quoi le modelage et/ou remodelage osseux deviendront les principaux mécanismes à l'origine de sa croissance (Enlow & Hans, 1996 ; Sperber, 2001).

2.2.1.1 *Modalités de croissance et développement*

La croissance suturale

Le (re-)modelage osseux qui intervient sur les surfaces ecto- et endocraniales (*cf. infra*) participe faiblement à l'élargissement des os du crâne en comparaison à l'activité suturale. Le principal moteur de la croissance résulte donc de l'activité ostéoformatrice qui opère au niveau sutural (e.g., Moss, 1968 ; Enlow & Hans, 1996 ; Sperber, 2001). Les sutures ne présentent pas d'activité spontanée d'ossification. L'ossification constitue la résultante de la croissance du cerveau, lequel exerce des tensions sur les os de la voûte crânienne qui tendent à s'éloigner les uns des autres perpendiculairement à l'orientation de la suture (Figure 2.6a ; Morriss-Kay & Wilkie, 2005 ; Cray et al., 2010). Cette croissance est donc secondaire et compensatoire (Moss, 1968). Les sutures vont alors garantir une production osseuse suffisante afin de répondre au mieux aux contraintes spatiales que le cerveau en croissance exerce.

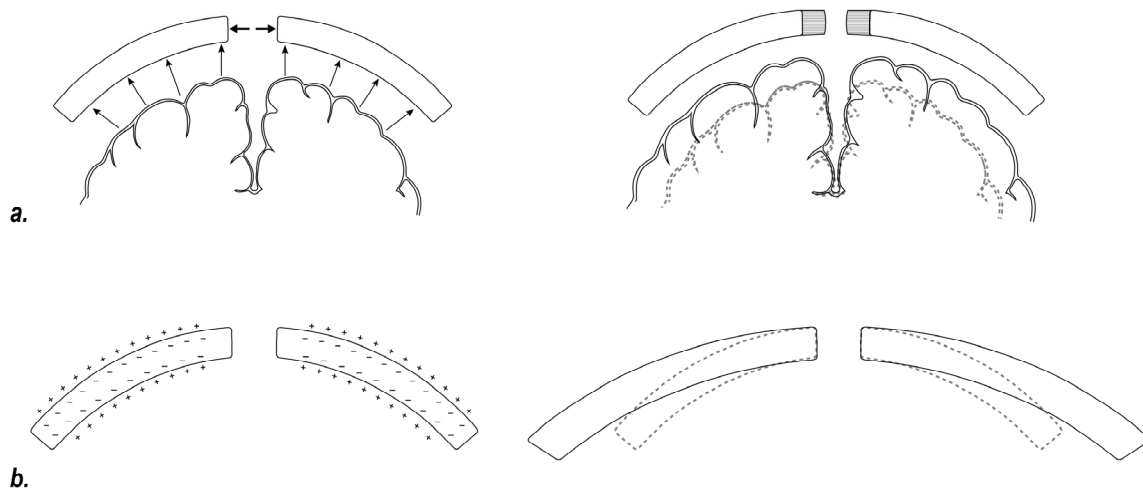


Figure 2.5 Schémas illustrant les différents modes de croissance neurocrâniens. (a) La croissance suturale. (b) La croissance par modelage osseux.

Une suture est constituée par deux bords osseux séparés par des tissus fibreux ou cartilagineux (on parle respectivement de syndesmose ou de synchondrose). Ces tissus sont composés de deux fronts ostéogéniques qui finiront par se rejoindre, s'ossifier et fusionner. D'un point de vue biomécanique, elle est considérée comme un élément visco-élastique qui est soumis à des forces de compressions ou de tensions de magnitudes, intensités et directions diverses (Herring, 2008). On distingue à ce propos la compression/tension dite quasi-statique que le cerveau en croissance exerce sur les sutures de la compression/tension cyclique qui peut résulter, entre autres, des activités masticatrices (Herring 2008 ; Cray et al. 2010). Si la compression/tension dite quasi-statique liée à la croissance du cerveau constitue le moteur majeur de la croissance suturale, il convient tout de même de préciser que les activités masticatrices semblent également avoir une potentielle incidence sur celle-ci (Herring, 1993 ; Byron et al., 2004 ; Byron et al., 2006)¹².

Bien que nous choissions de ne pas détailler l'histologie des sutures (nous renvoyons à cet égard le lecteur au chapitre de Huggare & Rönning, 1997), il reste tout de même important de garder à l'esprit que pour notre propos, que les sutures sont composées en leur centre de cellules mésenchymateuses indifférenciées. Celles-ci pourront être recrutées afin de se différencier en cellules ostéoprogénitrices (au niveau du front ostéogénique) puis en ostéoblastes matures en mesure de synthétiser une matrice de collagène qui, par minéralisation, produira le tissu osseux

¹² L'ensemble de ces études ayant été réalisées sur des modèles murins, il convient de rester prudent sur la transposition de leurs résultats à des modèles humains.

(e.g., Opperman, 2000 ; Flaherty et al., 2016). La croissance suturale va alors être engendrée et déterminée mécaniquement sous l'action du cerveau en croissance. Plus spécifiquement, elle résultera de l'interaction entre la dure-mère, le front ostéogénique et les cellules mésenchymateuses (e.g., Opperman, 2000 ; Morriss-Kay & Wilkie, 2005 ; Gagan et al., 2007 ; Richtsmeier & Flaherty, 2013). Bien que cette hypothèse reste à étayer, Jin et al. (2016) proposent que la production osseuse au niveau des sites suturaux soit proportionnelle à l'importance des forces de déplacement que la masse neurale exerce sur les os de la voûte. L'action mécanique de la masse neurale en croissance agirait alors aussi bien directement (Henderson et al., 2005) qu'indirectement (Henderson et al., 2004) sur la croissance suturale. En effet, Henderson et al. (2005) montrent que, chez le rat, une pression quasi-statique (générée par la croissance crânienne) s'exerce directement sur la suture sagittale, laquelle induit une production de tissu osseux au niveau de la suture. Dans une autre étude, Henderson et al. (2004) montrent que l'activité osseuse au niveau sutural est aussi sensible à des changements dans l'environnement angiogénique (changements de la vascularisation sous l'effet d'une force mécanique) ou encore à des phénomènes de méchanotransduction (face à la tension mécanique exercée par le cerveau en croissance, la dure-mère produit des signaux chimiques induisant la différenciation et prolifération d'ostéoblastes ; e.g., Vivatbutsi et al., 2008). Quel qu'en soit le mode d'action, il semble que la croissance au niveau des sites suturaux reste en grande partie déterminée et régulée par l'action mécanique de la masse neurale en expansion. Des études en éléments finis confortent d'ailleurs ce postulat en montrant qu'en simulant, à une classe d'âge donnée, les tensions générées par la pression intra-crânienne (i.e., croissance cérébrale) sur la *calvaria* chez la souris et chez l'humain, il était possible de prédire de manière plutôt fiable les formes de la *calvaria* des classes d'âge suivantes (chez l'humain ; Libby et al., 2017 ; chez la souris ; Marghoub et al., 2017). Malgré certaines simplifications inhérentes à la modélisation en éléments finis, il s'agit donc de modèles expérimentaux qui confirment le rapport étroit entre croissance cérébrale et croissance de la *calvaria* (Marghoub et al., 2017, p. 8).

Si toutes les sutures assurent bel et bien un rôle dans la croissance, leur contribution à ce processus n'en est pas pour autant uniforme, et ce en raison des âges différents auxquels elles fusionnent (Morriss-Kay & Wilkie, 2005). De plus, même s'il a été montré que certaines sutures (e.g., la suture coronale et la suture sagittale) étaient dotées de propriétés mécaniques similaires (Wang et al., 2014), elles subissaient tout de même l'action de forces dont l'intensité, les directions et les moments d'exercice variaient en raison d'une croissance différentielle entre les différentes parties du cerveau (Paus et al., 2001 ; Paus, 2005 ; Herring, 2008).

La croissance suturale, bien qu'étant le moteur principal de l'ontogénie desmocrânienne, ne constitue pas l'unique phénomène biologique présidant à sa détermination puisque le modelage osseux va également y contribuer.

2.2.1.2 Croissance par modelage osseux

Martínez-Maza et al. (2006 ; 2016) ont souligné la confusion qui règne quant aux définitions des termes de modelage et remodelage osseux. Ces deux termes résultant de processus biologiques différents (e.g., Martin, 2000), les auteurs recommandent donc de les différencier comme proposé par Frost (1987). Le remodelage consiste en l'activité conjointe, coordonnée et séquentielle des ostéoclastes et ostéoblastes (Hill, 1998 ; Martínez-Maza et al., 2006). Ces cellules assurent successivement une activité de résorption et de formation osseuse. Selon Ott (2002), ce processus intervient surtout afin de compenser les dommages qu'a pu subir le tissu osseux et permet d'en garantir la solidité. Par ailleurs, il jouerait également un rôle dans le métabolisme. Le modelage, quant à lui, désigne des activités simultanées de formation et résorption s'exprimant à différents endroits de la surface osseuse (Frost, 1987 ; Martínez-Maza et al., 2006). Dans le cadre de ce processus, formation et résorption interviennent indépendamment sur les versants internes (i.e., endoste) et externes (i.e., périoste) de l'os (Enlow, 1962) et agissent en des proportions différentes (i.e., parfois le taux de formation excède celui de résorption et parfois l'inverse se produit ; Enlow & Hans, 1996 ; Marks & Hermey, 1996 ; Schuh et al., 2019). Ainsi, les activités des ostéoblastes et ostéoclastes sont dissociées dans la mesure où elles n'interviennent pas aux mêmes niveaux. C'est à cette définition que renvoie le terme de remodelage employé par Enlow & Hans (1996). Selon ces auteurs, le modelage osseux est rythmé, pour le complexe craniofacial, par les tissus mous associés à chaque os. Celui-ci revêt alors plusieurs fonctions, parmi lesquelles le changement de taille de l'os, ou la relocalisation des différents composants d'une région anatomique afin de s'adapter aux changements de taille d'ordre général. Il conditionne la forme d'un os et le rend propre à l'exercice de certaines fonctions. Enfin, il ajuste les os les uns aux autres ainsi qu'aux demandes mécaniques et fonctionnelles des tissus mous en croissance. Il est également le garant d'adaptations structurelles continues face aux divers stimuli intra et/ou extrinsèques susceptibles d'intervenir durant la croissance.

Comme précédemment évoqué, le processus de modelage a une activité faible en comparaison à l'activité ostéogénique au niveau sutural lors des quatre premières années après la naissance.

En effet, Enlow & Hans (1996) évoquent l'existence d'une légère formation osseuse sur les surfaces ecto- et endocraniales participant à la croissance des os du crâne (Figure 2.6b). Ce processus est accompagné d'un processus de résorption intervenant sur le versant endostéal des tables internes et externes (Figure 2.6b). Tous les os de la voûte étant inclus dans du périoste (i.e., présent sur le versant ectocrânien, au niveau des sutures et du côté endocrânien pour lequel la dure mère assure ce rôle ; Moss & Young 1960), certains auteurs proposent que l'épaississement de la voûte crânienne et, par extension, la formation du diploé, résultent directement de la résorption du versant endostéal de la voûte (e.g., Moss & Salentijn, 1969 ; Enlow & Hans, 1996 ; Huggare & Rønning, 1997 ; Morriss-Kay & Wilkie, 2005).

Huggare & Rønning (1997, p. 364) mentionnent que la séparation des deux tables ne s'effectue pas uniformément sur l'ensemble de la voûte, dans la mesure où de fortes différences d'épaisseur peuvent être observées au niveau des zones d'attaches musculaires de la nuque ou des reliefs supraorbitaires en comparaison avec le reste. Le modelage sur le versant ectocrânien répondrait, pour sa part, aux sollicitations des tissus qui composent le scalp ainsi qu'à l'action de certains muscles (Moss & Young, 1960). On associe l'action mécanique du cerveau en croissance à une augmentation de la pression intracrânienne, laquelle par l'intermédiaire de la dure-mère exercerait des forces de tension sur le périoste du côté endocrânien (e.g., Moss & Young, 1960). Cette interaction aurait lieu tout au long de la vie et ne serait pas limitée à la période de croissance cérébrale (Moss & Young, 1960, p. 288). Moss (1958) et Moss & Young (1960) interprètent donc la différenciation entre les deux tables comme obéissant à des demandes fonctionnelles différentes. Pour ces auteurs, les deux entités seraient indépendantes l'une de l'autre.

La croissance par modelage osseux accompagnerait donc la croissance suturale afin d'ajuster la position des os du neurocrâne aux contraintes spatiales engendrées par la croissance du cerveau. Par ailleurs, celui-ci occuperait une fonction dans les changements de forme de par l'adaptation de la courbure des os aux changements de circonférence du cerveau (Figure 2.6b ; Enlow & Hans, 1996 ; Morriss-Kay & Wilkie, 2005).

2.2.1.3 Modalités de croissance et développement du neurocrâne

Il est important ici de fournir quelques informations sur les modalités de croissance et de développement du neurocrâne afin d'en identifier les étapes clés. Effectivement, ces informations peuvent rendre compte, dans le cas des pratiques de modifications artificielles du

crâne, de l'importance qu'une variable comme le moment d'intervention sur un crâne d'un individu, peut avoir sur la forme finale de son crâne.

Plusieurs auteurs (e.g., Baughan et al., 1979 ; Buschang et al., 1983 ; Enlow & Hans, 1996 ; Bastir et al., 2006) ont décrit les séquences de croissance (i.e., changement de forme ; Ponce de León & Zollikofer, 2001 ; Viðarsdóttir et al., 2002 ; Bastir & Rosas, 2004) et de développement (i.e., changement de conformation ; Ponce de León & Zollikofer, 2001 ; Viðarsdóttir et al., 2002 ; Bastir & Rosas, 2004) du bloc craniofacial. Parmi ceux-ci, Bastir et al. (2006) ont établi que le premier élément à achever sa croissance était le neurocrâne (aux alentours de 12-13 ans), suivi par la base du crâne (aux alentours de 14-15 ans), les fosses crâniennes antérieures et moyennes (aux alentours de 16-17 ans ; Figure 2.1d) et les éléments composant le viscérocrâne (aux alentours de 16-17 ans). La séquence de développement des éléments du bloc craniofacial montre que le premier élément à atteindre sa conformation adulte est la base du crâne à laquelle succède la *calvaria* (entre 9-12 ans), les fosses antérieures et moyennes du crâne et les éléments des étages moyens et inférieurs de la face (Bastir et al., 2006). L'intervalle d'âge estimé au cours duquel la *calvaria* achève son développement coïncide avec la fin du développement du cerveau (Ranly, 1988 ; Bastir et al., 2006). Soulignons par ailleurs que la mise en évidence des ces séquences de croissance et développement a une importance sur le plan structural. En effet, certains éléments montrant un aboutissement précoce de la croissance et du développement imposeraient alors aux autres éléments des contraintes structurales. C'est par exemple le cas du basicrâne, dont la maturité précoce engendrerait des conditions spatiales de développement sur les autres modules du bloc craniofacial (Bastir et al., 2006).

Comme nous l'avons mentionné, le cerveau en croissance constitue un moteur principal de la croissance du neurocrâne. Or, l'ontogénie du cerveau (et par extension celle du neurocrâne) ne montre pas un comportement linéaire. En effet, chez les Hommes modernes la première année après la naissance constitue l'intervalle de temps au cours duquel le cerveau présente la vitesse de croissance la plus rapide (e.g., Jolicoeur et al., 1988 ; Gilmore et al., 2007 ; Knickmeyer et al., 2008) après quoi celle-ci connaîtra un rythme ralenti similaire à celui observé chez les deux espèces de Panines (Leigh, 2004 ; Neubauer et al., 2010). Cet intervalle de temps que représente la première année coïncide d'ailleurs avec la phase dite de globularisation du neurocrâne, proposée par Lieberman et al. (2002) et spécifique aux Hommes modernes (caractérisée par la flexion du basicrâne ainsi que par les expansions importantes de la région pariétale et de la

fosse crânienne postérieure ; Lieberman et al., 2002 ; Gunz et al., 2010 ; Neubauer et al., 2010 ; Gunz et al., 2012 ; Neubauer et al., 2018 ; Gunz et al., 2019).

La croissance rapide et la plasticité du neurocrâne liées à la persistance des quatre fontanelles, font donc de la première année de vie après la naissance un instant clé pour les pratiques de modifications artificielles du crâne. En effet, les interventions visant à modeler ou modifier la forme de ce dernier et qui auront lieu au cours de cet intervalle de temps, affecteront en des mesures bien plus importantes sa forme finale.

2.3 Ontogénie mécaniquement contrainte dans le cas de modifications artificielles du crâne

Afin de fournir une vision dynamique de l'ontogénie neurocrânienne mécaniquement contrainte, nous nous arrêterons dans cette section sur la théorie des matrices fonctionnelles développée par Melvin Moss (1962, 1968). Moss (1958) compte d'ailleurs parmi les premiers à avoir livré une interprétation des modalités de croissance et de développement dans le cas de techniques de modifications artificielles du crâne. Dans la mesure où le cœur de cette étude est fortement influencé par les concepts qu'il établira et développera par la suite dans sa théorie des matrices fonctionnelles, nous présenterons dans un premier temps sa théorie de la croissance craniofaciale avant de nous pencher sur sa proposition d'interprétation adaptée à deux techniques de modifications artificielles du crâne.

2.3.1 Les matrices fonctionnelles

2.3.1.1 La théorie des matrices fonctionnelles

A partir des travaux de Van der Klaauw (1946, 1948-1952), Melvin Moss a élaboré la théorie connue sous le nom de théorie des matrices fonctionnelles (Moss, 1962, 1968).

La tête humaine est une partie anatomique au sein de laquelle s'exercent différentes fonctions. Dans la théorie des matrices fonctionnelles de Moss (1962, 1968), chacune de ces fonctions est assurée par un composant fonctionnel (terme emprunté à Van Der Klaauw, 1948-1952). Chacun de ces composants est lui-même composé de deux éléments : une matrice fonctionnelle et une

unité squelettique (Moss & Salentijn, 1969). Le terme d'unité squelettique désigne explicitement les « tissus squelettiques » (i.e., cartilage, os, tissus conjonctifs) dont le rôle consiste à soutenir et protéger leur matrice fonctionnelle respective (Moss, 1968 ; Moss & Salentijn, 1969). Quand un os est composé de différentes unités squelettiques, Moss & Salentijn (1969) emploient le terme d'unités microsquelettiques. Le terme d'unité squelettique fait référence au cas de figure où plusieurs os sont impliqués au sein d'un même composant fonctionnel (Moss & Salentijn, 1969). Le terme de matrice fonctionnelle renvoie à l'ensemble des tissus mous, dents ainsi que les espaces vides tels que les sinus qui vont assurer à proprement parler une fonction (e.g., la vue, la mastication ou la respiration ; Moss, 1968 ; Moss & Salentijn, 1969). Selon les mêmes auteurs, tout changement de taille ou de conformation de l'unité squelettique d'un composant fonctionnel intervient de manière secondaire et est donc toujours précédé par des changements affectant la matrice respective de ce composant fonctionnel. De manière plus spécifique, Moss (1997) estime que l'origine développementale des éléments du squelette crânien, ainsi que les changements de forme (i.e., de taille et de conformation) qui en découlent, constitueront toujours des réponses secondaires et compensatoires aux sollicitations mécaniques, ainsi qu'aux exigences spatiales et fonctionnelles imposées par des éléments non-squelettiques : tissus, organes ou volumes auxquels ces éléments sont associés. Pour résumer, les matrices fonctionnelles constituent le moteur même de la croissance des unités squelettiques qui vont alors répondre secondairement et de manière compensatoire.

Selon Moss (1997), il existe deux types de matrices : l'une étant capsulaire et l'autre périostée. La matrice périostée répond à des demandes opérationnelles (e.g., sollicitations musculaires) et agit directement et activement sur les unités squelettiques auxquelles elle est juxtaposée, par des activités de déposition/résorption osseuse (Moss, 1968 ; Moss & Salentijn, 1969). Ces matrices sont responsables des changements de forme des unités squelettiques (Moss, 2007). Selon Moss & Salentijn (1969), chaque unité squelettique est comprise au sein d'une matrice périostée. L'ensemble de ces matrices périostées et de leurs éléments squelettiques respectifs (i.e. l'ensemble des composants fonctionnels) est lui-même compris au sein de capsules crâniennes. Moss & Salentijn (1969) identifient deux capsules crâniennes : la capsule oro-faciale et la capsule neurocrânienne. Ces capsules crâniennes visent à protéger leurs matrices fonctionnelles respectives que sont les cavités du rhino- et nasopharynx pour la capsule oro-faciale et la masse neurale (i.e., la matrice capsulaire contenant le cerveau, les leptoméniges

et le liquide cébrospinal) pour la capsule neurocrânienne. Les matrices capsulaires constituent donc des espaces fonctionnels dont le volume s'accroît au cours de la croissance.

Au sein de la capsule neurocrânienne, la dure-mère représente l'élément non-ossifié et la *calvaria* l'élément ossifié (Moss & Young, 1960 ; Moss, 1968). L'unité squelettique que représente la *calvaria* contenue au sein de cette capsule assure la protection de la masse neurale (i.e., la matrice capsulaire contenant le cerveau, les leptoméniges et le liquide cébrospinal). L'expansion de la matrice capsulaire serait alors l'évènement à l'origine de l'expansion de la capsule neurocrânienne. La *calvaria* doit alors répondre à l'expansion de la masse neurale en accroissant sa surface. Parallèlement, les matrices périostées ont leur activité propre à laquelle les unités squelettiques doivent aussi répondre. Elles sont alors responsables de la croissance suturale et de la croissance par modelage osseux. Les éléments osseux de la *calvaria* sont alors relocalisés dans l'espace passivement et secondairement (Moss, 1968).

Les os de la *calvaria*, le périoste ectocrânien et la dure-mère constituent un même ensemble fonctionnel au sein duquel la dure-mère représente la part non-ossifiée et la *calvaria* la part ossifiée (Moss, 1958). Dans cet ensemble, la dure-mère va jouer un rôle clé puisque Moss (1958) estime que toute force extrinsèque (i.e., liée à l'environnement) ou intrinsèque (i.e., liée à la croissance cérébrale) agissant sur une partie du neurocrâne, sera transmise aux autres parties par les cloisons de la dure-mère.

2.3.2 Les matrices fonctionnelles et la modification intentionnelle du crâne

Dans le cadre d'une croissance et d'un développement contraints par un appareil céphalique et/ou un berceau, Moss & Young (1960), proposent de lire l'ontogénie neurocrânienne selon la séquence suivante : l'appareil céphalique et/ou le berceau vont d'abord endiguer la croissance du neurocrâne et l'adaptation structurelle de ses os face à la masse neurale en expansion (i.e., matrice capsulaire). Par conséquent, ces derniers ne sont pas en mesure de suivre leur propre mode de croissance (i.e., garanti par leur matrice périostée). Devant leur impossibilité à croître et se développer, les os du neurocrâne ne peuvent favoriser et accommoder la croissance de la masse neurale qui cherchera alors une résolution spatiale dans d'autres directions (Moss, 1958).

2.3.2.1 *Le cas de la modification tabulaire droite*

Selon Moss (1958), dans le cas de modification tabulaire droite (appelée « *vertical deformation* » dans le texte), l'apposition d'un élément de contrainte sur la partie postérieure de la voûte proscrit toute croissance du neurocrâne postérieurement. Les forces intrinsèques en jeu seraient alors contraintes et redirigées spatialement. Selon Moss (1958), ces forces trouveraient une résolution latéralement et supérieurement. Il en résulterait alors une élévation verticale et une expansion latérale de la voûte. Toutefois, Moss (1958) ne considère pas ces mécanismes compensatoires comme suffisants pour répondre aux exigences spatiales des éléments infra-tentoriels de la fosse crânienne postérieure (i.e., le tronc cérébral et le cervelet), dont la croissance est particulièrement rapide après la naissance. Moss (1958) avance alors que le cervelet n'ait d'autres possibilités que de croître antérieurement produisant une cyphose du tronc cérébral et des éléments basioccipitaux du crâne. Cela est plus ou moins corroboré par les diverses études montrant des résultats contrastés sur les conséquences de la modification crânienne au niveau de la morphologie de la base du crâne (e.g., Oetteking, 1924 ; Moss, 1958 ; Björk & Björk, 1964 ; McNeill & Newton, 1965 ; Pucciarelli, 1978 ; Schendel et al., 1980 ; Antón, 1989 ; Cheverud et al., 1992 ; Kohn et al., 1993 ; Ogura et al., 2006 ; Martínez-Abadías et al., 2009 ; Cocilovo et al., 2011 ; Jimenez et al., 2012 ; Ferros et al., 2014 ; Ferros et al., 2016 ; Cottin et al., 2017 ; Ketoff et al., 2017), et ce, probablement en raison des différences de systèmes typologiques utilisés par les uns ou les autres. En effet, tandis que Moss (1958) parle de « *vertical deformation* » et de « *oblique deformation* », certains auteurs classent l'ensemble des individus présentant des modifications artificielles affectant les parties antérieures et postérieures du crâne au sein d'un groupe dit « *fronto-occipital* » (cf. Cheverud et al., 1992 ; Cheverud & Midkiff, 1992) ou encore « *antero-posterior* » conformément aux typologies de Dingwall (1931) ou McGibbon (1912 ; cf. McNeill & Newton, 1965 ; Kohn et al., 1993 ; Kohn et al., 1995 ; Jimenez et al., 2012 ; Ferros et al., 2016 ; Cottin et al., 2017), tandis que d'autres appliquent le système typologique de Dembo & Imbelloni (1938) et classent les types tabulaires obliques et tabulaires droits au sein de la catégorie dite « *antero-posterior* » (cf. Antón, 1989 ; Cottin et al., 2017).

Aussi, dans le cas de la modification tabulaire droite, au niveau de l'étage supra-tentoriel, les cloisons de la dure-mère subiraient un mouvement ascendant en raison de la résolution spatiale de la masse neurale en expansion. Selon Moss (1958), ce mouvement causerait une orientation supérieure de leurs zones d'insertion au niveau basal. Il évoque ainsi une élévation de la crête pétreuse des os temporaux tandis que le processus *crista galli* resterait in affecté par ce type de

modification (la partie postérieure de la faux du cerveau compensant entièrement les contraintes spatiales du cerveau en croissance pour ce type de modifications). Par ailleurs, Moss (1958) estime que la force extrinsèque qu'exerce l'élément déformateur va aboutir à l'obtention d'un cerveau à la conformation non-sphérique (alors que celle-ci est plutôt sphérique dans des conditions physiologiques de croissance). Selon lui, la dure-mère répondrait à ce changement en augmentant sa surface.

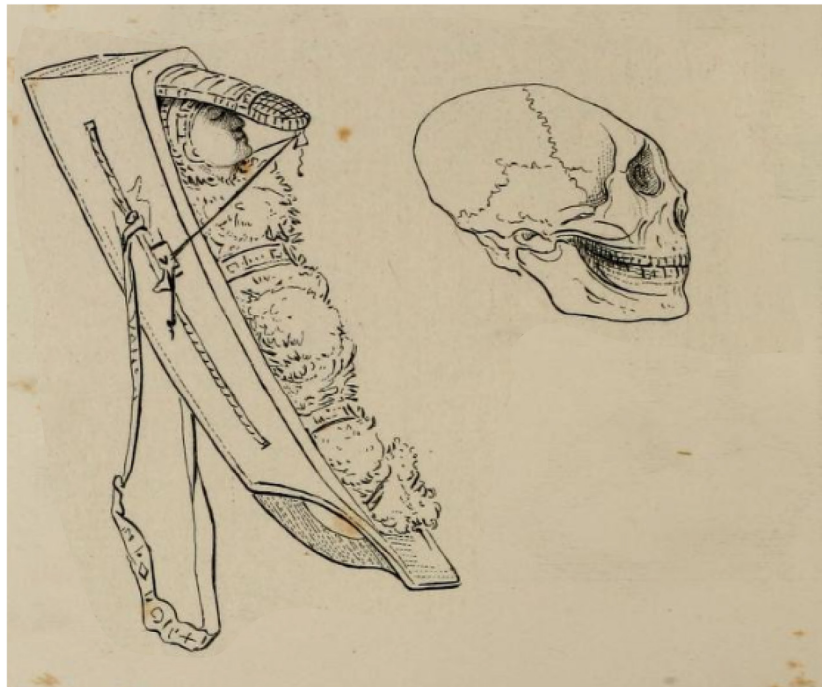
2.3.2.2 *Le cas de la modification tabulaire oblique*

Comme précédemment mentionné, Moss (1958) évoque un second type de modification qu'il qualifie de « *oblique deformation* ». Une partie du corpus utilisé dans notre étude provient de l'*American Museum of Natural History* (New York). En marge de l'étude de ce corpus, nous avons pu consulter certains crânes originaires de la communauté Chinook (communauté amérindienne de la côte Pacifique-Nord des Etats-Unis). Ces crânes ont vraisemblablement constitué l'échantillon étudié par Moss (1958). Nous aboutissons à des conclusions similaires à celle d'Antón (1989) qui rejette toute attribution de ces crânes à des formes annulaires ou circonférentielles comme cela a pu être mentionné par certains auteurs (e.g., McNeill & Newton, 1965). Antón (1989, p. 255) évoque simplement qu'il s'agit de modifications « *anteroposterior* ». Pour notre part, nous estimons que ce type de modification renvoie vraisemblablement au type tabulaire oblique décrit par Dembo & Imbelloni (1938). Le témoignage ethnohistorique de George Catlin (1857) rapporte que dans la culture Chinook, une technique de modification du crâne impliquant des berceaux permet l'obtention de formes tabulaires obliques Catlin (1857, p. 111, Plate 2101/2 ; Figure 2.7.a). Une telle affirmation est d'ailleurs confirmée par Dembo & Imbelloni (1938, p. 294) ayant publié un dessin qu'ils disent provenir de Meyer (1881)¹³, lequel rend compte d'un type de berceau permettant l'obtention de formes tabulaires obliques (Figure 2.7b). Des examens morphoscopiques et morphométriques approfondis sur l'ensemble de la collection seraient nécessaires pour éclaircir ce point.

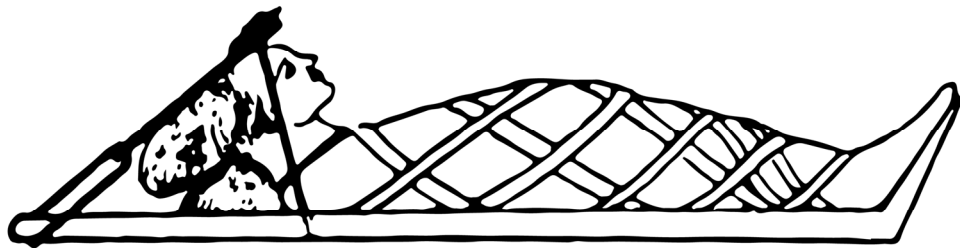
Pour ce type de modifications artificielles du crâne, Moss (1958) observe une platybasie (i.e., aplatissement de l'angle basicrânien) ainsi qu'une réorientation inférieure des crêtes pétreuses. Dans la mesure où l'expansion cérébrale est contrainte inférieurement et antérieurement, les fosses cérébrales antérieures et moyennes se retrouvent contraintes verticalement. La croissance

¹³ Nous avons pu consulter cet ouvrage et n'avons pas retrouvé le dessin que publient (Dembo & Imbelloni, 1938)

du cerveau et du neurocrâne ne peut donc s'effectuer que postérieurement, supérieurement et latéralement.



a.



b.

Figure 2.6 Illustrations montrant l'utilisation d'appareils céphaliques rigides associés à des berceaux, soumettant l'enfant à des forces de compressions constantes à l'origine des formes tabulaires obliques (a) Modifié d'après Catlin (1857) (b) Modifié d'après Meyer (1881).

Comme nous venons de le décrire, l'apposition d'un élément de contrainte sur le crâne d'un nouveau-né en affecte considérablement la croissance et le développement. Outre l'aspect « déformé » de plusieurs éléments crâniens, les sutures peuvent également constituer des éléments d'intérêt en nous renseignant sur la nature des forces mécaniques ayant œuvré et contribué à l'obtention d'une morphologie modifiée.

2.3.3 Croissance suturale et contraintes mécaniques

Certains auteurs avancent l'idée que les différences de morphologie des sutures sont déterminées par le type de forces mécaniques qui s'y exercent (e.g., Herring, 2008 ; Zollikofer & Weissmann, 2011). Dans la mesure où l'apposition d'un appareil céphalique sur le crâne d'un enfant constitue une force s'exerçant de manière continue, les informations qui figurent ci-après ne concernent que les conditions dites « quasi-statiques » (i.e., pour lesquelles une force de compression ou tension s'exerce en continu). Dans des cas de plagiocéphalie positionnelle affectant la suture lambdoïde, un épaissement de part et d'autre de la suture a été observé (Lin et al., 1997). Les auteurs affirment que les forces de compression s'appliquant sur une suture ont pour conséquence d'en augmenter le nombre d'interdigitations, d'en réduire la largeur, d'en diminuer la production osseuse et enfin sont responsables d'un épaissement osseux de part et d'autre de cette dernière (Bradley et al., 2000 ; Cray et al., 2010). En revanche, quand ces mêmes structures sont soumises à des forces de tension, Herring (2008) fait état d'une réponse ostéogénique plus importante au niveau sutural ainsi que d'un élargissement de la suture et un amincissement osseux de part et d'autre de celle-ci.

Afin de mieux connaître les modalités de croissance dans des conditions de contraintes mécaniques, Antón et al. (1992) ont quantifié la complexité morphologique des sutures neurocrâniennes. Les auteurs proposent que la redirection de la croissance de la masse neurale, liée aux contraintes engendrées par un appareil céphalique lors de pratiques de modifications artificielles du crâne, puisse exercer des forces susceptibles d'interférer sur l'activité ostéogénique au niveau sutural. Pour cela, ils ont quantifié et comparé la complexité morphologique des sutures neurocrâniennes entre des individus aux crânes non-déformés et des individus présentant deux types distincts de modifications crâniennes : le type tabulaire droit et le type annulaire (respectivement « *antero-posterior* » et « *circumferential* » dans le texte). Leurs résultats ont montré peu de différences entre les trois groupes en termes de complexité

suturale. Selon les auteurs, la conformation « déformée » du crâne ne résulterait donc pas d'un changement des modalités de croissance au niveau sutural. Ils proposent alors que la croissance par modelage osseux soit en fait le mécanisme prépondérant à l'origine de l'acquisition d'une conformation « déformée ».

Dans cette étude, les auteurs ont également répertorié les fréquences d'expression d'os surnuméraires (ou os wormiens) au niveau des sutures. Bien que l'expression des os wormiens soit déterminée génétiquement (ils constituent un des traits régulièrement observés dans les études de distances biologiques inter-populationnelles en raison de leur déterminisme génétique ; cf. Torgersen, 1954 ; Hauser & De Stefano, 1989), leur présence répondrait aussi à un environnement mécanique donné (White, 1996). Bien que certains auteurs présentent des constats plus nuancés (e.g., El-Najjar & Dawson, 1977 ; Wilczak & Ousley, 2009), la majorité des études montrent qu'il existe une expression préférentielle d'os wormiens lorsque des contraintes mécaniques s'exercent sur la *calvaria* (e.g., Ossenberg, 1970 ; Pucciarelli, 1974 ; El-Najjar & Dawson, 1977 ; Antón et al., 1992 ; Gerszten, 1993 ; White, 1996 ; Del Papa & Perez, 2007 ; Sanchez-Lara et al., 2007 ; Van Arsdale & Clark, 2012). Cela a conduit certains auteurs à proposer l'hypothèse d'une relation étroite entre les forces de tension ou de compression générées par la pratique de modification d'un crâne et l'existence d'os wormiens (Antón et al., 1992 ; White, 1996). Dans l'étude d'Antón et al. (1992), il a été mis en évidence que le nombre d'os surnuméraires à l'échelle intra-groupe était plus important chez les individus avec une modification tabulaire droite que chez ceux avec une modification annulaire. Certains auteurs (Antón et al., 1992 ; White, 1996 ; Sanchez-Lara et al., 2007) expliquent ce constat en proposant que la modification tabulaire droite exerce des forces de tension sur les sutures au niveau desquelles étaient apposés les éléments déformateurs. La modification de type annulaire agirait en créant des forces de compression au niveau des sutures, lesquelles montreraient une fréquence d'expression d'os surnuméraires plus faible. Une plus grande expression d'os wormiens serait alors conditionnée par des forces de tension en exercice sur les sutures.

Toutefois, comme le souligne White (1996), la compréhension des mécanismes à l'origine de ces forces de tension/compression et de leur interaction avec la croissance suturale reste encore à être élucidée. Outre des différences à des niveaux histologiques (contrairement aux sutures du plan médian, les sutures transversales sont constituées de deux couches osseuses superposées ; e.g., Opperman et al., 2005 ; Flaherty et al., 2016), les sutures diffèrent aussi les unes des autres en terme de moments d'activités ostéogéniques. Les sutures auraient donc des réponses

différentielles aux contraintes mécaniques imposées non seulement par les éléments déformateurs mais aussi par la masse neurale dont la croissance a été redirigée (White, 1996). White (1996) affirme que la suture sagittale constitue la structure dont le pic de l'activité ostéogénique coïncide avec l'intervalle de temps supposé au cours duquel les appareils céphaliques auraient été apposés sur le crâne des nouveau-nés (i.e., nombre d'auteurs rapportent que cette intervention devait avoir lieu au cours de la première année après la naissance ; e.g., Blackwood & Danby, 1955 ; Lieberman et al., 2000 ; Hutchison et al., 2004 ; Graham et al., 2005 ; Tiesler, 2014). De ce fait, la croissance suturale au niveau sagittal pourrait être la plus affectée par les pratiques de modification du crâne. Il convient également de souligner que les réponses ostéogéniques au niveau sutural sont aussi hautement dépendantes de facteurs culturels, tels que l'âge auquel la pratique a débuté ou l'intensité mécanique des forces de compression/tension s'exerçant sur les divers éléments neurocrâniens. Enfin, notons que la durée d'exercice des forces (i.e., durée d'apposition de l'appareil céphalique) est également un autre paramètre en mesure d'altérer les modalités de croissance au niveau sutural (Herring, 2008). A la différence des autres modes d'interventions dans le cadre des techniques de modifications crâniennes, le massage crânien (Hatt, 1915 ; Dingwall, 1931 ; Romano, 1974 ; Motte-Florac, 1997 ; Tiesler, 1998 ; Yon et al., 2017) serait quant à lui susceptible, d'un point de vue biomécanique, d'engendrer des réponses suturales différentes. En effet, cette pratique se rapporterait plus à une exposition cyclique, alors que dans les autres cas de figures la pratique de modification s'apparenterait plus à des conditions dites « quasi-statiques ».

3 Présentation des sites archéologiques étudiés

3.1 Sites préclassiques

3.1.1 Les sites Chupícuaro de la vallée d'Acámbaro

Avant la mise en eau du barrage Solis, des fouilles de sauvetage dirigées par Rubín de la Borbolla eurent lieu entre 1945 et 1947 dans la vallée d'Acámbaro (Estrada Balmori & Porter de Moedano, 1945 ; Porter, 1956). Celles-ci se concentrèrent sur différents sites et révélèrent un immense complexe funéraire datant du Préclassique récent, attribué à la culture Chupícuaro. Muriel Porter (1956) fait ainsi état de 388 sépultures mises au jour dans les cadres des fouilles entreprises sur le site d'El Rayo. Des prospections systématiques ont par la suite été menées par Charles Florance (1989), identifiant un total de 45 sites datés entre le Formatif récent et terminal. Les fouilles d'un site nommé La Virgen associé à la culture Chupícuaro furent également entreprises dans le courant des années 80 (Castañeda López & Cano Romero, 1993).

En 1998, un programme de recherche dirigé par Véronique Darras (CNRS) et Brigitte Faugère (Université Paris 1 – Panthéon-Sorbonne) et s'inscrivant au sein du projet « Dynamiques culturelles dans le Bajío » a eu pour visée une meilleure compréhension des dynamiques populationnelles et culturelles entre le Préclassique moyen et récent. Dans le cadre de ce projet, des fouilles menées sur deux sites ont permis la mise au jour de 16 sépultures primaires (Darras & Faugère, 2007 ; Barrientos Juárez, 2012) : le JR24 (La Tronera) et le TR6 (El Cuizillo de Don Fidel Herrera).

Initialement repéré par Florance (1989), le JR24 se situe dans la partie orientale de la vallée et dépend de la commune de Jerécuaro. La séquence céramique et stratigraphique du site, ainsi que les datations radiocarbones réalisées sur des charbons et des fragments osseux ont permis d'établir la chronologie de référence pour les sites de la culture Chupícuaro (Darras & Faugère, 2007). Ces éléments de datation ont pu également rendre compte d'une première phase d'occupation du site remontant à la fin du Préclassique moyen (i.e., aux alentours de 500 av. J.-C.) et une fin d'occupation estimée au début du Classique ancien (entre 100 et 200 apr. J.-C.). Les individus des sépultures du JR24 considérées dans cette étude sont datés du Préclassique récent (400 – 100 av. J.-C.)

3.2 Sites classiques

3.2.1 *Les sites du bassin de Zacapu*

3.2.1.1 *Guadalupe*

Le site de Potrero de Guadalupe (plus simplement Guadalupe) ou Mich. 215 se situe dans la partie occidentale du bassin lacustre de Zacapu, situé dans le Nord de l'état du Michoacán (Figure 3.1). Le bassin de Zacapu a été asséché au début du XXe siècle de notre ère. Avant cela, il constituait un vaste marais d'où émergeaient des reliefs correspondant à « de légères ondulations du terrain », appelés *Lomas* (Pereira, 1999, p. 13). Plus spécifiquement, elles désignent des éminences naturelles qui firent l'objet de diverses étapes successives de rehaussement artificiel (Carot, 1993 ; Pereira, 1999). Le site de Guadalupe était établi sur l'une d'entre elles et a été repéré au cours de prospections menées dans le cadre de la première étape du Projet Michoacán (Arnauld et al., 1993)¹⁴. Les fouilles extensives entreprises en 1986 mirent en évidence deux structures funéraires au sein desquelles quatre sépultures purent être fouillées. Les deux campagnes de fouilles conduites par la suite en 1993 eurent pour objectifs d'étendre la zone de fouilles des précédentes opérations afin d'appréhender la variabilité des sépultures mais aussi de comprendre l'organisation spatiale et l'évolution chronologique du complexe funéraire (Pereira, 1999). Une nouvelle campagne menée en 1998 a permis de dégager un nouvel ensemble funéraire (Pereira, 2010). A l'issue de ces diverses fouilles, 43 sépultures ont été mises au jour.

3.2.1.2 *Loma Alta*

Tout comme pour le site de Guadalupe, le site de Loma Alta ou Mich. 66 se trouve sur une *loma* du bassin de Zacapu (Figure 3.1). Comme son nom l'indique, il occupe la loma la plus élevée, culminant à 6-7 mètres de hauteur mais aussi la plus étendue (i.e., 8 hectares).

Il a été identifié en 1983 et les premières fouilles se limitèrent à quatre sondages avant que d'autres opérations de fouilles, cette fois-ci extensives, ne soient menées en 1985 et 1986 dans le cadre de la première étape du projet Michoacán (Arnauld et al., 1993). Les opérations ont

¹⁴ Le projet Michoacán est un vaste projet archéologique entrepris entre 1983 et 1996 par des chercheurs français associés au Centre d'Etudes Mexicaines et Centre-Américaines et des chercheurs mexicains. Il a été mené en trois étapes : le Projet Michoacán I, le Projet Michoacán II et le Projet Michoacán III.

mis en évidence l'existence d'un complexe funéraire important localisé dans le nord-ouest de la *loma*. Ce dernier révéla des pratiques funéraires diverses puisque l'on y fait état d'urnes cinéraires et d'individus inhumés datant de la dernière phase de la période préclassique (i.e., 100 - 0 av. J.-C. ; Arnould et al., 1993 ; Carot, 1993). De nouveaux travaux de fouilles furent entrepris en 1994 afin de comprendre les modalités d'élaboration de ce monticule artificiel. Une tranchée localisée dans la partie orientale de la *loma* révéla de nouvelles sépultures que l'on attribue à une phase plus récente qui correspond à la deuxième étape de construction du site (plus spécifiquement entre 0 et 350 apr. J.-C. ; Pereira, 1999). Il s'agit donc de deux ensembles funéraires attribuables au Préclassique final pour l'ensemble funéraire nord-ouest et à la fin du Préclassique final - début du Classique pour le complexe funéraire oriental¹⁵.

3.3 Les sites postclassiques

3.3.1 *Les sites du bassin de Zacapu*

3.3.1.1 *El Palacio*

Le site d'El Palacio-la Crucita (Mich. 23) occupe la partie sud-est du Malpaís de Zacapu¹⁶ (Figure 3.1). Son nom, selon Lumholtz & Hrdlička (1898), proviendrait d'une croyance selon laquelle il aurait constitué une des résidences du souverain de Tzintzuntzan (la capitale de l'« empire » tarasque ; cf. Figure 3.1). Dans la suite de notre travail, nous ferons référence à ce site sous le nom d'« El Palacio » ou sous le code lui ayant été attribué dans le cadre du projet Michoacán : Mich. 23.

Les premières fouilles archéologiques du site ont été entreprises par Carl Lumholtz (1902) à la fin du XIXe siècle. Cependant, les informations concernant le contexte stratigraphique ainsi que l'emplacement de la fouille de ce dernier sont ténues. Dans le courant du XXème siècle, d'autres fouilles ont également été réalisées sur le site d'El Palacio dont celles menées par Alfonso Caso (1930) et Marie Kimball Freddolino (1973) qui n'ont effectué que des sondages ponctuels pour lesquels les informations stratigraphiques sont restées également lacunaires. Ce

¹⁵ Le choix de faire figurer Loma Alta parmi les sites classiques fait directement suite au fait que le seul individu provenant de Loma Alta considéré dans notre corpus d'étude, provient d'une sépulture datée du début du classique (Pereira, 1999).

¹⁶ Le terme de Malpaís que l'on peut littéralement traduire comme « mauvais pays », fait référence à des paysages accidentés et arides. Dans le cas du Malpaís de Zacapu, ce terme renvoie à un ensemble de coulées volcaniques successives issues de différents événements volcaniques ayant marqué la région depuis le Pléistocène supérieur jusqu'à l'Holocène (Mahgoub et al., 2018 ; Reyes-Guzmán et al., 2018).

n'est qu'au cours des différentes étapes du Projet Michoacán que de nouveaux sondages permirent d'améliorer la chronologie du site (Migeon, 1990 ; Michelet, 1992 ; Michelet et al., 1995). Des fouilles d'habitats ont également été entreprises dans le début des années 1990 par l' *Instituto Nacional de Antropología e Historia* (cf. Forest, 2014). Plus récemment, le site a fait l'objet de deux sondages en 2012 (Jadot, 2013) et six en 2017 (Pereira, 2017, pp. 27-33 ; Pereira et al., 2018, pp. 139-172). Ces différents sondages ont mis en lumière plusieurs phases d'occupation du site, estimant ainsi qu'il fut peuplé de manière continue depuis le IXe siècle de notre ère et jusqu'à la période coloniale (Migeon, 1990 ; Michelet, 1992 ; Michelet et al., 1995 ; Jadot, 2013 ; Forest, 2014 ; Jadot, 2016).



Figure 3.1 Carte du Centre-Ouest mésoaméricain répertoriant les sites archéologiques

Les éléments squelettiques issus des fouilles menées par Lumholtz représentent la totalité de notre corpus provenant d'El Palacio. Par conséquent, nous ne présentons ici que les quelques données contextuelles disponibles. Elles se sont concentrées sur un espace restreint puisqu'elles furent conduites sur une surface de 25 square yards (équivalents à environ 22,86 mètres carrés ; Lumholtz & Hrdlička, 1898) et ont révélé un complexe sépulcral d'où ont été prélevés du matériel céramique, des éléments métalliques (i.e., des grelots en cuivre) et certains restes des individus inhumés (i.e., l'ensemble des blocs craniofaciaux mais aussi certains éléments incisés du squelette postcrânien Pereira, 2005). Ces vestiges ont été emmenés à l'*American Museum of Natural History* de New York, où ils sont encore conservés aujourd'hui.

Les informations concernant la fouille en elle-même sont sommaires et les données contextuelles quasi-absentes. Tout cela interroge la position stratigraphique ainsi que la distribution verticale des restes humains et des objets archéologiques, et par là-même leur contemporanéité; les éléments pouvant être issus de couches stratigraphiques différentes et/ou occuper des positions secondaires. Le prélèvement d'une urne funéraire de tradition Milpillas laisse tout de même penser qu'il s'agirait d'un contexte datant du Postclassique moyen (i.e., 1250 - 1450 apr. J.-C. ; Lumholtz, 1902, p. 427 ; Puaux, 1989 ; Pereira, 2005). Seules des datations réalisées de manière directe et systématique sur l'ensemble de la collection anthropologique sembleraient pouvoir éclaircir la question de la contemporanéité du corpus.

Signalons enfin que parmi les sondages entrepris dans le cadre du Projet Michoacán, l'un d'eux a livré une sépulture double datée du Postclassique Ancien (900 – 1200 apr. J.-C.), au sein de laquelle seul un crâne appartenant à un individu de sexe féminin a été conservé (Puaux, 1989 ; Pereira, 1999, p. 196). Ce dernier, bien que présentant une déformation de type tabulaire plano-lambdatique, ne figure pas dans notre corpus en raison des importantes altérations qu'il présente (i.e., une exposition vraisemblable au feu a endommagé une large partie de l'écaille temporale et de l'os pariétal gauches). Il fera l'objet de comparaisons *a posteriori*, notamment avec les individus d'Angamuco du bassin de Patzcuaro dont les modifications du crâne présentent des caractéristiques similaires.

3.3.1.2 Malpaís Prieto

Le site de Malpaís Prieto ou Mich. 31, à l'instar d'El Palacio, occupe une partie du Malpaís de Zacapu (plus spécifiquement sa partie nord, laquelle correspond à la coulée volcanique la plus récente ; Figure 3.1). Les premières fouilles archéologiques effectuées sur le site remontent à la première étape du Projet Michoacán au cours de laquelle deux sondages avaient été réalisés et avaient mis au jour du matériel attribuable au Postclassique moyen (i.e., 1200 - 1450 apr. J.-C. ; Migeon, 1990 ; Michelet, 1992). De nouvelles fouilles archéologiques furent entreprises en 2010 au lancement du projet Uacúsecha dirigé par Grégory Pereira (CNRS). L'ensemble du matériel recueilli ainsi que les diverses datations réalisées attestent d'une occupation du site très importante mais de courte durée, rendant ainsi compte des profondes transformations sociopolitiques qu'a connues la région au milieu de la période postclassique (Pereira et al., in press).

Si plusieurs sépultures provenant de contextes d'habitats ont livré des restes humains (i.e., deux adultes, un individu sub-adulte et huit d'âges inférieurs à 5 ans Pereira et al., in press), la grande

majorité de ceux ayant été découverts dans le cadre de ce projet provient d'un complexe cérémoniel fouillé entre 2012 et 2014. Une partie des travaux archéologiques s'est attachée à la fouille d'une plateforme quadrangulaire (S3) située dans la partie occidentale de la place cérémonielle principale, devant la *yácata* J7¹⁷ (cf. Pereira, 2013, p. 40 ; Forest, 2014, p. 157 ; Pereira et al., 2015, p. 8). Un espace funéraire associé à celle-ci y a été dévoilé et a révélé la présence de sépultures en urnes et en fosses. Malgré de nombreux pillages, 42 dépôts de restes humains dans un excellent état de conservation purent être récupérés (Pereira, 2013, 2014 ; Pereira et al., 2015).

3.3.2 La vallée de Pátzcuaro

3.3.2.1 Angamuco

Angamuco est localisé dans la portion sud-est du bassin de Pátzcuaro, lui-même situé à une quinzaine de kilomètres au sud-est du bassin de Zacapu. A l'instar de Malpaís Prieto et El Palacio, il se trouve dans un *malpaís*. Plus spécifiquement, il occupe deux coulées volcaniques que l'on estime remonter à l'Holocène (Cohen, 2016). Le projet *Legacies of Resilience - Lake of Patzcuaro Basin*, dirigé par Chris Fischer (Colorado State University) et initié en 2007, avait pour objectif d'évaluer les relations entre changements socio-politiques et environnementaux dans la partie sud-orientale du bassin de Pátzcuaro et ce tout au long de la période postclassique. L'étude du site s'est caractérisée par des travaux de prospections pédestres (entre 2009 et 2011), de fouilles archéologiques et de couverture LiDAR (*Light Detection And Ranging*). L'ensemble des données récoltées dans le cadre du projet permet de faire remonter l'apogée de son occupation au Postclassique moyen et récent (1188 – 1617 apr. J.-C.)¹⁸.

La totalité des fouilles conduites sur le site fit l'objet de deux campagnes (en 2013 et 2014). En 2014, une partie des fouilles s'est concentrée sur l'*Area C*, laquelle désigne une *yácata* située sur une place à laquelle sont également associés deux autels (cf. Cohen, 2016, p. 193 ; Fisher

¹⁷ Les *yácatas* désignent les temples-pyramidaux ou pyramides caractérisés par leur escalier frontal au sommet duquel se dressait un temple. Ils sont associés à des structures de plus petites dimensions interprétés comme des autels.

¹⁸ L'intervalle de temps présenté ici repose sur les intervalles de confiance de 95% de différentes datations radiocarbones entreprises sur des os humains de l'espace funéraire (Cohen, 2016, p. 162). Soulignons tout de même que la présence de certaines structures archéologiques (i.e., *patios hundidos*) dans la partie supérieure du groupe urbain semblent attester également d'une occupation plus ancienne (i.e., Classique - Epiclassique ; Cohen, 2016)

et al., 2019, pp. 516-518). S’inspirant de la stratégie de fouilles mise en place à Malpaís Prieto, elles se focalisèrent sur ce complexe par le biais d’une tranchée est-ouest située devant la *yácata* ainsi que deux sondages au sud et à l’ouest d’un des deux autels. L’ensemble a révélé 25 dépôts de restes humains dans des positions primaires et secondaires pour un nombre minimum d’individus de 71 (Cohen, 2016, p. 193). C’est de cet ensemble que provient le corpus de notre étude.

3.4 Synthèse sur l’évolution des modifications artificielles du crâne dans le Centre Ouest de la Mésoamérique

A partir des analyses morphoscopiques proposées par Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938) et agrémentées de celles développées par Romano (1974) et Tiesler (2012b), mais aussi à l’aide d’analyses morphométriques (e.g., mesures linéaires et angulaires inscrites dans le quadrilatère de Klaatsch ; Klaatsch, 1909 ; Ferembach, 1954), Pereira (2018) a mis en évidence la diversité et l’évolution des pratiques de modifications artificielles du crâne dans le Centre-Ouest mésoaméricain (résumés par la Figure 3.2). Pour cela, il s’est appuyé sur un échantillon de 250 individus couvrant les périodes préclassiques (600 av. J.-C. – 300 apr. J.-C.), classiques/épiclassiques (300 – 900 apr. J.-C.) et postclassiques (900 – 1500 apr. J.-C.).

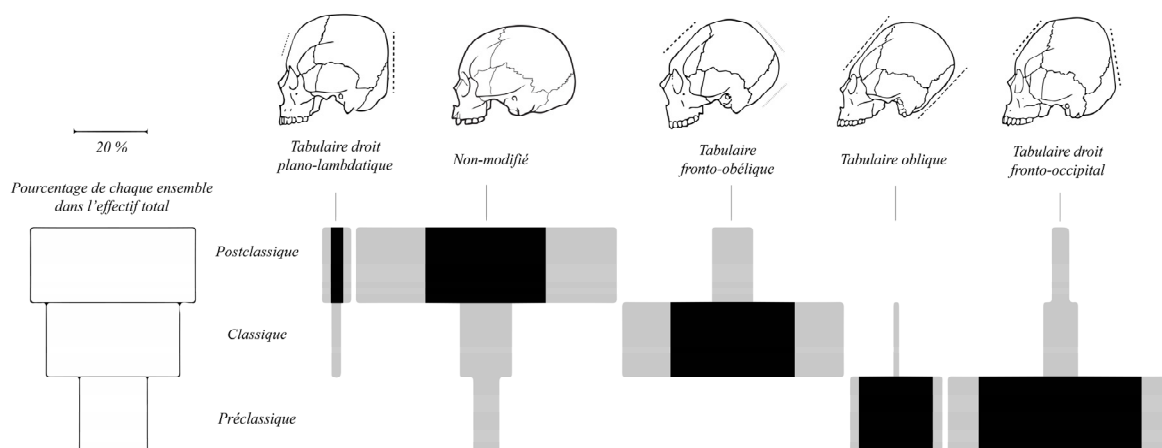


Figure 3.2 Evolution chronologique des types de modifications artificielles du crâne établi par Pereira (2018) à l’aide de la méthode du sériographe développée par Desachy (2004).

La période préclassique (600 av. J.-C. – 300 apr. J.-C.) constitue un intervalle de temps au cours duquel la pratique de modification artificielle du crâne était généralisée et se caractérisait majoritairement par la variété tabulaire droite (25 individus parmi 45 présentent ce type). Bien que les individus de certains sites datant de la fin de cette période montrent l'expression de formes tabulaires droites de plus faible intensité, les formes observées à la fois pour les populations de Chupícuaro mais aussi pour les individus de Loma Alta présentent des types « extrêmes » de modifications tabulaires droites (selon la classification d'Imbelloni, Dembo & Imbelloni, 1938). Des cas de modifications de types tabulaires obliques sont également relatés mais à une fréquence un peu plus faible que pour les cas de modifications tabulaires droites puisque l'on en dénombre 12 cas.

Bien que le type tabulaire droit persiste, la période classique, quant à elle, est surtout dominée par le type fronto-obélique identifié par Pereira (1999, p. 153). Elle montre un changement important puisque le type tabulaire oblique semble avoir disparu et que les formes fronto-obéliques sont exprimées très majoritairement. Pereira (2018) dénombre ainsi 46 cas présentant cette forme parmi les 54 individus qui composent l'échantillon classique. L'attribution à une forme à part entière résulte de plusieurs observations majoritairement menées sur les crânes d'individus provenant non seulement de Guadalupe mais aussi du site d'El Palacio. En effet, Pereira (1999, pp. 153-157 ; 2018, p. 664) indique l'existence d'un plan de compression antérieur au niveau de l'écaille de l'os frontal. Le plan de compression postérieur pour ces formes est localisé au niveau de l'obélium, ce qui les différencie donc des types tabulaires droits et obliques. Bien que ce type présente un aplanissement au niveau de la base de l'écaille de l'os occipital, ce dernier apparaît moindre en comparaison avec les types obliques de la période préclassique. Ces formes ne peuvent pas non plus être catégorisées dans une classe mimétique, pour laquelle elles présenteraient un mélange de caractères propres aux modifications tabulaires droites ou obliques et aux modifications tabulaires supérieures ou obéliques (lesquelles sont décrites par nombre d'auteurs ; e.g., Dembo & Imbelloni, 1938 ; Stewart, 1939 ; Martínez de León Mármol, 2009 ; Tiesler et al., 2009 ; Nelson & Madimenos, 2010 ; Tiesler et al., 2013 ; Gómez-Valdés et al., 2018). En effet, dans le cas de ces modifications fronto-obéliques, le plan de compression situé au niveau de l'obélium n'est pas aussi invasif que dans le cas des formes purement obéliques, pour lesquelles les auteurs rapportent qu'elles puissent avoir été obtenues par apposition d'éléments rigides, qu'il s'agisse d'un berceau ou d'un appareil céphalique (Martínez de León Mármol, 2009 ; Nelson & Madimenos, 2010 ; Tiesler, 2012a ; Tiesler et al., 2013). Le plan de compression antérieur de ces formes fronto-obéliques résulterait de l'emploi

d'une petite tablette. En revanche, le confinement du plan de compression postérieur à une petite superficie au niveau de l'obéliion et le léger aplanissement de la base de l'écaille de l'occipital seraient associés à l'utilisation d'éléments de contention plus souples (i.e., système de bandes ou ligatures ; Pereira, 2018, pp. 665-667). Ces formes peuvent ainsi être rapprochées des types bilobés et trilobés décrits par Gosse (1855), mais aussi par Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938).

La période postclassique (900 – 1500 apr. J.-C.) est marquée par l'importante proportion d'individus ne montrant aucun signe de modifications artificielles du crâne (Pereira, 2018 en dénombre 76 pour 117 individus). Les formes de modifications représentées à cette période se caractérisent surtout par les types fronto-obéliques, quelques tabulaires droits et des types plano-lambdatiques. (cette forme semble caractéristique de cette période puisque seuls deux cas pour un total de 88 individus avaient été identifiés pour la période classique/epiclassique contre huit pour le Postclassique ; Pereira, 2018). Parmi les individus observés, Pereira (2018, p. 670) relate que certains présentent des modifications si légères qu'il est parfois difficile d'en identifier le type. Cette spécificité compte parmi les nombreux changements d'ordres culturels qui interviennent dans le bassin de Zacapu au Postclassique (Pereira et al., in press). En effet parmi ces changements de nouvelles modalités d'occupation de territoire voient le jour et se caractérisent par le rassemblement de la population dans de nouveaux centres urbains (Pereira et al., in press). Ces changements sont interprétés comme résultant d'importants mouvements populationnels et plus spécifiquement de l'arrivée d'une nouvelle population dans cette région. Dans l'hypothèse où la modification artificielle du crâne puisse constituer un facteur d'ordre identitaire, sa caractérisation dans un tel contexte s'avère primordiale. Toutefois, ce procédé reste complexe en raison de l'émergence de formes plus ténues et pour lesquelles d'ailleurs un doute peut persister quant à leur aspect modifié. La compréhension des mécanismes de croissance et développement du neurocrâne couplée à une approche quantitative visant à mettre en évidence à l'aide de descripteurs fins, les changements morphologiques neurocrâniens entre individus, constituent ainsi des enjeux de taille pour tenter d'attester de ces formes, d'en comprendre les modalités de ce processus technique et d'en saisir les enjeux et les intentions.

4 Matériels et méthodes

4.1 Echantillon

Nous présentons le corpus d'étude de crânes dans le Tableau 4.1. et l'Annexe 1. Un certain déséquilibre en nombre d'individus existe entre les périodes préclassiques et classiques. Ce déséquilibre fut indépendant de notre volonté. Il résulte en premier lieu des difficultés que nous avons rencontrées pour avoir accès aux collections ostéologiques relatives à l'Occident mésoaméricain. Par ailleurs, de nombreux spécimens provenant des collections du CEMCA ne répondaient pas aux critères de conservation que nous avons fixés pour inclure un individu dans l'échantillon. Ils durent être écartés pour cette raison.

Tableau 1 Corpus de crânes considéré

Site	Période	Collection/Project	Institution	Acquisition surfacique	Acquisition tomodensitométrique (CT-scan)
Angamuco	Postclassique (900 - 1500 apr. J.-C.)	Projet LORE-LPB	CEMCA	3	3
El Palacio (Mich. 23)	Postclassique (900 - 1500 apr. J.-C.)	Lumholtz Collection	AMNH	32	19
Huichol population	Contemporain	Lumholtz Collection	AMNH	17	17
JR24	Préclassique (600 av. J.-C. - 300 apr. J.-C.)	Projet Chupícuaro	CEMCA	3	3
La Granède	Médiéval français (VIIIe - IXe siècle de notre ère)	La Granède	Ostéothèque - Pessac	15	0
Malpaís Prieto (Mich. 31)	Postclassique (900 - 1500 apr. J.-C.)	Projet Uacúsecha	CEMCA	24	24
Loma Alta (Mich. 66)	Classique/Epiclassique (300 - 900 apr. J.-C.)	Projet Michoacán	CEMCA	1	1
Guadalupe (Mich. 215)	Classique/Epiclassique (300 - 900 apr. J.-C.)	Projet Michoacán	CEMCA	0	1

Par ailleurs, afin d'apporter des éléments sur l'origine des variations observées dans les pratiques de modifications artificielles du crâne entre les différentes périodes de notre étude, nous avons également procédé à une étude préliminaire des distances biologiques interindividuelles en utilisant la morphologie de la jonction émail-dentine et l'épaisseur de l'émail des deuxièmes molaires supérieures¹⁹ comme indicateurs (cf. *infra*). Le but était

¹⁹ Les secondes molaires supérieures ont été sélectionnées car elles sont a priori moins affectées par l'usure occlusale que les premières molaires et car leur développement est plus corrélé à la maturation somatique et sexuelle que celui des troisièmes (Garn et al., 1962).

d'évaluer l'existence ou non de spécificités morphologiques au niveau des deuxièmes molaires supérieures chez des individus postclassiques en comparaison avec ceux des périodes antérieures. En effet, de nombreuses études ont montré que la jonction émail-dentine (JED) et, dans une moindre mesure, l'épaisseur d'émail constituaient des variables fiables dans la caractérisation des relations phylogénétiques, la détermination taxinomique ou la mise en évidence de différents modes de développement chez les hominines (Martin, 1985 ; Macho & Berner, 1993 ; Kono, 2004 ; Macchiarelli et al., 2006 ; Olejniczak et al., 2008 ; Skinner, 2008 ; Skinner et al., 2008 ; Bayle et al., 2009b ; Dean, 2009 ; Guatelli-Steinberg, 2009 ; Smith et al., 2012 ; Pampush et al., 2013 ; Smith, 2013 ; Zanolli et al., 2015). La forme de la JED a récemment été démontrée comme particulièrement efficace pour distinguer des individus, y compris à échelle microévolutive (e.g., Skinner et al., 2009 ; Le Luyer, 2016 ; Le Luyer et al., 2016 ; Le Luyer & Bayle, 2017 ; Martin et al., 2017 ; Davies et al., 2019). Représentant de l'état embryologique de l'organe dentaire, la JED constitue une représentation proche de l'épithélium dentaire interne du germe (Butler, 1956, 1999). Pour réaliser ces analyses dentaires, un échantillon d'individus datant du Postclassique (i.e., provenant de Malpaís Prieto) a été comparé à un ensemble d'individus provenant de sites datant de périodes antérieures (Tableau 4.3). Hormis pour les sites de Guadalupe et de Loma Alta, les autres sites n'ont pas été décrits dans le présent travail. En effet, les échantillons en provenance de ceux-ci ont été sélectionnés à titre exploratoire, mais aucun crâne de ces sites n'a encore pu être intégré à notre étude des modifications artificielles du crâne. Nous considérerons donc les individus provenant de ces sites comme un échantillon classique/épiclassique homogène auquel seront comparés les individus de Malpaís Prieto.

4.2 Estimation de l'âge au décès et détermination du sexe

Si la présence de différences de conformation neurocrânienne ou d'épaisseurs de voûte liées à l'âge (e.g., entre deux individus immatures appartenant à deux classes d'âge différentes) peut sembler assez intuitive en raison des différences de taille et de développement existant entre ceux-ci (e.g., pour la conformation du neurocrâne : Zollikofer & Ponce de León, 2002 ; Bastir et al., 2006 ; pour l'épaisseur de la voûte : Anzelmo et al., 2015), il est à noter que des auteurs ont également rapporté l'existence d'un dimorphisme sexuel s'exprimant au niveau de la conformation du neurocrâne (e.g., Graw et al., 1999 ; Rosas & Bastir, 2002 ; Bulygina et al., 2006 ; Garvin & Ruff, 2012 ; Shearer et al., 2012 ; Perlaza, 2014) ainsi que l'épaisseur de la

voûte (e.g., Smith et al., 1985 ; Ishida & Dodo, 1990 ; Nawrocki, 1991 ; Moreira-Gonzalez et al., 2006 ; Marsh, 2013 ; De Boer et al., 2016)²⁰. Pour ces raisons, nous avons estimé et déterminé respectivement ces deux facteurs dans le cadre de nos études afin de pouvoir, dans la mesure du possible, en évaluer et en contrôler l'incidence sur nos résultats et interprétations.

4.2.1 Influence de l'âge sur la conformation neurocrânienne et sur l'épaisseur de la voûte

Comme nous l'avons précédemment évoqué, Bastir et al. (2006) ont rapporté que le neurocrâne atteignait sa maturité développementale aux alentours de 9,9 – 11,4 ans. Cela sous-entend donc une absence de différences de conformation entre des individus appartenant à des classes d'âge postérieures à cet intervalle. Sur le plan de la croissance (i.e., différences de taille), les mêmes auteurs rapportent que le neurocrâne achève sa croissance avant 11,4 ans. Ces résultats nous ont donc amenés à la conclusion que l'intégration d'individus appartenant à une classe d'âge 10 – 20 ans au sein d'un échantillon d'adultes (d'âges supérieurs à 20 ans) pourrait être réalisée sans que cette différence d'âge n'introduise un biais dans la quantification des différences de conformations.

Anzelmo et al. (2015) ont étudié les variations d'épaisseurs de la voûte au cours de l'ontogénie et ont observé des différences significatives pour deux des comparaisons entre classes d'âge qu'ils ont réalisées. Ces différences concernent la comparaison entre les classes d'âge 0 – 6 ans et 7 – 11 ans et les classes d'âge 12 – 17 ans et ≥ 17 ans. Toutefois, la *one-way* ANOVA (i.e., *Analysis of Variance*) réalisée pour cette dernière comparaison montre un coefficient de détermination (R^2) plutôt faible (environ 28% ; Anzelmo et al., 2015, p. 479), ce qui suggère que les différences d'âge n'expliquent qu'un faible pourcentage de la variabilité de la moyenne d'épaisseurs de voûte entre adolescents et adultes. Soulignons que ces résultats portent sur l'ensemble de la voûte du crâne dont la variabilité est résumée par une seule variable (l'épaisseur de voûte moyenne). Toutefois, afin de limiter l'influence que l'âge de l'individu pourrait occasionner sur l'étude de l'épaisseur de la voûte, aussi faible soit-elle, nous avons exclusivement considéré des individus d'âge supérieur à 20 ans.

²⁰ L'existence d'un dimorphisme sexuel s'exprimant par des épaisseurs de voûte différentes reste encore débattue, avec certaines études montrant des variations voisines entre individus de sexe féminin et individus de sexe masculin (cf. Adeloje et al., 1975 ; Ross et al., 1998 ; Lynnerup, 2001 ; Anzelmo et al., 2015).

4.2.2 Estimation de l'âge au décès

Il était donc nécessaire d'estimer l'âge de chacun des individus considérés dans nos études dans le but de différencier clairement les individus adultes (d'âge supérieur à 20 ans) des individus appartenant à la classe d'âge antérieure. Selon les recommandations de Ferembach et al. (1979) et de Thomas (2011, p. 86), est attribuable à la classe d'âge des 15 – 19 ans tout individu présentant un début d'ossification des centres d'ossification secondaires aux centres primaires au niveau des os longs et une maturation complète des deuxièmes molaires. Afin de confirmer l'attribution à cette classe d'âge, nous avons également estimé l'âge à partir de la maturation dentaire, sur la base des méthodes développées par Moorrees et al. (1963) et Demirjian et al. (1973). Dans la mesure où certains des individus répondant à ces critères présentaient des séquences d'éruption et de développement dentaire correspondant à des âges plus précoces, nous avons élargi cette classe d'âge à l'intervalle 10-20 ans et substitué le terme de sub-adulte à celui d'adolescent afin d'éviter toute confusion.

L'association d'un individu à la classe « adulte » a été réalisée par observation de plusieurs critères. A été systématiquement considéré comme appartenant à la classe d'âge des adultes tout individu dont la maturation dentaire et la maturation squelettique (à l'exception de la crête iliaque et de l'extrémité sternale de la clavicule) étaient achevées (Brůžek et al., 2005). D'autres éléments anatomiques ont également participé à la distinction entre sub-adultes et adultes. Il s'agit de la fusion complète des anneaux épiphysaires des vertèbres (Scheuer & Black, 2000) et de la fusion complète de la synchondrose sphéno-occipitale (dans la littérature le terme de « synchondrose sphéno-basilaire » existe et renvoie à la même structure anatomique ; Ferembach et al., 1979)²¹.

4.2.3 Influence du sexe sur la conformation neurocrânienne et sur l'épaisseur de la voûte

Le travail de Bulygina et al. (2006) a démontré l'existence de différences liées au sexe apparaissant tôt au cours de l'ontogénie. Celles-ci s'expriment dès la naissance au niveau de la taille du neurocrâne, plus grande chez les individus de sexe masculin²². Des différences de conformation existent également à l'âge adulte et s'expriment majoritairement en deux zones

²¹ Une grande partie du corpus de notre étude provient de la collection de Lumholtz (cf. *supra*) pour laquelle seuls les crânes ont été conservés. Dans ces cas-là, seuls les critères de maturation dentaire et de fusion de la synchondrose sphéno-occipitale furent pris en considération.

²² Les auteurs de l'étude parlent du neurocrâne mais il s'agit plus exactement de l'écaille de l'os frontal qui a fait l'objet de comparaisons.

bien précises : la région supra-orbitaire et celle de la protubérance occipitale externe (Rosas & Bastir, 2002 ; Bigoni et al., 2010 ; Garvin & Ruff, 2012 ; Shearer et al., 2012). Elles constituent par ailleurs deux des traits traditionnellement cotés dans le système d'attribution du sexe à partir du bloc cranio-facial développé par Buikstra & Ubelaker (1994). Nous avons donc procédé à sa détermination afin de contrôler l'incidence d'un éventuel signal lié au dimorphisme sexuel sur nos résultats.

Si plusieurs auteurs ont rapporté l'existence de différences entre individus féminins et masculins en terme d'épaisseur de la voûte crânienne, ces différences restent subtiles et rarement significatives (Smith et al., 1985 ; Ishida & Dodo, 1990 ; Nawrocki, 1991 ; Lynnerup, 2001 ; Moreira-Gonzalez et al., 2006 ; Marsh, 2013 ; De Boer et al., 2016). Soulignons d'ailleurs que les modalités d'expression de ces différences varient selon les études, certaines rapportent des épaisseurs de voûte plus importantes chez les individus féminins (Ishida & Dodo, 1990 ; Moreira-Gonzalez et al., 2006), alors que d'autres l'observent chez des individus masculins (Smith et al., 1985 ; Nawrocki, 1991). Dans sa thèse de Doctorat, Copes (2012, p. 97) a observé l'expression d'un signal dimorphique au niveau des os frontaux et occipitaux sur l'ensemble des populations considérées dans son échantillon (les individus masculins présentant généralement des os plus épais), excepté celles appartenant au groupe Océanien. Même si l'expression d'un dimorphisme sexuel pour l'épaisseur de la voûte crânienne reste débattue, il convenait tout de même de prendre en considération le sexe des individus dans nos analyses afin d'en maîtriser l'incidence sur nos résultats.

4.2.4 Détermination du sexe

Bien que dotés d'une certaine fiabilité dans la détermination du sexe d'un individu à partir de l'ensemble de son bloc cranio-facial (Walrath et al., 2004 ; Garvin et al., 2014), nous avons proscrit toute utilisation du système de cotation des traits crâniens décrit par Buikstra & Ubelaker (1994) dans la mesure où nous pensons vraisemblable que les pratiques de modifications artificielles aient eu une incidence sur l'expression de certains de ces traits. Ainsi, toute détermination du sexe a exclusivement été menée à partir des os coxaux. Les individus issus de la collection Lumholtz (pour laquelle seuls les crânes ont été conservés) ont donc été classés dans la catégorie indéterminée. Nous avons donc eu recours dans un premier temps à la méthode développée par Brůžek (2002), puis dans un second temps à celle de la diagnose sexuelle probabiliste (DSP) élaborée par Murail et al. (2005) et reprise par Brůžek et al. (2017). La première de ces méthodes, proposée par Brůžek (2002), repose sur l'observation

morphoscopique des os coxaux. Chaque os coxal est décomposé en cinq segments morpho-fonctionnels auxquels sera respectivement attribué un critère de sexualisation. Ainsi, on procède par cotations de plusieurs traits appartenant aux différents segments que sont la surface pré-auriculaire, la grande échancrure sciatique, l'arc composé, la marge inférieure de l'os coxal et le rapport ischio-pubien. Chaque trait est coté selon trois modalités : morphologie féminine, morphologie masculine ou morphologie intermédiaire. A la suite de la cotation de chacun de ces traits, chaque segment se verra attribuer une cotation. Ces cotations prises dans leur ensemble orienteront vers une attribution finale du sexe de l'individu.

La seconde de ces méthodes propose une détermination du sexe sur la base de l'enregistrement de dix mesures linéaires sur les os coxaux (Murail et al., 2005 ; Brůžek et al., 2017) ; chacune de ces variables étant dotée d'un pouvoir discriminant plus ou moins important. Un sexe peut alors être attribué à un individu si au moins quatre de ces variables ont été renseignées.

Afin de parvenir à un certain degré de fiabilité, nous avons choisi d'attribuer un sexe à un individu si les résultats de la diagnose sexuelle obtenus à l'aide des deux méthodes s'avéraient concordants. En comparaison avec la méthode morphoscopique développée par Brůžek (2002), l'avantage de la DSP réside dans l'obtention de probabilités d'appartenance aux deux sexes. Par défaut, la probabilité d'associer un coxal à l'un des deux sexes est fixée à 95 %. Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de garder cet intervalle de confiance. Toutefois, notons que dans certains cas de figure, le résultat de la diagnose obtenu sur la base de la diagnose sexuelle probabiliste était indéterminé (i.e., en deçà du seuil des 95 %) bien que la probabilité d'appartenance à l'un des deux sexes reste importante. Pour ces individus, la décision de leur attribuer un sexe a quand même été prise si et seulement si, la probabilité d'appartenance la plus forte et le sexe obtenu sur la base de la méthode morphoscopique de Brůžek (2002) concordaient. Dans ce cas de figure, nous avons déterminé le sexe uniquement pour les individus présentant un seuil de probabilité supérieur à 90 %. En deçà de cette valeur, nous avons systématiquement considéré l'individu comme indéterminé.

4.3 Acquisitions et traitement des données 3D

Les acquisitions de données 3D (qu'il s'agisse d'acquisitions surfaciques, tomodensitométriques ou microtomodensitométriques) ont constitué le fondement même de

notre travail. C'est à partir de celles-ci et après des traitements informatiques différents selon les types d'acquisitions que peuvent être quantifiées les variations de conformations du neurocrâne et des os de la voûte, les différences d'épaisseurs de voûtes ou encore les différences d'épaisseurs d'émail et de conformations de la jonction émail-dentine.

4.3.1 Acquisitions de données surfaciques via scanner laser

L'acquisition de données surfaciques a été entreprise dans le but de procéder à une quantification des différences morphologiques neurocrâniennes entre les individus qui ont été pris en considération. Pour ce travail de thèse, la collecte de données 3D a principalement reposé sur l'utilisation d'un scanner 3D NextEngine[®]. Ce scanner laser constitue un mode d'acquisition de données 3D privilégié en Anthropologie biologique (e.g., DeSilva, 2010 ; Sholts et al., 2011 ; Garvin & Ruff, 2012 ; Wu et al., 2012 ; Haslam et al., 2013 ; Nolte & Wilczak, 2013 ; Slice & Algee-Hewitt, 2015 ; Hammond et al., 2016 ; Halenar-Price & Tallman, 2019 ; Perrone Jr & Williams, 2019) en raison de son faible coût, de sa transportabilité, de sa précision et de sa fiabilité (Slizewski & Semal, 2009 ; Slizewski et al., 2010 ; Friess, 2012 ; Algee-Hewitt & Wheat, 2016 ; Toneva et al., 2016 ; Edwards & Rogers, 2018).

Le scanner est composé d'une première structure en charge d'émettre le faisceau laser et d'un socle sur lequel l'objet sera disposé. Ce dernier effectue une série de rotations (dont le nombre est préalablement défini par l'opérateur) jusqu'à ce que l'objet ait réalisé un tour complet. Au cours de ce processus plusieurs faisceaux laser viennent alors balayer l'objet de sa base à son sommet et de sa gauche à sa droite (Figure 4.1). Plus le nombre de rotations augmente, plus la quantité d'informations topographiques enregistrée est importante et confère donc à l'acquisition tridimensionnelle une certaine finesse. Toutefois, plus le temps d'acquisition augmente plus le nombre de rotations est important : il est donc nécessaire de parvenir à un bon compromis entre ces deux paramètres. Un troisième paramètre est également au choix de l'opérateur : il s'agit du nombre de points enregistrés par pouces carrés (i.e., *square inches*). Du choix de cette option résultera une meilleure ou moins bonne densité de points décrivant la structure d'intérêt mais également une plus longue ou plus courte durée d'acquisition. Là encore, un compromis doit être trouvé. Un paramètre lumineux doit également être sélectionné. Il doit être choisi en fonction des propriétés de réflexion de l'objet. Dans le cas de structures osseuses, il est recommandé (à quelques exceptions près) de toujours utiliser l'option « neutre » pour ce paramètre. Enfin, la dernière option sur laquelle l'opérateur pourra intervenir sera la

portée qui renvoie à la distance entre le scanner et l'objet. Les distances optimales pour les trois modes de portée sont indiquées par le logiciel et renvoient pour les modes Macro, Wide et Extended à des distances de 16,51 cm (6,5 inches) pour le mode Macro et 63,5 cm (25 inches)



Figure 4.1 Exemple d'utilisation du scanner surfacique NextEngine®(modifié d'après White, 2015). Le crâne est déposé sur une plateforme tournante, permettant ainsi aux rayons laser de scanner la surface avec un angle de 360 degrés

pour les modes Wide et Extended. La différence entre ces deux derniers modes réside dans les plages de balayage plus importantes que confère le mode Extended où la fenêtre d'acquisition est de 584,2 x 431,8 mm (23 x 17 inches) alors qu'elle est plus réduite pour le mode Wide, ne faisant que 342,9 x 256,5 mm (13,5 x 10,1 inches). Le mode Extended permet donc l'acquisition d'objets de taille plus importante. Toutes les acquisitions ont été faites en utilisant le mode Extended. Chaque crâne (à l'exception de certains crânes fragmentaires) a dû faire l'objet de deux séries d'acquisitions : une première au cours de laquelle la partie supérieure du crâne reposait sur un support et une seconde au cours de laquelle sa partie postérieure reposait sur celui-ci afin d'obtenir une surface complète.

4.4 Traitement des données surfaciques via scanner laser

Suite aux deux séries d'acquisitions nécessaires pour reconstituer la surface du crâne dans sa totalité, nous avons réalisé un premier traitement informatique (à l'aide du logiciel fourni avec le scanner NextEngine®) qui a consisté à éliminer les éléments numérisés non-crâniens (i.e., support sur lequel reposait le crâne et/ou socle). Puis, les séries d'acquisitions ont été superposées en utilisant une série de points remarquables sur chacune d'entre elles. Enfin, les deux surfaces ont été fusionnées en une seule, laquelle a été nettoyée afin d'en éliminer des incohérences géométriques (e.g., géométrie non-manifold). A l'issue de ce traitement, chaque surface a été exportée au format PLY.

4.5 Acquisitions tomодensitométriques

Une partie de nos analyses ayant consisté à explorer les structures internes crâniennes et plus spécifiquement l'épaisseur de la voûte, nous avons réalisé des acquisitions tomодensitométriques sur différentes séries de crânes. Deux séries d'acquisitions ont été réalisées aux Etats-Unis et au Mexique (cf. *infra*) dans des infrastructures, sur des machines, et avec des paramètres d'acquisition différents. Les individus pris en considération ainsi que les paramètres d'acquisition sont listés dans le Tableau 4.2²³.

Les premiers travaux à avoir fait appel aux acquisitions tomодensitométriques dans le domaine de l'anthropologie ont été entrepris dans le début des années 80 avec les travaux pionniers de Jungers & Minns (1979), Tate & Cann (1982), Ward & Kimbel (1983) et Wind (1984). Outre l'accès à des structures morphologiques inédites, ce type d'analyses a favorisé l'extraction virtuelle de certains vestiges pris dans des matrices sédimentaires et également a permis la reconstruction de certaines structures anatomiques non-préservées ou déformées en raison des conditions taphonomiques (e.g., Conroy & Vannier, 1984 ; Wind & Zonneveld, 1985 ; Zollikofer et al., 1998 ; Recheis et al., 1999 ; Zollikofer et al., 2005 ; Zollikofer & Ponce de León, 2005 ; Ulhaas, 2007 ; Poza-Rey & Arsuaga, 2011 ; Godinho & O'Higgins, 2017).

⁵ Plusieurs individus ont donc fait à la fois l'objet d'acquisitions surfaciques et tomодensitométriques. Précisons également que certains individus de Malpais Prieto ont fait l'objet d'acquisitions tomодensitométriques mais n'ont pas été pris en considération dans les analyses en raison de leur état de conservation.

Tableau 2 Paramètres des acquisitions tomographiques par individus

Id	Collection/Project	Institution	Lieu d'acquisition	Type de scanner	Paramètres d'acquisition			
					Kilo-voltage du tube (kVP)	Courant du tube (mA)	Epaisseur de coupe (mm)	Taille de pixels (mm)
Angamuco_sep14_ind2	Projet LORE-LPB	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	100 - 150	0.625	0.488282
Angamuco_sep8	Projet LORE-LPB	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	101 - 150	0.625	0.505859
Angamuco_sep9_ind1	Projet LORE-LPB	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	102 - 150	0.625	0.541016
JR24_sep1	Projet Chupicuaro	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	103 - 150	0.625	0.541016
JR24_sep6	Projet Chupicuaro	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	104 - 150	0.625	0.496094
JR24_sep8	Projet Chupicuaro	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	105 - 150	0.625	0.554689
Loma_Alta_sep27	Projet Michoacán	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	106 - 150	0.625	0.503906
Mich215_sep43_ind2	Projet Michoacán	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	107 - 150	0.625	0.523438
Mich31_sep20	Projet Uacúsecha	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	108 - 150	0.625	0.482423
Mich31_sep24	Projet Uacúsecha	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	109 - 150	0.625	0.546875
Mich31_sep34_ind1	Projet Uacúsecha	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	110 - 150	0.625	0.541016
Mich31_sep34_ind3	Projet Uacúsecha	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	111 - 150	0.625	0.505859
Mich31_sep34_ind4	Projet Uacúsecha	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	112 - 150	0.625	0.521483
Mich31_sep37_ind2	Projet Uacúsecha	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	113 - 150	0.625	0.515624
Mich31_sep37_ind3	Projet Uacúsecha	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	114 - 150	0.625	0.556642
Mich31_sep37_ind6	Projet Uacúsecha	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	115 - 150	0.625	0.546875
Mich31_sep40	Projet Uacúsecha	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	116 - 150	0.625	0.521483
Mich31_sep42	Projet Uacúsecha	CEMCA	C.T. Scanner del Sur / Ciudad de México	General Electrics Discovery PET/CT 710	120	117 - 150	0.625	0.541016
Tarascan130	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	280 - 300	0.5	0.425781
Tarascan135	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	281 - 300	0.5	0.378907
Tarascan137	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	282 - 300	0.5	0.414063
Tarascan141	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	283 - 300	0.5	0.425781
Tarascan149	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	284 - 300	0.5	0.435546
Tarascan150	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	285 - 300	0.5	0.425781
Tarascan151	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	286 - 300	0.5	0.414063
Tarascan153	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	287 - 300	0.5	0.419922
Tarascan154	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	288 - 300	0.5	0.425781
Tarascan155	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	289 - 300	0.5	0.398438
Tarascan156	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	290 - 300	0.5	0.40625
Tarascan157	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	291 - 300	0.5	0.425781
Tarascan158	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	292 - 300	0.5	0.392579
Tarascan160	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	293 - 300	0.5	0.443358
Tarascan165	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	294 - 300	0.5	0.443358
Tarascan173	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	295 - 300	0.5	0.441406
Tarascan174	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	296 - 300	0.5	0.462892
Tarascan211	Lumholtz Collection	AMNH	Mount Sinai Hospital / New York	Siemens SOMATOM Definition Flash	120	297 - 300	0.5	0.441406

Dans le cadre de ce travail, nous expliquons brièvement le procédé et renvoyons donc le lecteur à Davis & Wong (1996) pour des informations plus précises. L'invention de la tomographie axiale à rayons x (Cormack, 1963 ; Hounsfield, 1973), a permis l'obtention d'images de structures internes à partir de leur coefficient d'atténuation. Les tissus ayant des compositions différentes, ils présentent des coefficients d'atténuation différents. Ces coefficients désignent la propriété d'un tissu à retenir les rayons X et donc endiguer leur propagation. Une fois la structure d'intérêt bombardée de rayons X sous différents angles, des récepteurs quantifieront l'intensité des rayons ayant traversé l'objet et permettront ainsi la reconstitution une image en fonction même de l'absorption de ces derniers par les différents tissus (i.e., les niveaux de gris de l'image obtenue sont donc proportionnels à l'absorption des rayons ; Davis & Wong, 1996). Couplé à des techniques informatiques et grâce à un algorithme, le volume de l'objet étudié peut alors être reconstruit en 3D (Feldkamp et al., 1984). On parle alors de *Computed Tomography* ou plus simplement de CT.

Ce type d'acquisitions a montré son potentiel informatif en Anthropologie biologique dans la mesure où il offre un accès à de nouvelles informations d'ordre biologique tout en étant relativement non-invasif²⁴ (Weber & Bookstein, 2011 ; Weber, 2015)

La première série d'acquisitions, réalisée au sein du département de radiologie du *Mount Sinai Hospital*, à New York, a été réalisée avec sur un CT scanner *Siemens SOMATOM Definition Flash*[®] (Figure 4.2). L'ensemble des acquisitions ont été réalisées avec les paramètres suivants : une épaisseur de coupe de 0.5 mm, un espace entre les coupes de 0.5 mm, une taille de pixels variant entre 0.37 et 0.46 mm. Le kilo-voltage du tube est de 120 kVP, La puissance du générateur varie entre 35 - 37 kW et le courant du tube de 280 à 300 mA.

La seconde série d'acquisition a été faite à la clinique *C.T. Scanner del Sur* à Mexico, avec un CT scanner *General Electrics Discovery PET/CT 710*[®] (Figure 4.3). L'ensemble des acquisitions ont été réalisées avec les paramètres suivants : une épaisseur de coupe de 0.625 mm et un espace entre les coupes de 0.5 mm. La taille des pixels varie entre 48 et 56 mm. Le kilo-voltage du tube est de 120 kVP et le courant du tube entre 100 et 150 mA.

⁶ Nous parlons d'un caractère « relativement non-invasif » en référence au fait que bien ce type d'analyses n'altère pas la morphologie de la pièce étudiée, il a été démontré que son irradiation était en mesure d'en dégrader l'ADN nucléaire (Immel et al., 2016).

L'ensemble des coupes tomодensitométriques ont été enregistrées au format DICOM puis importées dans le logiciel Avizo[®] pour y être segmentées⁶. A l'issue de cette segmentation, la surface correspondant au tissu osseux a été générée (Figure 4.4).



Figure 4.2 Acquisitions de données tomодensitométriques au Mount Sinai Hospital, New York



Figure 4.3 Acquisitions de données tomодensitométriques à la clinique C.T. Scanner del Sur, Mexico

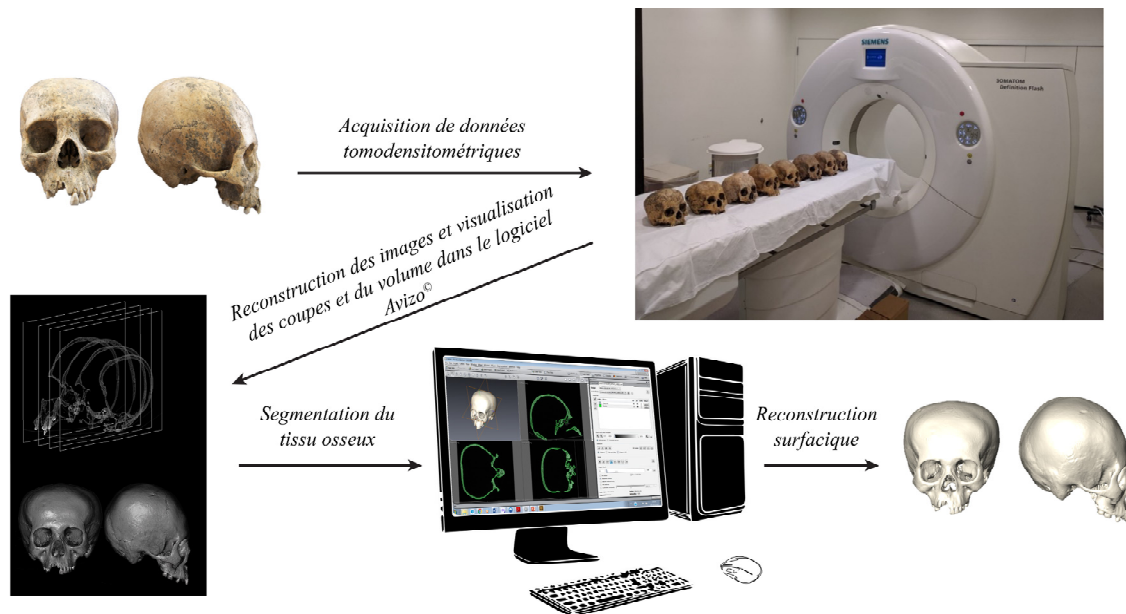


Figure 4.4 Processus d'acquisition des données tomodensitométriques et des modèles 3D constituant notre étude. Les crânes sont tout d'abord scannés, puis les images obtenues sont reconstruites dans un logiciel de traitement de données d'imagerie (dans notre cas, Avizo®) avant leur segmentation et la reconstitution des surfaces 3D.

4.6 Traitement des données issues de la tomodensitométrie

Dans le cadre de cette thèse, nous avons fait le choix de limiter l'analyse des structures internes crâniennes à l'épaisseur de la voûte. Si l'on s'en réfère à Anzelmo et al. (2015), l'épaisseur de la voûte crânienne est définie comme la distance entre la surface interne du neurocrâne (i.e., l'endocrâne) et la surface externe du neurocrâne. Aucune différenciation ne sera donc faite entre les tissus osseux qui la composent (i.e., la table externe, le diploé et la table interne). D'un point de vue plus technique, cette mesure s'obtient en déterminant la distance entre l'endocaste (i.e., surface négative de la cavité) et la partie exocrânienne du neurocrâne. L'ensemble des coupes propres à chaque individu a été chargé dans le logiciel Avizo®. Ce dernier propose un éditeur de segmentation, lequel offre divers outils pour séparer les tissus d'intérêt en fonction de leurs niveaux de gris. Dans cette étape, nous avons exclusivement segmenté le tissu osseux. A l'issue de ce processus, nous avons donc pu extraire la surface complète du crâne. Afin de générer la surface correspondant au négatif de la cavité crânienne, nous avons eu recours à la procédure automatique développée par Subsol et al. (2010) sous la forme du logiciel Endex. Le logiciel procède par segmentation de modèle déformable surfacique (cf. Montagnat, 1999 ; Velut, 2007 ; Galdames, 2012). Chaque surface va être représentée par un nuage de points. Une surface

sphérique représentée par un nuage de points est générée par le logiciel et doit être placée au centre de la cavité endocrânienne (Figure 4.5a). Selon deux forces, cette surface sphérique va être déformée de façon à venir épouser les contours de la cavité endocrânienne (Figure 4.5b, c). Une force externe va tendre à attirer les vertex de la surface sphérique en direction du nuage de points représentant la surface endocrânienne. La seconde force est interne et va garantir le maintien d'une surface lisse lors de la déformation. L'algorithme procède de manière itérative jusqu'à ce que les points de la surface sphérique ne bougent plus. L'une des propriétés intéressantes de cette procédure est la prise en compte des trous que constituent les divers foramina. Si l'on observe des différences entre une segmentation manuelle de l'endocaste et une segmentation automatique comme celle implémentée dans le logiciel Endex, celles-ci restent négligeables (Subsol et al., 2010)²⁵. L'endocaste généré est ensuite exporté au format .OBJ avant d'être converti en .PLY.

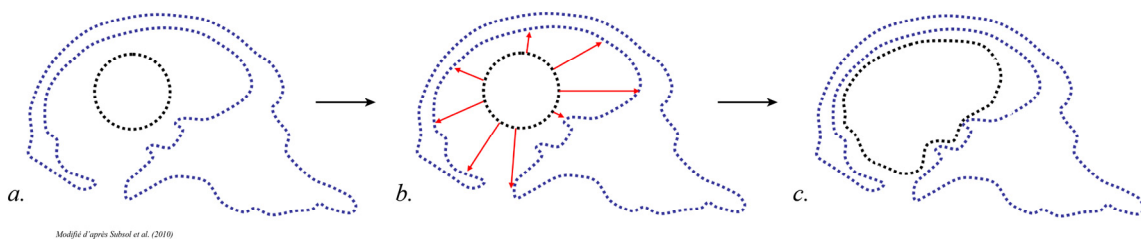


Figure 4.5 Illustration de la procédure automatique par laquelle le logiciel Endex génère les surfaces 3D des endocastes (modifié d'après Subsol et al., 2010). (a) Placement de la surface sphérique au centre de la cavité endocrânienne. (b) Déformation de la surface sphérique en direction de la surface endocrânienne. (c) Après itérations, obtention de la surface 3D représentant l'endocaste.

Afin de quantifier et illustrer les différences d'épaisseurs de voûte pour chaque os entre les individus, nous avons également utilisé le logiciel MorphoDig (Lebrun, 2018). Le logiciel nous a permis d'obtenir des rendus cartographiques des variations d'épaisseurs de voûte en 3D (Figure 4.6). Ces cartes de chaleur correspondent à la distance minimale entre les sommets des triangles d'une surface 3D et ceux d'une autre surface 3D (Lebrun, 2018).

⁷ Les différences que l'on note concernent surtout les positifs des empreintes du système vasculaire cérébral. Ces positifs apparaissent bel et bien sur la segmentation automatique mais peuvent parfois voir leurs reliefs un peu atténués en comparaison avec une segmentation manuelle.

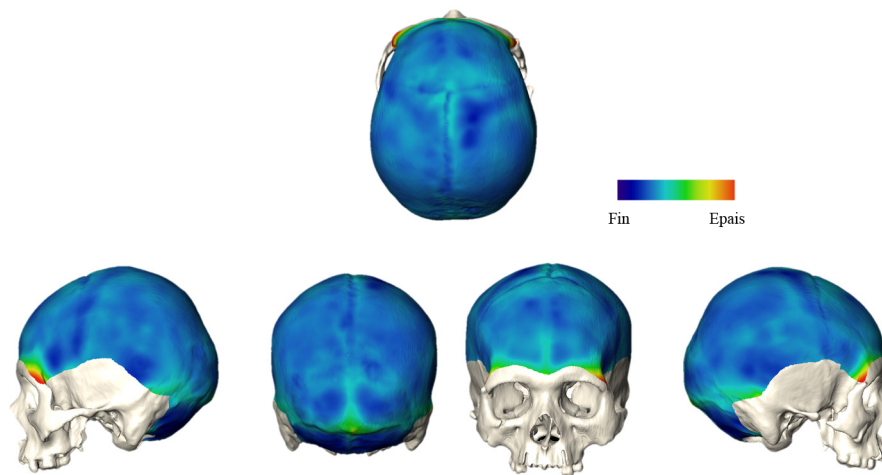


Figure 4.6 Cartographie des variations d'épaisseurs de la voûte crânienne de l'individu Mich31_sep24 pour l'os frontal, les deux os pariétaux et l'os occipital. Les couleurs chaudes représentent des épaisseurs importantes tandis que les couleurs froides des épaisseurs plus fines.

4.7 Acquisitions microtomodensitométriques

La microtomodensitométrie (micro-CT ou encore μ -CT) fait appel aux mêmes principes que la tomodensitométrie. Toutefois, celle-ci constitue une méthode d'imagerie à haute résolution et permet donc l'obtention d'images à une résolution plus fine (pouvant aller de quelques microns à 200 microns). Les acquisitions microtomodensitométriques ont été effectuées à l'aide d'un microtomographe RX in vivo SkyScan 1076[®] sur la plateforme MRI de BioCampus (UMS 3426 CNRS - US 09 INSERM - UM), à Montpellier (Tableau 4.3). Les dents disposées au sein de rouleaux sont placées sur un lit d'acquisition autour duquel tournera la source de rayons X (Figure 4.7). A l'issue de l'acquisition, plusieurs images radiographiques sont obtenues. Elles sont transformées en images composées de différents niveaux de gris en utilisant le logiciel NRecon[®] (version 1.6.10). Cette reconstruction s'est accompagnée d'un processus d'optimisation des images en corrigeant ou limitant certains artefacts propres aux analyses tomo et microtomodensitométriques (i.e., artefacts d'anneaux, effet de piquetage ou durcissement du faisceau ; cf. Boas & Fleischmann, 2012). Une fois reconstruites, celles-ci sont enregistrées au format TIFF en 16 bits.

Tableau 3 Paramètres des acquisitions microtomodensitométriques par individus

Site	Période	Collection/Project	Institution	Paramètres d'acquisition						
				Kilo-voltage du tube (kV/P)	Courant du tube (µA)	Filtre	Pas de Rotation (°)	Averaging	Profondeur (bits)	Résolution (i.e., taille de pixels en µm)
Guadalupe (Mich. 215)	Classique/Epiclassique	Projet Michoacán	CEMCA	100	100	Aluminium 1 mm	0,2	3	16	18.200
Guadalupe (Mich. 215)	Classique/Epiclassique	Projet Michoacán	CEMCA	100	100	Aluminium 1 mm	0,2	3	16	18.208
JR74	Classique/Epiclassique	Projet Chupicuaro	CEMCA	100	100	Aluminium 1 mm	0,2	3	16	18.208
Loma Alta (Mich. 66)	Classique/Epiclassique	Projet Michoacán	CEMCA	100	100	Aluminium 1 mm	0,2	3	16	18.200
Loma de Jaracuaro (Mich. 122)	Classique/Epiclassique	Lumbholtz Collection	CEMCA	100	100	Aluminium 1 mm	0,2	3	16	18.200
Malpais Prieto (Mich. 31)	Postclassique	Projet Uacúsecha	CEMCA	100	100	Aluminium 1 mm	0,2	3	16	18.200
Malpais Prieto (Mich. 31)	Postclassique	Projet Uacúsecha	CEMCA	100	100	Aluminium 1 mm	0,2	3	16	18.208
Nogales	Classique/Epiclassique	Barajas	CEMCA	100	100	Aluminium 1 mm	0,2	3	16	18.208
Nogales	Classique/Epiclassique	Barajas	CEMCA	100	100	Aluminium 1 mm	0,2	3	16	18.200
Tres Mezquites	Classique/Epiclassique	Projet Tres Mezquites	CEMCA	100	100	Aluminium 1 mm	0,2	3	16	18.200
Tres Mezquites	Classique/Epiclassique	Projet Tres Mezquites	CEMCA	100	100	Aluminium 1 mm	0,2	3	16	18.200
Tres Mezquites	Classique/Epiclassique	Projet Tres Mezquites	CEMCA	100	100	Aluminium 1 mm	0,2	3	16	18.200
Yácata El Ángel	Classique/Epiclassique	Barajas	CEMCA	100	100	Aluminium 1 mm	0,2	3	16	18.200
Yácata El Ángel	Classique/Epiclassique	Barajas	CEMCA	100	100	Aluminium 1 mm	0,2	3	16	18.200

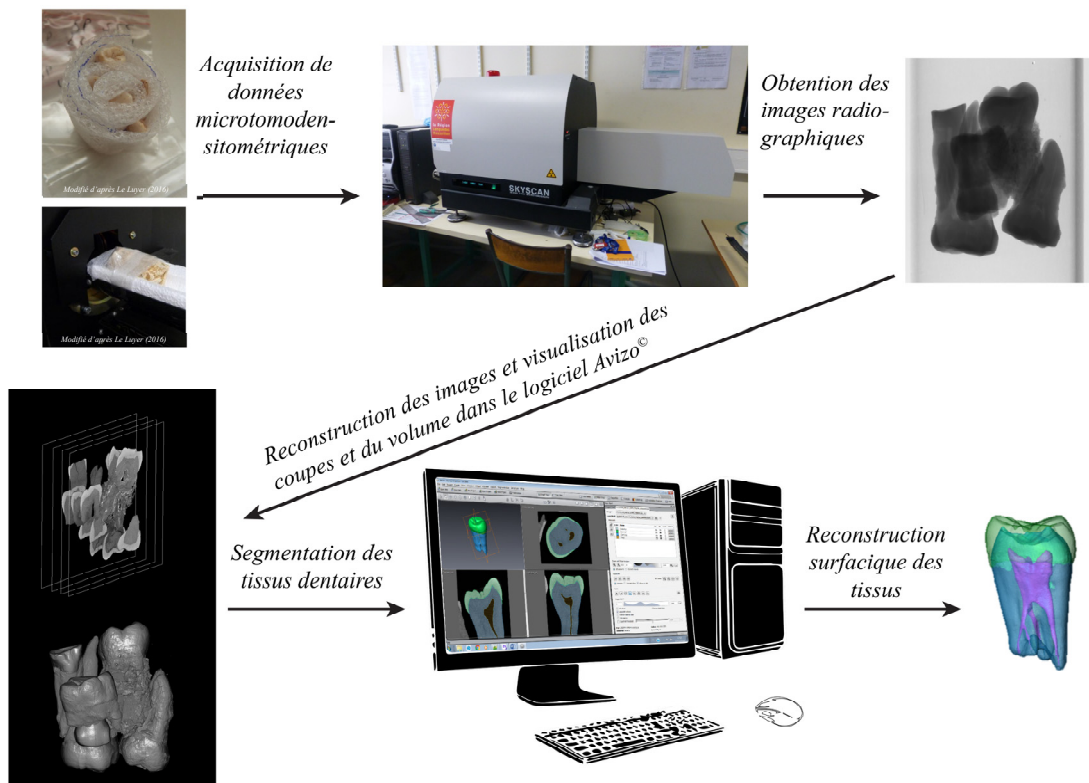


Figure 4.7 Procédure d'acquisition des données microtomodensitométriques. Les dents sont tout d'abord enroulées dans une mousse avant d'être placées sur le lit d'acquisition. Les images sont ensuite reconstruites à l'aide du logiciel Avizo®, lequel permet également la segmentation des différents tissus (email, dentine et pulpe).

4.8 Traitement des données issues de la microtomodensitométrie

Une fois le jeu d'images au format TIFF obtenu, celui-ci a été importé dans le logiciel Avizo® (version 7.1) afin de procéder à la segmentation des différents tissus dentaires (i.e., émail, dentine et cavité pulpaire). Cette segmentation a été réalisée automatiquement dans un premier temps avant de faire l'objet de corrections manuelles. Ainsi, les seuils de niveaux de gris associés à chaque tissu ont été définis de manière automatique en utilisant la procédure de *half maximum height* (HMH) développée par Spoor et al. (1993) et adaptée pour le modèle en 3D par Coleman & Colbert (2007). Un certain nombre de corrections ont par la suite été entreprises grâce à l'éditeur de segmentation du logiciel. Une fois les trois tissus virtuellement isolés, nous avons généré des surfaces correspondant à chacun d'entre eux par triangulation grâce à la fonction *generate surface* du logiciel, suivant l'algorithme du « *marching cube* » (Lorenson & Cline, 1987). Pour ce faire, nous avons utilisé des paramètres identiques à ceux employés par

Bayle et al. (2009a), Bayle et al. (2009b) et Le Luyer (2016), à savoir un lissage contraint avec les options *constrained smoothing* et *minimal edge length* de 0.4 (cf. Kupczik & Hublin, 2010). Afin d'extraire la partie coronaire de la jonction émail-dentine, nous avons procédé de façon similaire aux méthodes décrites en détails dans les travaux de Bayle (2008) et Le Luyer (2016) et avons donc défini un premier plan : le plan basal (Figure 4.8). Celui-ci est défini comme le plan passant par la ligne cervicale de l'émail. Toutefois, en raison de sa nature sinueuse, le collet peut être compliqué à déterminer. Il a donc été proposé d'agir en identifiant deux plans au préalable : un premier défini comme le plan de section transverse le plus apical et contenant le dernier anneau complet d'émail, et un second défini comme le plan de section transverse le plus apical comportant la dernière occurrence d'émail (Olejniczak, 2006 ; Olejniczak et al., 2008). Le plan intermédiaire à ces deux plans sera défini comme le plan basal (Olejniczak, 2006 ; Bayle, 2008 ; Olejniczak et al., 2008 ; Bayle et al., 2009a ; Le Luyer, 2016). La surface de la dentine située supérieurement à ce plan (i.e., la jonction émail-dentine; Figure 4.8) est séparée afin de quantifier les différences phénotypiques interindividuelles.

Les mesures de variations topographiques d'émail (ou variations d'épaisseurs d'émail

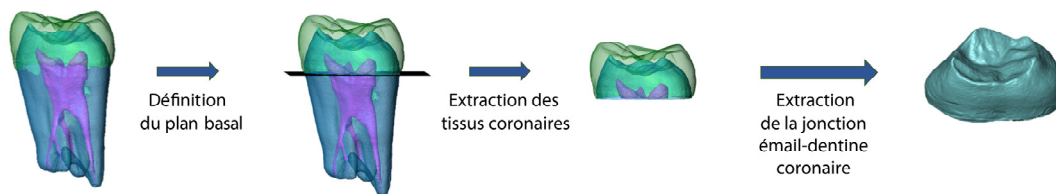


Figure 4.8 Processus d'extraction de la surface 3D représentant la jonction émail-dentine en fonction du plan basal.

standardisées) ont été calculées à partir d'un autre plan : le plan bucco-lingual. Il a été défini par Martin (1985) dans ses travaux en histologie dentaire comme le plan coronal passant par les sommets des deux cuspides mésiales. A partir des données microtomodensitométriques, nous suivons la définition suggérée par plusieurs auteurs (e.g., Le Luyer et al., 2016 ; Behie & Miskiewicz, 2019 ; Sorenti et al., 2019) proposant que ce plan soit déterminé comme le plan passant par l'apex des deux cornes de dentine du protocône et du paracône et que celui-ci soit perpendiculaire au plan basal (Figure 4.9). Ce plan a ensuite été extrait et ouvert dans le logiciel MPSAK (Bondioli, 2011).

Conformément aux recommandations publiées par Macchiarelli et al. (2007), chacune des mesures a été calibrée suivant un diamètre bi-cervical défini à 10 mm. Des mesures ont ainsi été prises tous les 0,25 mm de l'apex de la dent jusqu'à la couronne des côtés vestibulaires et linguaux (Figure 4.9). Celles-ci ont permis par la suite de visualiser les variations topographiques d'épaisseurs d'émail.

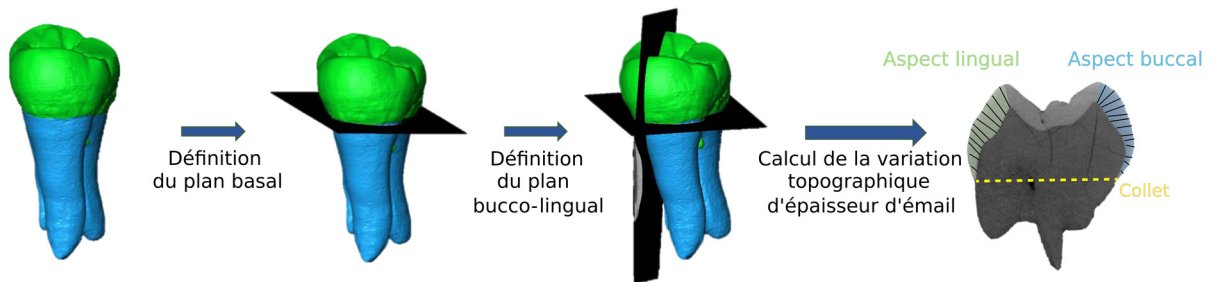


Figure 4.9 Positionnement des plans basal et bucco-lingual afin d'extraire la coupe à partir desquelles les épaisseurs d'émail au niveau des faces linguales et buccales seront calculées. Les traits noirs représentent chaque mesure (elles ont été prises tous les 0.25 mm).

Concernant la quantification des changements de conformation de la jonction émail/dentine, elle a été réalisée par morphométrie géométrique (cf. *infra*).

4.9 Analyses des formes et conformations via morphométrie géométrique

4.9.1 *La morphométrie*

La morphométrie est une branche de la biologie qui consiste en la caractérisation de la forme d'un organisme et en la quantification de sa variation morphologique. La morphométrie simplifie la forme en la réduisant à une série de mesures, de positions, de points repères ou de contours. En comparaison avec des descriptions purement qualitatives, elle présente les avantages d'être objective, reproductible et pouvant être soumise à des tests statistiques ; cela lui confère un plus fort pouvoir de discrimination de formes que celui conféré par des informations qualitatives. Comme nous l'avons évoqué préalablement, les pratiques de modifications artificielles du crâne sont généralement identifiées et caractérisées via un premier examen morphoscopique complété par un examen morphométrique. L'utilisation d'une approche intégrée nécessite que nous présentions ici les grands concepts de la morphométrie et que nous introduisions ceux de la morphométrie géométrique ainsi que les analyses qui en découlent.

4.9.2 Concepts

Trois concepts primordiaux décrivant la géométrie d'un objet sont indispensables à la compréhension des analyses morphométriques : la taille, la conformation et la forme.

La taille d'un organisme fait référence à son échelle (Figure 4.10a). Elle peut être représentée par différents descripteurs (variables de taille) qu'il s'agisse d'une aire, d'un volume ou d'une mesure linéaire. Selon Mosimann (1970), peuvent être considérées comme variables de taille, toute fonction G de x telle que :

$$G(ax) = aG(x)$$

L'équation met en avant le fait qu'à la multiplication de toutes variables morphométriques décrivant un organisme par un facteur donné, sera associée une multiplication de sa taille par le même facteur. Tout élément répondant à cette équation peut alors être considéré comme une variable de taille (e.g., la moyenne géométrique ; cf. Mosimann, 1970, p. 938 ; Mosimann & James, 1979, p. 445 ; Jungers et al., 1995 ; une mesure de distance ; cf. Beaudet et al., 2018 ; ou encore la racine carrée de la somme des écarts au carré). Notons que le dernier de ces exemples est celui le plus communément utilisé en morphométrie géométrique et désigne la taille centroïde (Bookstein, 1991).

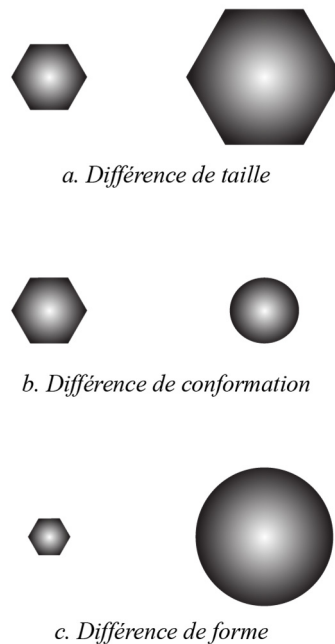


Figure 4.10 Illustrations des différences (a) de tailles, (b) de conformations et (c) de formes.

La conformation renvoie aux proportions d'une structure en dépit de sa taille²⁶ (Figure 4.10b). Elle désigne les propriétés géométriques « pures » d'un objet (Kendall, 1977 ; Bookstein, 1991 ; Dryden & Mardia, 1998 ; Slice, 2005).

En morphométrie, la notion de forme d'un objet désigne la résultante de la combinaison entre sa taille et sa conformation (Figure 4.10c). Elle est donc définie comme l'ensemble des propriétés géométriques d'un objet à l'exception de sa localisation et de son orientation.

4.9.3 Allométrie

Comme précédemment mentionné, la forme d'un objet renvoie à la combinaison de sa taille et de sa conformation. Toutefois, ces variables ne sont pas pour autant indépendantes. Leur interdépendance est désignée sous le nom d'allométrie (Gould, 1966 ; Mosimann, 1970). Plus exactement, l'allométrie fait référence à toutes les variations de conformation associées ou causées par des variations de taille. Précisons qu'elle peut également désigner la covariation entre des structures dont la variation est associée à un changement de taille.

Il est important de distinguer deux considérations que l'on prête à l'allométrie. Si, originellement, elle définit l'association statistique entre la taille d'un organisme ou une partie d'un organisme et les descripteurs de sa conformation, sa définition est aujourd'hui parfois élargie et peut également renvoyer à l'association entre les tailles de différentes parties d'un organisme (Houle et al., 2011 ; Voje et al., 2014).

On distingue trois types possibles : l'allométrie ontogénique, l'allométrie évolutive et l'allométrie statique (Figure 4.11 ; Klingenberg, 1996). L'allométrie ontogénique évalue les rapports de changements de conformation en fonction des changements de taille lors de l'ontogenèse. Elle renseigne donc sur les modalités différentielles de développements en rapport avec la taille entre individus de groupes d'âge différents. L'allométrie évolutive met en avant les différences de covariation entre taille et conformation entre différentes lignées évolutives. Enfin, l'allométrie statique fait référence à l'association entre taille et variables de conformation pour un échantillon au sein duquel les deux sources de variation préalablement mentionnées que sont l'âge des individus ou leur espèce d'appartenance sont maintenues

⁸ En morphométrie géométrique, la conformation désigne la géométrie de l'objet en dépit de sa taille mais aussi de sa localisation et de son orientation (Kendall, 1977 ; Bookstein, 1991 ; Dryden & Mardia, 1998 ; Slice, 2005).

constantes (i.e., étude de l'allométrie au sein d'une même espèce et d'une même classe d'âge ; Figure 4.11 ; Klingenberg, 1996).

A moins que cela ne soit mentionné, nous nous référerons toujours dans le cadre de cette thèse à l'allométrie statique.

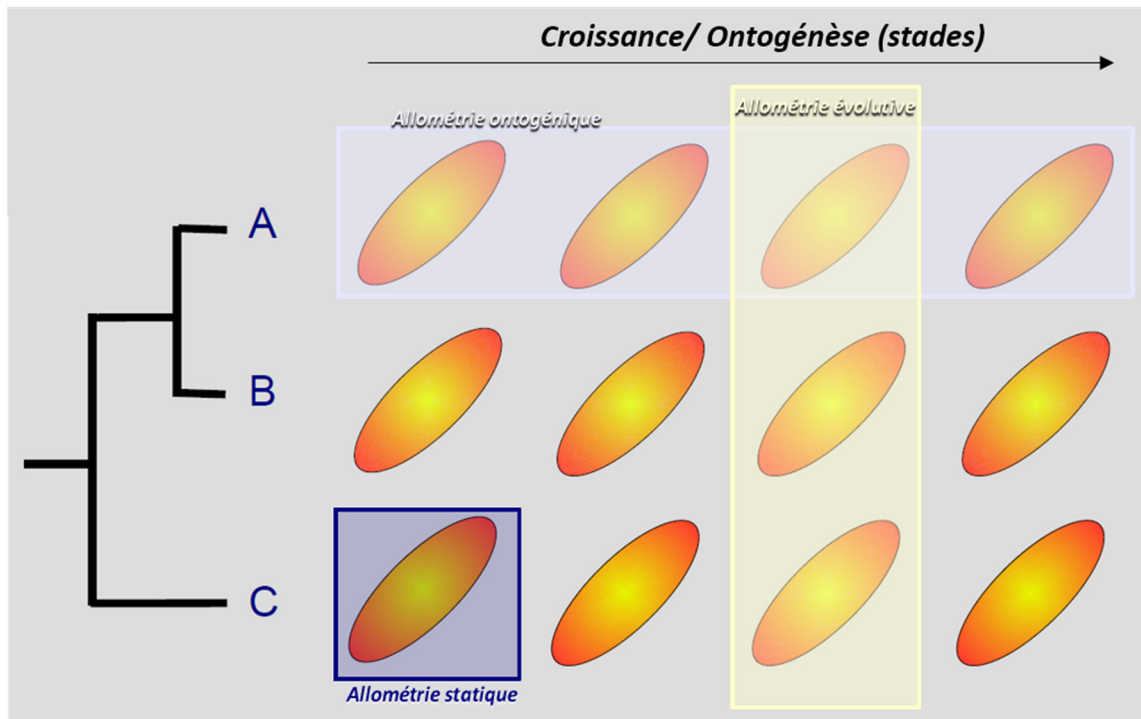


Figure 4.11 Illustration des trois types d'allométrie : ontogénique, statique et évolutive (modifié d'après Klingenberg, 1996).

4.10 La morphométrie géométrique

Avant la seconde moitié du XXe siècle, le processus de quantification et visualisation des différences morphologiques entre deux organismes avait déjà fait l'objet de plusieurs tentatives dont la première remonte vraisemblablement aux grilles de déformation proposées par Dürer (1528 ; Figure 4.12) et dont la formalisation fut reprise par d'Arcy Thompson (1917 ; Figure 4.12) au début du XXe siècle. Durant la seconde moitié du XXe siècle, différentes approches de quantification de la variation morphologique ont été développées et systématisées. Les prémices de l'approche géométrique ont été proposées par Mosimann (1970) qui définit la taille d'un objet comme l'échelle de ce dernier ; laquelle peut être caractérisée par une seule variable quantitative. Dans son article, Mosimann (1970) propose également de définir la conformation comme les propriétés géométriques d'un objet indépendamment de sa taille. Ainsi, deux objets

ayant une géométrie identique indépendamment de leur taille ont des conformations similaires. La morphométrie géométrique se distingue donc de la morphométrie « traditionnelle » dans le sens où elle cherche à mettre en évidence les variations morphologiques (i.e., différences géométriques) entre les structures de divers organismes, en restituant visuellement les différences de relations spatiales que ces structures entretiennent (Slice, 2005).

Dans le cadre de ce travail, le recours à la morphométrie géométrique s'est présenté comme une évidence en raison de son fort pouvoir statistique, de sa capacité à démêler et étudier séparément les différents facteurs de variation influant sur la forme d'un objet (i.e., étude de ses propriétés géométriques « pures »), de la description plus fine de la forme ou conformation de l'objet

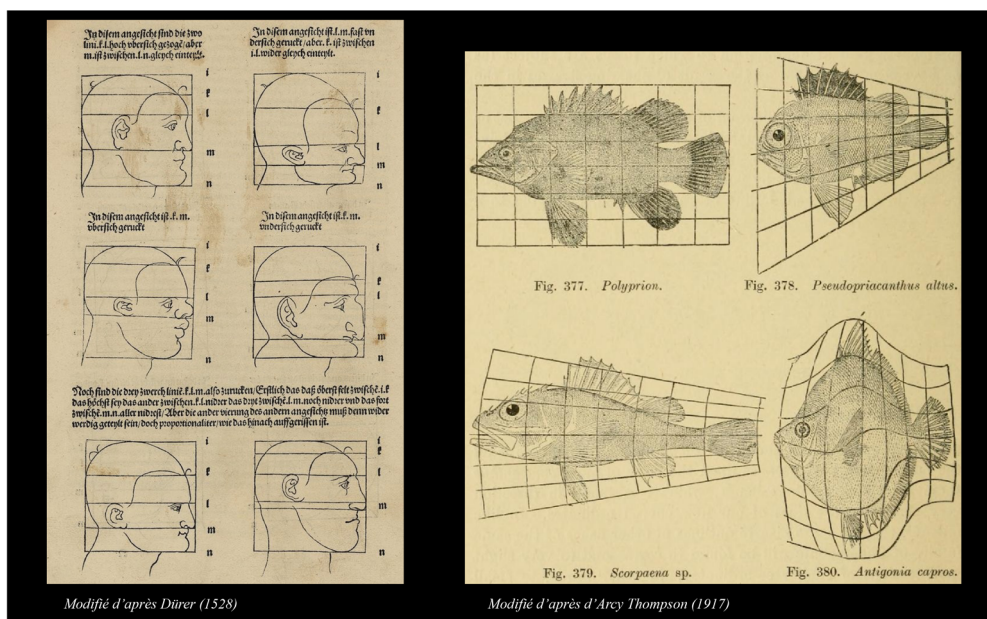


Figure 4.12 Illustrations des grilles de déformations proposées par Dürer (gauche ; modifié d'après Dürer, 1528) et d'Arcy Thompson (modifié d'après d'Arcy Thompson, 1917).

qu'elle confère et des représentations visuelles qui facilitent l'interprétation des changements de ces dernières. En effet, cette méthode constituera un atout majeur dans notre tentative de démontrer l'existence de degrés moindres de modifications artificielles du crâne.

De manière générale, le procédé de la morphométrie va reposer sur une approximation de la forme de l'organisme étudié : celui de la schématisation de sa complexité par le biais d'une série de descripteurs. Ce concept revêt une importance particulière dans la mesure où, du choix des descripteurs sensés caractériser morphologiquement les spécimens étudiés, dépendra la représentativité et la finesse de l'analyse.

En morphométrie géométrique, plusieurs types de descripteurs peuvent servir à caractériser les variations morphologiques entre spécimens (e.g., coordonnées de landmarks, courbes de Bézier, séries de Fourier). Dans le présent travail, nous n'aborderons ici que le cas des points-repères ou landmarks. Les landmarks constituent des points-repères dont la localisation (définie par des coordonnées x et y en 2D et x , y et z en 3D) sur un spécimen répond à un impératif de précision (la localisation du point sur le même spécimen doit être répétable) et d'homologie : la localisation d'un landmark exige une correspondance entre les structures qu'il caractérise d'un spécimen à un autre. Les coordonnées de chacun des landmarks, qu'ils soient en deux ou trois dimensions, constituent les descripteurs caractérisant les formes ; lesquels permettront alors la quantification des variations morphologiques au sein de l'échantillon.

Bookstein (1991) distingue plusieurs types de landmarks (Figure 4.13). Il distingue les landmarks de type 1 définis comme les points à la juxtaposition de différents tissus biologiques (et donc définis sur la base d'une homologie biologique tels que le bregma), les landmarks de type 2 caractérisés par une homologie géométrique (e.g., les maximums de courbures comme la glabelle) et les landmarks de type 3 dont la position est définie à partir d'autres landmarks (e.g., le point le plus éloigné de la glabelle pour l'opisthocranion). Seuls des landmarks de type 1 et 2 ont été pris en considération dans nos analyses.

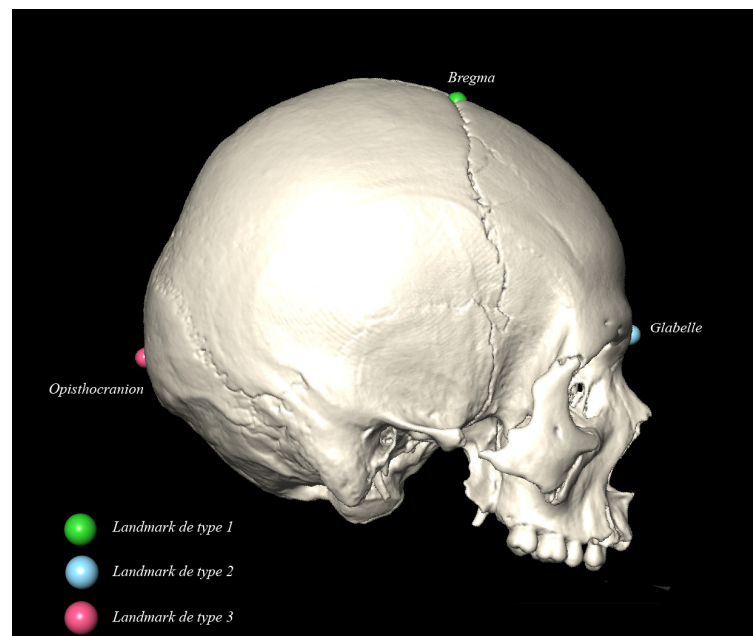


Figure 4.13 Illustrations des différents types de landmarks proposé par Bookstein (1991).

L'ensemble des landmarks ont été positionnés sur un individu de notre échantillon choisi en fonction de son intégralité (i.e., sans données manquantes). Celui-ci constituera notre atlas de référence, ou *template* (Figure 4.14). Le placement des landmarks sur les autres individus de l'échantillon se fera en fonction de ce dernier. Il sera également utilisé pour le *warping* des semilandmarks (cf. *infra*).

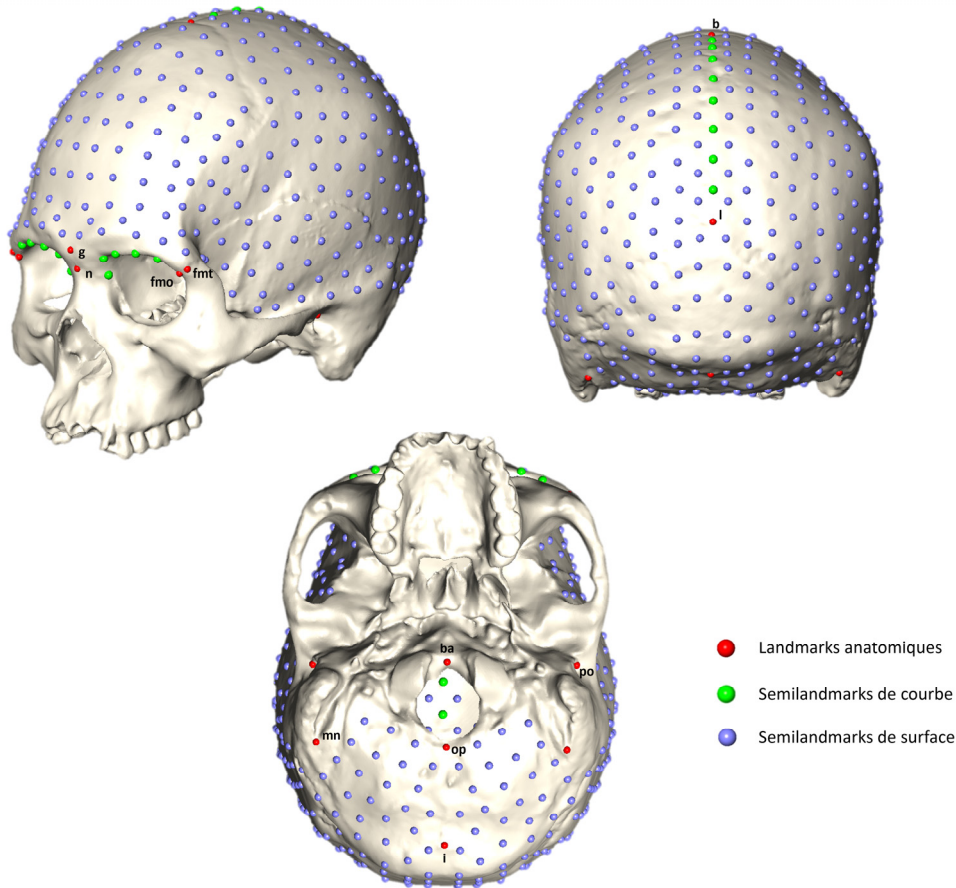


Figure 4.14 Exemple d'atlas de référence (ou *template*) utilisé pour notre étude.

En ce qui concerne les analyses dentaires préliminaires réalisées dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé le *template* mis en place par Le Luyer (2016 ; voir aussi Le Luyer et al., 2016) dans le but d'apprécier des variations ténues de conformation attendues aux échelles interindividuelle et interpopulationnelles caractérisant notre contexte d'étude. Ce *template* comprend 114 points, dont 5 landmarks anatomiques disposés sur les cornes de dentine (du protocône, du paracône, du métacône et de l'hypocône) et dans la partie la plus basse du bassin occlusal, 52 semilandmarks de courbe disposés soit le long du sommet des crêtes reliant les

cornes de dentine soit le long de la jonction émail-cément, ainsi que 57 semilandmarks de surface sur la surface du bassin occlusal et sur les parois de la jonction émail-dentine (Figure 4.15).

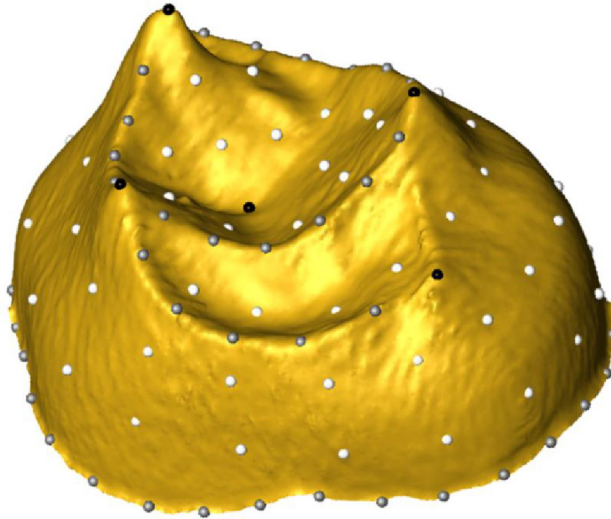


Figure 4.15 Atlas de référence (ou template) utilisé dans l'étude des quantifications des différences de conformations de la jonction émail-dentine pour les deuxièmes molaires supérieures (modifié d'après Le Luyer, 2016).

4.10.1 Déformations morphologiques et fonction de spline en plaque mince ou thin plate spline (TPS)

Comme précédemment mentionné, inspiré des travaux de Dürer (1528) sur les proportions humaines, d'Arcy Thompson (1917) a proposé le concept de grilles de déformations afin de rendre compte visuellement des transformations morphologiques advenues au cours de l'évolution. Ces grilles sont superposées sur l'image d'un premier objet d'étude, puis déformées, en premier lieu à la main chez Dürer (1528) et d'Arcy Thompson (1917) afin de s'ajuster à la forme d'un second objet d'étude (Figure 4.16). La formalisation mathématique de ces grilles n'a pu être réalisée que plus tard par Bookstein (1989), qui a proposé d'utiliser la fonction d'interpolation en plaque mince (TPS) pour reproduire ces déformations.

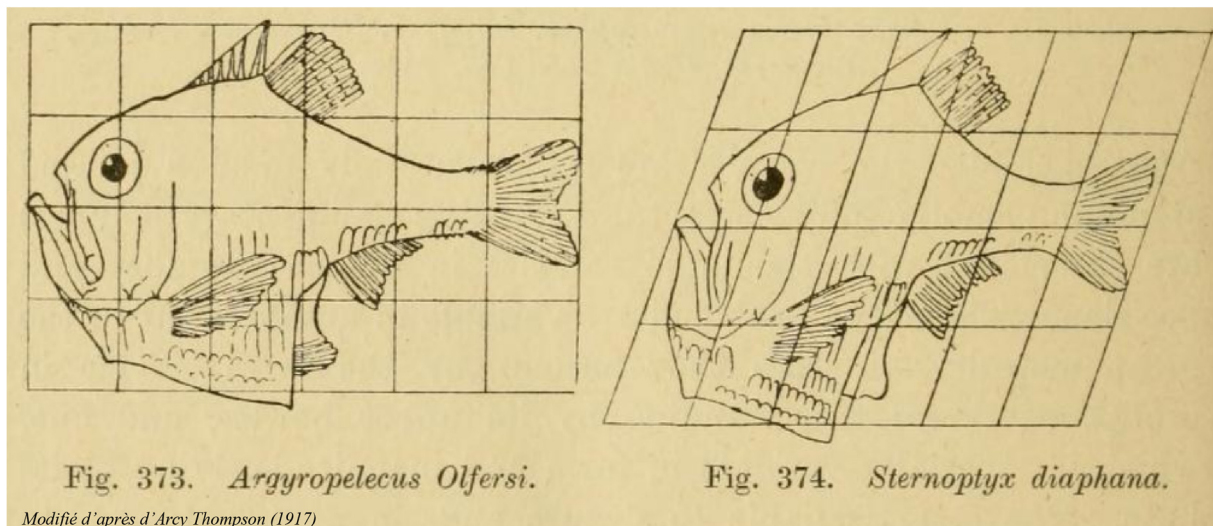


Figure 4.16 Illustrations de changements morphologiques décrits par la composante affine ou uniforme (modifié d'après D'arcy Thompson, 1917).

Quand il s'agit de décrire des changements morphologiques, on distingue généralement deux composantes : la composante uniforme ou affine et la composante non uniforme. Concernant la composante uniforme, seuls deux types de déformations interviennent directement sur la conformation d'un objet : la compression/dilatation et le cisaillement (Zelditch, 2012). Notons que la translation, la mise à l'échelle et la rotation constituent bien des déformations de nature uniforme, mais différent de la compression/dilatation et du cisaillement du fait qu'elles ne modifient pas la conformation de l'objet qui les subit. Les changements de nature uniforme ont la propriété de laisser parallèles toutes les lignes initialement parallèles (Rohlf & Bookstein, 2003 ; Figure 4.16). La composante non-uniforme, quant à elle, désigne des changements localisés, c'est-à-dire restreints à un espace donné (Figure 4.17). Elle est observable en utilisant les *principal warps*, qui correspondent aux vecteurs propres issus de la décomposition de la matrice d'énergie de courbure (cf. *infra*) en éléments propres (Slice, 2005). Nous nous intéresserons ici uniquement aux changements de conformation dans leur globalité et ne distinguerons donc pas une composante de l'autre.

Afin de décrire les changements de formes ou de conformations globaux, la méthode de TPS mérite un chapitre à part entière car elle constitue l'un des fondements des analyses que nous avons menées dans ce présent travail et y a été d'ailleurs utilisée à différents égards (e.g., cf. *infra* : estimation de données manquantes, glissement des semilandmarks, déformations de surfaces 3D). Cette méthode désigne un algorithme d'interpolation adapté à des problématiques géométriques par Duchon (1977). En morphométrie géométrique, l'algorithme consiste à faire

correspondre les points homologues de deux spécimens les uns sur les autres en interpolant l'espace entre chaque point. Il en résulte une déformation de cet espace avec, comme contrainte, que la déformation soit la plus lisse possible. Cette contrainte est mathématiquement définie par le concept de minimisation de l'énergie de courbure (i.e., *Bending energy*) liée à la déformation. Elle est définie mathématiquement comme l'intégrale des dérivées secondes des déformations (Bookstein, 1997b ; Gunz, 2005 ; Mitteroecker & Gunz, 2009 ; Gunz & Mitteroecker, 2013). Cette énergie peut être assimilée à la mesure du degré de déformabilité à une localisation donnée. En effet, si l'on considère l'analogie d'une fine plaque de métal qui doit être déformée, l'énergie à fournir pour déformer la plaque sera différente selon la superficie de la plaque à déformer. Plus la portion sera petite, plus l'énergie à fournir sera importante.

Son application en morphométrie originellement proposée par Bookstein (Bookstein, 1989,

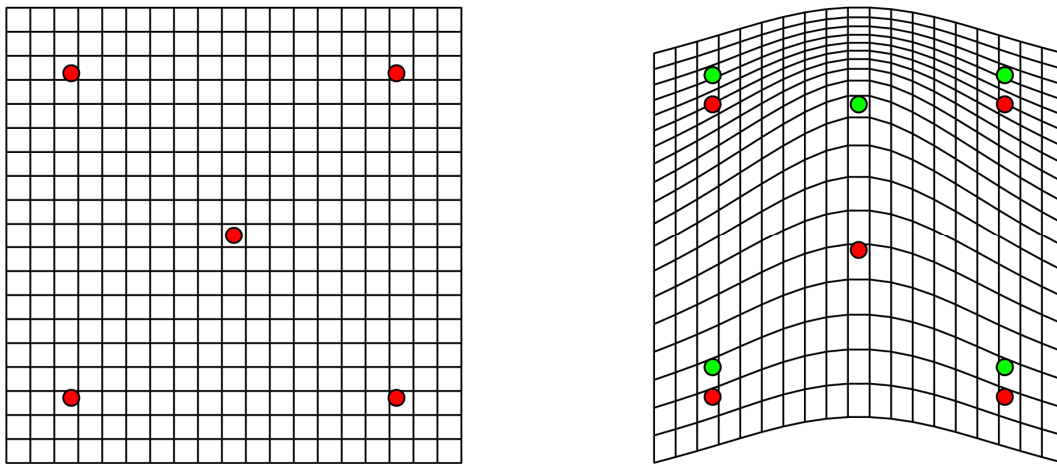


Figure 4.17 Illustrations, par le biais d'une grille de déformation, de la composante non-uniforme liée aux différences de configurations entre un individu représentant l'atlas de référence (ou template ; représenté par les points rouges) et un individu cible (représenté par les points verts).

1991), avait pour principe de rendre compte, par le biais de grilles, des déformations de conformation intervenant entre un spécimen de référence et un spécimen cible. La fonction était alors appliquée aux nœuds de la grille de déformation. La manière dont se déforme la grille illustre les directions et amplitudes des différences morphologiques entre les deux individus (Figure 4.18). La fonction de TPS comporte un autre intérêt de première importance : elle peut être appliquée à tout point dans l'entourage proche des landmarks de la configuration de référence. Autrement dit, l'algorithme peut être appliqué directement à une surface, sa déformation mettant en évidence la déformation morphologique entre le spécimen de référence et l'individu cible (Mitteroecker & Gunz, 2009). Dans la mesure où les grilles de déformations

sont difficilement interprétables pour des données 3D, nous préférons dans le cadre de ce travail cette dernière alternative. Il convient de préciser que la méthode des TPS est un algorithme d'interpolation et par définition, il procède à l'interpolation de l'espace entre chaque landmark. En soi, cette interpolation ne correspond à aucune réalité biologique et géométrique mais offre une illustration facilitant la lecture des changements de conformations ou de formes entre deux configurations données.

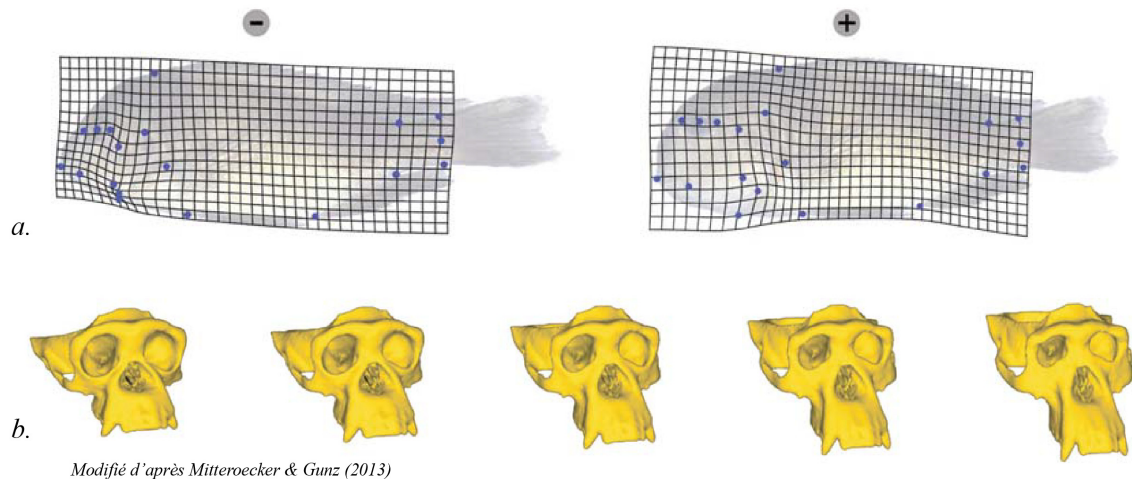


Figure 4.18 (a) Illustration de la déformation d'une image par TPS le long des axes négatifs et positifs d'une composante principale. (b) Illustration de la déformation d'une surface 3D par TPS le long d'une trajectoire de croissance (modifié d'après Mitteroecker & Gunz, 2013).

4.11 Semilandmarks

Dans le cadre de notre étude sur les modifications artificielles du crâne, le déficit de points-repères présentant une homologie anatomique sur la voûte crânienne (Gunz 2005) est problématique. Il nous a donc conduits à pallier ce problème en utilisant, en plus des landmarks anatomiques traditionnels, des semilandmarks ou *sliding-landmarks* (Bookstein, 1997a ; Gunz et al., 2005 ; Gunz & Mitteroecker, 2013).

Le concept au centre-même de l'analyse morphométrique est celui de l'homologie. Si nous avons déjà évoqué la notion d'homologie anatomique avec les landmarks de type 1 de Bookstein (1991), l'homologie géométrique est également utilisée pour placer des points dans des contextes où le nombre de points définis sur la base d'une homologie anatomique serait trop faible pour décrire avec finesse la conformation d'une structure. Sur le neurocrâne, la plupart des structures ne peut être identifiée que sur la base de landmarks anatomiques (e.g., la

région des bosses pariétales). D'autres structures peuvent être identifiées sur la base de critères anatomiques mais sont dépourvues de points-repères définis localement par une homologie biologique. C'est par exemple le cas des sutures crâniennes pour lesquelles les quelques landmarks identifiables (au niveau de la jonction des sutures) ne sauraient constituer des descripteurs représentatifs de la morphologie suturale. L'utilisation d'une série de landmarks placés indifféremment ou même de manière équidistante le long de la suture ne serait pas satisfaisante non plus dans la mesure où ces points ne répondraient d'aucune homologie d'un individu à un autre (Gunz et al., 2005 ; Gunz & Mitteroecker, 2013). Pour cette raison, nous avons opté, afin de caractériser les différences de conformations entre individus, pour l'emploi de semilandmarks.

Ainsi, les structures anatomiques définies à un niveau local et identifiables par un point ont été caractérisées par des landmarks anatomiques classiques qui répondent à une homologie biologique (Figure 4.13). Les structures anatomiques (e.g., sutures ou crêtes) décrivant des courbes ont été définies par des semilandmarks de courbe ; lesquels répondent à une homologie biologique mais aussi géométrique (cf. *infra.* ; Figure 4.13). Enfin, les surfaces sans structure identifiable de manière homologue d'un spécimen à un autre ont été décrites par des semilandmarks de surface qui répondent à une homologie géométrique (cf. *infra* ; Figure 4.13). Plus spécifiquement, l'homologie géométrique à laquelle nous faisons référence quand nous mentionnons les deux types de semilandmarks (i.e., semilandmarks de courbe et semilandmarks de surface) trouve son origine directement dans les déformations géométriques (cf. *supra*) que nous avons précédemment mentionnées. En effet, afin de parvenir à une homologie géométrique, ces points vont glisser jusqu'à parvenir à un équilibre pour lequel ils seront considérés homologues géométriquement. Pour parvenir à cet équilibre, le glissement de ces points va répondre à la minimisation d'un critère mathématique au cœur-même de l'algorithme de TPS : l'énergie de courbure. De manière itérative, les semilandmarks vont ainsi glisser avec plus ou moins de contraintes²⁷ et se positionner de façon à ce que l'énergie de courbure calculée entre les configurations de chaque individu et la configuration moyenne de l'échantillon soit minimale.

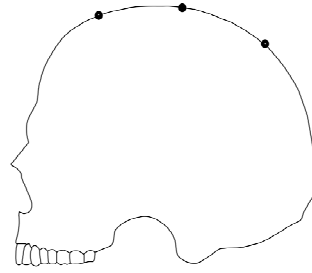
⁹ Selon qu'il s'agisse de semilandmarks de courbe ou de surface, leurs possibilités de déplacement dans l'espace seront plus ou moins contraintes. En trois dimensions, les semilandmarks de courbe qui se déplacent le long d'une courbe à la surface d'un objet auront perdu deux degrés de liberté et se trouveront limité à un seul. Les semilandmarks de surface, quant à eux, peuvent se déplacer dans toutes les directions à la surface de l'objet et auront simplement perdu un seul degré de liberté.

Initialement proposé par Bookstein (1991), cet algorithme de glissement a été dans un premier temps appliqué à des données 2D (i.e., semilandmarks de courbes en 2D) avant d'être étendu aux données 3D par Gunz et al. (2005). Ainsi, Gunz (2005, pp. 29-30) a proposé deux algorithmes pour procéder au glissement des semilandmarks : un premier appelé « basique » et le second dit « étendu ». Ici, quand nous ferons référence à l'étape de glissement des semilandmarks, nous ferons toujours référence au second algorithme dit « étendu ».

L'algorithme dit « étendu » fait appel à un processus itératif composé d'une série d'étapes consistant en une alternance de superpositions Procrustes et de relaxations de spline au cours de laquelle les semilandmarks glissent le long des tangentes aux surfaces. L'algorithme se décompose de la sorte :

1. Calcul des tangentes pour chaque semilandmark (Figure 4.19a.)
2. Glissement de tous les semilandmarks avec différents degrés de liberté selon leur type et avec, comme paramètre de convergence, la minimisation de l'énergie de courbure ou de la distance euclidienne entre chaque spécimen et l'atlas de référence (Figure 4.19b.)
3. Projection de chaque semilandmark sur les points de surface les plus proches (Figure 4.19c.)
4. Calcul d'une configuration Procrustes consensus (i.e., configuration moyenne)
5. Nouveau calcul des tangentes (Figure 4.19a.)
6. Nouveau glissement des semilandmarks par minimisation de l'énergie de courbure ou de la distance Procrustes entre les configurations de chaque individu et la configuration Procrustes consensus (Figure 4.19b.)
7. Projection de chaque semilandmark sur les points de surfaces les plus proches (Figure 4.19c.)
8. Répétition des étapes 4, 5, 6 et 7 n fois jusqu'à convergence

Minimiser l'énergie de courbure lors du glissement des semilandmarks en utilisant une configuration Procrustes moyenne comme individu de référence, n'est pas problématique. En effet, l'énergie de courbure est un invariant des effets de position, de taille et de rotation et permet donc ce procédé.



Atlas de référence (template) ou configuration consensus

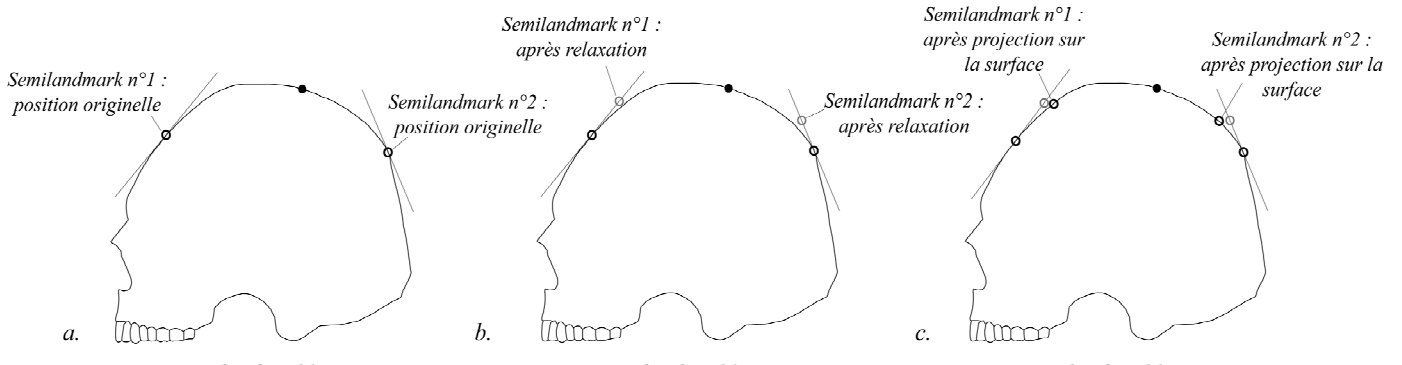


Figure 4.19 Représentation des différentes étapes de glissement de semilandmarks sur un individu cible avec le critère de minimisation de l'énergie de courbure. (a) positions originales des deux semilandmarks. (b) phase de relaxation (glissement le long des tangentes). (c) projection sur la surface 3D.

Deux critères de minimisation de différences morphologiques peuvent être pris en considération lors du glissement des semilandmarks : l'énergie de courbure ou la distance Procrustes. L'énergie de courbure repose sur le formalisme des TPS tandis que le second sur la procédure des moindres carrés. La différence fondamentale réside donc dans le fait que l'énergie de courbure est calculée sur l'ensemble des semilandmarks, lesquels se voient attribuer différents degrés de liberté. Ainsi, le glissement des semilandmarks se trouve donc influencé par les positions des landmarks anatomiques (Gunz and Mitteroecker, 2009b). La minimisation de la distance Procrustes comme critère d'homologie n'est pas influencée par la position relative des landmarks et semilandmarks. Il peut en résulter des semilandmarks finissant par glisser par-delà certaines courbes, par exemple dans le cadre d'études où la variation morphologique entre individus peut être grande. En raison de l'importante variation due aux différents types de modifications artificielles du crâne, nous avons choisi de faire glisser nos semilandmarks avec la minimisation de l'énergie de courbure comme critère d'homologie géométrique.

4.12 La superposition Procrustes

La procédure inhérente à la morphométrie géométrique est la superposition Procrustes qui, afin de comparer les différences morphologiques entre spécimens, va garantir leur superposition de manière indépendante à leur position, taille et orientation (Rohlf & Slice, 1990). Les configurations de landmarks des individus vont donc être dans un premier temps mises à la même échelle, puis vont subir une translation et enfin une étape de rotation. Ces trois opérations n'influencent pas sur la configuration de landmarks. Précisons que, s'il existe différents types de superposition Procrustes (e.g., *Ordinary Procrustes analysis*, *Generalized Procrustes analysis*, *Partial Procrustes fit*, *Resistant fit Procrustes superimposition* ; Rohlf and Slice, 1990), nous n'aborderons ici que la superposition Procrustes généralisée (i.e., *Generalized Procrustes Analysis* ou *Generalized Least-squares Superimposition*, deux termes équivalents employés dans la littérature). Si les étapes de translation et de mise à l'échelle sont interchangeables, l'étape de rotation constituera toujours la dernière étape de la procédure. La mise à l'échelle intervenant lors de la superposition Procrustes va consister à réduire à la même échelle l'ensemble des spécimens inclus dans l'analyse. Pour cela, nous utiliserons comme mesure de taille, la taille centroïde (Bookstein, 1991). La taille centroïde (CS) d'une configuration de landmarks est définie comme la racine carrée de la somme des distances au carré entre le centroïde (centre de gravité de la configuration de landmarks) et l'ensemble des landmarks :

$$CS = \sqrt{\sum_{i=1}^k xi^2 + yi^2 + zi^2}$$

La superposition Procrustes généralisée (*Generalized Procrustes Analysis* ou GPA) procède de manière itérative : elle va dans un premier temps faire subir une translation, mettre à l'échelle et orienter les configurations de tous les spécimens en fonction de la configuration d'un spécimen pris au hasard dans notre échantillon. A l'issue de cette étape, elle générera une configuration consensus ou configuration moyenne à partir de laquelle les individus subiront une nouvelle fois une étape de mise à l'échelle, translation et orientation. Ce processus sera répété n fois jusqu'à optimiser au mieux la superposition de tous les individus.

Dans un premier temps, les configurations de landmarks seront transposées dans l'espace (Figure 4.20). Le processus s'effectue en retranchant aux coordonnées x, y et z de chaque landmark (pour des modèles 3D) les coordonnées x, y et z de chaque landmark d'un individu

pris au hasard dans l'échantillon (individu cible). Cela aura pour effet de faire subir une translation aux configurations de chaque spécimen, alignant leur centroïde respectif sur celui de l'individu cible. Dans un deuxième temps, l'ensemble des individus sera mis à une même échelle ; celle de l'individu cible. Le procédé est réalisé en divisant les coordonnées de chaque landmark par la taille centroïde du spécimen cible (Figure 4.20). Enfin, l'étape de rotation (Figure 4.20) aura pour but d'optimiser l'alignement des spécimens de sorte que la somme des distances au carré entre landmarks de chaque configuration et leur correspondant sur l'individu cible soit minimisée (méthode des moindres carrés ou *least-squares fitting*). La superposition Procrustes est itérative. En effet, à l'issue de cette première étape d'alignement sera générée une configuration moyenne en calculant la moyenne de chaque coordonnée de landmarks pour l'ensemble des spécimens alignés dont, l'individu cible. Les deux étapes d'alignement que sont la mise à l'échelle et la rotation sont alors répétées en prenant cette fois pour référence la configuration moyenne nouvellement calculée. Le processus sera répété n fois, jusqu'à

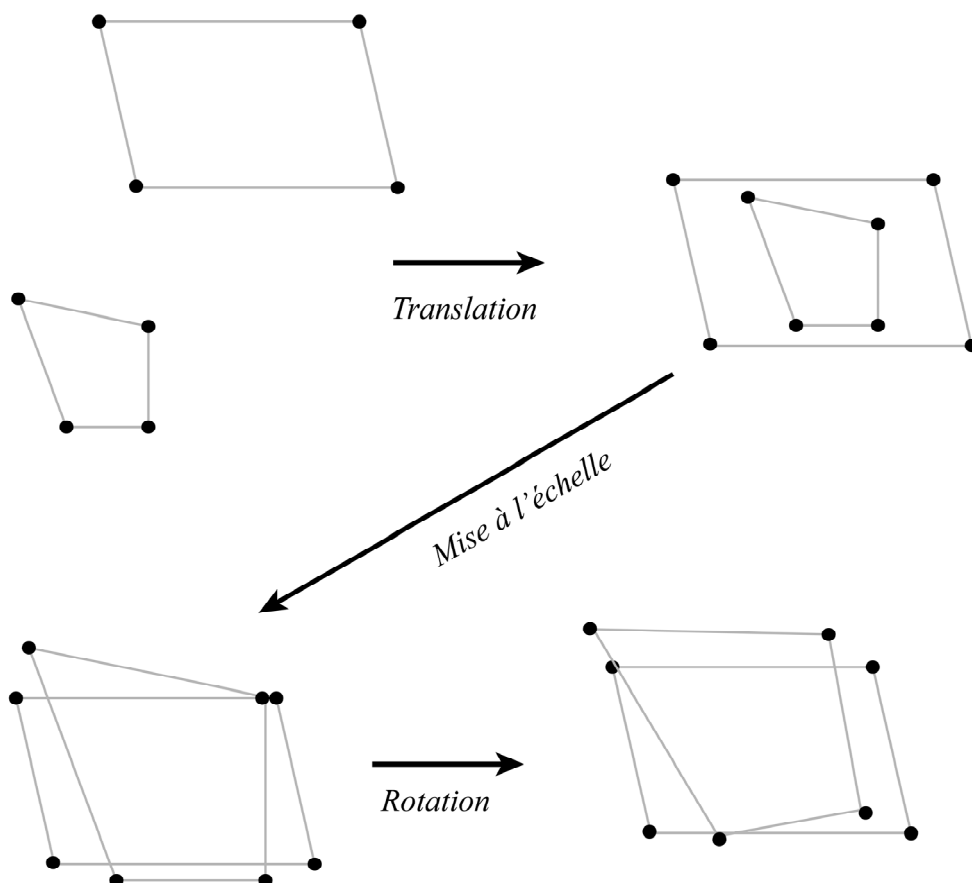


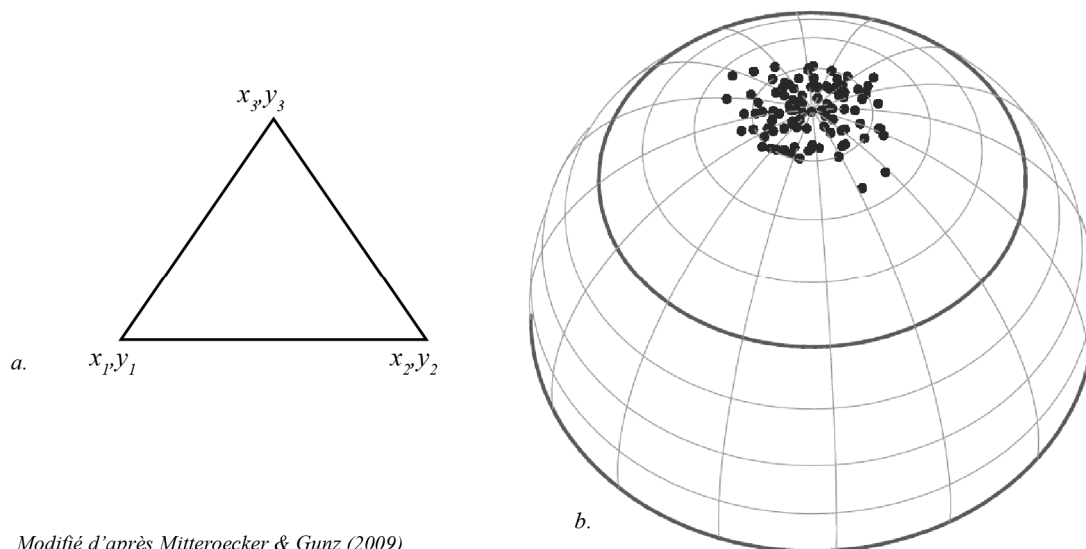
Figure 4.20 Représentation des différentes étapes constituant l'analyse Procrustes généralisée : la translation, la mise à l'échelle et la rotation.

obtention de différences infimes entre la configuration moyenne nouvellement calculée au bout de n répétitions et la configuration moyenne issue de la répétition $n-1$.

4.13 Espace de conformation et dimensionnalité

L'espace de conformation désigne l'espace au sein duquel toutes les conformations possibles d'objets existent.

La réalisation des différentes étapes qu'implique la superposition Procrustes occasionne des pertes d'informations. En effet, lors de la superposition Procrustes, l'étape de mise à l'échelle par exemple occasionne une perte de l'information de taille de nos individus. Cette perte d'information crée donc la perte d'un degré de liberté. Pour les coordonnées 2D de k landmarks ($2k$ coordonnées par spécimens ; $2k$ dimensions ou degrés de liberté représentant l'espace de conformation) par exemple, l'étape de translation va occasionner une perte de deux degrés de liberté alors que la mise à l'échelle et l'étape de rotation engendrent la perte d'un seul degré chacune. L'étape de superposition Procrustes cause alors la perte de quatre degrés de liberté, ce qui fait de l'espace de conformation, un espace à $2k-4$ dimensions. En trois dimensions, cette même procédure va avoir pour conséquence une perte de trois degrés de liberté pour l'étape de translation, d'un seul degré de liberté pour la mise à l'échelle et enfin de trois degrés de liberté pour la rotation (en raison des trois angles possibles de rotation dans un espace en trois dimensions), réduisant ainsi l'espace de conformation à $3k-7$ dimensions. A des fins de simplification, et à l'instar de beaucoup d'auteurs (e.g., Claude, 2008 ; Coquerelle, 2011), nous prendrons ici l'exemple de triangles afin d'explicitier le concept d'espace de Kendall (Figure 4.21a). Considérons plusieurs triangles chacun constitué de trois landmarks à deux coordonnées (6 degrés de liberté en tout). Dans ce cas de figure, chaque triangle devrait donc être représenté par un point dans un espace à six dimensions (Goodall, 1991). Après les trois étapes de mise à l'échelle, translation et rotation, 4 degrés de liberté ont été perdus et seuls restent deux degrés de liberté nous informant que l'espace de conformation des triangles comporte deux dimensions. Or Kendall (1981) a pu mettre en évidence que l'espace de conformation de triangles était une surface courbe comprise au sein d'un espace à trois dimensions : une surface incluse dans une sphère et dont le point au pôle représente la conformation moyenne après Superposition Procrustes (Rohlf, 1999 ; Figure 4.21b.).



Modifié d'après Mitteroecker & Gunz (2009)

Figure 4.21 (a) Schéma d'un triangle représenté par trois coordonnées à deux dimensions (b) Représentation de l'espace de conformation de Kendall pour différentes conformations de triangles décrites par trois coordonnées à deux dimensions.

Ainsi, à l'issue des deux premières étapes de la superposition Procrustes (avant l'étape de rotation), les configurations de landmarks sont appelées « pré-conformations » ou *presshapes* (Goodall, 1991 ; Dryden & Mardia, 1998 ; Rohlf, 1999). Elles sont situées dans un espace appelé espace de pré-conformation, représenté par une demi-sphère (Figure 4.22 Kendall, 1981). A la suite de la dernière étape de rotation, les configurations de landmarks deviennent alors des conformations, situées dans l'espace de conformation (*shape space*), appelé espace de conformation de Kendall. Toutes les conformations possibles de triangles y sont représentées par des points qui sont eux-mêmes contenus dans cet espace (Rohlf, 2000). Chaque point est une conformation et chaque déplacement d'un point vers un autre représente un changement de conformation (Klingenberg, 2016).

Pour les configurations comprenant un nombre de landmarks supérieurs à trois, l'espace de conformation est donc une variété riemannienne complexe (Mitteroecker & Huttegger, 2009), non-linéaire proscrivant tout recours aux méthodes statistiques traditionnelles qui reposent elles sur la géométrie euclidienne. Pour contourner ce problème, l'ensemble des configurations alignées depuis l'espace de conformation non-linéaire est projeté sur un plan tangent (Figure 4.22). Cet espace est tangent à la configuration consensus et à l'espace de conformation de Kendall.

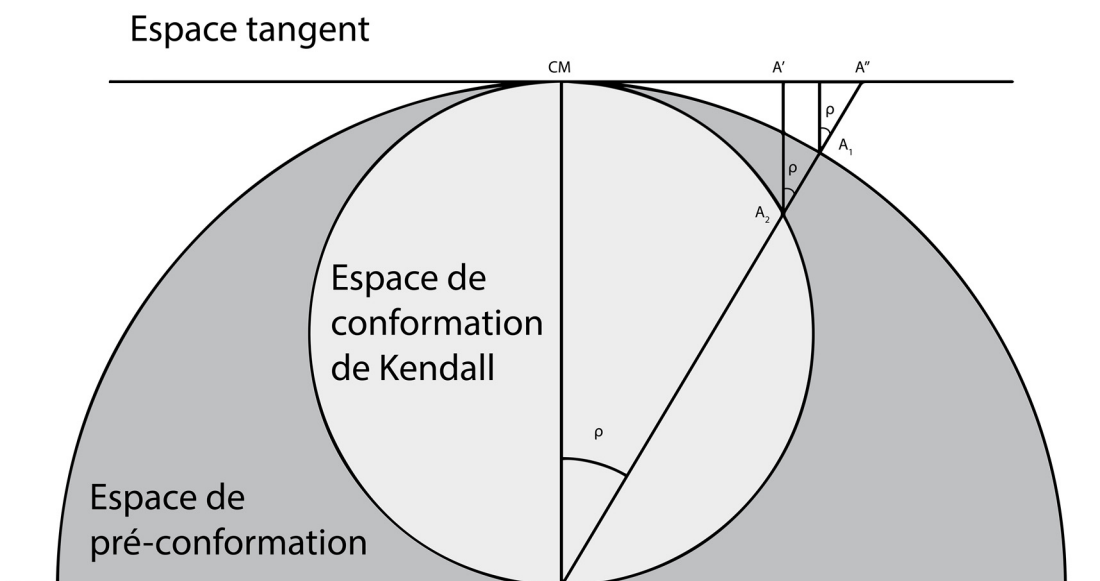


Figure 4.22 Illustration de l'espace de conformation de Kendall, de l'espace de pré-conformation et de l'espace tangent ainsi que des différentes projections d'un individu A au sein de ces différents espaces.

Cette projection pourrait créer des distorsions dans le cas où des individus présenteraient des différences morphologiques extrêmement importantes avec la configuration consensus (les individus occuperaient sur la sphère des positions très éloignées de son pôle). Néanmoins, il est généralement admis que le champ des conformations possibles en biologie se concentre sur une très faible partie de l'espace de conformation de Kendall (Klingenberg, 2016). Il est donc communément admis que les distorsions engendrées par la projection dans l'espace tangent sont négligeables, même dans le cadre de variations morphologiques aussi importantes qu'entre différents spécimens de l'ordre des mammifères (Rohlf, 1999 ; Marcus et al., 2000). Ajoutons que la projection depuis l'espace de conformation de Kendall vers l'espace tangent peut être réalisée de deux manières : de manière orthogonale ou de manière stéréoscopique. Marcus et al. (2000) ont montré que la distance Procrustes (ρ dans la figure 4.22) correspondant à l'angle entre le point projeté dans l'espace tangent et le point dans l'espace de pré-conformation ou dans l'espace de conformation de Kendall (respectivement les points A1 et A2 de la figure 4.22) était extrêmement petite, et ce, quelle que soit la méthode de projection utilisée (les points A', A'' et A''' dans cette même figure). Ainsi, dans le cadre de ce travail, nous aurons systématiquement recours à la projection orthogonale.

Bien que Mitteroecker & Gunz (2009) estiment que, dans la grande majorité des cas, l'application d'analyses issues de la géométrie euclidienne dans un espace non-euclidien est généralement concevable, il existe toutefois des cas de figures pour lesquels une telle

application s'avère plus problématique. C'est notamment le cas quand la variation morphologique s'effectue au sein d'une même direction de l'espace de conformation (Mitteroecker & Bookstein, 2007). Ne pouvant présumer des directions des changements morphologiques et par souci d'exactitude, nous avons pris la décision de systématiquement projeter les coordonnées des individus depuis l'espace de Kendall vers le plan tangent à la configuration consensus.

Soulignons qu'à partir de ce stade, et afin d'éviter toute confusion, nous parlerons d'espace de conformation de Kendall pour désigner la surface courbe incluse dans la sphère (ou hypersphère) constituant l'espace des conformations avant projection dans l'espace tangent. L'espace de conformation, ou *shape space*, fera, lui référence à l'espace de conformation après analyse en composantes principales sur les coordonnées Procrustes (i.e., coordonnées projetées dans l'espace tangent).

4.14 **Estimation de données manquantes**

L'analyse en composantes principales constitue l'analyse exploratoire par excellence en morphométrie et permet de résumer un nombre important de variables quantitatives caractérisant la conformation d'un objet en un nombre de variables décorrélatées et hiérarchisées. Toutefois, cette analyse exige des jeux de données complets. En archéologie, et pour des raisons évidentes de conservation, rares sont les spécimens dépourvus d'altérations taphonomiques et donc parfaitement conservés. Ainsi, il est tout à fait courant de ne pouvoir placer certains landmarks sur certains spécimens. Deux solutions s'offrent alors : exclure l'individu de l'analyse ou bien estimer la position « théorique » des landmarks manquants. La première solution est extrêmement contraignante dans la mesure où elle réduit significativement la taille des échantillons considérés. Cela serait particulièrement dommageable dans le cadre de ce travail où l'ensemble des individus considérés proviennent de contextes archéologiques et peuvent, par conséquent, présenter des parties manquantes. Aujourd'hui, il existe des méthodes efficaces de restitution des positions des landmarks manquants (Gunz, 2005 ; Gunz et al., 2009). Afin de minimiser tout biais potentiel lié à l'estimation de données manquantes, seuls les individus ne comptant pas plus de 12,5% de landmarks manquants ont été considérés.

Il convient de distinguer deux types de données manquantes. La forme la plus courante et la plus évidente est liée au spécimen et se manifeste par l'absence de certaines régions anatomiques. Le deuxième type de données manquantes peut être plutôt attribuable à la

méthode d'acquisition et se caractérise par l'impossibilité d'identifier certaines structures en raison d'artéfacts ou la résolution de l'acquisition. L'estimation de ce dernier type de données manquantes se fera rigoureusement de la même manière que pour le premier type, à cette différence près que les points seront projetés sur la surface 3D après estimation.

L'estimation des données manquantes peut être réalisée en faisant appel à différentes méthodes. Elles peuvent être fondées sur des modèles statistiques comme ceux des modèles de régressions multiples multivariées ou des algorithmes de maximum de vraisemblance (expectation-maximization algorithms Dempster et al., 1977). En raison de sa meilleure précision (Gunz, 2005 ; Gunz et al., 2009), dans ce travail, nous avons estimé la position des landmarks manquants à partir de l'algorithme de TPS. Cette méthode est particulièrement adaptée aux surfaces relativement lisses comme le neurocrâne (Gunz et al., 2009).

L'estimation des données manquantes a ici été faite en suivant le protocole développé par Gunz (2005). Le crâne étant une structure comportant une symétrie de type objet, on distingue au sein de cette même entité une partie droite et une partie gauche. Dans un premier temps, l'estimation va reposer sur cette symétrie et consister à la rétablir : quand un landmark pair est manquant, nous allons estimer sa position à partir de plusieurs points. L'estimation de la position du landmark manquant sera réalisée à partir de la position de son homologue droit ou gauche, mais aussi grâce à un ensemble de points uniques localisés le long de l'axe médian de la structure (i.e., *reflected-relabeling* ; Mardia et al., 2000). Il existe plusieurs méthodes de reconstruction de la symétrie bilatérale qui reposent sur la définition empirique d'un plan sagittal médian, sur la technique de *reflected-relabeling* ou encore sur une combinaison de *reflected-relabeling* et d'une fonction de TPS.

Dans ce travail, la première de ces méthodes n'a pas été considérée car elle postule que les points médians sont alignés sur un même et unique plan (estimable par exemple à l'aide de l'ajustement par la méthode des moindres carrés ; Gunz et al., 2009). Or, il a été constaté que les spécimens déformés présentent souvent un décalage entre ces points (e.g., on observe souvent un déplacement important du bregma si l'on prend en considération un plan passant par le nasion, la glabellule et le lambda). La deuxième méthode présente l'avantage de pouvoir s'affranchir de toute définition d'un plan de symétrie (Mardia et al., 2000 ; Bookstein & Mardia, 2003). Dans la mesure où elle repose sur le *reflected-relabeling*, elle procède à l'aide de points uniques situés le long de l'axe médian. Cela facilite une reconstruction indépendante de la

définition d'un quelconque axe de symétrie. Toutefois, elle aboutira à une reconstruction des données manquantes dépourvue de signal asymétrique (Gunz et al., 2009).

Ainsi, dans ce travail, nous avons utilisé la combinaison de *reflected-relabeling* et de TPS proposée par Gunz et al. (2009). Elle a pour principe de calculer la configuration symétrique du spécimen présentant des données manquantes. Par la suite, il faudra établir une fonction d'interpolation par TPS entre les landmarks qui ont pu être localisés de manière fiable sur la configuration originale et leurs correspondants sur la configuration symétrique. Cette fonction sera alors appliquée aux homologues symétriques des landmarks manquants de la configuration originale. Seuls les points pairs dont l'homologue droit ou gauche a pu être localisé seront estimés de cette manière. Pour les points uniques (situés le long de l'axe médian) et les points pairs pour lesquels aucun homologue n'a pu être localisé, l'estimation des données se fera en utilisant uniquement la méthode d'interpolation par TPS. Pour ce faire, il est nécessaire d'estimer ces données manquantes à partir d'un autre spécimen « complet » pris comme référence (Gunz, 2005). On procède alors à une superposition Procrustes entre les deux individus à partir d'un sous-échantillon de landmarks. Cette superposition est réalisée sur la base des points qui ne sont pas manquants. La référence que l'on utilise peut être un spécimen pris au hasard, le *template* ou la configuration consensus de notre échantillon. Nous avons opté pour la dernière option en y apportant quelques modifications afin d'affiner au mieux l'estimation des landmarks manquants pour notre échantillon d'étude. En effet, certains individus présentent des modifications artificielles du crâne et donc des différences morphologiques importantes entre eux mais également avec des individus non-modifiés. La participation des individus impliqués dans le calcul de la configuration a été ainsi pondérée selon leur proximité morphologique avec l'individu (Schlager, 2017). Toute configuration présentant une proximité importante avec l'individu cible est dotée d'une inertie plus importante que les configurations morphologiquement plus différentes. Plus les différences morphologiques (quantifiées par les distances Procrustes entre l'individu cible et les individus impliqués dans le calcul de la configuration consensus) sont importantes, plus l'inertie accordée aux individus tend vers zéro. Chaque inertie est inversement proportionnelle à cette distance Procrustes et leur somme est égale à 1. Une fois la configuration de landmarks et semilandmarks estimée, la surface 3D de l'individu présentant des données manquantes pourra être reconstruite à partir d'un individu complet en utilisant une nouvelle fois une fonction de TPS (Figure 4.23).

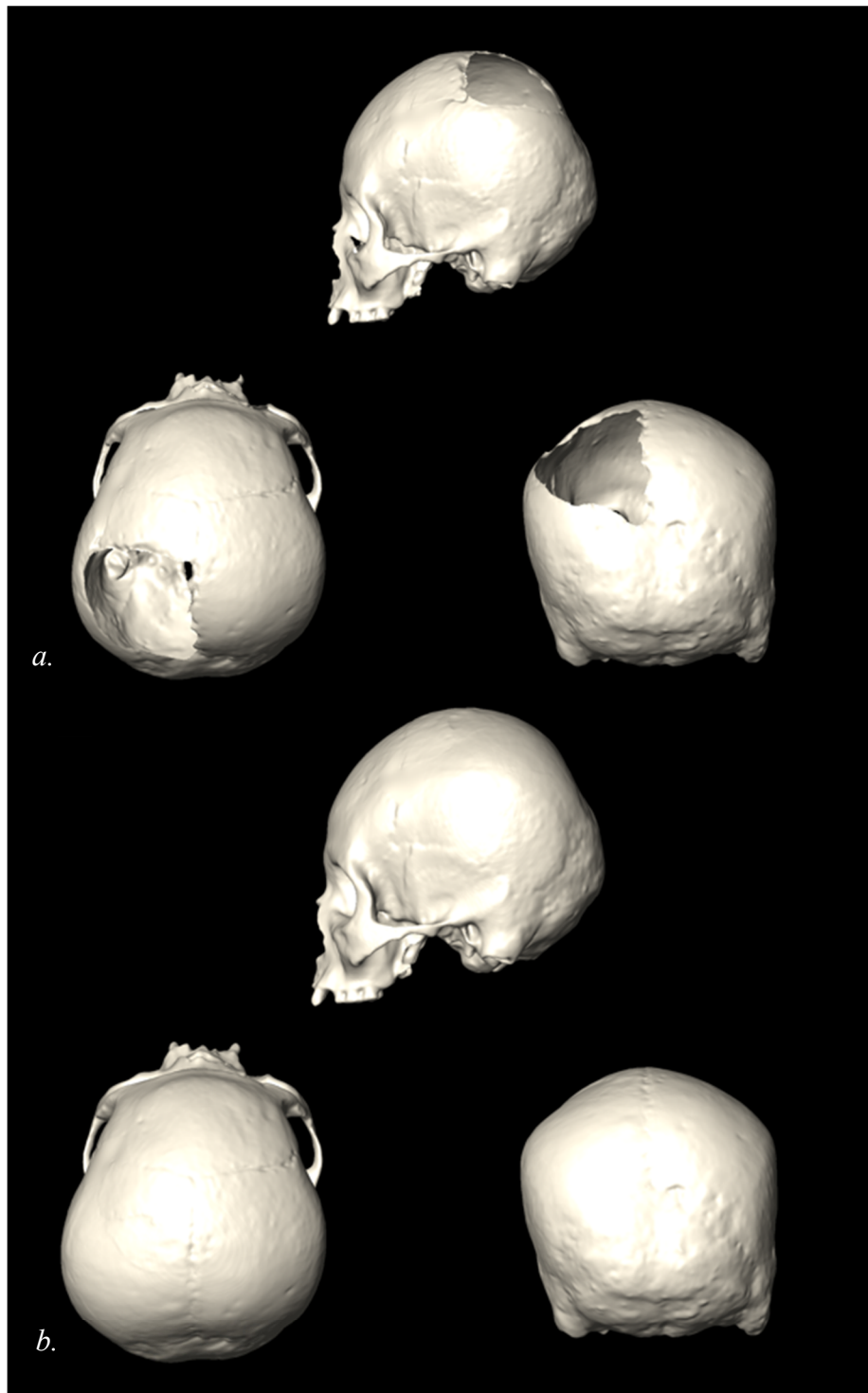


Figure 4.23 Exemple de reconstruction d'une surface 3D après estimation des données manquantes. (a) surface 3D originelle de l'individu Mich 31_sep37-10 (b) surface 3D reconstruite de l'individu Mich 31_sep37-10.

4.15 Traitement statistique et analyse en composantes principales

En morphométrie dite « classique » ou « traditionnelle », les variables peuvent être constituées de mesures linéaires, d'angles ou de ratios et donc présentent des unités de mesure différentes. En morphométrie géométrique, les variables de conformation (i.e., les coordonnées Procrustes) possèdent toutes la même unité définie par la métrique Procrustes. Or, la plupart des analyses classiques (e.g., régression multiple, analyses canoniques, fonction discriminantes) ne permettent pas de préserver cette métrique (Mitteroecker & Gunz, 2009). Par ailleurs, étant donné que la plupart des méthodes statistiques classiques requièrent un nombre d'individus plus élevé que celui des variables, l'utilisation d'un grand nombre de landmarks (i.e., landmarks et semilandmarks) va contraindre les analyses statistiques et proscrire l'utilisation de certaines d'entre elles (e.g., l'analyse canonique ; Mitteroecker & Gunz, 2009). Pour être mené à bien, ce type d'analyses exigent que la matrice de variance-covariance soit non-singulière (i.e., inversible). Or, en raison du trop grand nombre de variables rapporté au nombre d'individus, cette condition peut ne pas être respectée. D'autre part, de fortes corrélations entre les variables liées à l'utilisation d'un grand nombre de semilandmarks, est un second facteur qui peut favoriser l'obtention d'une matrice singulière.

Il est tout de même possible d'avoir recours à ces analyses statistiques en utilisant de nouvelles variables résumant notre jeu de variables brutes, et ce, à l'aide de techniques de réduction dimensionnelle (e.g., analyse en composantes principales ou ACP). Il est aussi tout à fait possible de faire appel à des méthodes qui n'imposent aucune contrainte sur le nombre de variables (e.g., régression des moindres carrés partiels, tests de permutation).

En morphométrie géométrique, l'ACP s'avère particulièrement utile puisque c'est une technique de réduction dimensionnelle qui résume la variabilité d'un jeu de données multivariées en un ensemble de nouvelles variables ordonnées et indépendantes (i.e., les composantes principales qui résultent de combinaisons linéaires des variables originales). Le caractère ordonné provient du fait que chaque nouvelle variable ou composante principale (de PC1 à PCn avec n étant le nombre d'individus) expliquera un pourcentage décroissant de la variance. L'aspect indépendant met en avant le fait que les composantes principales sont décorrélées. L'ACP cherche donc à identifier un premier axe de variation qui explique la proportion de variance la plus grande (i.e., la PC1) puis à en chercher un second orthogonal au premier (de cette orthogonalité résultera l'indépendance des composantes principales). Il en va de même pour les composantes suivantes. Par une rotation et une translation, il est alors possible

d'orienter, dans l'espace multidimensionnel, le nuage de points des individus de sorte que les PCs constituent les axes d'un nouveau système de coordonnées (Figure 4.24).

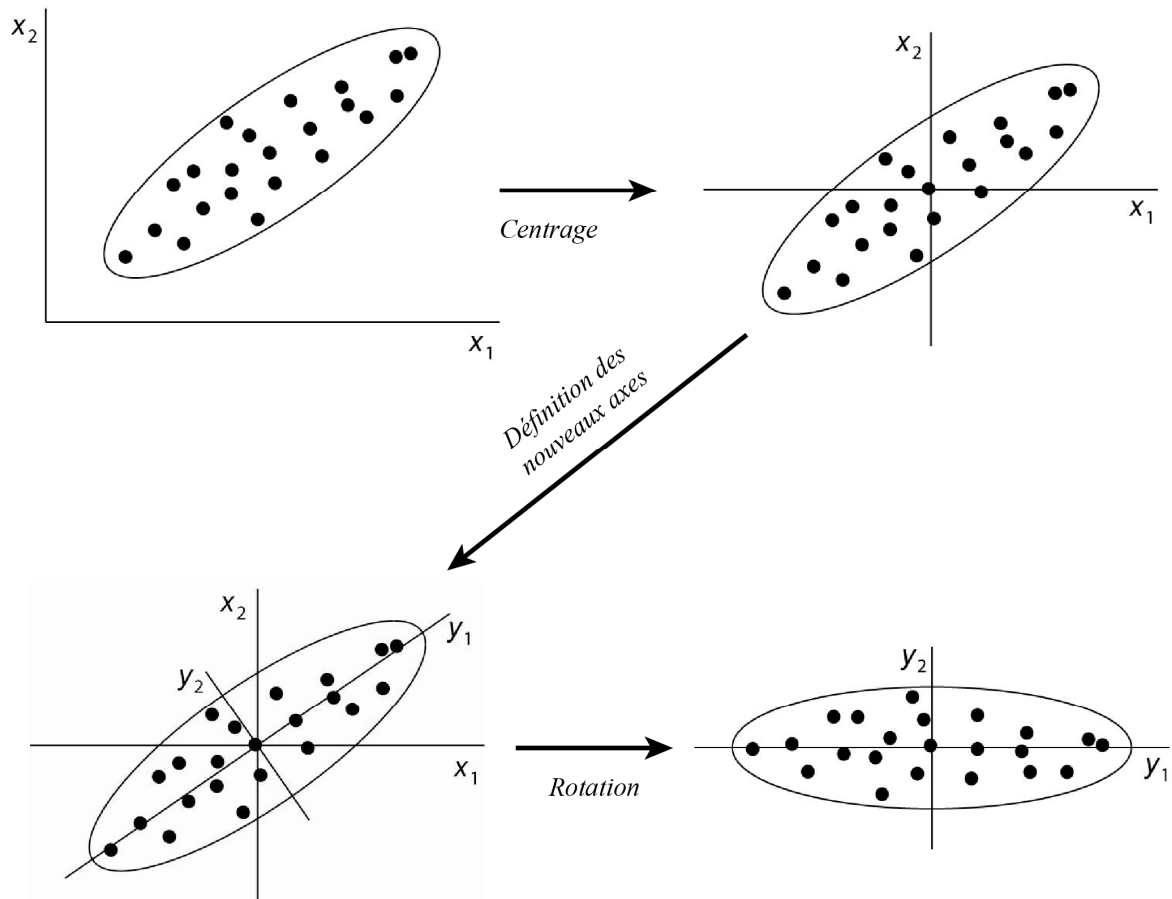


Figure 4.24 Schéma des différentes étapes qui constituent l'analyse en composantes principales.

Considérons la matrice A suivante avec n individus et p variables (i.e., descripteurs de conformation). Précisons que les n variables renvoient bel et bien au nombre de descripteurs de conformation et non au nombre de landmarks (Zelditch et al., 2012). Notons également que i renvoie à l'indice des individus et j à celui des variables. On peut donc écrire la matrice A telle que :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & \cdots & \cdots & a_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{ip} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{np} \end{pmatrix}$$

Soit X , le vecteur des p variables tel que :

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_p \end{pmatrix}$$

On peut alors noter C la matrice de covariance de A , telle que :

$$C = \begin{pmatrix} Var(x_1) & Cov(x_1, x_2) & \cdots & Cov(x_1, x_p) \\ Cov(x_2, x_1) & Var(x_2) & \cdots & Cov(x_2, x_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Cov(x_p, x_1) & Cov(x_p, x_2) & \cdots & Var(x_p) \end{pmatrix}$$

Précisons qu'il s'agit ici de la matrice de covariance dans la mesure où les données ont été centrées.

A partir de la matrice de covariance, l'ACP va consister à transformer l'ensemble des p variables en une série de nouvelles variables ordonnées et indépendantes de sorte que :

1. La somme des variances de la nouvelle série de variables (i.e., les PCs) doit être égale à celle des variables originales.
2. La covariance des PCs doit être nulle. Autrement dit, les composantes doivent être orthogonales les unes aux autres. Cela est garanti par la matrice de covariance dont les vecteurs propres sont orthogonaux.
3. La première PC (PC1) doit décrire la variance la plus importante. Par la suite, chaque PC devra alors décrire la variance la plus importante qui n'a pas été décrite par la PC la précédente.

La première étape de l'ACP consiste à trouver les valeurs et vecteurs propres de la matrice de covariance et revient en fait à résoudre l'équation :

$$(C - \lambda I)u = 0$$

Dans cette équation, λ correspond aux valeurs propres, u aux vecteurs propres et I à la matrice d'identité. Pour trouver les solutions de cette équation (i.e., les vecteurs et valeurs propres), il

faut procéder à une décomposition en valeurs singulières ou en valeurs propres que nous ne décrirons pas ici. Ces deux méthodes procèdent de manière assez similaire puisqu'elles décomposent la matrice de covariance en un produit de trois matrices. Notons que, dans toutes nos analyses, nous n'avons procédé que par décomposition en valeurs singulières.

On appelle vecteurs propres les composantes (i.e., les nouvelles variables indépendantes). Ces vecteurs expriment la combinaison linéaire de chaque variable originale dans la construction des composantes. Dans la mesure où les nouvelles variables doivent être ordonnées, les vecteurs propres seront classés selon leur valeur propre. La première composante constituera donc le vecteur dont la valeur propre sera la plus grande telle que :

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$$

Ainsi, l'information contenue au sein d'un ensemble de variables de grandes dimensions va être résumé à un ensemble de nouvelles variables non-corrélées et hiérarchisées. Chaque individu se verra attribuer un score pour chacune d'entre elles. Cette opération revient en fait à projeter des individus d'un espace à grandes dimensions vers un espace de plus petites dimensions. Ainsi, le score b d'un individu i pour une composante k du vecteur propre u , pourra être déterminé en effectuant le calcul suivant :

$$b_{ik} = u_{k1}a_{i1} + u_{k2}a_{i2} + \dots + u_{kp}a_{ip}$$

Dans le contexte de ce travail, nous avons été amenés à utiliser cette formule dans deux cas de figures. Le premier cas est celui pour lequel l'ACP a été entreprise sur l'ensemble de l'échantillon. Le second cas renvoie au contexte où l'ACP a été réalisée sur une partie de l'échantillon. Dans ce cas de figure, les premiers vecteurs propres issus de l'analyse caractérisent donc les maximums de variation morphologique entre les individus composant ce sous-échantillon. A partir de ces derniers, nous pourrions chercher alors à explorer comment certains individus se situent sur les premières composantes exprimant la variation morphologique de ce sous-échantillon. Cela sera utile pour mieux caractériser certaines formes *a minima* difficilement identifiables sur la base d'un examen morphoscopique. Par exemple, nous pourrions procéder à ce type d'analyses afin de comprendre si une même modification artificielle du crâne *a minima* est assimilable à une version amoindrie d'un type de modification « extrême », déjà bien établi sur la base d'analyses morphoscopiques réalisés par Imbelloni (Dembo & Imbelloni, 1938), Romano (1974) ou Tiesler (2014). Par exemple, dans le cas où nous souhaiterions comparer un même type de modification *a minima* à la variation

morphologique que représente le type tabulaire droit, nous utiliserons les vecteurs propres issus d'une ACP réalisée exclusivement entre des individus présentant des conformations marquées du type tabulaire droit et des conformations d'individus non-modifiés. Ces premiers vecteurs propres exprimeront les différences morphologiques liées majoritairement à la modification tabulaire droite. En multipliant les coordonnées des individus présentant de possibles modifications *a minima*, par les vecteurs propres de cette ACP, nous pourrions projeter les individus suspectés de présenter des modifications artificielles du crâne *a minima* dans un espace au sein duquel la variation morphologique exprimée est celle liée à une modification tabulaire droite.

Comme mentionné ci-dessus, les composantes sont hiérarchisées dans la mesure où elles vont exprimer un pourcentage différent de variance. Ce pourcentage pour une composante j se

calculera de la sorte : $\frac{\lambda_j}{\sum_j \lambda_j}$

5 Résultats

Nos résultats se présentent sous la forme de trois articles dont le premier a été publié dans l'*American Journal of Physical Anthropology*, le deuxième soumis à la revue *Journal of Archaeological Science: Reports* et le troisième actuellement en cours d'écriture. Nous avons planifié de le soumettre d'ici le début du mois de mai de l'année 2020 pour le deuxième à la revue *American Journal of Physical Anthropology*.

5.1 Neurocranial shape variation among Tarascan populations: Evidence for varying degrees in artificially modified crania in pre-Hispanic West Mexico (1200–1400 AD)


Sélim Natahi, Michael Coquerelle, Grégory Pereira & Priscilla Bayle

Etat : publié en août 2019 dans l'*American Journal of Physical Anthropology*

Le premier de ces articles s'est attaché à quantifier les différences de conformation et l'asymétrie au sein d'un échantillon datant du Postclassique moyen (1200 – 1400 apr. J.-C.) afin de tester l'hypothèse de Pereira (1999, 2018) selon laquelle des formes de modifications artificielles *a minima* sont apparues dans le bassin de Zacapu à cette période. En outre, l'article a également visé à évaluer la possibilité de certains critères non-métriques à distinguer les modifications artificielles du crâne quel que soit leur degré d'intensité. Enfin, nous avons présenté et discuté des plausibles intentions qui ont sous-tendu l'expression des formes de modifications artificielles *a minima*.

Les *Supplementary Information* sont présentées en Annexe 2

Neurocranial shape variation among Tarascan populations: Evidence for varying degrees in artificially modified crania in pre-Hispanic West Mexico (1200–1400 AD)

Sélim Natahi¹  | Michael Coquerelle² | Grégory Pereira³ | Priscilla Bayle¹

¹Université de Bordeaux, CNRS, MCC, UMR 5199 PACEA, Pessac, France

²Department of Medicine and Surgery (Stomatology Area), Universidad Rey Juan Carlos, Alcorcón, Spain

³UMR 8096, Archéologie des Amériques, CNRS, Maison René-Ginouvès, Nanterre, France

Correspondence

Sélim Natahi, Université de Bordeaux, CNRS, MCC, UMR 5199 PACEA, Bâtiment B8, Allée Geoffroy St Hilaire, CS 50023, 33615 Pessac Cedex, France.

Email: selim.natahi@gmail.com

Funding information

ANR MESOMOBILE, Grant/Award Number: ANR-14-CE31-0016; LascArBx: Cluster of Excellence in Archaeological Sciences of Bordeaux, Grant/Award Number: ANR-10-LABX-5

Abstract

Introduction: Along the Mesoamerican western margin, the Zacapu basin has yielded a large number of human remains demonstrating usage of artificial cranial modification (ACM). However, at the onset of the Middle Postclassic (1200–1400 AD) only few individuals still exhibit clear signs of ACM. Some authors have suggested that, rather than disappearing entirely, ACM may have become less visible anatomically, making it difficult to identify based on simple visual analyses. Here, we used 3D geometric morphometric methods to investigate the extent to which ACM persisted during the Postclassic in this region.

Materials and methods: We measured the 3D vault's shape changes in a sample of surface-scanned human crania: 55 individuals from the Postclassic Zacapu basin and a control group of 31 individuals from a Huichol Mexican Indian sample and a French medieval series from La Granède. We used a principal component analysis to explore the shape variation within the sample and employed the neighbor joining method to identify morphological groups. Finally, we quantified each individual's asymmetry. **Results:** We identified three groups displaying shape features diverging from those of the control group. The first group is characterized by marked fronto-obelionic ACM, whereas the other two show mild forms of ACM. The individuals in all three groups display moderate to high degrees of asymmetry compared to the control group.

Discussion: The marked fronto-obelionic modification is clear evidence of a specific ACM technique. The two types of mild ACM most likely result from different techniques but their moderate degree of modification brings into question the intentions behind their production.

KEYWORDS

3D geometric morphometrics, artificial cranial modification, asymmetry, Mesoamerican Archaeology

1 | INTRODUCTION

In bioarchaeology, accurately identifying and quantifying shape variation among artificially modified crania (possibly caused by the appliance of a device) is a matter of concern because such shape variation is the physical manifestation of cultural practices of past populations. Their identification is also important when calculating biological distances based on craniometrics and/or the presence/absence of discrete traits in order to avoid biasing results and their interpretation by failing to account for any culturally induced cranial variation. Artificial cranial modification (ACM) is a cultural practice that consists in placing a cephalic device upon a newborn's head in order to give the head a determined form during ontogeny. The device functions by preventing growth of the neurocranium in regions where the constraining elements have been placed (e.g., Antón & Weinstein, 1999; Moss, 1958; Tiesler, 2014). The resulting shape is highly dependent on the nature of the cephalic device, the composition of which can vary from one culture to another and include cords, boards, or specific headdresses.

Archaeologically and historically, such cultural practices have been spread across all of Oceania and the Old and New World (Dembo & Imbelloni, 1938; Dingwall, 1931) and were characterized by various cranial forms. In addition to the type of device used, the age at which it was affixed and the duration of its application are two other factors that may explain variation among the shapes of artificially modified crania (Tiesler, 2014; Tiesler & Cucina, 2010). The cultural etiology of ACM are multiple including esthetics (e.g., Dingwall, 1931), religious (e.g., Fletcher, Pearson, & Ambers, 2008; Houston, 2006; Tiesler & Cucina, 2010), the statement of a social status (e.g., Geller, 2011; Khudaverdyan, 2011; Okumura, 2014; Sharapova & Razhev, 2011) and ethnic identity (e.g., Blom, 2005; Hakenbeck, 2009; Lozada, 2011; Mayall, Pilbrow, & Bitadze, 2017; Ozbek, 2001; Tiesler, 2014; TorresRouff, 2002).

The pre-Hispanic Americas and, more specifically, Mesoamerica were characterized by a wide range of expression in terms of ACM techniques. The most ancient human remains demonstrating the existence of ACM in Mexico are those of a skull found in the Tehuacán valley, dated to 8500–7000 BP (Anderson, 1965; Lagunas Rodríguez, 1989). Following this, the practice of ACM was varied and widespread until its prohibition after the Spanish conquest (1519–1521 AD; Tiesler, 2012a, 2014; Tiesler & Cucina, 2010; Tiesler & Zabala, 2011). Overall, analysis of the reported cases of ACM in Mesoamerica indicates that the skulls were deformed by either applying rigid cephalic gears or using cradles that integrated a cranial modification device (Romano, 1974; Tiesler, 2014).

Although less studied than in the rest of Mesoamerica, ACM techniques were extensively reported throughout Western Mexico (e.g., Acosta, 2003; Bautista & Ortega, 2005; Gill, 1985; Hulse, 1945; Meighan & Foote, 1968; Stewart, 1948; Uruñuela y Ladron de Guevara, 1994). As part of this area, the Mexican state of Michoacán provides many examples from the Preclassic (100 BC to 300 AD) to the Postclassic (900–1500 AD) periods (Lagunas Rodríguez, 1987; Oliveros, 2004; Pereira, 1999; Pereira, 2018). Pereira (2018) showed the evolution of these techniques within the state from the Preclassic (100 BC to 300 AD) to the Postclassic (900–1500 AD) periods. During this latter period, he observed a drastic decrease in the number of crania demonstrating morphology consistent with ACM.

Visual examination of the human cranial remains indicates that ACM techniques likely underwent a major cultural shift (Pereira, 1999, 2018). Prior to the Postclassic, evidence for ACM was widespread and modified crania demonstrated a large number of different marked shape variations in the Zacapu basin. Yet, the cranial records for the Postclassic period deviate from this pattern of ACM expression, which Pereira has interpreted as being indicative of a shift toward preference for unmodified crania and mild forms of ACM (Pereira, 1999, 2018). Indeed, on several individuals originally thought to be unmodified, he has observed morphological criteria that authors traditionally report as preferentially expressed among culturally modified crania (Antón & Weinstein, 1999; Tiesler, 2012b, 2014). The majority of crania either display subtle features that are likely examples of mild ACM, or do not exhibit any signs of ACM at all. This trend is unusual for the region, where ACM was pervasively practiced (Pereira, 2018). In this context, confirming or ruling out the modified aspect of certain skulls is quite challenging and would be most effectively accomplished by developing an objective method of ascertainment.

During the 20th century, the different ACM variants were identified and classified via either visual examination (e.g., Brothwell, 1963; Buikstra & Ubelaker, 1994; Dembo & Imbelloni, 1938; Dingwall, 1931; Gervais, 1989; Tiesler, 2014) or morphometric methods (e.g., Comas & Marquer, 1969; Dembo & Imbelloni, 1938; Falkenburger, 1938). After determining that the shape of the cranial vault of an individual falls outside the range of natural variation within modern populations, the major concern lies in attempting to understand the way the ACM shape was produced. Most analyses rely upon typological systems that list numerous expressions of forms. Dembo and Imbelloni (1938) have developed a detailed typology specifically designed to differentiate the ACM variants observed among pre-Hispanic populations. It is structured into three main types, each one corresponding to a specific cephalic device involved in the

modification process: the tabular-oblique, tabular-erect and annular types. The tabular-oblique type includes the modified skulls exhibiting obliquely oriented parallel constriction planes. In the tabular-erect type, the planes are non-parallel, as the posterior device is vertically oriented. The annular type includes cranial forms where symmetric annular constrictions can be identified. According to the authors, tabular-oblique forms would refer to the use of rigid cephalic devices, tabular-erect to the process of infant cradleboarding and annular to the arrangement of bandages, strings or a headdress applied to the child's head. Finally, the mimetic forms are reported as intermediate types that share a combination of morphological features from two different ACM categories.

Other studies address the issue of classification of artificially modified cranial forms by using linear measurements, as well as indices and angles, to reliably evaluate cases of ACM (e.g., Clark et al., 2007; Falkenburger, 1938; O'Brien & Stanley, 2013; Pomeroy, Stock, Zakrzewski, & Lahr, 2010; Romano, 1965, 1974). Although combinations of these metric traits allow for the identification of major ACM forms to a certain extent (e.g., Falkenburger, 1938; O'Brien & Stanley, 2013), the limited number of recordable variables on the cranial vault prevents clear discrimination among certain types and is inadequate for accurately describing fine shape changes between individuals. More recently, geometric morphometrics has been used to quantify ACM diversity among modern humans (Cheverud, Kohn, Konigsberg, & Leigh, 1992; Friess & Baylac, 2003; Gómez-Valdés, Bautista Martínez, & Romano Pacheco, 2007; Kohn, Leigh, & Cheverud, 1995; Kuzminsky, Tung, Hubbe, & Villaseñor-Marchal, 2016; Manríquez, González-Bergás, Salinas, & Espouey, 2006; Mayall et al., 2017; Mayall & Pilbrow, 2018; Perez, 2007; Perez et al., 2009). Those studies have measured the shape changes among different ACM variants and highlighted how effective geometric morphometrics can be when applied to the issue of discriminating among various ACM techniques.

A number of the aforementioned studies succeeded in differentiating among different ACM variants for clear cases of modification (e.g., the annular type from the tabular one in Kuzminsky et al., 2016). Nevertheless, numerous studies have highlighted that the morphological differences among ACM types do not have clear-cut boundaries. Some morphological overlaps are observable between individuals belonging to different ACM types, as well as between individuals with ACM and control group individuals (Clark et al., 2007; Kuzminsky et al., 2016; Mayall et al., 2017; Pomeroy et al., 2010). Because cranial modification is a complex and dynamic integrated system, several factors can influence the final form a skull takes, including the type of cephalic device used to modify the skull, its placement on the skull,

the magnitude of the pressure it applies to the skull, the length of its application and the age of the individual when initially exposed to modification. All those factors are likely to alter the natural neurocranium growth and subsequently account for the important diversity of ACM expressions in terms of forms and modification degrees (Tiesler, 2014, p. 262). Therefore, the application of certain ACM techniques can be characterized by mild to moderate morphological modification, which can be hard to identify by simple visual examination (Brothwell, 1975; Clark et al., 2007; Neumann, 1942; Pomeroy et al., 2010; Romano, 1965). Our study aims to address this issue using 3D geometric morphometrics by documenting for the first time mild forms of ACM in an archaeological sample.

Despite the difficulties in visually identifying mild forms of ACM, there are five criteria proposed in the literature as being correlated with ACM expression. In most cases, the identification of ACM relies on bone flattening (Figure S1a) and its counterpart process, bone broadening. These are usually considered to be the most easily recognizable and reliable traits that suggest prior application of ACM devices. Nonetheless, several authors report that some cases of mild ACM would not appear vastly different from a group of unmodified crania, complicating substantially the identification of mild forms based on those criteria (Anderson, 1965; Antón, 1989; Pereira, 1999; Pomeroy et al., 2010; Tiesler, 2012b, 2014). Apart from bone flattening and broadening, other nonmetric traits have been suggested to help support the diagnosis of ACM in skeletal samples. Antón and Weinstein (1999) and Tiesler (2012a, 2014) have proposed the sagittal and bilateral postcoronal sulci (Figure S1b,c), which are displayed by the ACM trilobed and bilobed forms in the classification system of Dembo and Imbelloni (1938, p. 271), as a reliable morphological feature indicative of this cultural habit. Tiesler (1999, 2012b) demonstrated that the bilateral postcoronal sulcus expression gradually increases according to the skull's degree of modification. The author also stresses that no individual with an unmodified head exhibited this feature. This morphological trait is likely a physiological response of sutural growth under the condition of mechanical constraint, rather than an imprint of elements, such as bands or cords (Tiesler, 1999). Some authors also suspect the presence of suprainiac imprints (i.e., small depressions localized in part of the occipital squama in the area surrounding inion; Figure S1d), as indicative of the use of ACM techniques (Goldstein, 1940; Holliday, 1993; Magitot, 1885; Stewart, 1976; Tiesler, 2012a, 2012b; Weiss, 1981). This anatomical feature is present in more than 40% of Maya skulls exhibiting tabular-erect or oblique types (Tiesler, 1998, 1999, p. 218). Antón and Weinstein (1999) have also identified, within South America, a higher frequency of occipital depressions (i.e., suprainiac imprints)

among crania exhibiting ACM than for individuals with unmodified skulls (25.3% for the antero-posterior modification type, 28.1% for the circumferential type and 2.3% for the individuals with unmodified skulls). The overall degree of asymmetry also might be another relevant factor in the identification of ACM (Figure S1e). Several authors (e.g., Clark et al., 2007; Kohn et al., 1995; Neumann, 1942; Pomeroy et al., 2010; Romano, 1974; Tiesler, 1998) have observed cases of vault shape asymmetry that they interpreted as by-products of the use of cradles. Those criteria do not allow a clear discrimination when used independently. Therefore, our study tests the relevance of these criteria when considered jointly in the identification of marked or mild ACM forms.

For the Postclassic period in the Zacapu basin, Pereira (1999, 2018) has suggested, based on visual examination, that some skulls resemble the mild forms of ACM discussed above. In order to test Pereira's assertion and determine whether ACM techniques were used in these populations, we quantify the shape variation in a sample of Postclassic individuals from two archaeological sites: El Palacio and Malpaís Prieto (Figure 1). We propose to focus on the following three objectives: (a) we will quantify the morphometric shape differences within the sample considered; (b) we will measure the individual's asymmetry; and (c) we will address and discuss the relevance of the morphological criteria mentioned by Antón and Weinstein (1999) and Tiesler (2012b, 2014) in the determination of ACM.

2 | MATERIALS AND METHODS

2.1 | Samples

Our sample consists of 55 individuals from the Zacapu basin (Table S1). Thirty-two skulls come from the archaeological site of El Palacio, which was excavated at the outset of the 19th century by the explorer Carl Lumholtz (Lumholtz, 1902; Lumholtz & Hrdlicka, 1898). Very little information regarding the archaeological context and exact location of the excavations have been provided. Lumholtz discarded the postcranial material, with the exception of several carved long bones (Pereira, 2005), focusing instead on the skulls that he transported to the American Museum of Natural History where they are now preserved. Twenty-three skulls come from Malpaís Prieto. Gregory Pereira led the archaeological excavations from 2010 to 2017 where 42 simple and multiple graves in an outstanding state of preservation have been unearthed. In addition, we have created a control group consisting of 31 individuals for which no ACM techniques of any kind have been reported, including 16 Huichol Mexican Indians from The Huichol's skull collection (Lumholtz, 1902) and 15 French medieval individuals from

the archaeological site of La Granède (Saint-Pierre, 2010). All individuals are adults except two (Table S1). According to Bastir, Rosas, and O'Higgins (2006), the neurocranial outline achieves its adult shape between 9.9 and 11.7 years of age. Based on the degree of maturation observed in various post-cranial elements, dental mineralization and eruption stages (AlQahtani, Hector, & Liversidge, 2010; Demirjian, Goldstein, & Tanner, 1973; Moorrees, Fanning, & Hunt Jr, 1963; Scheuer & Black, 2000; Schmitt, 2005; Ubelaker, 1978), we estimate that the age-at-death of the two subadult individuals ranges from 10 to 20 years. As this age bracket overlaps that of the achieved maturity of the neurocranial outline, we elected to include these two specimens in our analyses.



FIGURE 1 Location of El Palacio and Malpaís Prieto sites.

In order to assess whether sexual dimorphism results in neurocranial shape differences, we determined the sex for 17 individuals from Malpaís Prieto and La Granède. Given the potential for ACM to affect sex-related cranial traits (Buikstra & Ubelaker, 1994), we only used metric and nonmetric traits of the pelvis (Brůžek, 2002; Brůžek, Santos, Dutailly, Murail, & Cunha, 2017; Murail, Brůžek, Houët, & Cunha, 2005). The two Lumholtz collections (i.e., the El Palacio and the Huichol Mexican Indian collections) lack pelvic bones, thus preventing any reliable sex determination for these two samples.

2.2 | Data acquisition

The cranial surfaces were digitally scanned using a Next Engine laser scanner. Each scan was performed with a resolution of 322,580 points per square millimeter and a ± 0.125 mm accuracy. Neurocranial shape is difficult to quantify using traditional craniometric landmarks because there are few homologous anatomical structures that can be measured reliably (Gunz & Mitteroecker, 2013). Therefore, semilandmarks were included to help capture the three-dimensional neurocranial structure (Bookstein, 1997). Using the software Viewbox (dHAL software, Kifissia, Greece), a 3D-template of 515 landmarks and semilandmarks was digitized and warped onto each skull to capture the cranial surface geometry (Table 1 and Figure 2). After digitization and warping, using the R “Morpho” package (Schlager, 2017) the 3D semilandmarks were allowed to slide along curves and surfaces in order to minimize the bending energy of the thin-plate spline (TPS) interpolation function that is computed between each specimen and the sample Procrustes average (Bookstein, 1997; Gunz, Mitteroecker, & Bookstein, 2005). After sliding, semilandmarks can be treated as homologous points and combined with traditional landmarks to be converted into Procrustes shape coordinates by generalized Procrustes analysis (GPA; Rohlf & Slice, 1990; Bookstein, 1996; Mitteroecker & Gunz, 2009). Each configuration was scaled to have a unit centroid size (CS; square root of the summed squared Euclidean distances from all semilandmarks to their centroid; Dryden & Mardia, 1998). Then all configurations were translated and rotated to minimize the overall sum of the squared distances between the corresponding landmarks and semilandmarks.

Individuals with missing data account for no more than 12.5% of information loss (i.e., no more than 65 missing landmarks). Their missing coordinates were estimated and their meshes reconstructed according to the standard protocol developed by Gunz (2005) and Gunz, Mitteroecker, Neubauer, Weber, and Bookstein (2009) (Figure S2).

To assess the amount of shape variation in our sample that can be attributed to size differences among individuals (i.e., allometry), we conducted a Procrustes analysis of variance (i.e., Procrustes ANOVA) of the shape coordinates on the log of centroid size (logCS) with a permutation procedure repeated 1,000 times. Our control sample is composed of individuals originating from both North American and European populations. However, the shape variation related to these population distinctions is not the focus of this study. Therefore, to remove this source of variation, we subtracted the mean shape and mean size of the Huichol control group from every individual of the El Palacio, Malpaís Prieto and Huichol groups after Procrustes superimposition. The same method was applied to the French control group, subtracting the

group shape and size means from each La Granède individual. Finally, the sample shape and size grand means were added to each individual shape and size residuals.

TABLE 1 List of anatomical landmarks and semilandmarks shown in Figure 2.

No.	Anatomical landmarks	Label (see Figure 2)	Unilateral/bilateral
1	Nasion	n	Unilateral
2	Glabella	g	Unilateral
3	Bregma	b	Unilateral
4	Lambda	l	Unilateral
5	Inion	i	Unilateral
6	Opisthion	op	Unilateral
7	Basion	ba	Unilateral
8, 9	Frontomolare temporal	fnt	Bilateral
10, 11	Frontomolare orbital	fmo	Bilateral
12, 13	Porion	po	Bilateral
14, 15	Mastoid notch	mn	Bilateral
No.	Curve semilandmarks	Unilateral/bilateral	Comments
26:33	Sagittal suture (n = 8)	Unilateral	Cranial suture expanding from bregma to lambda
16:20, 21:25	Inferior orbital margin (n = 5 × 2)	Bilateral	Rim of the orbital opening to frontomolare orbital
No.	Surface semilandmarks	Unilateral/bilateral	
34:274, 275:515	Cranial vault patch (n = 241 × 2)		Bilateral

2.3 | Shape analyses

To explore the neurocranial shape differences among the individuals of our sample, we performed a principal components analysis (PCA) on the matrix of Procrustes shape coordinates of the full sample in the shape space. In order to test the deviation from joint equality of any sequence of consecutive eigenvalues we used Anderson's statistics (Anderson, 1963; see reference in Coquerelle et al., 2011). When the formula is applied to a single pair of consecutive eigenvalues, it states that the distribution of $2N\log(a/g)$ is that of an ordinary chisquare on two degrees of freedom. Here N is the sample size, a is the arithmetic mean of the pair of consecutive eigenvalues and g is the geometric mean of this same pair of eigenvalues. The expected value of the chi-square is two (its degrees of freedom). Therefore, no PC (eigenvector) should be considered for interpretation if, when its eigenvalue is compared with the next eigenvalue,

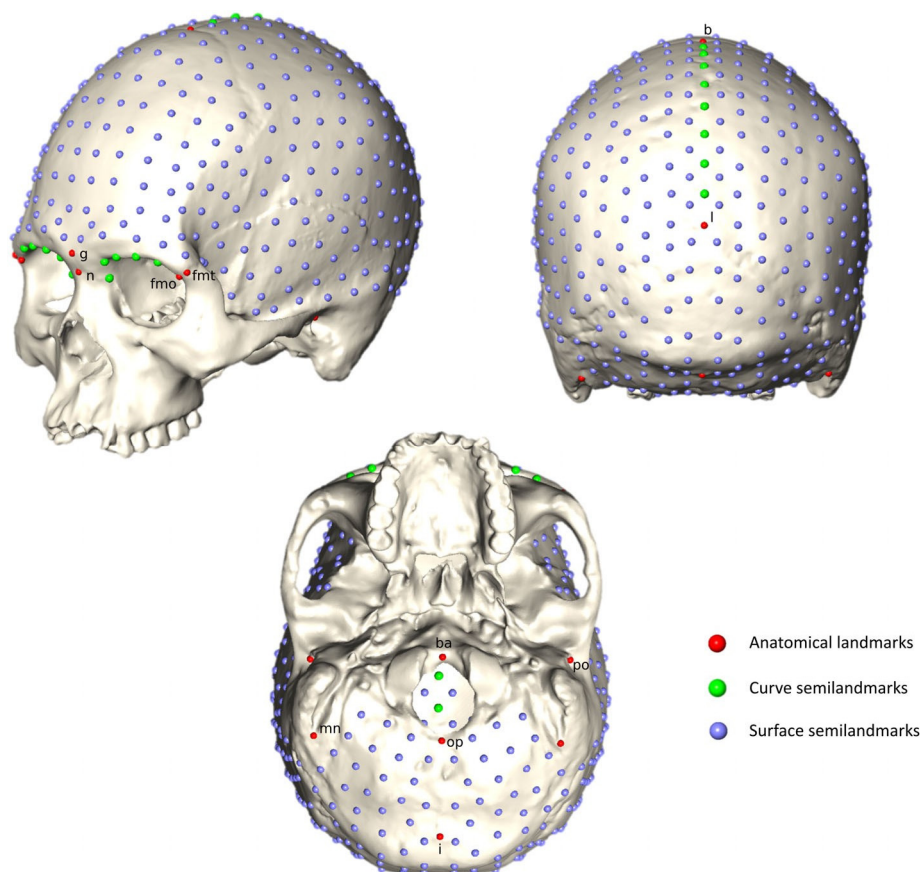


FIGURE 2 Neurocranium template of 515 landmarks and semilandmarks. Table 1 provides the landmarks and semilandmarks list with names and labels.

$2N\log(a/g)$ does not exceed two, as their ordination is more likely than not to be expressing only noise.

To visualize shape variation along the principal components (PCs), we created a 3D digital mesh of a skull that was warped toward the Procrustes grand mean using a thin plate spline (TPS) interpolation function (Bookstein, 1991). Thereafter, the surface of the Procrustes grand mean configuration (consensus) was used to visualize shape variation along the PCs. The shape deformation represented by the eigenvectors of a particular PC could then be visualized as a TPS deformation of the consensus configuration plus or minus the eigenvector (positive and negative values of the PC, respectively).

In order to assess the shape similarity among the individuals, we used neighbor joining (NJ) algorithms of the pairwise Procrustes distances to determine nearest-neighbor connections (i.e., NJ connections; e.g., Gunz et al., 2009). This procedure allowed us to identify empirically groups. Additionally, pairwise permutation procedures (with 1,000 permutations) were performed to test whether Procrustes distances between the means of these new groups were significantly different when group membership was randomly assigned.

Finally, we measured the degree of asymmetry within each group in order to evaluate whether asymmetry patterns and magnitude would differ from the average asymmetry level of an unmodified cranium's series. The asymmetric component of shape variation was assessed by measuring the deviations between each specimen's original landmark configuration and its reflected/re-labeled one (Klingenberg, 2015; Klingenberg, Barluenga, & Meyer, 2002). To explore the pattern of asymmetry within each group, we conducted a PCA on the matrix representing the asymmetric component of shape variation (e.g., Klingenberg et al., 2002; Klingenberg & McIntyre, 1998). We then represented the groups' asymmetry patterns as distributions of their respective individuals' scores along the first principal component (i.e., PC1Asym). Finally, we evaluated the shapes homogeneity within each group isolated via NJ by calculating the trace of the asymmetric and symmetric within-group variance-covariance matrices (Zelditch, Swiderski, & Sheets, 2012).

2.4 | Evaluate the significance of morphological criteria

To evaluate the significance of some diagnostic features used for identifying ACM, we have considered the degree of expression of five traits: bone flattening, the sagittal and bilateral postcoronal sulci, the suprainiac imprints, and the asymmetry (Figure S1). Each trait was scored

on a scale from 0 to 2 (Figure S1). Next, we aggregated individuals into clusters with a k-means non-hierarchical clustering procedure, which computes k clusters so that the inertia within each cluster is minimized (Hartigan & Wong, 1979). It proceeds relocating iteratively the k clusters means until convergence (i.e., until the optimal partition is found). The algorithm has been computed for k = 4 clusters. They were ordinated from Cluster 1 with the lowest scores to Cluster 4 with the highest (Table S1). To compare cluster assignment to identified shape features, we included each cluster's convex hull in the shape space summarized by the first two PCs.

3 | RESULTS

3.1 | Shape space PCA

A Procrustes ANOVA of the original shape coordinates and logCS (i.e., before removing shape variation due to interpopulation differences) was conducted. Results suggest a weak covariation between shape variables and size (Table 2). Cranial size only accounts for 3% of shape variation in our sample, which implies that other factors independent from size account for the total shape variation. The first two principal components (PC1 and PC2) account for 53.3% of the total shape variance (Figure 3a). Anderson's formula (1963) for the PC2 and PC3 eigenvalues (respectively, 0.292 and 0.129) gives a result of 51.96, indicating the two PCs can be independently interpreted. There is no differentiation between females and males along PC1 and PC2 (Figure 3a), indicating that sexual dimorphism is not a significant source of variation along these two axes. The scatterplot (Figure 3a) of the PC scores is enhanced by the interindividual connections resulting from NJ. Three groups plot outside the distribution of the control group and are statistically distinct from both each other and the control group (Table 3). The group NJ1 is composed of eight individuals from El Palacio displaying the highest PC1 scores. The groups NJ2 and NJ3 are composed of individuals from both El Palacio and Malpaís Prieto. The group NJ2 comprises intermediate PC1 positive scores and is located between the control group and the NJ1 group, whereas the individuals of NJ3 differ from the control, NJ1 and NJ2 groups by having high PC2 scores. Interestingly, two individuals from Malpaís Prieto (Mich31 sep 33 and Mich31 sep 37-10) are distinct from all other individuals in the archaeological sample and the NJ places them with individuals falling in the PC plot area inhabited by the control group. Mich31 sep 33 and Mich31 sep 37-10 fall within NJ2 along the PC1 axis, between the control group and NJ1. However, they are distinct from NJ2 along the PC2 axis by having the lowest and the highest PC2 scores, respectively. All other individuals

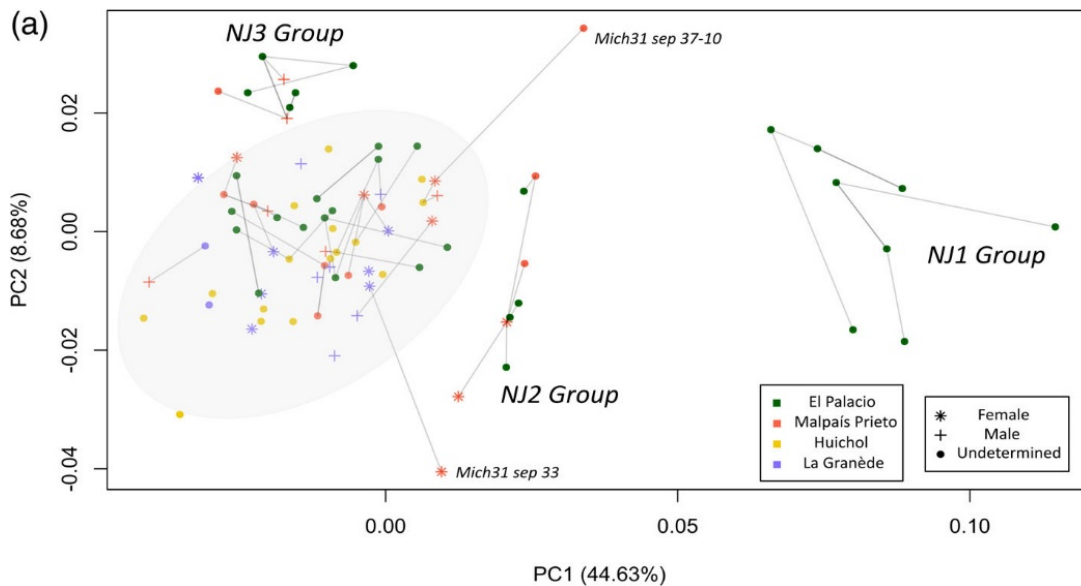
from El Palacio and Malpaís Pietro not within the three NJ groups and not the two Mich31 individuals fall within the 95% confidence interval ellipse of the control group, indicating shapes similar to those of the control group (i.e., unmodified cranial shapes). Along the PC1

axis, the shape of the NJ1 skulls with high PC1 scores is characterized by protruding parietal regions associated with a flattening of the obelionic region and an anteroposterior reduction of the vault (Figure 3b). Their cranial shape is consistent with the fronto-obelionic ACM variant originally described by Pereira (1999). The shape of the vault in the NJ2 individuals, which are located between those of the control and NJ1 groups along the PC1 axis, is characterized by the same characteristics as the NJ1 skulls, although expressed to a lesser degree.

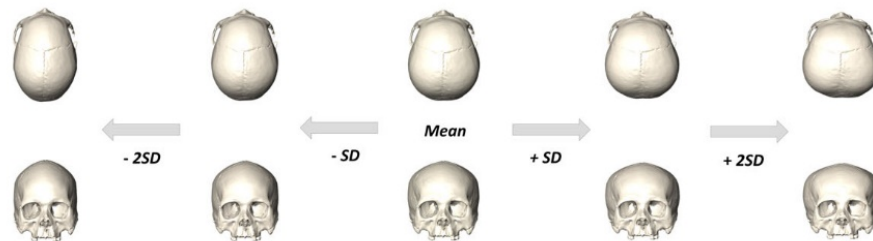
On the positive end of the PC2 axis, the neurocranial shape variation includes a vault height increase in the bregmatic area, as well as the anterior two-thirds of the sagittal suture. This increase in height is associated with a flattening of the squamous parts of the frontal and occipital bones (Figure 3.c) and is expressed in the individuals of the NJ3 group. In addition, the median posterior and inferior parts of the occipital of the NJ3 specimens is flattened vertically.

TABLE 2. Procrustes analysis of variance with 1,000 permutations.

	Df	SS	MS	R2	F	Z	Pr(>F)
logCS	1	0.006491	0.0064912	0.03007	2.6038	1.9268	0.039
Residuals	84	0.209411	0.002493	0.96993			
Total	85	0.215902					



(b) Shape variation along PC1



(c) Shape variation along PC2

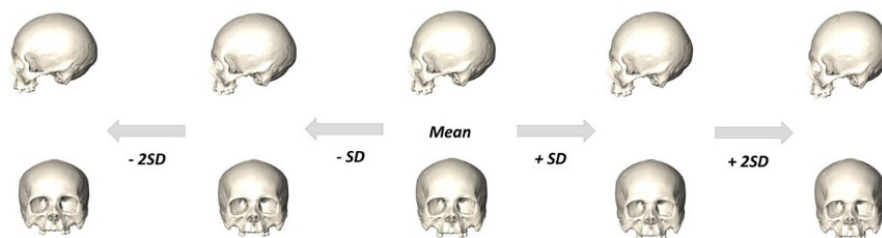


FIGURE 3 (a) Shape space principal components analysis. Individuals are ordinated along the first two principal components (i.e., PC1 and PC2 that account for 53.31% of total variance). Control group variation space is represented with a 95% confidence interval. Neighbor joining (NJ) is computed using the Procrustes distances. Only nearest neighbor connections of the El Palacio and Malpaís Prieto individuals are represented. Interconnected neighbor joined groups out of the control group variation are identified (i.e., the NJ1, NJ2, and NJ3 groups). Mich31 sep 33 and Mich31 sep 37-10 are two individuals displaying isolated positions in comparison with the rest of the sample.

(b) Visualization of shape changes via deformation of the grand mean shape along minus and positive PC1 values (plus-minus one and two standard deviations: respectively, $\pm 1SD$ and $\pm 2SD$).

Mich31 sep 33 displays a slight hollowing of the obelionic region, combined with a moderate broadening of the vault, which explains the similarity of its PC1 score to those of the members of the NJ2 group. Nevertheless, the neurocranial height is quite low in comparison to the NJ2 individuals (Figure S3.a). Mich31 sep 37-10 demonstrates an anteroposterior compression with a vertical flattening of the vault's posterior part joined to a lateral expansion of the vault (Figure S3.b). These characteristics place it as intermediate to groups NJ1 and NJ2 along PC1. This individual shape differs from NJ1 individuals by possessing a more rounded and narrower frontal squamous part, which is associated with an elevated vault. This individual is distinguished from membership in the NJ3 group by laterally expanded parietal bones.

TABLE 3 Results of the permutation tests for pairwise comparisons of Procrustes distances between neighbor-joined isolated groups' means (see Figure 3) and Procrustes distances between neighbor-joined isolated groups' means when individuals group's memberships are randomly re-assigned.

Procrustes distances				
	Group NJ1	Group NJ2	Group NJ3	Control Group
Group NJ1	-			
Group NJ2	0.0657774	-		
Group NJ3	0.1055481	0.054357	-	
Control Group	0.0991496	0.0383989	0.0332584	-
<i>p</i>-values				
	Group NJ1	Group NJ2	Group NJ3	Control Group
Group NJ1	-			
Group NJ2	0.001	-		
Group NJ3	0.001	0.002	-	
Control Group	0.001	0.013	0.022	-

3.2 | Measuring asymmetry among groups

We quantified variation within the control group and each NJ group with the trace of each group's asymmetric and symmetric variance– covariance matrix. Results indicate that asymmetry accounts for 29.95% of the original shape variation in NJ1 and 24.92% in NJ2 (Table 4). The effect of the asymmetric component is considerably greater in these two groups compared to the NJ3 group (16.49%), which is much closer to that of the control group (15.25%). The low degree of asymmetry measured in the control group is reflected in its homogenous distribution centered on zero (Figure 4). The asymmetry of the individuals of the group NJ1 is characterized by a bimodal distribution, which is consistent with an antisymmetric relationship where extreme left- and right-sided forms coexist (Klingenberg, 2015). The group NJ2 is composed of individuals as highly asymmetric as the NJ1 individuals are, but it also includes individuals with lower levels of asymmetry. The pattern of distribution of asymmetry in the NJ3 specimens is homogenous and characterized by a right-sided preference, which may indicate a directional asymmetry for this group. Finally, the two isolated individuals, Mich31 sep 33 and Mich31 sep 37-10, both exhibit a left-sided preference with asymmetry values as high as those of the group NJ1, indicating a significant degree of asymmetry for them.

TABLE 4 Computation of Procrustes variance for each isolated neighbor-joined group (see Figure 3) asymmetric and symmetric configurations, and percentage of asymmetry accounting for the Procrustes variance.

	Asymmetric configurations	Symmetric configurations	Differences Asymmetric/Symmetric (%)
Group NJ1	0.00187	0.00131	29.95
Group NJ2	0.00104	0.00076	26.92
Group NJ3	0.00097	0.00081	16.49
Control Group	0.00118	0.001	15.25

3.3 | Comparing shape variation to cluster assignment

When considering the five morphological criteria in isolation, it is apparent that some of them can be used effectively to detect mild forms of ACM (Table 5). The degree of bone flattening is the most reliable characteristic, as its frequency of observation is much higher for the NJ1, NJ2 and NJ3 groups, rather than the control group. The degree of asymmetry and sagittal sulcus expression are also valuable, but only for skulls from the NJ1 and NJ2 groups, as the frequency of these traits is low in both the NJ3 and control groups. Finally, the bilateral postcoronal sulcus and the suprainsiac imprints are expressed mainly in individuals from the NJ1 group; their frequency of expression is low or moderate for the control, NJ2 and NJ3 groups. If one considers the five criteria in concert, we have used the kmeans clustering method to aggregate the individuals in four clusters ordinated from the lowest (Cluster 1) to the highest scores (Cluster 4). As shown in the bivariate plot of the first two principal components scores in shape space (Figure 5), the composite morphological traits scoring procedure is indeed informative for ACM diagnosis as it differentiates the eight individuals belonging to the NJ1 group from the rest of the individuals (Figure 5). However, Cluster 1, which consists of individuals expressing the lowest scores in the five traits scoring system, is actually comprised of individuals belonging to both the NJ2, NJ3 and control groups and fails to differentiate them.

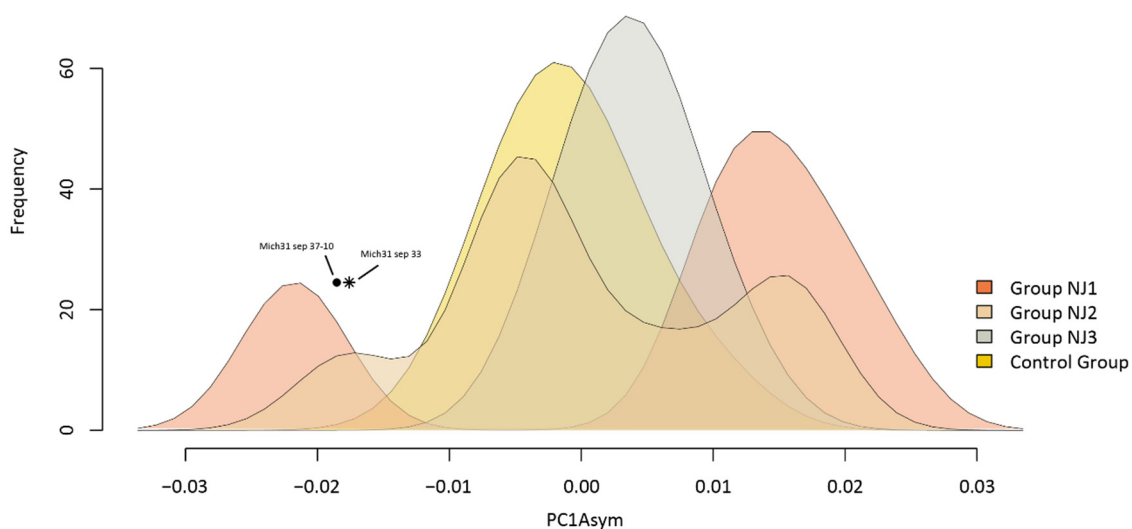


FIGURE 4 Distribution of the first principal component scores after PCA on the asymmetry component of shape variation matrix (i.e., PC1Asym). Negative values along PC1Asym account for left-sided asymmetry while the positive ones express right-sided asymmetry. The two individuals Mich31 sep 33 and Mich31 sep 37-10, isolated in the shape space principal components analysis, are also plotted.

TABLE 5 Expression percentages of morphoscopic traits by groups isolated via neighbor joining. (NJ) in Figure 3

	Morphoscopic criteria expressions (%)				
	Flattening degree	Sagittal sulcus	Bilateral postcoronal sulcus	Suprainiac imprints	Asymmetry
Group NJ1	100	93.75	93.75	81.25	100
Group NJ2	18.75	68.75	6.25	43.75	68.75
Group NJ3	25	6.25	0	18.75	6.25
Control Group	4.84	6.45	0	24.19	8.06

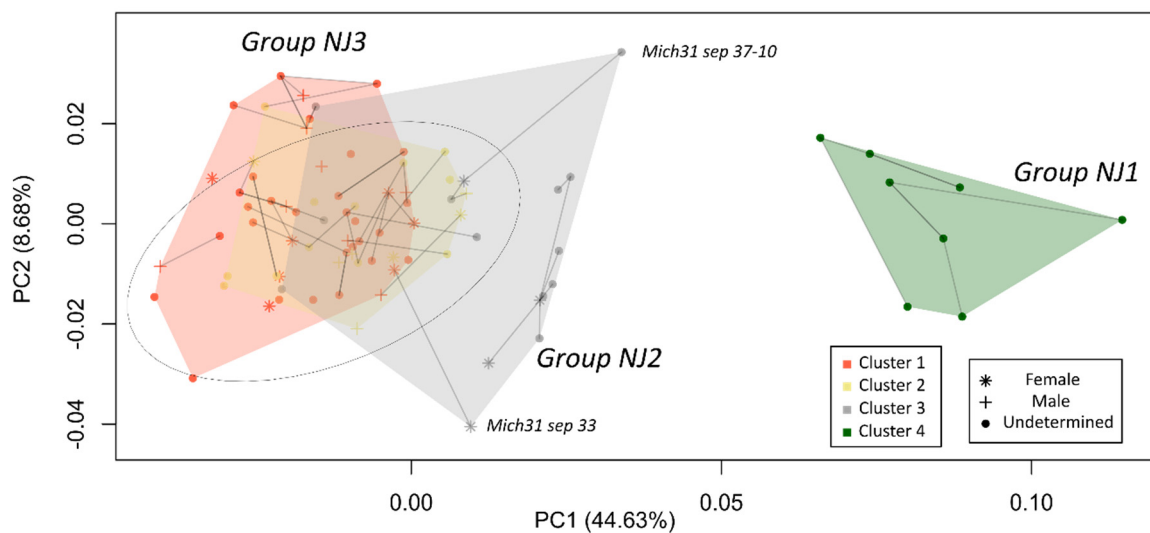


FIGURE 5 Shape space principal components analysis. For legend, see Figure 3. Colors and convex hulls represent cluster assignment resulting from the k-means clustering algorithm.

4 | DISCUSSION

Previous investigations (Michelet, Pereira, & Migeon, 2005; Pereira, 1999, 2005) among pre-Hispanic populations from the Zacapu basin have documented the diversity of ACM forms between the Classic and Postclassic periods (300–1500 AD). They have also stressed the difficulty involved in identifying some variants less severely affected by the modification process that appear along the Postclassic period. Ascertaining ACM for some individuals has been contentious due to the complexity of visually differentiating natural variation from the variation induced by mild forms of ACM, casting doubt on the existence of such techniques within the Postclassical Zacapu basin populations. Our results demonstrate that some individuals express shape characteristics ranging significantly outside the shape variation of the control group. Three groups have been identified: the NJ1 group characterized by marked

fronto-obelionic modifications and the NJ2 and NJ3 groups represented, respectively, by more mild forms of fronto-obelionic and tabular-erect ACM. Shape analyses via geometric morphometrics has thus proved to be an efficient tool to detect not only marked ACM forms, but also mild ACM forms that were not clearly diagnosed via visual examination. As mentioned earlier, several authors have reported five specific morphological criteria that are expressed with greater frequency in individuals exhibiting ACM (Antón & Weinstein, 1999; Tiesler, 2012b, 2014). We have shown the relative utility of using these traits for the identification of cranial vault shape modifications when considering all of them jointly. Indeed, marked forms of ACM (i.e., NJ1 group) have the highest scores for these nonmetric traits and can be reliably identified based on their expression. Some of these nonmetric traits, such as the degree of bone flattening, sagittal sulcus expression and the asymmetry, are informative independent of the others, suggesting a potential for ACM in some cases. However, the joint expression pattern of all five traits in the case of slightly modified crania barely differs from that of the control group, limiting the efficacy of these criteria for providing a clear cutoff between modified and unmodified individuals. Therefore, using quantitative methods, as we have done here with configurations of anatomical landmarks and semilandmarks, is preferable for accurately identifying mild forms of ACM.

4.1 | Interpreting ACM techniques and the cultural meanings underlying their production

The marked forms of ACM in the Zacapu basin during the Postclassic period (i.e., the NJ1 group) are characterized by an antero-posterior shortening and lateral broadening of the cranial vault. Such shape changes suggest the use of compressive elements that exert pressure on the obelionic and the squamous frontal and occipital areas. The NJ1 group can be associated with the bilobed and trilobed variants mentioned by Dembo and Imbelloni (1938). Those variants are interpreted as the result of the use of composite cephalic devices. According to Pereira (2018), such a device would likely be a system made of a wooden board applied anteriorly on the frontal squama held in place with a band running along the sagittal suture, which would cause the reported obelionic depressions. The antero-posterior shortening involves the arrangement of a posterior constraining element, which is far more complex to identify but could consist of a cushion or a series of bands (Pereira, 1999). In comparison to the control group, the NJ1 group demonstrates that part of its important shape variation is due to the individuals' high asymmetry degrees (Table 4). This suggests that the techniques used by the practitioners to modify the shape of the vault were performed with a certain degree of standardization. Both the large degree of asymmetry and its antisymmetric pattern are likely

the result of the intricate integrated mechanism between constraining elements location and the directions toward which growth forces can be resolved. Tiesler (1998, 2012b, 2014, p. 52) interpreted cases with severe asymmetry as a direct result of the ACM technique employed, stating such cases are more likely to occur when external posterior forces are dominant. Random phenomena occurring during the infant daily life, such as displacement of the headgear due to the infant's head movements, breastfeeding or sleep, may explain why individuals show either a right- or left-sided preference. NJ, asymmetry amplitude and the first two PC scores point to the identification of two groups with vault shape most likely attributable to mild forms of ACM: the NJ2 and NJ3 groups. The NJ2 group shape characteristics include a wide cranial vault associated with a flattening of both the frontal squama and the obelionic region. We have shown that this group is similar to the NJ1 group in this regard, although the expression is to a lesser degree in NJ2 group. This finding supports Tiesler's (2014) hypothesis that ACM types can manifest on a continuum, from minor to extreme forms. This suggests identical locations of constraints within both NJ1 and NJ2 groups, although the question of the consistency of techniques employed for the two groups remains unresolved. Variation in the age at which the ACM practice is initiated likely accounts for varying degrees of expression between marked and mild ACM forms (i.e., between the NJ1 and NJ2 groups). The time interval during which the cephalic gear has been applied is also likely to influence the modification intensity (Tiesler, 2014). Some authors (e.g., Blackwood & Danby, 1955; Graham et al., 2005; Hutchison, Hutchison, Thompson, & Mitchell, 2004; Lieberman, Pearson, & Mowbray, 2000; Tiesler, 2014) have suggested that cranial deformation induced by external forces that occur during the first year of life, when cranial growth reaches its fastest rate, have the greatest effects on cranial vault shape due to the skull's malleability. Thus, Rogers (2011) regards the deformation degree of a skull (in cases of positional plagiocephaly) as tightly correlated to the growth rate, suggesting that any external constraining forces applied later during ontogeny would be less prone to affect the cranium to such an extent. This suggests the more mild expression of ACM in the NJ2 group could be the result of a later exposure to the constraining elements of the ACM device. We can also assume that a short-term exposure to the cephalic device could have played a role in diminishing the modified aspect of a skull. After this short-term exposure, the neurocranium and brain forms, no longer mechanically constrained, would follow a physiological expansion. Physiological growth would then reduce substantially the formerly modified features of the neurocranium. In comparison with the other two NJ groups, the NJ3 group displays an elevated vault consistent with an ACM technique where constraining planes affect the skull anteriorly and posteriorly (e.g., Moss, 1958). Within this group, the upper vault

is left unconstrained, which results in its vertical expansion. According to Tiesler (2014), such a modification can be associated with cradleboarding techniques where slight flattening of both frontal and occipital regions may occur. The lack of any parietal broadening can be interpreted as resulting from the use of cradles involving lateral constrictions that restrict the head's lateral expansion (Tiesler, 2014, pp. 81–83). The combination of traditional tabular-erect features complemented with small cranial asymmetry degrees and a lack of parietal broadening for the individuals of the NJ3 group indicates they could be compared to the pseudocircular variant of the tabular-erect type described by Dembo and Imbelloni (1938, pp. 281–282) or Tiesler (2014, pp. 87–88). However, none of these individuals exhibits the horizontal bulge that authors (e.g., Romano, 1980; Tiesler, 2010) have reported when describing this variant. Low pressures exerted by the cephalic device could explain why this imprint does not express among the NJ3 group. The antero-posterior reduction combined with the absence of both lateral protrusion and horizontal bulging suggest such form could be identified as a mimetic variant within the tabular-erect category. The individuals of the NJ3 group express lower modification degrees than the Preclassic tabular-erect variants (Pereira, 2018). The differences between Preclassic variants and the group NJ3 are likely to result from the cradle device itself. The Preclassic period devices could have been presumably combined with cephalic gears specifically designed to exert higher mechanical tensions upon the infant head whereas the NJ3 group cradles would be less constraining and complemented with lateral constraints. The individuals Mich31 sep 33 and Mich31 sep 37-10 have the highest PC2 scores and their degree of asymmetry far exceeds the range of variation within a normal population (i.e., the control group). Their shape features are probably the consequences of usual cranial modification techniques or daily cranial massages (which were applied to the newborn's head in order to shape it in a certain way; Dingwall, 1931; Romano, 1974; Motte-Florac, 1997; Tiesler, 1998; Yon et al., 2017), but their specific characteristics remain to be explained. Further investigation with larger sample sizes will be necessary to determine whether they were poorly controlled attempts of slight modifications or outcomes of ACM techniques different from the ones employed to produce the NJ1, NJ2, and NJ3 groups. The cradleboard techniques, which we suggest account for one of the mild form variants, are sometimes considered “unintentional modifications” (which implies an undesirable and/or uncontrolled modification process; e.g., Neumann, 1942). The use of this term is questionable, except under certain pathological (e.g., craniosynostosis) or occupational conditions (e.g., use of tumplines; Gervais, 2001). Pre-Hispanic populations ascribed to the head and its manipulations various values that were intimately tied to their deeply rooted worldviews. Therefore, it is unlikely that any alterations of cranial form, whether major or

minor, could have resulted from random or non-intentional conditions. Ethnohistoric and ethnographic data provide valuable information that support this assertion, as well as interpretative frameworks that can help clarify the intentions underlying both the marked and mild forms of ACM. For example, in the Nahuas' belief system mental illness and cognitive impairment were associated with elongated skulls. Therefore, López Austin (2004, p. 212) and Tiesler (2014, p. 143) suggest that this tenet possibly explains ACM techniques consisting of broadening the head and reducing its length. Moreover, López Austin (2004, pp. 224–225) has reported the symbolic value ascribed to the fontanelles in Nahuas infants. They were considered as exit points for the infant spirit, which was mostly entrenched in the head and capable of leaving the body via the fibrous intervals. Tiesler (2014) has also stressed the specific value granted to the occiput in some Mesoamerican groups and mentioned the Nahuas' recommendations for protecting the spirit from deserting the body. The ethnohistoric data on Nahuas populations and the ethnographic investigations within the Purépechas communities (the living descendants of the Tarascan population) have reported several ways in which the spirit's loss was treated: by exerting daily pressures upon the posterior, anterior, and lateral parts of the skull or by sealing the fontanelle using plaster mixtures of various ingredients (Motte-Florac, 1997; Ponce, 2014; Ruiz de Alarcón, 1953). Duncan (2009) has stated that head binding and head modification among the Mayas were part of the same rite but should not be considered a similar phenomenon. He has proposed a distinction between the headgear awarding the infant a soul protection and the modified head feature itself, which allowed differentiation among individuals for religious, identity, social or occupational purposes. He has also assessed that this protection treatment did not necessarily involve any modification in skull shape. Practicing head molding to a lesser extent (as for the NJ2 and NJ3 groups) is likely the result of an intentional process. Nevertheless, this practice makes the modified feature barely noticeable during the individual's life, which questions the intention(s) underlying those mild forms production. Could the mild forms result from a specific ideology of childcare and protection as compared to marked forms that would ensue from the additional intention of modeling the skull in a certain way for the purposes of marking it for beauty, bravery, group belonging, or some other imbued cultural meaning (Duncan, 2018, p. 275)?

4.2 | Cultural continuity or discontinuity in Postclassic West Mexico?

Presence of mild forms of ACM was undocumented prior to the Postclassic period (900–1500 AD). If marked fronto-obelionic was the predominant variant along the Classic/Epiclassic period (300–900 AD), the NJ2 and NJ3 groups identified in this study represent technical

innovations. In the Zacapu region, only 14% of Postclassic period individuals exhibit the marked fronto-obelionic form (8 out of 55), whereas its frequency for the Classic period reached 72% (55 out of 76; Pereira, 2018). Considering both mild and marked forms, frequency of individuals expressing ACM patterns totals 43% of the entire Postclassic sample. More than half of the population exhibits no visible signs of ACM. Those results are in concurrence with the archaeological and ethno-historical data that point to a new population's settlement and a social reorganization in the region during the Postclassic (e.g., Pereira, Forest, Elsa, & Darras, in press). Indeed, this region experienced tremendous changes during this period, as the occupied sites surrounding north of the Rio Lerma were abandoned while populations in the lacustrine areas located south of the river expanded (Figure 1; Pereira et al., in press). In addition, new cultural elements observed among the archaeological artifacts as well as the modifications to the existing funerary behaviors have been interpreted by Pereira et al. (in press) to be the results of interactions between the autochthonous populations and a newly settled Chichimec group. This Chichimec migration and settling occurred during the 13th century, at the same time as the occupation of the two archaeological sites of El Palacio and Malpaís Prieto, both dating to 1200–1450 AD (Pereira, 2005; Pereira et al., in press). It is unclear whether the mild modified variants innovation consisted of newly derived versions of pre-existing west Mesoamerican techniques or genuine technical novelties brought by the settlers. The *Relación de Michoacán*, an ethnohistoric testimony of Tarascan populations (i.e., the claimed descendants of the Chichimecan group), gathered by Fray Jerónimo de Alcalá in 1540 depicts the local native Pátzcuaro basin populations or “valiant men” as persons exhibiting flattened skulls (Alcalá, 2008). Thus, unmodified cranial shapes would suggest an exogenous origin. Such hypotheses will need to be addressed in further investigations involving paleogenetic and/or isotopic analyses. Our results also shed light on the continuance of practice of ACM techniques among Middle Postclassic populations of the Zacapu basin. We have shown that the techniques that produced more marked forms of ACM were still practiced during that period and that techniques leading to mild ACM forms existed as well. An extensive understanding about how these forms were technically produced is needed. Likewise, the question of the intentions to produce them still needs to be addressed and would require a much larger sample to discuss how standardized those forms were.

5 | CONCLUSION

This study provides additional evidence of the changing cultural landscape of the Zacapu basin region during the Postclassic period. Although cultural novelties have been reported and

attributed to a newly settled Chichimecan group during the Postclassic (Pereira et al., in press), the break with previous periods is not complete. Our results demonstrate evidence for both cultural discontinuity (e.g., the presence of numerous individuals with unmodified neurocranial shapes) and continuity with the preceding periods (e.g., the marked forms of ACM that were widely produced during the previous periods have persisted). Such a cultural framework could result from the regional context where the remodeling of the socio-political landscape occurred via interactions among, alliances with and integration of the autochthonous populations within the newly developed urban settlements, as proposed by Pereira et al. (in press). Finally, the identification and quantification of mild forms of ACM via geometric morphometrics in the present work stresses that ACM techniques were not always meant to produce clear and marked forms of modification. Our results highlight the wide range of expression of this cultural practice, demonstrating that ACM occurred along a spectrum and not just in easily identifiable and discrete forms. These more subtle forms of modification were also valued among pre-Hispanic West Mexican populations. Similar investigations of cranial modification using geometric morphometrics could be conducted in other populations globally to determine whether mild forms of ACM were practiced outside of the extended Mesoamerican sphere. In conclusion, we think that pre-Hispanic skulls should be examined closely in order to avoid mistaking slightly modified shapes for unmodified ones or vice versa. Such misidentifications would bias biodistance studies that use cranial shape as a proxy for establishing phenotypic proximity among human groups.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to acknowledge Francesco d'Errico, Yann Heuzé, Paul O'Higgins, and Viviana Toro-Ibacache for providing fruitful advice and comments on this study. We acknowledge Ian Tattersall and Gisselle Garcia from the American Museum of Natural History for providing access to the Museum's collections. We are thankful to Stephan Naji and the New York University Department of Anthropology for the loan of the NextEngine laser scanner. We are also grateful to Patrice Courtaud for allowing us to study the La Granède medieval collection at L'Ostéothèque de Pessac. We thank Jessica L. Joganic for her valuable editorial revision of English language as well as for her comments. We are thankful to the associate editor and two anonymous reviewers for their constructive comments, which helped to improve greatly the early version of this article. Finally, we acknowledge the LascArBx: Cluster of Excellence in Archaeological Sciences of Bordeaux (ANR-10-LABX-52) for awarding S.N. a PhD grant and the ANR MESOMOBILE (ANR-14-CE31-0016).

REFERENCES

- Acosta, R. (2003). *L'ensemble funéraire du site de Caseta, Jalisco, Mexique*. Oxford, England: Archaeopress (B.A.R. International Series, 1197 ; Monographs in American Archaeology, 13).
- Alcalá, J. (2008). *Relación de Michoacán*. Zamora, Michoacán, México: El Colegio de Michoacán.
- AlQahtani, S. J., Hector, M. P., & Liversidge, H. M. (2010). Brief communication: the London atlas of human tooth development and eruption. *American Journal of Physical Anthropology*, 142(3), 481-490.
- Anderson, J. E. (1965). Human skeletons of Tehuacan. *Science*, 148(3669), 496-497.
- Anderson, T. W. (1963). Asymptotic theory for principal component analysis. *Annals of Mathematical Statistics*, 34(1), 122-148.
- Antón, S. C. (1989). Intentional cranial vault deformation and induced changes of the cranial base and face. *American Journal of Physical Anthropology*, 79(2), 253-267.
- Antón, S. C., & Weinstein, K. J. (1999). Artificial cranial deformation and fossil Australians revisited. *Journal of Human Evolution*, 36(2), 195-209.
- Bastir, M., Rosas, A., & O'Higgins, P. (2006). Craniofacial levels and the morphological maturation of the human skull. *Journal of Anatomy*, 209(5), 637-654.
- Bautista, J., & Ortega, A. (2005). *Catálogo de los cráneos aislados de la Colección Solórzano* (Vol. 483). Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Blackwood, B., & Danby, P. M. (1955). A study of artificial cranial deformation in New Britain. *The Journal of the Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland*, 85(1/2), 173-191.
- Blom, D. E. (2005). Embodying borders: human body modification and diversity in Tiwanaku society. *Journal of Anthropological Archaeology*, 24(1), 1-24.
- Bookstein, F. L. (1991). *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Bookstein, F. L. (1996). Biometrics, biomathematics and the morphometric synthesis. *Bulletin of Mathematical Biology*, 58(2), 313.
- Bookstein, F. L. (1997). Landmark methods for forms without landmarks: morphometrics of group differences in outline shape. *Medical Image Analysis*, 1(3), 225-243.
- Brothwell, D. R. (1963). *Digging up bones. The excavation, treatment and study of human skeletal remains*. London, England: British Museum.
- Brothwell, D. R. (1975). Possible evidence of a cultural practice affecting head growth in some late Pleistocene East Asian and Australasian populations. *Journal of Archaeological Science*, 2(1), 75-77.
- Brůžek, J. (2002). A method for visual determination of sex, using the human hip bone. *American Journal of Physical Anthropology*, 117(2), 157-168.
- Brůžek, J., Santos, F., Dutailly, B., Murail, P., & Cunha, E. (2017). Validation and reliability of the sex estimation of the human os coxae using freely available DSP2 software for bioarchaeology and forensic anthropology. *American Journal of Physical Anthropology*, 164(2), 440-449.
- Buikstra, J. E., & Ubelaker, D. H. (1994). *Standards for data collection from human skeletal remains* (Vol. 44). Fayetteville, United States of America.
- Cheverud, J. M., Kohn, L. A., Konigsberg, L. W., & Leigh, S. R. (1992). Effects of fronto-occipital artificial cranial vault modification on the cranial base and face. *American Journal of Physical Anthropology*, 88(3), 323-345.
- Clark, J. L., Dobson, S. D., Antón, S. C., Hawks, J., Hunley, K. L., & Wolpoff, M. H. (2007). Identifying artificially deformed crania. *International Journal of Osteoarchaeology*, 17(6), 596-607.
- Comas, J., & Marquer, P. (1969). Crânes déformés de l'île de Sacrificios (État de Veracruz, Mexique). *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 4(3), 209-257.
- Coquerelle, M., Bookstein, F. L., Braga, J., Halazonetis, D. J., Weber, G. W., & Mitteroecker, P. (2011). Sexual dimorphism of the human mandible and its association with dental development. *American Journal of Physical Anthropology*, 145(2), 192-202.
- Dembo, A., & Imbelloni, J. (1938). *Deformaciones intencionales del cuerpo humano de carácter étnico*. Buenos Aires, Argentina: José Anesi.

- Demirjian, A., Goldstein, H., & Tanner, J. M. (1973). A new system of dental age assessment. *Human Biology*, 211-227.
- Dingwall, E. J. (1931). *Artificial cranial deformation. A contribution to the study of ethnic mutilations*. London, England: Bale.
- Dryden, I. L., & Mardia, K. V. (1998). *Statistical shape analysis*. New York, United States of America: Wiley
- Duncan, W. N. (2009). Cranial modification among the Maya: Absence of evidence or evidence of absence. In K. Knudson & C. M. Stojanowski (Eds.), *Bioarchaeology and identity in the Americas* (pp. 177-193): University Press of Florida.
- Duncan, W. N. (2018). Sellamiento ritual, envoltura y vendaje en la modificación cefálica Mesoamericana. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica. Una perspectiva continental* (Vol. 1, pp. 261-282). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Falkenburger, F. (1938). Recherches anthropologiques sur la déformation artificielle du crâne. *Journal de la Société des Américanistes*, 1-70.
- Fletcher, A., Pearson, J., & Ambers, J. (2008). The Manipulation of Social and Physical Identity in the Pre-Pottery Neolithic: Radiographic Evidence for Cranial Modification at Jericho and its Implications for the Plastering of Skulls. *Cambridge Archaeological Journal*, 18(3), 309-325.
- Friess, M., & Baylac, M. (2003). Exploring artificial cranial deformation using elliptic Fourier analysis of Procrustes aligned outlines. *American Journal of Physical Anthropology*, 122(1), 11-22.
- Geller, P. L. (2011). Getting a head start in life: Pre-Columbian Maya cranial modification from infancy to ancestorhood. In M. Bonogofsky (Ed.), *The Bioarchaeology of the Human Head: Decapitation, Deformation, and Decoration* (pp. 241-261). Gainesville, United States of America: University Press of Florida.
- Gervais, V. (1989). *Déformations artificielles de crânes préhispaniques au Guatemala et au Mexique*. (Ph.D. Dissertation), Université de Caen.
- Gervais, V. (2001). El uso del mecapal en Guatemala y sus consecuencias sobre la columna cervical (primeras observaciones). *Estudios de Antropología Biológica*, 10(2).
- Gill, G. W. (1985). Cultural implications of artificially modified human remains from Northwestern Mexico. In M. S. Foster & P. C. Weigand (Eds.), *The archaeology of West and Northwest Mesoamerica* (pp. 193-215). Boulder, United States of America: Westview Press.
- Goldstein, M. S. (1940). Cranial deformation among Texas Indians. *American Journal of Physical Anthropology*, 27, 312-313.
- Gómez-Valdés, J. A., Bautista Martínez, J., & Romano Pacheco, A. (2007). Morfometría geométrica aplicada al estudio de la deformación cefálica intencional. *Estudios de Antropología Biológica*, 13(1), 117-134.
- Graham, J. M., Kreutzman, J., Earl, D., Halberg, A., Samayoa, C., & Guo, X. (2005). Deformational brachycephaly in supine-sleeping infants. *The Journal of Pediatrics*, 146(2), 253-257.
- Gunz, P. (2005). *Statistical and geometric reconstruction of hominid crania: reconstructing australopithecine ontogeny*. (Ph.D. Dissertation), Universität Wien.
- Gunz, P., Bookstein, F. L., Mitteroecker, P., Stadlmayr, A., Seidler, H., & Weber, G. W. (2009a). Early modern human diversity suggests subdivided population structure and a complex out-of-Africa scenario. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(15), 6094-6098.
- Gunz, P., & Mitteroecker, P. (2013). Semilandmarks: a method for quantifying curves and surfaces. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, 24(1), 103-109.
- Gunz, P., Mitteroecker, P., & Bookstein, F. L. (2005). Semilandmarks in three dimensions. In D. E. Slice (Ed.), *Modern morphometrics in physical anthropology* (pp. 73-98). New York, United States of America: Kluwer Academic / Plenum Publishers.
- Gunz, P., Mitteroecker, P., Neubauer, S., Weber, G. W., & Bookstein, F. L. (2009b). Principles for the virtual reconstruction of hominin crania. *Journal of Human Evolution*, 57(1), 48-62.
- Hakenbeck, S. (2009). 'Hunnic' modified skulls: physical appearance, identity and the transformative nature of migrations. In D. W. Sayer, Howard (Ed.), *Mortuary Practices and Social Identities in the Middle Ages* (pp. 64-80). Exeter, England: Exeter University Press.

- Hartigan, J. A., & Wong, M. A. (1979). Algorithm AS 136: A k-means clustering algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 28(1), 100-108.
- Holliday, D. Y. (1993). Occipital lesions: a possible cost of cradleboards. *American Journal of Physical Anthropology*, 90(3), 283-290.
- Houston, S. D. (2006). *The memory of bones body, being, and experience among the classic Maya*. Austin, United States of America: University of Texas Press.
- Hulse, F. H. (1945). Appendix III: Skeletal Material. In K. Isabel (Ed.), *Excavations at Culiacán, Sinaloa* (pp. 187-198). Los Angeles, United States of America: University of California Press.
- Hutchison, B. L., Hutchison, L. A., Thompson, J. M., & Mitchell, E. A. (2004). Plagiocephaly and brachycephaly in the first two years of life: a prospective cohort study. *Pediatrics*, 114(4), 970-980.
- Khudaverdyan, A. (2011). Trepanation and artificial cranial deformations in ancient Armenia. *Anthropological Review*, 74(1), 39-55.
- Klingenberg, C. P. (2015). Analyzing fluctuating asymmetry with geometric morphometrics: concepts, methods, and applications. *Symmetry*, 7(2), 843-934.
- Klingenberg, C. P., Barluenga, M., & Meyer, A. (2002). Shape Analysis of Symmetric Structures: Quantifying Variation among Individuals and Asymmetry. *Evolution*, 56(10), 1909-1920.
- Klingenberg, C. P., & McIntyre, G. S. (1998). Geometric morphometrics of developmental instability: analyzing patterns of fluctuating asymmetry with Procrustes methods. *Evolution*, 52(5), 1363-1375.
- Kohn, L. A. P., Leigh, S. R., & Cheverud, J. M. (1995). Asymmetric vault modification in Hopi crania. *American Journal of Physical Anthropology*, 98(2), 173-195.
- Kuzminsky, S. C., Tung, T. A., Hubbe, M., & Villaseñor-Marchal, A. (2016). The application of 3D geometric morphometrics and laser surface scanning to investigate the standardization of cranial vault modification in the Andes. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10, 507-513.
- Lagunas Rodríguez, Z. (1987). Análisis de los restos óseos humanos procedentes de la tumba Num. 1 de Tinganio, Tingambato, Michoacán. *Avances en antropología física*, 3, 7-72.
- Lagunas Rodríguez, Z. (1989). Los antiguos habitantes de Cholula: Prácticas osteoculturales. *Notas Mesoamericanas*, 11, 28-50.
- Lieberman, D. E., Pearson, O. M., & Mowbray, K. M. (2000). Basicranial influence on overall cranial shape. *Journal of Human Evolution*, 38(2), 291-315.
- López Austin, A. (2004). *Cuerpo humano e ideología: las concepciones de los antiguos Nahuas*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Lozada, M. C. (2011). Marking ethnicity through premortem cranial modification among the Pre-Inca Chiribaya, Perú. In M. Bonogofsky (Ed.), *The Bioarchaeology of the Human Head: Decapitation, Deformation, and Decoration* (pp. 228-240). Gainesville, United States of America: University Press of Florida.
- Lumholtz, C. (1902). *Unknown Mexico: A record of five years' exploration among the tribes of the western Sierra Madre; in the tierra caliente of Tepic and Jalisco; and among the Tarascos of Michoacan* (Vol. 2). New York, United States of America: Charles Scribner's sons.
- Lumholtz, C., & Hrdlička, A. (1898). Marked human bones from a prehistoric Tarasco Indian burial place in the State of Michoacan, Mexico. *Bulletin American Museum of Natural History*, 5, 61-79.
- Magitot, E. (1885). Essai sur les mutilations ethniques. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 21-25.
- Manríquez, G., González-Bergás, F. E., Salinas, J. C., & Espouey, O. (2006). Deformación intencional del cráneo en poblaciones arqueológicas de Arica, Chile: análisis preliminar de morfometría geométrica con uso de radiografías craneofaciales. *Chungará*, 38(1), 13-34.
- Mayall, P., & Pilbrow, V. (2018). Generalized Procrustes analysis of an ontogenetic series of modified crania: Evaluating the technique of modification in the Migration Period of Europe (4th–7th century AD). *American Journal of Physical Anthropology*, 166(1), 156-169.
- Mayall, P., Pilbrow, V., & Bitadze, L. (2017). Migrating Huns and modified heads: Eigenshape analysis comparing intentionally modified crania from Hungary and Georgia in the Migration Period of Europe. *PLoS One*, 12(2).

- Meighan, C. W., & Foote, L. J. (1968). *Excavations at Tizapan el Alto, Jalisco*. Los Angeles, United States of America: University of California, Latin American Center.
- Michelet, D., Pereira, G., & Migeon, G. (2005). La llegada de los uacúsechas a la región de Zacapu, Michoacán: datos arqueológicos y discusión. In L. Manzanilla (Ed.), *Reacomodos demográficos del Clásico al Posclásico en el centro de México* (pp. 137-154). Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Mitteroecker, P., & Gunz, P. (2009). Advances in geometric morphometrics. *Evolutionary Biology*, 36(2), 235-247.
- Moorrees, C. F. A., Fanning, E. A., & Hunt Jr, E. E. (1963). Age variation of formation stages for ten permanent teeth. *Journal of Dental Research*, 42(6), 1490-1502.
- Moss, M. L. (1958). The pathogenesis of artificial cranial deformation. *American Journal of Physical Anthropology*, 16(3), 269-286.
- Motte-Florac, E. (1997). La fontanelle chez les P'urhépecha et dans le centre du Mexique; du microcosme au macrocosme, de l'homme à dieu». In I. Bianquis, D. Le Breton & C. Méchin (Eds.), *Usages culturels du corps* (pp. 187-218). Clamecy, France: L'Harmattan.
- Murail, P., Brůžek, J., Houët, F., & Cunha, E. (2005). DSP: a tool for probabilistic sex diagnosis using worldwide variability in hip-bone measurements. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 17(3-4), 167-176.
- Neumann, G. K. (1942). Types of artificial cranial deformation in the eastern United States. *American Antiquity*, 7(3), 306-310.
- O'Brien, T. G., & Stanley, A. M. (2013). Boards and cords: discriminating types of artificial cranial deformation in prehispanic South Central Andean populations. *International Journal of Osteoarchaeology*, 23(4), 459-470.
- Okumura, M. (2014). Differences in types of artificial cranial deformation are related to differences in frequencies of cranial and oral health markers in pre-Columbian skulls from Peru. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, 9(1), 15-26.
- Oliveros, A. (2004). *Hacedores de tumbas en el Opeño, Jacona, Michoacán*. Zamora, México: Colegio de Michoacán
- Ozbek, M. (2001). Cranial deformation in a subadult sample from Degirmentepe (Chalcolithic, Turkey). *American Journal of Physical Anthropology*, 115(3), 238-244.
- Pereira, G. (1999). *Potrero de Guadalupe : anthropologie funéraire d'une communauté pré-tarasque du nord du Michoacan, Mexique*. Oxford, England: Archaeopress (B.A.R. International Series, 816 ; Monographs in American Archaeology, 5).
- Pereira, G. (2005). The utilization of grooved human bones: A reanalysis of artificially modified human bones excavated by Carl Lumholtz at Zacapu, Michoacán, Mexico. *Latin American Antiquity*, 16(3), 293-312.
- Pereira, G. (2018). Dinámicas poblacionales y modificación cefálica artificial en el Michoacán prehispánico. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica* (Vol. 2, pp. 649-680). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Pereira, G., Forest, M., Elsa, J., & Darras, V. (in press). Ephemeral cities? The longevity of the Postclassic Tarascan urban sites of Zacapu Malpaís and its consequences on the migration process. In M.-C. Arnauld, C. Beekman & G. Pereira (Eds.), *Ancient Mesoamerican cities: populations on the move*. Boulder, United States of America: University Press of Colorado.
- Perez, S. I. (2007). Artificial cranial deformation in South America: a geometric morphometrics approximation. *Journal of Archaeological Science*, 34(10), 1649-1658.
- Perez, S. I., Della Negra, C., Novellino, P., González, P., Bernal, V., Cuneo, E., & Hajduk, A. (2009). Deformaciones artificiales del cráneo en cazadores-recolectores del Holoceno medio-tardío del noroeste de Patagonia. *Magallania*, 37(2), 77-90.
- Pomeroy, E., Stock, J. T., Zakrzewski, S. R., & Lahr, M. M. (2010). A metric study of three types of artificial cranial modification from north-central Peru. *International Journal of Osteoarchaeology*, 20(3), 317-334.
- Ponce, P. (2014). *Breve relación de los dioses y ritos de la gentilidad*: Linkgua
- Rogers, G. F. (2011). Deformational plagiocephaly, brachycephaly, and scaphocephaly. Part I: terminology, diagnosis, and etiopathogenesis. *Journal of Craniofacial Surgery*, 22(1), 9-16.

- Rohlf, F. J., & Slice, D. E. (1990). Extensions of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks. *Systematic Biology*, 39(1), 40-59.
- Romano, A. (1965). *Estudio morfológico de la deformación craneana en Tamuín, S.L.P., y en la Isla del Idolo, Veracruz*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Romano, A. (1974). Deformación cefálica intencional. In J. Comas (Ed.), *Antropología física, época prehispánica* (pp. 197-227). Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Romano, A. (1980). Appendix 3. The Skull from El Pajón, Chiapas. In M. Paillés (Ed.), *Pampa El Pajón, an early estuarine site, Chiapas, Mexico* (pp. 95-114): New World Archaeological Foundation, Brigham Young University.
- Ruiz de Alarcón, H. (1953). Tratado de las supersticiones de los naturales de esta Nueva España. In F. Paso y Troncoso (Ed.), *Tratado de las idolatrías, supersticiones, dioses, ritos, hechicerías y otras costumbres gentílicas de las razas aborígenes de México* (pp. 17-180). México: Fuente Cultural.
- Saint-Pierre, C. (2010). Millau, La Granède (Aveyron) : une église paléochrétienne anonyme sur un éperon barré. *Archéologie du Midi Médiéval*, 181-191.
- Scheuer, L., & Black, S. (2000). *Developmental Juvenile Osteology*. London, England: Academic Press.
- Schlager, S. (2017). Morpho and Rvcg – Shape Analysis in R: R-Packages for Geometric Morphometrics, Shape Analysis and Surface Manipulations. In Zheng Guoyan, Li Shuo & S. Gabor (Eds.), *Statistical shape and deformation analysis* (pp. 217-256): Academic Press.
- Schmitt, A. (2005). Une nouvelle méthode pour estimer l'âge au décès des adultes à partir de la surface sacro-pelvienne iliaque. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 17(1-2), 89-101.
- Sharapova, S., & Razhev, D. (2011). Skull Deformation during the Iron Age in the Trans-Urals and Western Siberia. In M. Bonogofsky (Ed.), *The Bioarchaeology of the Human Head: Decapitation, Deformation, and Decoration* (pp. 203-227). Gainesville, United States of America: University press of Florida.
- Stewart, T. D. (1948). The true form of the cranial deformity originally described under the name "tête trilobée". *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 38(2), 66-72.
- Stewart, T. D. (1976). Are supra-inion depressions evidence of prophylactic trephination? *Bulletin of the History of Medicine*, 50(3), 414-434.
- Tiesler, V. (1998). *La costumbre de la deformación cefálica entre los antiguos mayas: aspectos morfológicos y culturales*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Tiesler, V. (1999). *Rasgos bioculturales entre los antiguos mayas: aspectos arqueológicos y sociales*. (Ph.D. Dissertation), Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Tiesler, V. (2010). "Olmec" head shapes among the Preclassic period Maya and cultural meanings. *Latin American Antiquity*, 21(3), 290-311.
- Tiesler, V. (2012a). Studying cranial vault modifications in ancient Mesoamerica. *Journal of Anthropological Sciences*, 90, 1-26.
- Tiesler, V. (2012b). *Transformarse en maya: el modelado cefálico entre los mayas prehispánicos y coloniales*. Mérida, Yucatán, México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Tiesler, V. (2014). *The bioarchaeology of artificial cranial modifications new approaches to head shaping and its meanings in pre-Columbian Mesoamerica and beyond*. New York, United States of America: Springer.
- Tiesler, V., & Cucina, A. (2010). La deformación craneana como emblema de identidad, etnicidad y reproducción cultural entre los mayas del Clásico. In H. Hernández & M. Pool (Eds.), *Identidades y cultura material en la región maya* (pp. 111-134). Mérida, México.
- Tiesler, V., & Zabala, P. (2011). El modelado artificial de la cabeza durante la Colonia: Una tradición maya en el espejo de las fuentes históricas. *Estudios de Cultura Maya*, 38, 75-96.
- Torres-Rouff, C. (2002). Cranial Vault Modification and Ethnicity in Middle Horizon San Pedro de Atacama, Chile. *Current Anthropology*, 43(1), 163-171.
- Ubelaker, D. H. (1978). *Human skeletal remains: excavation, analysis, interpretation*. Chicago, United States of America: Aldine Pub. Co.

- Uruñuela y Ladron de Guevara, G. (1994). *Análisis de los restos óseos de los entierros del fraccionamiento San Juan, Atoyac, Jalisco. Informe técnico. Volumen II. Rasgos epigenéticos, análisis dental y prácticas osteoculturales*. Universidad de las Américas-Puebla, México.
- Weiss, P. (1981). La trepanación ritual suprainiana. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Historia y Filosofía de la Medicina*, 36, 193-211.
- Yon, R., Gómez, A., Morales, A. L., Argueta, A., Quiñónez, S., Secaira, C., Garzaro, P., & Suzuki, S. (2017). Modelar la cabeza: una tradición mesoamericana milenaria desde el Preclásico hasta la actualidad. *Estudios de cultura maya*, 50, 157-181.
- Zelditch, M. L., Swiderski, D. L., & Sheets, H. D. (2012). *Geometric morphometrics for biologists: a primer* (2nd ed.): Academic Press.

5.2 **Evaluating the efficiency of isolated calvaria bones shape changes in the identification and differentiation of artificial cranial modification techniques among pre-Hispanic west Mesoamerican populations**

Sélim Natahi, Michael Coquerelle, Grégory Pereira & Priscilla Bayle

Etat : soumis à la revue *Journal of Archaeological Science : Reports*

Ce deuxième article a cherché à quantifier les différences de conformations entre chaque os de la calvaria afin d'en estimer leur potentiel informatif dans l'identification et la caractérisation des modifications artificielles du crâne exprimées dans le Centre-Ouest mésoaméricain au cours des périodes préclassiques (600 av. J.-C. - 300 apr. J.-C), classiques/épiclassiques (300 - 900 apr. J.-C.) et de la période postclassique (900 - 1500 apr. J.-C.). Nous avons ainsi mesuré la variation entre et au sein de groupes composés des différents types de modifications ainsi que d'un groupe servant de groupe de contrôle. Par ailleurs, nous nous sommes aussi intéressés aux informations que chaque os de la calvaria pouvait apporter quant à la compréhension du mode de modification utilisé ainsi qu'à la standardisation de la technique.

Les *Supplementary Information* sont présentées dans l'Annexe 3

Title: Evaluating the efficiency of isolated calvaria bones shape changes in the identification and differentiation of artificial cranial modification techniques among pre-Hispanic west Mesoamerican populations

Authors: Sélim Natahi¹, Michael Coquerelle², Grégory Pereira³ and Priscilla Bayle¹

Author affiliation(s):

¹ Université de Bordeaux, CNRS, MCC, UMR 5199 PACEA, Bâtiment B8, Allée Geoffroy St Hilaire, CS 50023, 33615 Pessac Cedex, France.

² Department of Medicine and Surgery (Stomatology Area), Universidad Rey Juan Carlos, 28922 Alcorcón, Spain

³ UMR 8096, Archéologie des Amériques, CNRS, Maison René-Ginouvès, 21, Allée de l'Université, 92023 Nanterre, France

Correspondence

Sélim Natahi, Université de Bordeaux, CNRS, MCC, UMR 5199 PACEA, Bâtiment B8, Allée Geoffroy St Hilaire, CS 50023, 33615 Pessac Cedex, France.

Email: selim.natahi@gmail.com

Abstract

Introduction

Artificial cranial modification (ACM) is a widespread cultural phenomenon that has been reported in human populations from Late Pleistocene to present time all over the world. Although ACM techniques have been reported in West Mesoamerica, the state of preservation of bone has occasionally limited the possibility of diagnosing and differentiating ACM variants. To explore how informative fragmentary skull remains can be in this matter, here we used 3D geometric morphometrics to quantify shape variation of isolated calvaria bones.

Materials and Methods

36 well preserved individuals from West Mesoamerica were selected and divided into five groups: four showing distinct forms of ACM, and a control group of unmodified skulls. Using medical computed tomography, we measured the 3D shape changes in three isolated calvaria bones. We calculated the morphological differences within and between groups by computing pairwise Procrustes distances for all possible combinations of individuals. Finally, we used 3D digital meshes to describe the shape changes in an ACM variant compared to the other ones and to the control group.

Results

Whichever part of the calvaria is considered, the variation between the individuals showing ACM and the unmodified individuals always exceeds the variation measured within the unmodified group. Furthermore, some ACM variants can be characterized by examining isolated calvaria bones in isolation.

Discussion

The study of isolated calvaria bones can help to identify individuals with ACM from the background physiological variation. Our study also provided information relative to the techniques employed to produce certain ACM variants and discuss their standardization.

KEYWORDS Artificial cranial modification, isolated calvaria bones, 3D geometric morphometrics, Mesoamerican Archaeology

1. INTRODUCTION

Artificial Cranial Modification (ACM) is a pervasive cultural phenomenon, practiced in the Oceania and the Old and New worlds (Dingwall, 1931) with the earliest reported evidences of expression dating back to Late Pleistocene in Australia (Brothwell, 1975; Brown, 1981; Antón & Weinstein, 1999; Durband, 2008; Brown, 2010; Durband, 2014) and North-East China (Wu, 1961; Brothwell, 1975; Ni et al., 2019; Zhang et al., 2019). The ACMs were performed via the implementation of a cranial device upon a child's skull from an early age so that cranial growth was prevented in certain directions (Moss, 1958; Antón & Weinstein, 1999; Tiesler, 2014). This results in a specific modification of the skull's shape that depends on the nature of the cranial device employed, its location upon the infant's skull, as well as the magnitude of pressure applied. The initiation time and the duration of the procedure are two other factors that likely account for the variation observed among shapes (e.g., Ambialet, 1893; Ewing, 1950; Blackwood & Danby, 1955; Lieberman et al., 2000; Hutchison et al., 2004; Graham et al., 2005; Rogers, 2011; Tiesler, 2014). The cranial devices employed in ACM are varied and can consist in rigid tablets (e.g., Dembo & Imbelloni, 1938; Romano, 1965; Tiesler, 2014), systems made of bands or chords (e.g., Dembo & Imbelloni, 1938; O'Brien & Stanley, 2013), headdresses or caps (e.g., Ambialet, 1893; Hatt, 1915), or cradle systems integrating constraining elements (e.g., Romano, 1974; Piper, 2002; Tiesler, 2014). The modification of the cranial shape could also have been reached via the performance of daily head massages so the skull is molded to fit

a particular shape (Hatt, 1915; Dingwall, 1931; Romano, 1974; Motte-Florac, 1997; Tiesler, 1998; Yon et al., 2017).

Modified heads have been entrenched with various cultural meanings among which the statement of a social status (e.g., Marcus & Flannery, 2004; Ricci et al., 2008; Geller, 2011; Khudaverdyan, 2011; Sharapova & Razhev, 2011; Okumura, 2014) or an ethnic identity (e.g., Özbek, 2001; Torres-Rouff, 2002; Blom, 2005; Ricci et al., 2008; Hakenbeck, 2009; Lozada, 2011; Tiesler, 2014; Mayall et al., 2017; Veeramah et al., 2018; Fernandes et al., 2019; Mayall & Pilbrow, 2019), religious beliefs (e.g., Houston, 2006; Fletcher et al., 2008; Tiesler & Cucina, 2010; García & Tiesler, 2011), protective functions (e.g., Icart, 1784; Delisle, 1880; Ambialet, 1893, p. 19; Hatt, 1915; Motte-Florac, 1997; Duncan & Hofling, 2011) or esthetic considerations (e.g., Hatt, 1915; Dingwall, 1931; Lorentz, 2003).

The child's head in general, and the way it's different anatomical regions grow and develop, was associated to considerations embedded in Mesoamerican populations' world views (Ruiz de Alarcón, 1953; Motte-Florac, 1997; López Austin, 2004, pp. 224-225; Ponce, 2014; Tiesler, 2014, p. 143). For this reason, some authors have proposed that the action of modifying the shape of a skull should be considered as a complex cultural process that originates from different yet complementary intentions. They distinguish the intentions that relate to childcare (López Austin, 2004, p. 212; Tiesler, 2014, p. 143) from the intentions of shaping the child's head in a certain way to proclaim an ethnic identity, a hierarchical status or any other cultural statements (Duncan, 2009, 2018). Therefore, assessing and characterizing reliably the various ACMs forms of expression is an important concern because they may inform us of the structure and relations within and between populations (e.g., Tiesler, 2014; Alvarado Viñas & Manzanilla, 2018; Pereira, 2018) in pre-Hispanic Mesoamerica.

The identification and classification of marked forms of ACM among pre-Hispanic populations is generally addressed using the typological system developed by Dembo and Imbelloni (1938). The system is specifically designed so that ACM variants among pre-Hispanic populations could be differentiated. The method consists of examining several morphological features among which the most significant are bones flattening and broadening. The authors have defined three major categories of cranial modifications, each corresponding to the cephalic devices used in this technical process. The annular forms with symmetric circular constrictions are associated to devices composed of bandages, chords or headdresses. The individuals with tabular erect types display two obliquely parallel constriction planes, which are usually thought

to result from the infant cradleboarding practice. Finally, the tabular-oblique forms of the Dembo and Imbelloni (1938) typology refer to individuals exhibiting non-parallel constrictions planes that affect the anterior and posterior parts of the vault. The use of cephalic device made of rigid tablets is reported in such cases. Each one of these forms subdivided into different variants indicating different ACM techniques reported in the New World.

Besides the studies using visual examination, others employ morphometrics such as linear measurements and angles in order to identify and differentiate ACMs (e.g., Dembo & Imbelloni, 1938; Falkenburger, 1938; Romano, 1965; Comas & Marquer, 1969; Romano, 1974; Clark et al., 2007; Pomeroy et al., 2010; O'Brien & Stanley, 2013). For almost four decades, the rise of geometric morphometrics techniques has provided efficient tools for analyzing variation of biological shape (Bookstein, 1991; Slice, 2005). Geometric morphometrics has also been applied to identify and characterize ACM shapes. It has been demonstrated to be efficient in differentiating variants even in the case of subtle ACM (Cheverud et al., 1992; Kohn et al., 1995; Friess & Baylac, 2003; Manríquez et al., 2006; Gómez-Valdés et al., 2007; Perez, 2007; Perez et al., 2009; Burchi et al., 2016; Kuzminsky et al., 2016; Mayall et al., 2017; Mayall & Pilbrow, 2018; Alejandro et al., 2019; Natahi et al., 2019).

However, multiple cranial alterations unrelated to any cultural behavior can originate from ante mortem conditions (e.g., pathological or occupational conditions; Gervais, 1989; Tiesler, 1999; Gervais, 2001), and/or postmortem ones (e.g., taphonomic processes or biases related to the restoration process; Shipman, 1981; Lyman, 1994; Arbour & Currie, 2012; Tiesler, 2014) and substantially complicate the recognition and characterization of ACMs. In some contexts, the overlying sediments may exert compression forces on the skull causing distortions and discontinuities between and within certain cranial elements (Laitman & Heimbuch, 1982; Franciscus & Trinkaus, 1988; Gunz et al., 2009; Weber & Bookstein, 2011; Tiesler, 2014; Jurda et al., 2015) that can be subsequently mistaken for ACMs. In others, the soil characteristics (e.g., acidity or alkalinity) can severely affect the bone leading to its degradation and destruction which makes the identification and characterization of ACMs impossible (Emery, 2004).

Therefore, under certain conditions the skull may only be represented by few cranial elements, precluding reliable and in-depth investigations of the practices (Tiesler, 2014, p. 70; Jácome Hernández et al., 2018; Montiel Mendoza, 2018). If not excluded from the analyses, assessing ACM and differentiating the form variants based on isolated calvaria bone fragments is challenging and may lead to misinterpretations.

While some authors have proposed to use the multiple expression of morphological criteria as reliable indications in the diagnosis of ACMs (Magitot, 1885; Goldstein, 1940; Stewart, 1976; Weiss, 1981; Holliday, 1993; Antón & Weinstein, 1999; Tiesler, 2012a, 2012b, 2014; Tiesler & Gómez-Valdés, 2018; Natahi et al., 2019), little is known about the informative potential of isolated calvarial bones shape quantification in the identification and differentiation of ACMs.

Although various authors have reported the expression of ACM techniques in West Mesoamerica (e.g., Hulse, 1945; Stewart, 1948; Meighan & Foote, 1968; Gill, 1985; Uruñuela y Ladron de Guevara, 1994; Acosta, 2003; Bautista & Ortega, 2005; Pereira, 2018; Natahi et al., 2019), the preservation state of bone limited some studies where fragmented or poorly preserved material reduce substantially the size of the sample considered (e.g., Jácome Hernández, 2012, p. 315; Jácome Hernández et al., 2018, p. 690). In order to improve the possibility of diagnosing ACMs and differentiating variants relying on fragmentary cranial remains, we are proposing here to explore how informative some parts of the calvaria can be for the identification and the differentiation of ACM variants. Using 3D geometric morphometrics, we will focus on the following objective: to quantify shape variation of isolated calvaria bones within and between different groups which are composed of unmodified individuals (i.e., the control group) and groups made of individuals demonstrating diverse ACM variants.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Sample composition

Owing to their excellent states of preservation, 36 individuals were considered. In order to avoid mixing the shape signal related to the ACMs with shape signals due to interpopulation differences, we have only considered pre-Hispanic individuals coming from archaeological excavations carried out in the same West Mesoamerican area, specifically in two neighboring Mexican states: Guanajuato and Michoacán (Figure 1). The individuals come from different archaeological sites located in three different neighboring regions: the valley of Acámbaro and the basins of Zacapu and Pátzcuaro (Figure 1; Table 1). The individuals from the site JR24 in the Acámbaro valley date back to the Late Preclassic (400 BC - 300 AD; Darras & Faugère, 2007). The individuals of the Zacapu basin come from the archaeological site of Loma Alta (Arnauld et al., 1993; Carot, 1993) for the Late Preclassic (400 BC - 300 AD; Pereira, 1999)

and Guadalupe for the Classic period (300 - 900 AD; Pereira, 1999, 2010). Individuals from El Palacio (Lumholtz & Hrdlička, 1898; Lumholtz, 1902) and Malpais Prieto (Pereira et al., in press) for the Middle Postclassic (1200 - 1400 AD; Pereira et al., in press), two other sites of the Zacapu basin, are also been included. For the Pátzcuaro basin, all the individuals come from Angamuco (Fisher et al., 2019) and belong to the Late Postclassic – Early Colonial period (1200 - 1600 AD; Cohen, 2016).

Individuals have been classified into five groups: four of them show the distinct forms of ACM mainly expressed in West Mesoamerica (Pereira, 2018). They have been differentiated according to the typology of Dembo and Imbelloni (1938) (i.e., the tabular erect fronto-occipital and plano-lambdoid variants, the tabular oblique form and the fronto-obelionic one) and a control group (Table 1). The classification of the individuals in the latter category was addressed using the results of Natahi et al. (2019) study. More specifically, here we used as control group all the individuals from El Palacio and Malpaís Prieto that fall within the 95% confidence ellipse of a group composed of unmodified Mexican Indians and French medieval individuals in Natahi et al. (2019).

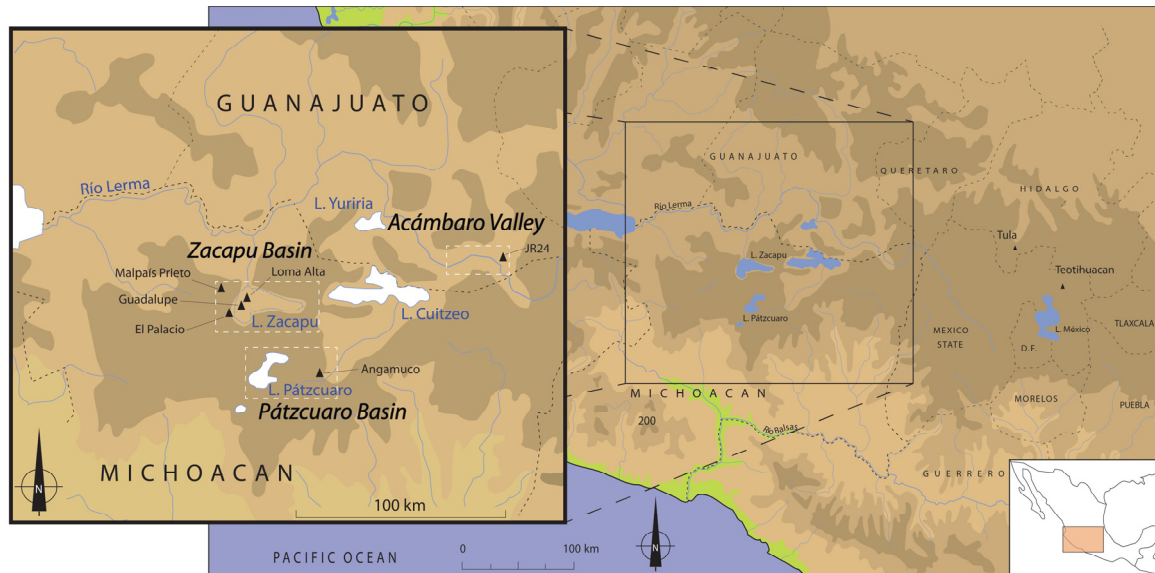


FIGURE 1 Locations of the archaeological sites.

All the individuals considered in the study were adults, except one. The dental mineralization and eruption stages (Moorrees et al., 1963; Demirjian et al., 1973; Ubelaker, 1978; AlQahtani et al., 2010), have permitted to estimate the age-at-death for this individual as between 10-20

years. This age-at-death overlaps with the age of neurocranial outline maturity (as documented by Bastir et al., 2006), and as such we have included this individual in our analyses.

The sex assignment of an individual has been carried out using metric and nonmetric traits of the pelvis (Brůžek, 2002; Murail et al., 2005; Brůžek et al., 2017). For the skeletons lacking the pelvic bones, we have chosen not to use the sex-related cranial traits reported by Buikstra and Ubelaker (1994) since ACM are likely to affect their expressions.

2.2 Data acquisition

The individuals have been scanned using medical computed tomography (Mount Sinai Radiology, New York, United States of America; CT Scanner del Sur, Ciudad de México, México; with slices interval varying from 0.5mm (Mount Sinai Radiology) to 0.625mm (CT Scanner del Sur) and pixel sizes ranging from 0.38 to 0.56mm ; SI 1). Each surface has been generated using the HMH segmentation procedure (Half Maximum Height ; Spoor et al., 1993). Subsequent corrections were applied manually in the Avizo software (Thermo Fisher Scientific).

The shape of four calvaria bones have been analyzed in isolation: the frontal squamous part, the two parietals and the posterior part of the occipital bone. Except for the latter, each calvaria bone shape captured corresponds to the bone area delimited by its respective sutures (Figure 2). The signal describing the shape of the occipital bone has been restricted to the occipital squama and the posterior part of the occipital base (i.e., the anatomical regions where the posterior elements of the cranial devices employed in ACM are usually arranged). The first structure is delimited anteriorly and superiorly by the two parietal bones (i.e., the lambdoid sutures) and laterally and inferiorly by the two temporal bones petrous parts. The limits of the second structure are defined from the most anterior and median to the lateral parts by: the posterior margin of the foramen magnum, the posterior margins of the posterior condylar foramina, the paracondylar processes and the occipitomastoid suture laterally.

Table 1 List of individuals.

Id	Site	Region	Sex	Age	ACM	Period
JR24_sep1	JR24	Acámbaro Valley	F	Adult	Tabular oblique	Late Preclassic (400 BC – 300 AD)
Angamuco_sep14_ind2	Angamuco	Pátzcuaro Basin	F	Adult	Tabular Erect plano lambdaoid	Late Postclassic (1400 – 1600 AD)
Angamuco_sep8	Angamuco	Pátzcuaro Basin	M	Adult	Tabular Erect plano lambdaoid	Late Postclassic (1400 – 1600 AD)
Angamuco_sep9_ind1	Angamuco	Pátzcuaro Basin	M	Adult	Tabular Erect plano lambdaoid	Late Postclassic (1400 – 1600 AD)
Loma_Alta_sep27	Loma Alta	Zacapu Basin	F	Adult	Tabular Erect plano lambdaoid	Late Preclassic (400 BC – 300 AD)
JR24_sep6	JR24	Acámbaro Valley	M	Adult	Tabular erect	Late Preclassic (400 BC – 300 AD)
JR24_sep8	JR24	Acámbaro Valley	M	Adult	Tabular erect	Late Preclassic (400 BC – 300 AD)
Tarascan135	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Fronto obelionic	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan151	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Fronto obelionic	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan154	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Sub-adult	Fronto obelionic	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan154	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Fronto obelionic	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan155	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Fronto obelionic	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan156	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Fronto obelionic	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan157	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Fronto obelionic	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan158	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Fronto obelionic	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich215_sep43_ind2	Guadalupe	Zacapu Basin	F	Adult	Fronto obelionic	Classic (300 – 600 AD)
Tarascan130	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan137	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan141	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan149	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan150	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan160	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan165	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan173	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan174	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan211	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep20	Malpais Prieto	Zacapu Basin	M	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep24	Malpais Prieto	Zacapu Basin	F	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep34_ind1	Malpais Prieto	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep34_ind3	Malpais Prieto	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep34_ind4	Malpais Prieto	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep37_ind2	Malpais Prieto	Zacapu Basin	M	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep37_ind3	Malpais Prieto	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep37_ind6	Malpais Prieto	Zacapu Basin	F	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep40	Malpais Prieto	Zacapu Basin	M	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep42	Malpais Prieto	Zacapu Basin	F	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)

As mentioned by Gunz and Mitteroecker (2013), the calvaria has relatively few homologous anatomical structures which precludes an attempt to quantify precisely its bones shape variation using only traditional craniometric landmarks. Therefore, we have included semilandmarks in order to capture the three-dimensional shape of each calvaria bone (Bookstein, 1997; Gunz et al., 2005). A 3D-template of 463 landmarks and semilandmarks was specifically digitized on the entire calvaria (Figure 2, center; Table 2). The latter has been warped onto each skull using the software Viewbox (dHAL software, Kifissia, Greece).

The missing data do not account for more than 2.6% of information loss for an individual (i.e., no more than 12 missing landmarks for the entire calvaria). If missing, their coordinates have been estimated in accordance with the standard protocol developed by Gunz (2005) and Gunz et al. (2009).

In order to analyze separately the shapes of each four calvaria bones, seven semilandmark curves have been digitized: along the left and right sphenofrontal sutures, squamous sutures, lambdoid sutures and along the sagittal suture (Figure 2, green dots). When using the minimization of the bending energy as criterion to perform the sliding of the semilandmarks (see below), the anatomical landmarks and curve semilandmarks constrain the displacements of the surface semilandmarks, guaranteeing that no surface semilandmarks slide beyond the limits of the surface of interest (Gunz & Mitteroecker, 2013). Therefore, in the subsequent analyses we have defined five sliding groups (i.e., subset of landmarks and semilandmarks; Table 2) as follows: one for the frontal, one for the left parietal, one for the right parietal and one for the occipital. After digitization and warping, using the R “Morpho” package (Schlager, 2017), the 3D semilandmarks of the five subsets were independently allowed to slide along curves and surfaces in order to minimize the bending energy of the Thin-Plate Spline (TPS) interpolation function that is computed between each specimen calvaria bone configuration and the respective sample Procrustes average (Bookstein, 1997; Gunz et al., 2005).

It has been reported that in cases of different ACM techniques high degrees of neurocranium asymmetry have been observed (Neumann, 1942; Romano, 1974; Kohn et al., 1995; Tiesler, 1998; Clark et al., 2007; Pomeroy et al., 2010; Natahi et al., 2019). The quantification of asymmetry being not relevant to our study, the symmetric component of shape variation was used in the subsequent analyses (Klingenberg et al., 2002). The entire calvaria, the frontal bone, the occipital bone all display an internal symmetry plane so their symmetric configuration has

been computed as the average of their respective original and reflected relabeled configurations (Mardia et al., 2000; Klingenberg et al., 2002; Savriama & Klingenberg, 2011; Klingenberg, 2015). In order to evaluate the shape changes relating to the parietal bone only, we have proceeded differently since it displays a matching symmetry (i.e., right and left parietal bones are mirror images of each other). Right configurations were reflected by changing the sign of the x coordinates (Klingenberg et al., 2002; Zelditch et al., 2012). Subsequently, the two configurations of each individual were superimposed in pairs via a Procrustes fit in order to compute their respective mean shape (Zelditch et al., 2012). After the sliding and the computation of the symmetric component of each calvaria bone configuration, the semilandmarks are treated as homologous points and combined with traditional landmarks so

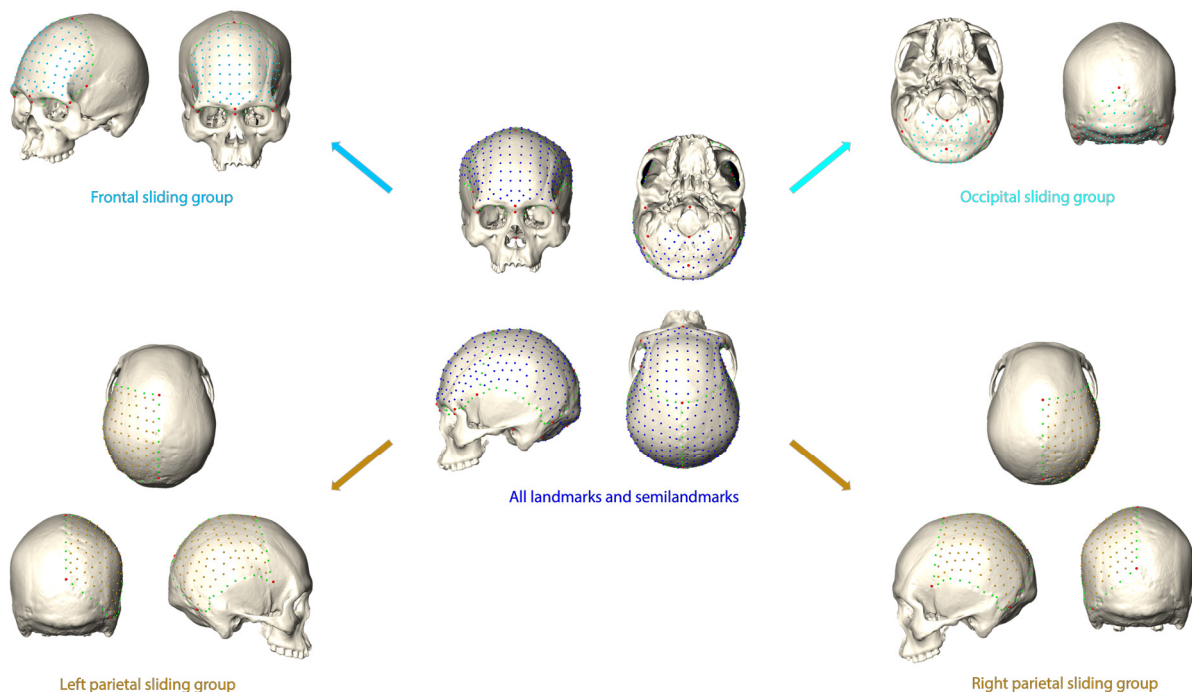


FIGURE 2 The four groups of sliding semilandmarks considered.

they can be transformed into Procrustes shape coordinates via a Generalized Procrustes Analysis (GPA; Rohlf & Slice, 1990; Bookstein, 1996; Mitteroecker & Gunz, 2009). Each configuration is scaled to have a unit Centroid Size (CS: square root of the summed squared Euclidean distances from all semilandmarks to their centroid; Dryden & Mardia, 1998). Then all configurations are translated and rotated to minimize the overall sum of the squared distances between the corresponding landmarks and semilandmarks.

TABLE 2 List of landmarks, curve semilandmarks and surface seminlandmarks.

No	Anatomical landmarks	Label (see Figure 2)	Unilateral/Bilateral	Comments
1	Nasion	n	Unilateral	
2	Glabella	g	Unilateral	
3	Bregma	b	Unilateral	
4	Lambda	l	Unilateral	
5	Inion	i	Unilateral	
6	Opisthion	op	Unilateral	
7	Basion	ba	Unilateral	
8, 9	Frontomalare temporal	fmt	Bilateral	
10, 11	Frontomalare orbital	fmo	Bilateral	
12, 13	Porion	po	Bilateral	
14, 15	Mastoid notch	mn	Bilateral	
12,18	Asterion	as	Bilateral	
13,19	Pterion	pt	Bilateral	
Curve semilandmarks				
20:25, 26:31	Inferior orbital margin (n= 6 x 2)		Bilateral	Rim of the orbital opening to frontomalare orbital
32:36, 37:41	Sphenofrontal suture (n= 5 x 2)		Bilateral	Cranial suture between sphenoid and frontal bone
42:49, 50:57	Coronal suture (n= 8 x 2)		Bilateral	Cranial suture separating the frontal from the two parietal bones
42:49, 50:57	Squamosal suture (n= 13 x 2)		Bilateral	Cranial suture separating the temporal squama from the two parietal bones
84:89, 90:95	Lambdoid suture (n= 6 x 2)		Bilateral	Cranial suture separating the occipital from the two parietal bones
96:103	Sagittal suture (n= 8)		Bilateral	Cranial suture expanding from bregma to lambda
Surface seminlandmarks				
104:154, 284:334	Frontal patch (n= 51 x 2)		Bilateral	
155:253, 335:433	Parietal vault patch (n= 99 x 2)		Bilateral	
254:283, 434:463	occipital vault patch (n= 30 x 2)		Bilateral	

2.3 Analyses of shape variation

In order to explore the informative potential of calvaria bone shape in the identification and differentiation of ACM, we have evaluated their morphological differences within and between the five aforementioned groups (i.e., a control group, a group composed of individuals with fronto-obelionic ACM, one with tabular erect fronto-occipital ACM, one with tabular erect plano-lambdoid ACM and one with tabular oblique ACM). The morphological differences within and between group have been measured following the procedure used in Stelzer et al. (2018). This consisted of computing Procrustes distances pairwise for all possible combinations within a group (except for the tabular oblique group which is represented by one individual) and between groups. The within variation of the tabular oblique group could not be explored since the sample size limited to one individual

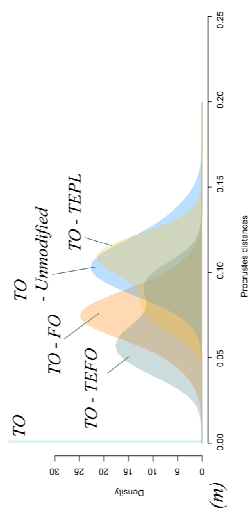
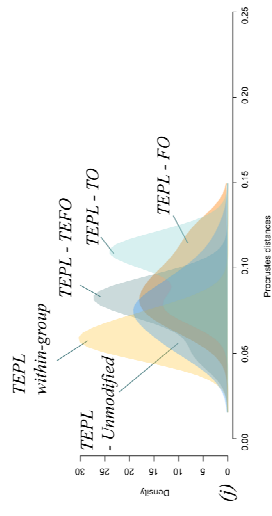
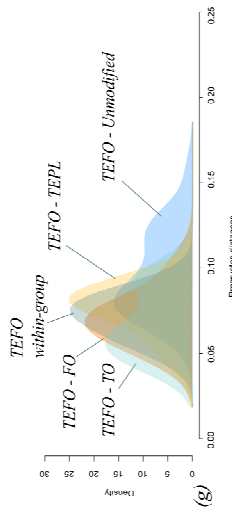
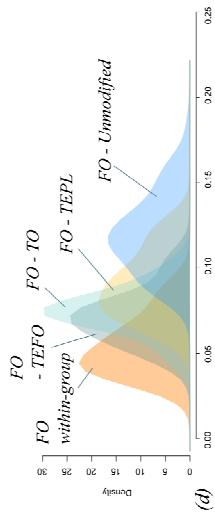
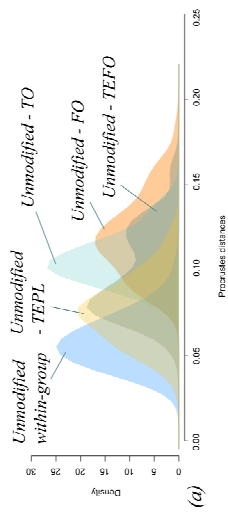
2.4 Visualization patterns of shape variation

In order to provide morphological elements that can help identifying a form based on isolated bones, we have generated 3D digital meshes of the four calvaria bones. They have been respectively warped towards the mean shapes of our five groups for each calvaria bone. We have used those meshes to visualize and describe the shape changes that characterize an ACM in comparison to another on one isolated bone.

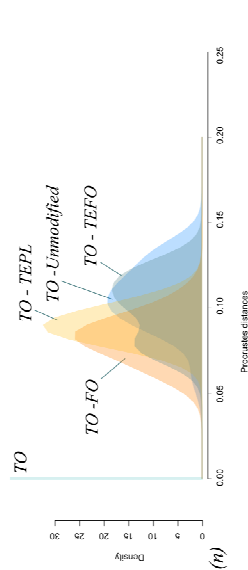
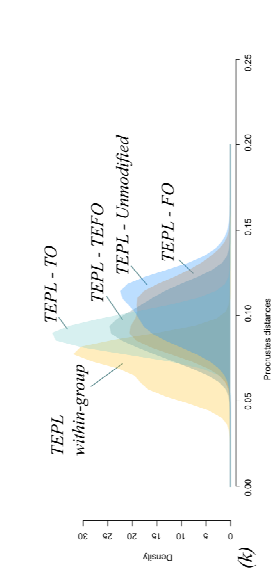
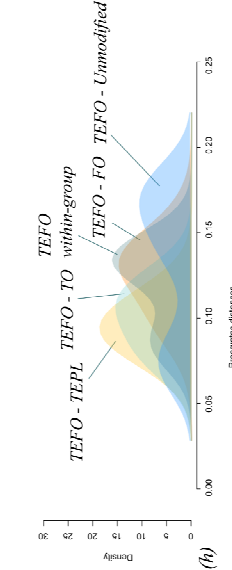
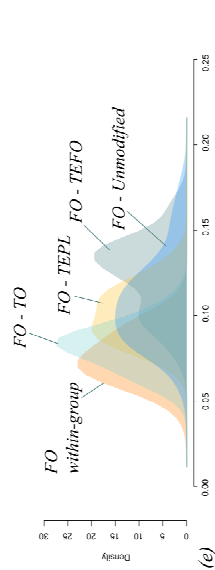
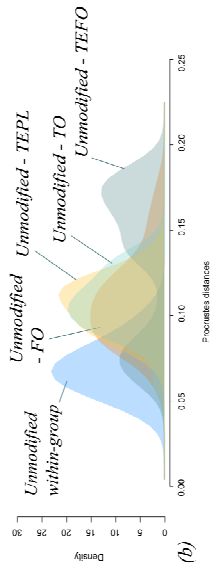
3. RESULTS

Figure 3 displays the within and between group variation for the control group (characterized as unmodified) and the different types of ACM we have identified via visual examinations. Tables 3a and 3b describes the summary statistics of each group within and between group comparisons.

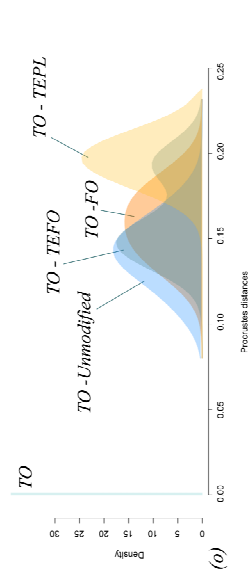
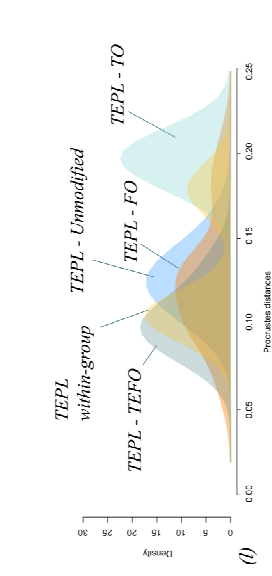
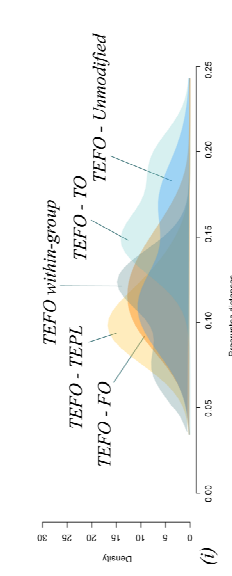
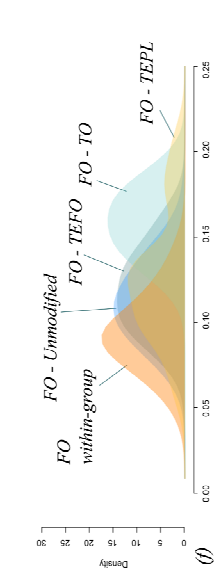
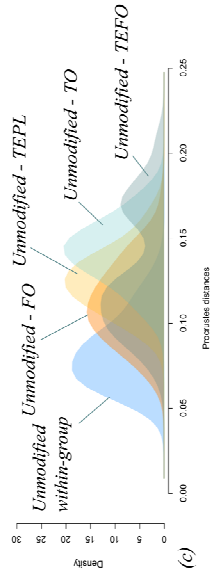
FRONTAL



PARIETAL



OCCIPITAL



UNMODIFIED

FRONTO-OBELIONIC

TABULAR ERECT FRONTO-OCCIPITAL

TABULAR ERECT PLANO-LAMBDOID

TABULAR OBLIQUE

FIGURE 3 Distribution of the Procrustes distances for all pairwise combinations of calvaria bones within and between four groups of individuals: the Unmodified group, the Fronto-Obelionic group (i.e., FO), the Tabular Erect Fronto-Occipital group (i.e., TEFO), the Tabular Erect Plano-Lambdaoid group (i.e., TEPL) and the Tabular Oblique group composed of one individual (i.e., TO).

TABLE 3a Summary statistics of the Procrustes distances for all pairwise combinations frontal and parietal bones within and between four groups of individuals: the Unmodified group, the Fronto-Obelionic group (i.e., FO), the Tabular Erect Fronto-Occipital group (i.e., TEFO), the Tabular Erect Plano-Lambdoid group (i.e., TEPL) and the Tabular Oblique group composed of one individual (i.e., TO).

		Frontal bone					Parietal bone				
		Unmodified	Fronto-Obelionic	Tabular erect	Tabular plano lambdoid	Tabular oblique	Unmodified	Fronto-Obelionic	Tabular erect	Tabular plano lambdoid	Tabular oblique
Unmodified	Min	0.03	0.08	0.06	0.04	0.09	0.04	0.06	0.06	0.08	0.06
	1st Quartile	0.05	0.10	0.08	0.06	0.10	0.06	0.09	0.08	0.09	0.10
	Median	0.06	0.12	0.09	0.08	0.10	0.07	0.10	0.15	0.10	0.11
	Mean	0.06	0.12	0.10	0.08	0.11	0.07	0.10	0.13	0.10	0.11
	3rd Quartile	0.07	0.13	0.11	0.09	0.11	0.08	0.11	0.17	0.11	0.11
	Max	0.10	0.18	0.16	0.12	0.14	0.11	0.17	0.19	0.13	0.13
Fronto-obelionic	Min	-	0.03	0.05	0.06	0.05	-	0.05	0.08	0.08	0.06
	1st Quartile	-	0.04	0.06	0.08	0.07	-	0.07	0.11	0.09	0.08
	Median	-	0.05	0.07	0.09	0.07	-	0.07	0.13	0.10	0.09
	Mean	-	0.05	0.07	0.09	0.07	-	0.08	0.13	0.10	0.08
	3rd Quartile	-	0.06	0.08	0.10	0.08	-	0.09	0.14	0.11	0.09
	Max	-	0.09	0.11	0.13	0.10	-	0.10	0.17	0.13	0.10
Tabular erect	Min	-	-	0.06	0.05	0.05	-	-	0.09	0.07	0.08
	1st Quartile	-	-	0.07	0.07	0.06	-	-	0.11	0.09	0.09
	Median	-	-	0.08	0.08	0.06	-	-	0.13	0.09	0.10
	Mean	-	-	0.07	0.08	0.07	-	-	0.12	0.10	0.10
	3rd Quartile	-	-	0.08	0.09	0.08	-	-	0.13	0.10	0.11
	Max	-	-	0.08	0.09	0.09	-	-	0.14	0.12	0.12
Tabular plano lambdoid	Min	-	-	-	0.06	0.08	-	-	-	0.06	0.09
	1st Quartile	-	-	-	0.06	0.09	-	-	-	0.07	0.09
	Median	-	-	-	0.06	0.11	-	-	-	0.08	0.09
	Mean	-	-	-	0.06	0.10	-	-	-	0.07	0.09
	3rd Quartile	-	-	-	0.06	0.11	-	-	-	0.08	0.09
	Max	-	-	-	0.07	0.11	-	-	-	0.08	0.10

TABLE 4 Summary statistics of the Procrustes distances for all pairwise combinations of occipital bones within and between four groups of individuals: the Unmodified group, the Fronto-Obelionic group (i.e., FO), the Tabular Erect Fronto-Occipital group (i.e., TEFO), the Tabular Erect Plano-Lambdoid group (i.e., TEPL) and the Tabular Oblique group composed of one individual (i.e., TO).

		Occipital bone				
		Unmodified	Fronto Obelionic	Tabular erect	Tabular plano lambdoid	Tabular oblique
Unmodified	Min	0.05	0.07	0.07	0.09	0.11
	1st Quartile	0.07	0.09	0.10	0.12	0.13
	Median	0.08	0.11	0.12	0.12	0.14
	Mean	0.08	0.11	0.13	0.13	0.14
	3rd Quartile	0.09	0.13	0.17	0.14	0.16
	Max	0.14	0.18	0.21	0.17	0.17
	<hr/>					
Fronto-obelionic	Min	-	0.05	0.08	0.06	0.13
	1st Quartile	-	0.08	0.10	0.10	0.14
	Median	-	0.09	0.12	0.13	0.16
	Mean	-	0.09	0.12	0.13	0.16
	3rd Quartile	-	0.11	0.14	0.14	0.17
	Max	-	0.14	0.16	0.21	0.19
	<hr/>					
Tabular erect	Min	-	-	0.07	0.08	0.14
	1st Quartile	-	-	0.10	0.09	0.15
	Median	-	-	0.12	0.10	0.15
	Mean	-	-	0.11	0.10	0.16
	3rd Quartile	-	-	0.12	0.11	0.17
	Max	-	-	0.13	0.13	0.19
	<hr/>					
Tabular plano lambdoid	Min	-	-	-	0.10	0.18
	1st Quartile	-	-	-	0.10	0.19
	Median	-	-	-	0.11	0.20
	Mean	-	-	-	0.13	0.20
	3rd Quartile	-	-	-	0.14	0.20
	Max	-	-	-	0.18	0.21

3.1 Within and between group variations

The within and between group variation of the control group

Figure 3.a shows that the within group variation for the frontal bone of the Unmodified group overlaps that of the Unmodified – TEPL (i.e. Tabular Erect Plano-Lambdoid) and part of Unmodified – TEFO (i.e., Tabular Erect Fronto-Occipital) comparison. The other part of the variation observed for the Unmodified – TEFO group is within the variation of the unmodified individuals. The Unmodified – TO (i.e., Tabular Oblique) and Unmodified – FO (Fronto-obelionic) groups differ clearly from the variation within the unmodified cluster. When considering the parietal bone (Figure 3.b), the highest values of the within variation for the unmodified group intersects that of all groups except that of Unmodified – TEFO group. This group displays a bimodal distribution when compared to the unmodified one since part of its variation lies in the within-group range of variation of the unmodified individuals. The other part displays the highest Procrustes distances values (Tables 3a and 4). The variation of the occipital bone within the unmodified group is close to that calculated for the Unmodified – FO comparison (Figure 3.c). The Unmodified – TEPL and Unmodified - TO are distinct from the within-group variation of the unmodified individuals. The variation observed for the Unmodified – TEFO comparison is bimodal with one section overlapping the unmodified within-group variation while the other shows the highest values.

The within and between group variation of the fronto-obelionic group

The frontal bone morphological differences we observe among the individuals with a fronto-obelionic ACM are close to the variation measured for FO – TE, FO – TEPL and FO – TO comparisons (Figure 3.d; Table 3a). The highest differences are those calculated for the FO – Unmodified comparison. The parietal bone FO within-group variation expresses values close to all comparison groups except part of the FO – TEFO variation for which the highest Procrustes distances are observed (Figure 3.e; Table 3a). The comparisons of the occipital morphological differences for the fronto-obelionic group reveals that the FO within-group variation is close to the variation computed for the FO – Unmodified comparison (Figure 3.f). The FO – TEFO group shows a widespread distribution with some values located in the FO within-group distribution while some exceed it and are much higher (Table 4). The FO – TEPL comparison yields a bimodal distribution with most of the variation located in the same variation range as the FO – Unmodified distribution. The rest of the variation of this group

demonstrates the highest values. The FO – TO group displays important morphological differences that clearly separate its distribution from the FO within-group one.

The within and between group variation of the tabular erect fronto-occipital group

The TEFO within-group variation for the frontal bone is comparable to all groups except that of the TEFO – Unmodified one (Figure 3.g; Table 3a). This latter group exhibits a bimodal distribution with some values laying in the TEFO within-group variation and others outreaching the variation range of the other groups. The variation measured for the parietal bone in the TEFO within-roup is very important and expresses a bimodal pattern where some values are low and the others high (Figure 3.h; Table 3a). The variation of this group exceeds the variation displayed by the other groups except the TEFO – Unmodified group that also expresses a bimodal distribution. For the occipital bone (Figure 3.i), the TEFO within-group variation also shows a bimodal pattern of variation. Variation in this group is more important than the ones computed for TEFO – FO and TEFO – TEPL groups. Only the TEFO – TO group and the highest values of the TEFO – Unmodified group are higher than the TEFO within-group variation.

The within and between group variation of the tabular erect plano-lambdoid group

The variation for the TEPL within-group overlaps in major part that of the TEPL - Unmodified group (Figure 3.j). It also overlays the other groups variation (i.e., TEPL – FO, TEPL – TEFO and TEPL – TO) but to lesser extents. Regarding the parietal bone (Figure 3.k), the within-group TEPL variation demonstrates a narrow distribution and differs from the other groups, which present similar distributions. When examining the occipital bone variation (Figure 3.l), the TEPL within-group expresses a bimodal pattern of variation with some Procrustes distances showing low values while others are displaying high ones (Table 4). The lowest ones are similar to and overlap the variation recorded for the TEPL – FO, TEPL – TEFO and TEPL – Unmodified groups.

The within and between group variation of the tabular oblique group

The lowest variation registered for the frontal concerns the two groups TO – FO and TO – TEFO (Figure 3.m; Table 3a). TO - Unmodified and TO – TEPL expresses higher amount of shape variation. Considering the parietal bone (Figure 3.n), the distribution of shape differences is homogenous with groups like the TO – FO and TO – TEPL displaying the lowest variation expressed as a unimodal distribution. The TO – Unmodified and TO – TEFO show the highest variation with respectively unimodal and bimodal distributions. Regarding the occipital bone

(Figure 3.o), all of the comparisons show a high amount of variation compared to any of the other comparisons measured (Figure 3.o; Table 3b). The TO – Unmodified, TO – FO and TO – TEFO groups all overlap. The TO – TEPL group is the one showing the highest amount of variation and the highest values (Figure 3.o; Tables 3a and 4).

The shape variation computed within and between each group has revealed that some calvaria bones can be informative in the identification and characterization process of ACM.

3.2 The challenge of identifying and differentiating ACM using isolated calvaria bones

Firstly, we have shown that the variation observed between the unmodified individuals and the individuals belonging to other groups always exceeded that of the within-group composed of the unmodified individuals (Tables 3a and 4). It suggests that regardless of the type of ACM to which it belongs, an isolated calvaria bone of an individual express greater morphological differences than the background physiological variation and can be dissociated from it. Therefore, the flattening degree of the frontal squama is a unanimous criterion that permits a reliable distinction of ACM from the unmodified group. However, in the case of plano-lambdoid ACM, the morphological variation observed for the frontal bone between the unmodified individuals and those exhibiting a plano-lambdoid type does not display a clear cut-off. Thus, some difficulties can be encountered when looking to differentiate those forms from the physiological variation if the analyses are exclusively based on visual examinations. When comparing the parietal bones of every ACM variant to the unmodified group, the protrusion of the lateral parietal region is a pattern shared among all types. For all ACM variants, a lateral and backward movement of the parietal boss is observed when compared to the unmodified group. ACM, whichever variant considered, also affects the lambdoid suture and its surroundings, and is characterized by their stretching laterally and inferiorly. The occipital bone of the unmodified group is expressing a narrower and rounder shape in comparisons to all ACM types for which it shows a certain amount of bone flattening (differentially localized according to the ACM variant considered) associated with a broadened shape.

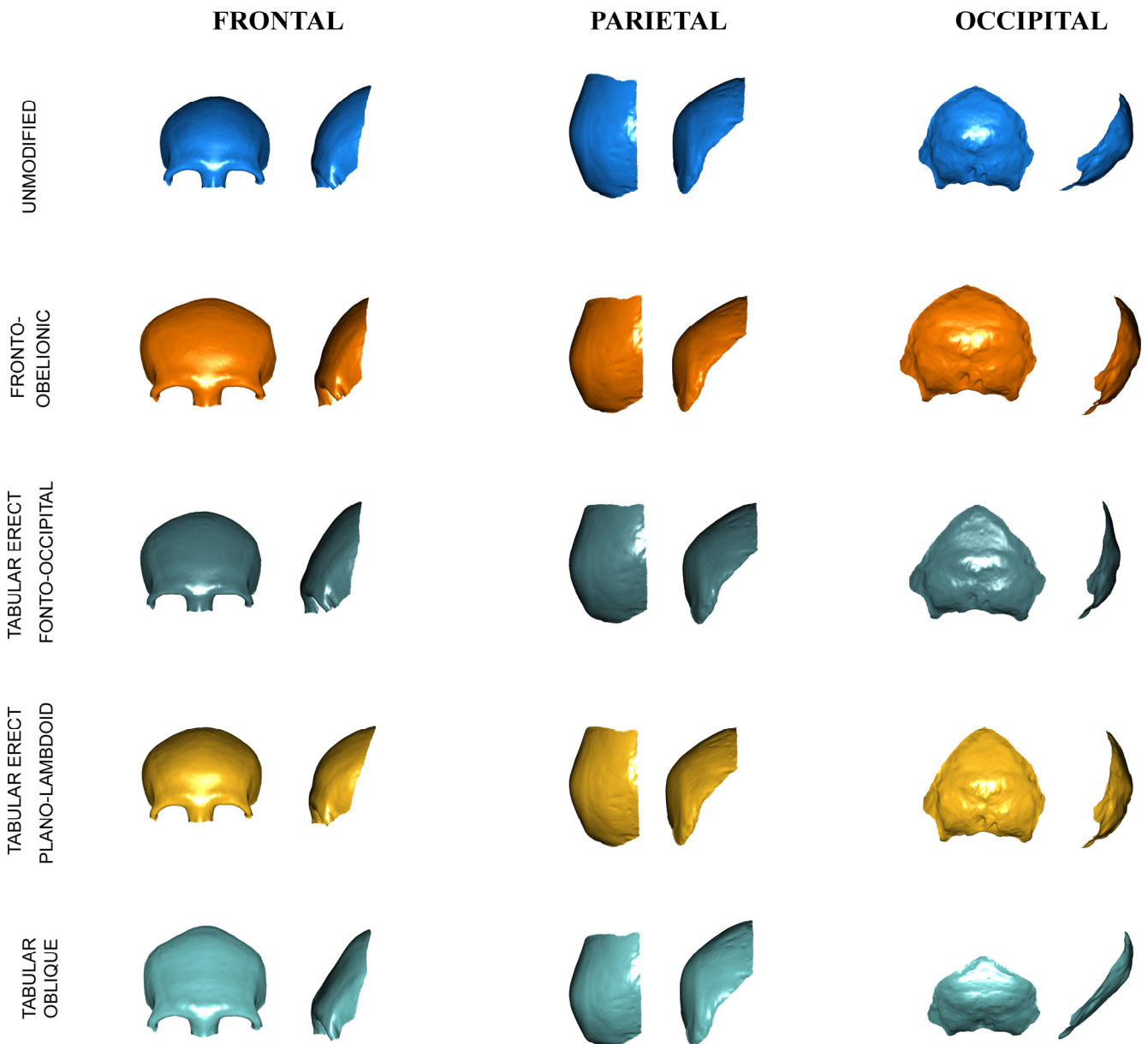


FIGURE 4 Mean shape of each group for the frontal, parietal and occipital bones.

In some cases, certain bones exhibit shape features specific to some types of ACM and allow their differentiation from the other ACM variants. The within-group variation observed for the frontal bone of the fronto-obelionic group indicates a distinct shape when compared to the other groups. Figure 4 describes the morphological changes it expresses with all group. The frontal bone of the fronto-obelionic ACM displays a marked flattening, a shortened length of the frontal squama associated with a more retracted position of the glabellar region and the orbital rims. These features distinguish fronto-obelionic ACM from the unmodified group and the plano-lambdoid ACM, which are showing rounded morphologies of the frontal squama and a more protruding glabellar region. The differences are more subtle when compared to the two other types of ACM that both involve flattening of the frontal bone. The evaluation of shape differences between the fronto-obelionic and the tabular oblique ACMs demonstrates that the degree of flattening is lower for the fronto-obelionic group. In comparison with the tabular erect fronto-occipital group, the fronto-obelionic one shares similar flattening degrees. Compared to the tabular erect fronto-occipital and tabular oblique groups, the fronto-obelionic one is mainly characterized by an important degree of lateral protrusion that affect the temporal lines region and the lateral sections of the coronal suture combined with a reduced height of the frontal squama.

The measures of morphological differences (Table 3a) and the distribution pattern of variation within the tabular erect plano-lambdoid variant for the parietal bone (Figure 4), also point to specific shape features regarding their parietal shape. First, the parietal shape is broadened; likewise the other individuals belonging to any ACM groups. Yet, they differ from the fronto-obelionic and tabular oblique parietal mean shapes since the tabular erect plano-lambdoid mean shape does not present the similar prominent bulging. It also shows higher parietal bosses oriented more anteriorly. Finally, the differences between the plano-lambdoid group and the tabular erect fronto-occipital are more subtle since they seem only to relate to the degree of modification. Indeed, when compared to the unmodified group, the morphological differences concern similar regions. However, they express with lower intensity among the tabular erect plano-lambdoid group. Differentiating those forms via a visual examination is a difficult process that should be addressed using complementary analyses (e.g., using linear measurements).

The within variation of the tabular oblique group could not be investigated because of its sample size of one individual. Nevertheless, when compared to individuals belonging to other groups the tabular oblique individual displays a specific occipital shape feature that is not reported in the other comparisons. The tabular oblique occipital shows a very high degree of specificity that is enhanced by the patterns of between group variation (Figure 3.o) and the morphological differences computed via the Procrustes distances (no mean Procrustes distances is inferior to 0.10; Table 3a and 3b). Important increases in length and flattening of the nuchal area are the most noticeable criteria that account for the specific occipital shape of this variant. In combination with these characteristic features, we also observe that the superior part of the occipital squama is reduced substantially and the occipital eminence occupies a much higher position, closer to lambda. A downward motion affects the surroundings of the asterion that are displaced inferiorly and anteriorly.

4. DISCUSSION

The results presented above have proved that isolated bones may provide valuable information that can help to identify individuals with ACM from the physiological variation defined by the unmodified group. The shape of all bones of each ACM variant are informative when compared to the variation of the unmodified group, and are characterized by bone flattening, and its counterpart, bone broadening. The assumption that some ACM variants can be characterized based on isolated calvaria bones is also supported under certain conditions. The frontal bone is the most informative element to characterize the fronto-obelionic type. The combination of both flattening and broadening morphology seem to be specific to this variant. The tabular erect plano-lambdoid type displays a parietal shape that can be distinguished from the other variants through the identification of laterally expanded parietal bosses as well as via their anterior position. Finally, the elongated shape of the nuchal portion of the occipital bone that characterize the tabular oblique type is highly specific to this type since it has not been observed in any other cases of ACM considered here. These results are important for the context of West Mesoamerican archaeology where in-depth investigations on the evolution and diversity of ACM practices are sometimes lacking relatively to the preservation of bone. The quantification of the within and between group variations of the calvaria bones among individuals exhibiting ACM must not be limited to this area. Applications to other contexts such as the Maya area where poor bone preservation sometimes limits substantially the study of ACM (e.g., Danforth,

1994; Wright, 1997; Cucina et al., 2002), should provide valuable information to the identification and determination of ACM.

While the patterns of variation within and between groups have revealed some specificities among certain variants, they have also brought information on standardization of ACM techniques and the manner in which they were performed.

This study has provided for the first time information on isolated calvaria bones shape features individually for cases of ACM. Besides evaluating the informative potential for an isolated bone to identify and differentiate ACM, it also reveals valuable information relative to the techniques employed to produce certain ACM variants and questions the homogeneity the tabular erect variant.

The fronto-obelionic variant shows within-group values similar to that of the control group for the three calvaria bones considered in this study. This reinforces that this technique was standardized (Natahi et al., 2019). When comparing the occipital shape differences within the fronto-obelionic group to those quantified between groups, the weakest differences were recorded for the FO – Unmodified comparison and the highest one for the FO – TEFO comparison. This suggests that the shape of the occipital bone in individuals with ACM is closest to those of individuals with no modification than to any other ACM group. Furthermore, the occipital shape variation pattern observed for the Unmodified – FO comparison differs from the variation recorded for the FO within-group. These results show that the occipital bone underwent a modification process important enough to differentiate it from the unmodified variation but not as marked as the reported case of tabular oblique ACM. Therefore, it strengthens Pereira's assumption that such an ACM variant is distinct from the major two types (i.e., tabular erect and tabular oblique) usually encountered in the context of Mesoamerican archaeology (Romano, 1974; Tiesler, 2014; Tiesler & Serrano, 2018). Moreover, it proves that an element had also exerted a constraint with lower intensity on the nuchal part of the occipital bone for this variant. Consequently, these lines of evidence are consistent with the conclusions reached by Pereira (1999, 2018) that such a modification process would be obtained through the implementation of constraining elements localized on the frontal squama and in the obelionic and nuchal regions.

The tabular erect plano-lambdoid variant results from the implementation of a constraining element in the posterior section of the occipital bone, which prevents brain growth in that direction. While barely noticeable via a visual examination, we have demonstrated here that the

frontal bone for this variant presents a shape that differs from the unmodified group. This information is valuable regarding the nature of the cephalic device employed to produce this variant. The plano-lambdoid variant is thought to be induced by the process of cradleboarding (e.g., Dembo & Imbelloni, 1938; Tiesler, 2014). Dembo and Imbelloni (1938) have identified similar forms to ours since they have observed both anterior and posterior compression planes among individuals exhibiting it. More specifically, they propose that the head of the newborn was maintained by a system tying the frontal bone back to the cradleboard. Such a system, as documented for the southwest of the United States of America (e.g., Piper, 2002) would result in a slightly modified curvature of the frontal squama and would explain the variation we have documented here.

The tabular erect plano-lambdoid group considered here expresses a within-group variation distribution and values similar to that of the control group for the frontal and parietal bones. However, the group variation for the occipital bone is bimodal with very high Procrustes distances for the highest values. It indicates that very different occipital shapes co-exist within that cluster and questions if this practice was standardized. Such a result is consistent with the hypothesis that these variants are produced via cradleboarding. Indeed, random phenomena such as the infant's head movements are likely to occur daily and may explain the discrepancies of occipital shapes observed here. The consistency of the within-group variation for the parietal bone compared to the bimodal distribution of the occipital variation is of interest. It suggests that the parietal shapes within this group are similar while the occipital ones differ greatly. This result implies that differential constraints localized in the posterior part of the skull can result in similar responses in other region (i.e., the parietal bones). Whether different cradleboarding techniques have produced those forms is a question that will have to be explored in further analyses implying quantification of asymmetry.

The within-group variations of the parietal and occipital bones observed for the tabular erect fronto-occipital group exhibit a bimodal distribution. Furthermore, several comparisons with other groups have also shown a bimodal distribution. Except for the variation measured between the tabular erect fronto-occipital and tabular oblique groups for the occipital bone, the within-group variation of the tabular erect fronto-occipital group is always equal or greater than the between group one whichever bone considered. Further, when considering the parietal bone, most of group comparisons are exhibiting Procrustes distances lower than the one observed for the TEFO within-group variation (3.h).

These results point to important shape differences within this group. It is composed of three individuals, one of which is expressing a different shape to the others. This questions the homogeneity of the technique employed to produce their forms and highlights the limitations that classification systems have to face. Additional work that will consider larger samples should focus on the variation recorded within each variant in order to disentangle whether cases like the tabular erect fronto-occipital variant forms a homogenous class ensuing from similar techniques of ACM.

The purpose of this study being the investigation of the shape variation of the calvaria bones among individuals with ACM independently of how asymmetric they are, the asymmetric component of all landmark configurations was removed. Nevertheless, ACM are reported to cause important amount of asymmetry within the entire crania (Neumann, 1942; Romano, 1974; Kohn et al., 1995; Tiesler, 1998; Clark et al., 2007; Pomeroy et al., 2010). Some authors have identified that in certain ACM cases, flattening can affect separately the right or left posterior portions of the skull (Kohn et al., 1995; Tiesler, 1998; Natahi et al., 2019). In this study, we have excluded asymmetry to focus exclusively on the informative signal each calvaria bone can bring to the question of identification and characterization of ACM. Further studies should consider asymmetry and evaluate the extent to which it can complicate the assessment of ACMs based only on calvaria bones.

Further studies should consider larger samples, and include other variants with different degrees of modification so analyses and tests could be carried out at larger regional scale. This would contribute to our ability to diagnose ACM in archaeological contexts with bad preservation and provide information of major concern regarding this cultural phenomenon.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to acknowledge the Centro francés de Estudios Mexicanos y Centroamericanos (CEMCA) for facilitating the access to the archaeological material and providing the logistic facilities that enabled the acquisition of CT data. We are also deeply grateful to Isaac Barrientos Juárez and Osiris Quezada Ramírez for their valuable assistance in the transportation of the skulls of the CEMCA collections. We would like to thank the Division of Anthropology Loan Committee from the American Museum of Natural History for having allowed the CT scanning of part of the Lumholtz collection. We are thankful to Gisselle Garcia and Kristen Mable for their help in preparing the skulls so they could be safely transported. We are grateful to Jeffrey

T. Laitman for having facilitated the CT scanning and having provided a storage location for the skulls. We also thank Thomas Davies for proofreading the article. We acknowledge the LascArBx: Cluster of Excellence in Archaeological Sciences of Bordeaux (ANR-10-LABX-52) for granting SN a PhD fellowship. Finally, we also thank the ANR MESOMOBILE (ANR-14-CE31-0016), the LascArBx: Cluster of Excellence in Archaeological Sciences of Bordeaux (ANR-10-LABX-52) and the CEMCA for having funded the analyses and the mobility of SN.

REFERENCES

- Acosta, R. (2003). *L'ensemble funéraire du site de Caseta, Jalisco, Mexique*. Oxford, England: Archaeopress (B.A.R. International Series, 1197 ; Monographs in American Archaeology, 13).
- Alejandro, S., Luciano, P., Gustavo, F., Gustavo, M., Cristian, F. D., & Ivan, P. S. (2019). Does the shape make a difference? Evaluating the ethnic role of cranial modification in the Pampa-Patagonia region (Argentina) during the late Holocene. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 11(6), 2597-2610.
- AlQahtani, S. J., Hector, M. P., & Liversidge, H. M. (2010). Brief communication: the London atlas of human tooth development and eruption. *American Journal of Physical Anthropology*, 142(3), 481-490.
- Alvarado Viñas, A., & Manzanilla, L. R. (2018). Modificación cultural de la cabeza. Los casos de Teopancazgo, Teotihuacan. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica* (Vol. 1, pp. 373-386). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Ambialet, M. J. (1893). *La déformation artificielle de la tête dans la région toulousaine*. (Thèse d'exercice de Médecine), Toulouse.
- Antón, S. C., & Weinstein, K. J. (1999). Artificial cranial deformation and fossil Australians revisited. *Journal of Human Evolution*, 36(2), 195-209.
- Arbour, V. M., & Currie, P. J. (2012). Analyzing taphonomic deformation of ankylosaur skulls using retrodeformation and finite element analysis. *PloS one*, 7(6), e39323.
- Arnould, C., Carot, P., & Fauvet-Berthelot, M.-F. (1993). *Arqueología de las Lomas en la cuenca lacustre de Zacapu, Michoacán, México*. México: Centro de estudios mexicanos y centroamericanos.
- Bastir, M., Rosas, A., & O'Higgins, P. (2006). Craniofacial levels and the morphological maturation of the human skull. *Journal of Anatomy*, 209(5), 637-654.
- Bautista, J., & Ortega, A. (2005). *Catálogo de los cráneos aislados de la Colección Solórzano* (Vol. 483). Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Blackwood, B., & Danby, P. M. (1955). A study of artificial cranial deformation in New Britain. *The Journal of the Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland*, 85(1/2), 173-191.
- Blom, D. E. (2005). Embodying borders: human body modification and diversity in Tiwanaku society. *Journal of Anthropological Archaeology*, 24(1), 1-24.
- Bookstein, F. L. (1991). *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Bookstein, F. L. (1996). Biometrics, biomathematics and the morphometric synthesis. *Bulletin of Mathematical Biology*, 58(2), 313.
- Bookstein, F. L. (1997). Landmark methods for forms without landmarks: morphometrics of group differences in outline shape. *Medical Image Analysis*, 1(3), 225-243.
- Brothwell, D. R. (1975). Possible evidence of a cultural practice affecting head growth in some late Pleistocene East Asian and Australasian populations. *Journal of Archaeological Science*, 2(1), 75-77.
- Brown, P. (1981). Artificial cranial deformation: a component in the variation in Pleistocene Australian Aboriginal crania. *Archaeology in Oceania*, 16(3), 156-167.
- Brown, P. (2010). Nacurrie 1: mark of ancient Java, or a caring mother's hands, in terminal Pleistocene Australia? *Journal of Human Evolution*, 59(2), 168-187.
- Brůžek, J. (2002). A method for visual determination of sex, using the human hip bone. *American Journal of Physical Anthropology*, 117(2), 157-168.
- Brůžek, J., Santos, F., Dutailly, B., Murail, P., & Cunha, E. (2017). Validation and reliability of the sex estimation of the human os coxae using freely available DSP2 software for bioarchaeology and forensic anthropology. *American Journal of Physical Anthropology*, 164(2), 440-449.

- Bucchi, A., Püschel, T., & Manríquez, G. (2016). Artificial Cranial Modification in San Pedro de Atacama and the Loa Basin: A Quantitative Approach to Its Role as a Marker of Social Identity. *Revista Chilena de Antropología*(34).
- Buikstra, J. E., & Ubelaker, D. H. (1994). *Standards for data collection from human skeletal remains* (Vol. 44). Fayetteville, United States of America.
- Carot, P. (1993). *Le site de loma alta, lac de zacapu, michoacan (mexique)*. (Thèse de doctorat), Université de Paris 1, Panthéon-Sorbonne, Paris, France.
- Cheverud, J. M., Kohn, L. A., Konigsberg, L. W., & Leigh, S. R. (1992). Effects of fronto-occipital artificial cranial vault modification on the cranial base and face. *American Journal of Physical Anthropology*, 88(3), 323-345.
- Clark, J. L., Dobson, S. D., Antón, S. C., Hawks, J., Hunley, K. L., & Wolpoff, M. H. (2007). Identifying artificially deformed crania. *International Journal of Osteoarchaeology*, 17(6), 596-607.
- Cohen, A. S. (2016). *Creating an Empire: Local Political Change at Angamuco, Michoacan, Mexico*. (Ph. D. dissertation), University of Washington, Seattle, United States of America.
- Comas, J., & Marquer, P. (1969). Crânes déformés de l'île de Sacrificios (État de Veracruz, Mexique). *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 4(3), 209-257.
- Cucina, A., Tiesler Blos, V., & Sosa, T. S. (2002). Sex differences in oral pathologies at the Late Classic Maya site of Xcambó, Yucatán. *Dental Anthropology Journal*, 16(2), 45-51.
- Danforth, M. E. (1994). Stature change in prehistoric Maya of the Southern Lowlands. *Latin American Antiquity*, 5(3), 206-211.
- Darras, V., & Faugère, B. (2007). Chupícuaro, entre el Occidente y el Altiplano central. Un balance de los conocimientos y las nuevas aportaciones. In B. Faugère-Kalfon (Ed.), *Dinámicas culturales entre el Occidente, el Centro-Norte y la cuenca de México, del Preclásico al Epiclásico* (pp. 51-84). México: El Colegio de Michoacán - Centro de estudios mexicanos y centroamericanos.
- Delisle, F. (1880). *Contribution à l'étude des déformations artificielles du crâne*. (Thèse d'exercice de Médecine), Faculté de Médecine de Paris, Paris.
- Dembo, A., & Imbelloni, J. (1938). *Deformaciones intencionales del cuerpo humano de carácter étnico*. Buenos Aires, Argentina: José Anesi.
- Demirjian, A., Goldstein, H., & Tanner, J. M. (1973). A new system of dental age assessment. *Human Biology*, 45(2), 211-227.
- Dingwall, E. J. (1931). *Artificial cranial deformation. A contribution to the study of ethnic mutilations*. London, England: Bale.
- Dryden, I. L., & Mardia, K. V. (1998). *Statistical shape analysis*. New York, United States of America: Wiley.
- Duncan, W. N. (2009). Cranial modification among the Maya: Absence of evidence or evidence of absence. In K. Knudson & C. M. Stojanowski (Eds.), *Bioarchaeology and identity in the Americas* (pp. 177-193). Gainesville, United States of America: University Press of Florida.
- Duncan, W. N. (2018). Sellamiento ritual, envoltura y vendaje en la modificación cefálica Mesoamericana. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica. Una perspectiva continental* (Vol. 1, pp. 261-282). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Duncan, W. N., & Hofling, C. A. (2011). Why the head? Cranial modification as protection and ensoulment among the Maya. *Ancient Mesoamerica*, 22(1), 199-210.
- Durband, A. C. (2008). Artificial cranial deformation in Kow Swamp 1 and 5: A response to. *HOMO-Journal of Comparative Human Biology*, 59(4), 261-269.
- Durband, A. C. (2014). Brief communication: Artificial cranial modification in Kow Swamp and Cohuna. *American Journal of Physical Anthropology*, 155(1), 173-178.
- Emery, K. F. (2004). *Maya Zooarchaeology: New Directions in Method and Theory* (Vol. 1). Los Angeles, United States of America: Cotsen Institute of Archaeology at University of California
- Ewing, J. F. (1950). *Hyperbrachycephaly as influenced by cultural conditioning* (Vol. 23). Cambridge, United States of America: The Museum.
- Falkenburger, F. (1938). Recherches anthropologiques sur la déformation artificielle du crâne. *Journal de la Société des Américanistes*, 1-70.
- Fernandes, D., Sirak, K., Cheronet, O., Howcroft, R., Čavka, M., Los, D., Burmaz, J., Pinhasi, R., & Novak, M. (2019). Cranial deformation and genetic diversity in three adolescent male

- individuals from the Great Migration Period from Osijek, eastern Croatia. *PloS one*, *14*(8), e0216366.
- Fisher, C. T., Cohen, A. S., Solinis-Casparius, R., Pezzutti, F. L., Bush, J., Forest, M., & Torvinen, A. (2019). A Typology of Ancient Purépecha (Tarascan) Architecture from Angamuco, Michoacán, Mexico. *Latin American Antiquity*, *30*(3), 510-528.
- Fletcher, A., Pearson, J., & Ambers, J. (2008). The Manipulation of Social and Physical Identity in the Pre-Pottery Neolithic: Radiographic Evidence for Cranial Modification at Jericho and its Implications for the Plastering of Skulls. *Cambridge Archaeological Journal*, *18*(3), 309-325.
- Franciscus, R. G., & Trinkaus, E. (1988). Nasal morphology and the emergence of Homo erectus. *American Journal of Physical Anthropology*, *75*(4), 517-527.
- Friess, M., & Baylac, M. (2003). Exploring artificial cranial deformation using elliptic Fourier analysis of Procrustes aligned outlines. *American Journal of Physical Anthropology*, *122*(1), 11-22.
- García, A. B., & Tiesler, V. (2011). El aspecto físico de los dioses mayas: modelado cefálico y otras marcas corporales. *Arqueología mexicana*, *19*(112), 59-63.
- Geller, P. L. (2011). Getting a head start in life: Pre-Columbian Maya cranial modification from infancy to ancestorhood. In M. Bonogofsky (Ed.), *The Bioarchaeology of the Human Head: Decapitation, Deformation, and Decoration* (pp. 241-261). Gainesville, United States of America: University Press of Florida.
- Gervais, V. (1989). *Déformations artificielles de crânes préhispaniques au Guatemala et au Mexique*. (Thèse de doctorat), Université de Caen, Caen, France.
- Gervais, V. (2001). El uso del mecapal en Guatemala y sus consecuencias sobre la columna cervical (primeras observaciones). *Estudios de Antropología Biológica*, *10*(2), 496-501.
- Gill, G. W. (1985). Cultural implications of artificially modified human remains from Northwestern Mexico. In M. S. Foster & P. C. Weigand (Eds.), *The archaeology of West and Northwest Mesoamerica* (pp. 193-215). Boulder, United States of America: Westview Press.
- Goldstein, M. S. (1940). Cranial deformation among Texas Indians. *American Journal of Physical Anthropology*, *27*, 312-313.
- Gómez-Valdés, J. A., Bautista Martínez, J., & Romano Pacheco, A. (2007). Morfometría geométrica aplicada al estudio de la deformación cefálica intencional. *Estudios de Antropología Biológica*, *13*(1), 117-134.
- Graham, J. M., Kreutzman, J., Earl, D., Halberg, A., Samayoa, C., & Guo, X. (2005). Deformational brachycephaly in supine-sleeping infants. *The Journal of Pediatrics*, *146*(2), 253-257.
- Gunz, P. (2005). *Statistical and geometric reconstruction of hominid crania: reconstructing australopithecine ontogeny*. (Ph.D. Dissertation), Universität Wien, Wien, Österreich.
- Gunz, P., & Mitteroecker, P. (2013). Semilandmarks: a method for quantifying curves and surfaces. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, *24*(1), 103-109.
- Gunz, P., Mitteroecker, P., & Bookstein, F. L. (2005). Semilandmarks in three dimensions. In D. E. Slice (Ed.), *Modern morphometrics in physical anthropology* (pp. 73-98). New York, United States of America: Kluwer Academic / Plenum Publishers.
- Gunz, P., Mitteroecker, P., Neubauer, S., Weber, G. W., & Bookstein, F. L. (2009). Principles for the virtual reconstruction of hominin crania. *Journal of Human Evolution*, *57*(1), 48-62.
- Hakenbeck, S. (2009). 'Hunnic' modified skulls: physical appearance, identity and the transformative nature of migrations. In D. W. Sayer, Howard (Ed.), *Mortuary Practices and Social Identities in the Middle Ages* (pp. 64-80). Exeter, England: Exeter University Press.
- Hatt, G. (1915). Artificial moulding of the infant's head among the Scandinavian Lapps. *American Anthropologist*, *17*(2), 245-256.
- Holliday, D. Y. (1993). Occipital lesions: a possible cost of cradleboards. *American Journal of Physical Anthropology*, *90*(3), 283-290.
- Houston, S. D. (2006). *The memory of bones body, being, and experience among the classic Maya*. Austin, United States of America: University of Texas Press.
- Hulse, F. H. (1945). Appendix III: Skeletal Material. In K. Isabel (Ed.), *Excavations at Culiacán, Sinaloa* (pp. 187-198). Los Angeles, United States of America: University of California Press.
- Hutchison, B. L., Hutchison, L. A. D., Thompson, J. M. D., & Mitchell, E. A. (2004). Plagiocephaly and brachycephaly in the first two years of life: a prospective cohort study. *Pediatrics*, *114*(4), 970-980.

- Icart, J.-F. (1784). *Leçons pratiques sur l'art des accouchemens*. Castres.
- Jácome Hernández, C. A. (2012). *El tropel, un sitio arqueológico del clásico en el occidente Mesoamericano*. (Ph.D. Dissertation), Université de Montréal (Faculté des arts et des sciences), Montréal, Canada.
- Jácome Hernández, C. A., González Zozaya, F., & Almendros López, L. (2018). Deformación Craneal en el Occidente Mesoamericano. Nuevas evidencias e interpretaciones sobre esta práctica cultural. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica* (Vol. 2, pp. 683-707). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Jurda, M., Urbanová, P., & Králík, M. (2015). The Post-Mortem Pressure Distortion of Human Crania Uncovered in an Early Medieval Pohansko (Czech Republic) Graveyard. *International Journal of Osteoarchaeology*, 25(4), 539-549.
- Khudaverdyan, A. Y. (2011). Trepanation and artificial cranial deformations in ancient Armenia. *Anthropological Review*, 74(1), 39-55.
- Klingenberg, C. P. (2015). Analyzing fluctuating asymmetry with geometric morphometrics: concepts, methods, and applications. *Symmetry*, 7(2), 843-934.
- Klingenberg, C. P., Barluenga, M., & Meyer, A. (2002). Shape Analysis of Symmetric Structures: Quantifying Variation among Individuals and Asymmetry. *Evolution*, 56(10), 1909-1920.
- Kohn, L. A. P., Leigh, S. R., & Cheverud, J. M. (1995). Asymmetric vault modification in Hopi crania. *American Journal of Physical Anthropology*, 98(2), 173-195.
- Kuzminsky, S. C., Tung, T. A., Hubbe, M., & Villaseñor-Marchal, A. (2016). The application of 3D geometric morphometrics and laser surface scanning to investigate the standardization of cranial vault modification in the Andes. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10, 507-513.
- Laitman, J. T., & Heimbuch, R. C. (1982). The basicranium of Plio-Pleistocene hominids as an indicator of their upper respiratory systems. *American Journal of Physical Anthropology*, 59(3), 323-343.
- Lieberman, D. E., Pearson, O. M., & Mowbray, K. M. (2000). Basicranial influence on overall cranial shape. *Journal of Human Evolution*, 38(2), 291-315.
- López Austin, A. (2004). *Cuerpo humano e ideología: las concepciones de los antiguos Nahuas*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Lorentz, K. (2003). Cultures and Physical Modifications: Child Bodies in Ancient Cyprus. *Stanford Journal of Archaeology*, 2.
- Lozada, M. C. (2011). Marking ethnicity through premortem cranial modification among the Pre-Inca Chiribaya, Perú. In M. Bonogofsky (Ed.), *The Bioarchaeology of the Human Head: Decapitation, Deformation, and Decoration* (pp. 228-240). Gainesville, United States of America: University Press of Florida.
- Lumholtz, C. (1902). *Unknown Mexico: A record of five years' exploration among the tribes of the western Sierra Madre; in the tierra caliente of Tepic and Jalisco; and among the Tarascos of Michoacan* (Vol. 2). New York, United States of America: Charles Scribner's sons.
- Lumholtz, C., & Hrdlička, A. (1898). Marked human bones from a prehistoric Tarasco Indian burial place in the State of Michoacan, Mexico. *Bulletin American Museum of Natural History*, 5, 61-79.
- Lyman, R. L. (1994). *Vertebrate taphonomy*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Magitot, E. (1885). Essai sur les mutilations ethniques. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 21-25.
- Manríquez, G., González-Bergás, F. E., Salinas, J. C., & Espouey, O. (2006). Deformación intencional del cráneo en poblaciones arqueológicas de Arica, Chile: análisis preliminar de morfometría geométrica con uso de radiografías craneofaciales. *Chungará*, 38(1), 13-34.
- Marcus, J., & Flannery, K. V. (2004). The coevolution of ritual and society: New 14C dates from ancient Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(52), 18257-18261.
- Mardia, K. V., Bookstein, F. L., & Moreton, I. J. (2000). Statistical assessment of bilateral symmetry of shapes. *Biometrika*, 285-300.
- Mayall, P., & Pilbrow, V. (2018). Generalized Procrustes analysis of an ontogenetic series of modified crania: Evaluating the technique of modification in the Migration Period of Europe (4th–7th century AD). *American Journal of Physical Anthropology*, 166(1), 156-169.

- Mayall, P., & Pilbrow, V. (2019). A review of the practice of intentional cranial modification in Eurasia during the Migration Period (4th–7th c AD). *Journal of Archaeological Science*, *105*, 19-30.
- Mayall, P., Pilbrow, V., & Bitadze, L. (2017). Migrating Huns and modified heads: Eigenshape analysis comparing intentionally modified crania from Hungary and Georgia in the Migration Period of Europe. *PloS One*, *12*(2).
- Meighan, C. W., & Foote, L. J. (1968). *Excavations at Tizapan el Alto, Jalisco*. Los Angeles, United States of America: University of California, Latin American Center.
- Mitteroecker, P., & Gunz, P. (2009). Advances in geometric morphometrics. *Evolutionary Biology*, *36*(2), 235-247.
- Montiel Mendoza, M. (2018). La modificación cefálica en la Huasteca prehispánicas. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica* (Vol. 2, pp. 487-502). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Moorrees, C. F. A., Fanning, E. A., & Hunt Jr, E. E. (1963). Age variation of formation stages for ten permanent teeth. *Journal of Dental Research*, *42*(6), 1490-1502.
- Moss, M. L. (1958). The pathogenesis of artificial cranial deformation. *American Journal of Physical Anthropology*, *16*(3), 269-286.
- Motte-Florac, E. (1997). La fontanelle chez les P'urhépecha et dans le centre du Mexique; du microcosme au macrocosme, de l'homme à dieu». In I. Bianquis, D. Le Breton & C. Méchin (Eds.), *Usages culturels du corps* (pp. 187-218). Clamecy, France: L'Harmattan.
- Murail, P., Brůžek, J., Houët, F., & Cunha, E. (2005). DSP: a tool for probabilistic sex diagnosis using worldwide variability in hip-bone measurements. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, *17*(3-4), 167-176.
- Natahi, S., Coquerelle, M., Pereira, G., & Bayle, P. (2019). Neurocranial shape variation among Tarascan populations: Evidence for varying degrees in artificially modified crania in pre-Hispanic West Mexico (1200–1400 AD). *American Journal of Physical Anthropology*, *170*(3), 418-432.
- Neumann, G. K. (1942). Types of artificial cranial deformation in the eastern United States. *American Antiquity*, *7*(3), 306-310.
- Ni, X., Li, Q., Stidham, T. A., Yang, Y., Ji, Q., Jin, C., & Samiullah, K. (2019). Earliest-known intentionally deformed human cranial fossil from Asia and the initiation of hereditary hierarchy in the early Holocene. *bioRxiv*, 530907.
- O'Brien, T. G., & Stanley, A. M. (2013). Boards and cords: discriminating types of artificial cranial deformation in prehispanic South Central Andean populations. *International Journal of Osteoarchaeology*, *23*(4), 459-470.
- Okumura, M. (2014). Differences in types of artificial cranial deformation are related to differences in frequencies of cranial and oral health markers in pre-Columbian skulls from Peru. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, *9*(1), 15-26.
- Özbek, M. (2001). Cranial deformation in a subadult sample from Degirmentepe (Chalcolithic, Turkey). *American Journal of Physical Anthropology*, *115*(3), 238-244.
- Pereira, G. (1999). *Potrero de Guadalupe : anthropologie funéraire d'une communauté pré-tarasque du nord du Michoacan, Mexique*. Oxford, England: Archaeopress (B.A.R. International Series, 816 ; Monographs in American Archaeology, 5).
- Pereira, G. (2010). Arqueología de un lugar de pasaje hacia el inframundo. *TRACE. Travaux et recherches dans les Amériques du Centre*(58), 19-28.
- Pereira, G. (2018). Dinámicas poblacionales y modificación cefálica artificial en el Michoacán prehispánico. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica* (Vol. 2, pp. 649-680). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Pereira, G., Forest, M., Elsa, J., & Darras, V. (in press). Ephemeral cities? The longevity of the Postclassic Tarascan urban sites of Zacapu Malpaís and its consequences on the migration process. In M.-C. Arnauld, C. Beekman & G. Pereira (Eds.), *Ancient Mesoamerican cities: populations on the move*. Boulder, United States of America: University Press of Colorado.
- Perez, S. I. (2007). Artificial cranial deformation in South America: a geometric morphometrics approximation. *Journal of Archaeological Science*, *34*(10), 1649-1658.

- Perez, S. I., Della Negra, C., Novellino, P., González, P., Bernal, V., Cuneo, E., & Hajduk, A. (2009). Deformaciones artificiales del cráneo en cazadores-recolectores del Holoceno medio-tardío del noroeste de Patagonia. *Magallania*, 37(2), 77-90.
- Piper, C. (2002). The morphology of prehispanic cradleboards: form follows function. In K. A. Kamp (Ed.), *Children in the Prehistoric Puebloan Southwest* (pp. 41-70). Salt Lake City, : University of Utah Press, United States of America.
- Pomeroy, E., Stock, J. T., Zakrzewski, S. R., & Lahr, M. M. (2010). A metric study of three types of artificial cranial modification from north-central Peru. *International Journal of Osteoarchaeology*, 20(3), 317-334.
- Ponce, P. (2014). *Breve relación de los dioses y ritos de la gentilidad*. Barcelona, España: Linkgua
- Ricci, F., Fornai, C., Tiesler Blos, V., Rickards, O., Di Lernia, S., & Manzi, G. (2008). Evidence of artificial cranial deformation from the later prehistory of the Acacus Mts.(Southwestern Libya, Central Sahara). *International Journal of Osteoarchaeology*, 18(4), 372-391.
- Rogers, G. F. (2011). Deformational plagiocephaly, brachycephaly, and scaphocephaly. Part I: terminology, diagnosis, and etiopathogenesis. *Journal of Craniofacial Surgery*, 22(1), 9-16.
- Rohlf, F. J., & Slice, D. E. (1990). Extensions of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks. *Systematic Biology*, 39(1), 40-59.
- Romano, A. (1965). *Estudio morfológico de la deformación craneana en Tamuín, S.L.P., y en la Isla del Idolo, Veracruz*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Romano, A. (1974). Deformación cefálica intencional. In J. Comas (Ed.), *Antropología física, época prehispánica* (pp. 197-227). Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Ruiz de Alarcón, H. (1953). Tratado de las supersticiones de los naturales de esta Nueva España. In F. Paso y Troncoso (Ed.), *Tratado de las idolatrías, supersticiones, dioses, ritos, hechicerías y otras costumbres gentílicas de las razas aborígenes de México* (pp. 17-180). México: Fuente Cultural.
- Savriama, Y., & Klingenberg, C. P. (2011). Beyond bilateral symmetry: geometric morphometric methods for any type of symmetry. *BMC evolutionary biology*, 11(1), 280.
- Schlager, S. (2017). Morpho and Rvcg – Shape Analysis in R: R-Packages for Geometric Morphometrics, Shape Analysis and Surface Manipulations. In Zheng Guoyan, Li Shuo & S. Gabor (Eds.), *Statistical shape and deformation analysis* (pp. 217-256). London, England: Academic Press.
- Sharapova, S., & Razhev, D. (2011). Skull Deformation during the Iron Age in the Trans-Urals and Western Siberia. In M. Bonogofsky (Ed.), *The Bioarchaeology of the Human Head: Decapitation, Deformation, and Decoration* (pp. 203-227). Gainesville, United States of America: University press of Florida.
- Shipman, P. (1981). *Life history of a fossil: an introduction to taphonomy and paleoecology*. Cambridge, England: Harvard University Press.
- Slice, D. E. (2005). *Modern morphometrics in physical anthropology*. New York, United States of America: Kluwer Academic / Plenum Publishers.
- Spoor, C. F., Zonneveld, F. W., & Macho, G. A. (1993). Linear measurements of cortical bone and dental enamel by computed tomography: applications and problems. *American journal of physical anthropology*, 91(4), 469-484.
- Stelzer, S., Gunz, P., Neubauer, S., & Spoor, F. (2018). Using the covariation of extant hominoid upper and lower jaws to predict dental arcades of extinct hominins. *Journal of Human Evolution*, 114, 154-175.
- Stewart, T. D. (1948). The true form of the cranial deformity originally described under the name "tête trilobée.". *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 38(2), 66-72.
- Stewart, T. D. (1976). Are supra-inion depressions evidence of prophylactic trephination? *Bulletin of the History of Medicine*, 50(3), 414-434.
- Tiesler, V. (1998). *La costumbre de la deformación cefálica entre los antiguos mayas: aspectos morfológicos y culturales*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Tiesler, V. (1999). *Rasgos bioculturales entre los antiguos mayas: aspectos arqueológicos y sociales*. (Ph.D. Dissertation), Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Tiesler, V. (2012a). Studying cranial vault modifications in ancient Mesoamerica. *Journal of Anthropological Sciences*, 90, 1-26.
- Tiesler, V. (2012b). *Transformarse en maya: el modelado cefálico entre los mayas prehispánicos y coloniales*. Mérida, Yucatán, México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Tiesler, V. (2014). *The bioarchaeology of artificial cranial modifications new approaches to head shaping and its meanings in pre-Columbian Mesoamerica and beyond*. New York, United States of America: Springer.
- Tiesler, V., & Cucina, A. (2010). La deformación craneana como emblema de identidad, etnicidad y reproducción cultural entre los mayas del Clásico. In H. Hernández & M. Pool (Eds.), *Identidades y cultura material en la región maya* (pp. 111-134). Mérida, México.
- Tiesler, V., & Gómez-Valdés, J. A. (2018). Términos y taxonomía empleados en las modificaciones cefálicas. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica* (Vol. 1, pp. 83-134). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Tiesler, V., & Serrano, C. (2018). *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica*. México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Torres-Rouff, C. (2002). Cranial Vault Modification and Ethnicity in Middle Horizon San Pedro de Atacama, Chile. *Current Anthropology*, 43(1), 163-171.
- Ubelaker, D. H. (1978). *Human skeletal remains: excavation, analysis, interpretation*. Chicago, United States of America: Aldine Pub. Co.
- Uruñuela y Ladron de Guevara, G. (1994). *Análisis de los restos óseos de los entierros del fraccionamiento San Juan, Atoyac, Jalisco. Informe técnico. Volumen II. Rasgos epigenéticos, análisis dental y prácticas osteoculturales*. Universidad de las Américas-Puebla, México.
- Veeramah, K. R., Rott, A., Groß, M., van Dorp, L., López, S., Kirsanow, K., Sell, C., Blöcher, J., Wegmann, D., & Link, V. (2018). Population genomic analysis of elongated skulls reveals extensive female-biased immigration in Early Medieval Bavaria. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(13), 3494-3499.
- Weber, G. W., & Bookstein, F. L. (2011). *Virtual anthropology: a guide to a new interdisciplinary field*. Vienna, Austria: Springer Verlag.
- Weiss, P. (1981). La trepanación ritual suprainiana. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Historia y Filosofía de la Medicina*, 36, 193-211.
- Wright, L. E. (1997). Biological perspectives on the collapse of the Pasión Maya. *Ancient Mesoamerica*, 8(2), 267-273.
- Wu, X. (1961). Study on the Upper Cave man of Choukoutien. *Vertebrata Palasiatica*, 3, 181-203.
- Yon, R., Gómez, A., Morales, A. L., Argueta, A., Quiñónez, S., Secaira, C., Garzaro, P., & Suzuki, S. (2017). Modelar la cabeza: una tradición mesoamericana milenaria desde el Preclásico hasta la actualidad. *Estudios de cultura maya*, 50, 157-181.
- Zelditch, M. L., Swiderski, D. L., & Sheets, H. D. (2012). *Geometric morphometrics for biologists: a primer* (2nd ed.). London, England: Academic Press.
- Zhang, Q., Liu, P., Yeh, H. Y., Man, X., Wang, L., Zhu, H., Wang, Q., & Zhang, Q. (2019). Intentional cranial modification from the Houtaomuga Site in Jilin, China: Earliest evidence and longest in situ practice during the Neolithic Age. *American Journal of Physical Anthropology*, 169(4), 747-756.

5.3 **Identification and characterization of artificial cranial modifications among pre-Hispanic West Mesoamerican populations using covariation analysis of cranial vault thickness arrangement and calvaria bones shapes**

Sélim Natahi, Michael Coquerelle, Grégory Pereira & Priscilla Bayle

Etat : en cours d'écriture. Soumission prévue dans le courant du premier trimestre de l'année 2020 à la revue *American Journal of Physical Anthropology*

Ce troisième article a évalué dans quelle mesure les modifications artificielles du crâne pouvaient avoir une incidence sur les variations d'épaisseurs crâniennes. L'objectif a consisté aussi à tester si les régions montrant un aplatissement ou un élargissement présentaient des épaisseurs de voûte distinctes. Pour cela, nous avons pris en considération un échantillon provenant de la région du Centre-Ouest mésoaméricain et daté des périodes préclassiques (600 av. J.-C. - 300 apr. J.-C), classiques/épiclassiques (300 - 900 apr. J.-C.) et postclassiques (900 - 1500 apr. J.-C.). Nous avons ainsi quantifié la covariation entre la conformation de chaque os de la calvaria et ses variations d'épaisseurs de voûte respectives.

Les *Supplementary Information* sont présentées dans l'Annexe 3

Title: Identification and characterization of artificial cranial modifications among pre-Hispanic West Mesoamerican populations using covariation analysis of cranial vault thickness arrangement and calvaria bones shapes

Authors: Sélim Natahi¹, Michael Coquerelle², Grégory Pereira³ and Priscilla Bayle¹

Author affiliation(s):

¹ Université de Bordeaux, CNRS, MCC, UMR 5199 PACEA, Bâtiment B8, Allée Geoffroy St Hilaire, CS 50023, 33615 Pessac Cedex, France.

² Department of Medicine and Surgery (Stomatology Area), Universidad Rey Juan Carlos, 28922 Alcorcón, Spain

³ UMR 8096, Archéologie des Amériques, CNRS, Maison René-Ginouvès, 21, Allée de l'Université, 92023 Nanterre, France

Correspondence

Sélim Natahi, Université de Bordeaux, CNRS, MCC, UMR 5199 PACEA, Bâtiment B8, Allée Geoffroy St Hilaire, CS 50023, 33615 Pessac Cedex, France.

Email: selim.natahi@gmail.com

Abstract

Introduction

Together with skull shape changes, disruptions in the pattern of cranial vault thickness (CVT) have been proposed as a consequence of artificial cranial modification (ACM). However, studies of CVT patterning have been limited because of a lack of homologous landmarks on the calvaria. Here, we tested the hypothesis that a disrupted CVT pattern can help identifying ACM, and that a thickening of CVT in the unconstrained regions occurs as a compensatory mechanism to the mechanical forces generated by this practice.

Materials and Methods

We quantified the covariation between CVT and shape changes in a medical computed tomographic sample of 35 West Mesoamerican unmodified and modified individuals showing different ACM variants. Calvaria bones shape changes were analyzed using semilandmarks and 3D geometric morphometric methods. CVT was computed for each semilandmark, and covariation between shape and CVT was evaluated using two-blocks partial least square analysis.

Results

We found a covariation between CVT and shape changes produced by different types of ACM in the frontal and occipital bones, but in opposite directions. Indeed, thinner CVT associates with the flattening of the frontal squama, while thicker CVT connects to the flattening of the occipital bun and squama. We also measured thicker CVT in unconstrained regions such as the parietal bones. However, this compensatory mechanism relationship is not observed in all ACM groups.

Discussion

CVT can substantially help to identify the practice of an ACM, and to differentiate ACM variants described in West Mesoamerica. The discrepancies observed between bones that underwent similar forces can result from their different mechanical properties.

KEYWORDS Artificial cranial modification, Cranial vault thickness, Skull shape, 3D geometric morphometrics, Mesoamerican Archaeology

1. INTRODUCTION

Artificial Cranial Modifications (ACM) are cultural technical processes whereby a specific cephalic device (independent or associated with a cradle system) is implemented upon a newborn's head in order to modify its shape during ontogeny. Their specific design are meant to shape the individual's skull in a certain way, granting him an identity that can either relates to ethnic (e.g., Özbek, 2001; Torres-Rouff, 2002; Blom, 2005; Ricci et al., 2008; Hakenbeck, 2009; Lozada, 2011; Tiesler, 2014; Mayall et al., 2017; Fernandes et al., 2019; Mayall & Pilbrow, 2019), social (e.g., Marcus & Flannery, 2004; Ricci et al., 2008; Geller, 2011; Khudaverdyan, 2011; Sharapova & Razhev, 2011; Okumura, 2014), occupational (e.g., Geller, 2004; Geller, 2011), religious (e.g., Houston, 2006; Fletcher et al., 2008; Tiesler & Cucina, 2010; García & Tiesler, 2011) or aesthetic values (e.g., Dingwall, 1931; Lorentz, 2003). Because they can provide valuable information regarding the social position or the ethnic belonging of an individual, identifying and differentiating forms are of major concerns. Broca (1875) and Virchow (1888) were the first to suggest that ACM classification should rest upon the identification of the cephalic device involved in the modification process rather than on a simple vault's examination (as proposed by Morton, 1839; Gosse, 1855; Lenhossék, 1878; Topinard, 1879). Thus, visual classification systems were subsequently developed (Hrdlička, 1912; Dembo & Imbelloni, 1938; Falkenburger, 1938; Neumann, 1942; Weiss, 1962). In order to identify and characterize ACM variants, some studies rely on the examination of the morphological features described in the aforementioned visual classification systems (e.g., Tiesler, 1998; Pereira, 1999; Torres-Rouff, 2002; Varela & Cocilovo, 2002; Knudson & Torres-Rouff, 2009; Tiesler, 2010) while others also address morphometrics as a proxy (e.g., Romano, 1965; Comas & Marquer, 1969; Romano, 1974; Clark et al., 2007; Pomeroy et al., 2010; O'Brien & Stanley, 2013). Both systems aim to identify and differentiate the forms and/or shapes of some individuals with modified neurocrania in order to infer on the way the ACM was performed. It involves discussing the type of cephalic devices, its location upon the child's head, the initiation time and the duration of the practice (e.g., Ambialet, 1893; Ewing, 1950;

Blackwood & Danby, 1955; Lieberman et al., 2000; Hutchison et al., 2004; Graham et al., 2005; Rogers, 2011; Tiesler, 2014).

Conjointly with the technological improvements of imaging techniques, some authors have identified a thinning of Cranial Vault Thickness (i.e., CVT) in areas where they suspect that external constraining forces produced by the cephalic device were exerting (Crubézy, 1986; Maureille et al., 1995; Khonsari et al., 2013; Boman et al., 2016). Thus, they have proposed to address the questions of characterizing the type of cephalic device and subsequently identifying the ACM technique using CVT. Together with CVT thinning, some authors (Khonsari et al., 2013; Fernandes et al., 2019) have also identified a thickening of the cranial vault in regions supposedly free of any constraints, pointing to a plausible compensatory mechanism of the CVT thinning occurring in the restrained anatomical areas. Khonsari et al. (2013) are the only ones to provide a series of CVT measurements in order to support their comparisons between individuals with different ACM and individuals from an unmodified group (five variables expressing the thickness of the three layers conjointly were measured on the vault). They have found significant differences in CVT (i.e., total thickness) for four of the five variables they have considered. The calvaria lacking of homologous landmarks, increasing substantially the number of descriptors for CVT is challenging and prevents consequently from a comprehensive and representative vision of the arrangement of CVT in individuals with ACM.

The CVT corresponds to the distance between ectocranial and endocranial limits (as clearly defined in Anzelmo et al., 2015; Eisová et al., 2016; Rangel de Lázaro et al., 2018). The term refers to the thickness of the three layers composing the vault: the inner and outer tables, and a layer composed of cancellous bone located in between, the diploe. While modern humans differ from earlier taxa from the genus *Homo* exhibiting thicker cranial vaults (e.g., Weidenreich, 1943; Nawrocki, 1991; Gauld, 1996; Lieberman, 1996; Balzeau, 2013; Copes & Kimbel, 2016), differences between and within modern humans populations have also been observed. When CVT is compared between groups with different geographic origins, significant differences are observed (e.g., Ross et al., 1976; Brown et al., 1979; Brown, 1994; Hwang et al., 2000; Moreira-Gonzalez et al., 2006; Copes, 2012). As mentioned by Baab et al. (2018), it is still unclear whether CVT would be a reliable proxy mirroring neutral genetic variation among modern human populations.

Sex is also purported to contribute to the variation in CVT observed among modern humans since some studies have found differences, yet rarely significant, in CVT arrangement

according to the individuals' sex (e.g., Twiesselmann, 1941; Roche, 1953; Adeloje et al., 1975; Olivier, 1975; Ross et al., 1976; Lestrel & Roche, 1979; Smith et al., 1985; Ishida & Dodo, 1990; Nawrocki, 1991; Brown, 1994; Hwang et al., 2000; Moreira-Gonzalez et al., 2006; Hatipoglu et al., 2008; Shashanka, 2011; Copes, 2012; Marsh, 2013; De Boer et al., 2016; Lillie et al., 2016; Farzana et al., 2018). Other authors contrast those results since they report no difference of CVT between female and male individuals (Brown et al., 1979; Smith et al., 1985; Loder, 1996; Ross et al., 1998; Lynnerup, 2001; Jung et al., 2003; Anzelmo et al., 2015). Those discrepancies may be caused by some differential effects of the sexual dimorphism on CVT arrangements between modern humans populations (e.g., Copes, 2012 has observed significant differences in terms of CVT between females and males in Eskimo populations while Oceania populations expressed none). As demonstrated by Anzelmo et al. (2015), the age of the individual also accounts for differences in CVT measurements though the adult CVT arrangement is established early in ontogeny. Thus, the results of their analyses stated that age is significantly associated with CVT variation until the end of adolescence (i.e., 17 years in their study). Allometry has also been presented as having a putative influence on CVT since among certain extant primates the total CVT presents a positive allometric relationship with the overall size (e.g., Gauld, 1996; Copes, 2016; Copes & Kimbel, 2016). However the strength of this relationship in a group composed of modern humans is weak (Lynnerup, 2001; Antón et al., 2007; Copes, 2012; Marsh, 2013; De Boer et al., 2016).

Investigations among modern humans have also identified a systemic factor (Lieberman, 1996) and more localized ones (Anzelmo et al., 2015) as the underlying mechanisms that likely account for the differences of CVT arrangements. Lieberman (1996) has proposed that most of the variation observed among individuals was directly influenced by epigenetic factors, stressing that thicker CVT patterns are likely to ensue from high levels of sustained exercises. High activities would result in increased systemic hormones secretion and circulation, causing higher osteogenic activities and subsequently thicker vaults. Despite being challenged by Copes et al. (2018) who evidenced, in mice, that postcranial robusticity and CVT were independent from the levels of physical activity, this hypothesis is still corroborated by the results presented in the study of Baab et al. (2018). However, Baab et al. (2018) have evidenced weak or no correlation between the cortical bone thicknesses values of both cranial vault and long bones. Therefore, the authors have suggested that factors others than levels of activity likely account for the major part of the observed variation in cortical bones thickness among modern humans.

Anzelmo et al. (2015) have proposed that the arrangement of CVT may respond to varying factors that occur differentially during ontogeny. They suggest that CVT is formerly driven by the forces the growing brain is exerting on the endocranial side until it achieves its maturity (i.e., by 6 years the brain is at approximately 95% of its final volume which is considered complete between 11.5 - 14.5 years old; Giedd et al., 1999; Lenroot & Giedd, 2006). Therefore, the increase of CVT up to the age of 6 is interpreted by Anzelmo et al. (2015) in accordance with the functional matrix hypothesis proposed by Moss (1962, 1968), suggesting that the interrelationships of brain, dura mater and endocranial periost would affect the osteogenic activities of the endocranial surface during ontogeny (Moss & Young, 1960). Brain's maturity once achieved, Anzelmo et al. (2015) are proposing that CVT would respond to other functional matrices such as the periosteal muscular matrices involved in masticatory activities. Indeed, some studies have interpreted differences of CVT arrangement in rodents as ensuing from differential diets (i.e., soft versus hard food items; Menegaz et al., 2010; Copes, 2012). An increase of CVT jointly with higher masticatory loads due to hard diet consumption has been identified in rabbits (Menegaz et al., 2010) while a trend for a thinner arrangement has been documented in mice fed with soft food (Copes, 2012).

Similarly to masticatory activities, ACM can be regarded as an epigenetic stimulus (e.g., Cheverud & Midkiff, 1992; Martínez-Abadías et al., 2009) and its performance has been presented as causing disruptive effects on the arrangement of CVT as observed in some studies (Crubézy, 1986; Maureille et al., 1995; Khonsari et al., 2013; Boman et al., 2016; Baab et al., 2018). Some of them are proposing that the disrupted arrangement is informative for identifying and characterizing ACM (Crubézy, 1986; Maureille et al., 1995; Khonsari et al., 2013; Boman et al., 2016). In the present study, we are looking to test these assertions using semilandmarks as homologous points (Gunz et al., 2005; Gunz & Mitteroecker, 2013) to compute multiple variables of CVT. Secondly, we will also seek to test the hypothesis that a thickening of CVT in the unconstrained regions occurs as a compensatory mechanism to the mechanical forces generated by the ACM. To answer those two objectives, we will quantify the covariation between CVT and shape changes using geometric morphometrics among a sample of individuals with different ACM variants and a control group composed of unmodified individuals. They are all coming from the same region and fall within a 400 BC – 1600 AD interval of time.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Materials

As previously mentioned, several factors are accounting for variation in CVT arrangement. This statement implies to control as far as possible confounding factors such as population membership (e.g., Moreira-Gonzalez et al., 2006; Copes, 2012; Marsh, 2013), diet (e.g., Menegaz et al., 2010; Copes, 2012), physical activities (Lieberman, 1996), age-at-death (e.g., Marsh, 2013; Anzelmo et al., 2015), sex (e.g., Lynnerup, 2001) as well as pathological conditions (e.g., Anderson et al., 1970). For that reason, our sample was restricted to pre-Hispanic populations from part of the west Mesoamerican area (i.e., more specifically to the actual two Mexican states of Michoacán and Guanajuato; Table 1). The individuals are coming from different archaeological sites located in three different neighboring regions: the valley of Acámbaro and the basins of Zacapu and Pátzcuaro (Figure 1). They belong to three different periods: the Late Preclassic (400 - 100 BC; Darras & Faugère, 2007) for the Acámbaro valley, the Early Classic (0 - 350 AD; Pereira, 1999) and the Middle Postclassic (1200 - 1400 AD; Pereira et al., in press) for the Zacapu basin and the Middle and the Late Postclassic – Early Colonial (1200 - 1600 AD; Cohen, 2016) for the Pátzcuaro basin. Archaeological evidences are pointing to similar diets among the populations (Manin, 2015) as well as comparable levels of physical activities (the individuals from the three considered regions are sedentary and it is not likely they express differences of level activities as important as observed between hunter-gatherers and sedentary populations). Consecutively to the results presented in Anzelmo et al. (2015), we have only included adult individuals in our analyses. We have considered adults all the individuals displaying a complete dental maturity and a fully closed spheno-occipital synchondrosis (Demirjian et al., 1973; Scheuer & Black, 2000). Some individuals (i.e., the Lumholtz collection; see Natahi et al., 2019) are lacking pelvic bones, which precludes reliable sex assignments for them. For the individuals with preserved pelvis, sex has been determined (Table 1) via a visual examination (Brůžek, 2002) and a morphometric procedure (Murail et al., 2005; Brůžek et al., 2017).

Table 1 List of individuals.

Id	Site	Region	Sex	Age	ACM	Period
JR24_sep1	JR24	Acámbaro Valley	F	Adult	Tabular oblique	Late Preclassic (400 BC – 300 AD)
Angamuco_sep14_ind2	Angamuco	Pátzcuaro Basin	F	Adult	Tabular Erect plano lambdaoid	Late Postclassic (1400 – 1600 AD)
Angamuco_sep8	Angamuco	Pátzcuaro Basin	M	Adult	Tabular Erect plano lambdaoid	Late Postclassic (1400 – 1600 AD)
Angamuco_sep9_ind1	Angamuco	Pátzcuaro Basin	M	Adult	Tabular Erect plano lambdaoid	Late Postclassic (1400 – 1600 AD)
Loma_Alta_sep27	Loma Alta	Zacapu Basin	F	Adult	Tabular Erect plano lambdaoid	Late Preclassic (400 BC – 300 AD)
JR24_sep6	JR24	Acámbaro Valley	M	Adult	Tabular erect	Late Preclassic (400 BC – 300 AD)
JR24_sep8	JR24	Acámbaro Valley	M	Adult	Tabular erect	Late Preclassic (400 BC – 300 AD)
Tarascan135	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Fronto obelionic	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan151	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Fronto obelionic	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan154	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Fronto obelionic	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan155	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Fronto obelionic	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan156	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Fronto obelionic	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan157	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Fronto obelionic	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan158	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Fronto obelionic	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich215_sep43_ind2	Guadalupe	Zacapu Basin	F	Adult	Fronto obelionic	Classic (300 – 600 AD)
Tarascan130	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan137	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan141	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan149	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan150	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan160	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan165	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan173	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan174	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Tarascan211	El Palacio	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep20	Malpais Prieto	Zacapu Basin	M	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep24	Malpais Prieto	Zacapu Basin	F	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep34_ind1	Malpais Prieto	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep34_ind3	Malpais Prieto	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep34_ind4	Malpais Prieto	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep37_ind2	Malpais Prieto	Zacapu Basin	M	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep37_ind3	Malpais Prieto	Zacapu Basin	NA	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep37_ind6	Malpais Prieto	Zacapu Basin	F	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep40	Malpais Prieto	Zacapu Basin	M	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)
Mich31_sep42	Malpais Prieto	Zacapu Basin	F	Adult	Control Group	Middle Postclassic (1200 – 1400 AD)

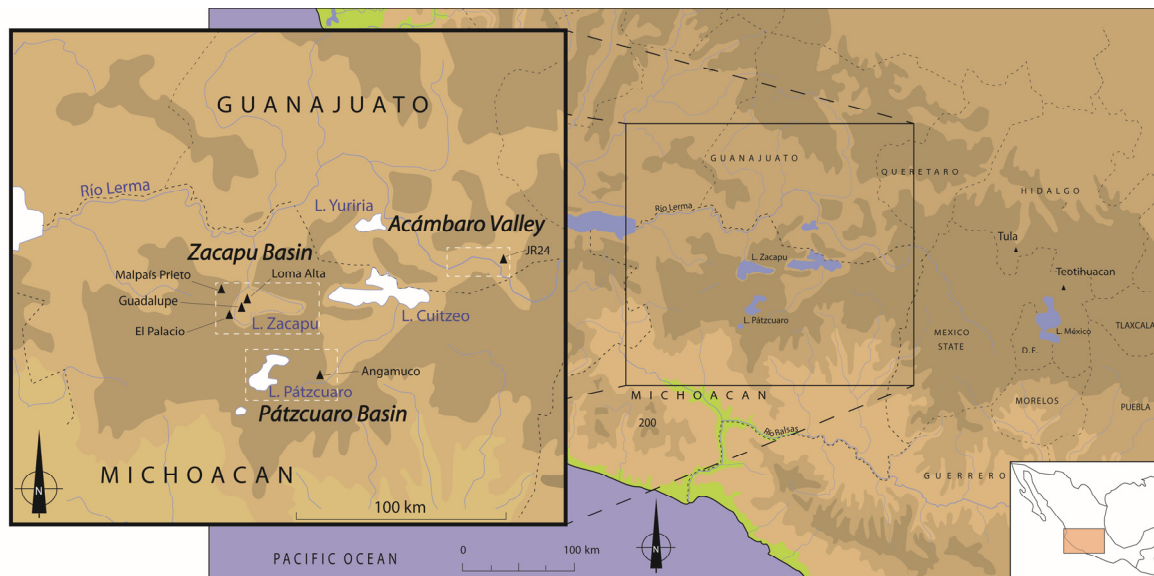


FIGURE 1 Locations of the sites.

For the aforementioned reasons we have limited our sample to 35 individuals among which eight were identified with the fronto-obelionic variant of ACM (Pereira, 1999, 2018; Natahi et al., 2019), three with the tabular erect fronto-occipital type, three with the tabular erect plano-lambdoid type, and one with the tabular oblique type (in accordance with the classification system of Dembo & Imbelloni, 1938).. The rest of the sample (i.e., 20 individuals) was used as a control group. Their assignment to the control group is relying on the results presented in Natahi et al. (2019). All individuals from El Palacio and Malpaís Prieto falling within the 95% confidence ellipse of the aforementioned study have been assigned to the control group.

All individuals were scanned using medical computed tomography (CT-scan) with the scanning parameters detailed in Natahi et al. (in prep) and presented here in the supporting information (i.e., SI 1). Semimanual segmentation of the cranial vault bones using the HMH procedure (Half Maximum Height ; Spoor et al., 1993) and surface rendering were performed in Avizo (Visualization Sciences Group).

2.2 Quantifying shape changes

In order to finely evaluate the extent to which shape changes ensuing from ACM affect the arrangements of CVT, we have studied separately the calvaria bones shape changes and their respective pattern of CVT. Firstly, we have created a template for the entire calvaria as detailed in Natahi et al. (in prep). The digitalization of the 3D-template and the consecutive warping of the semilandmarks onto each skull were realized via the software Viewbox (dHAL software, Kifissia, Greece). Secondly, once the semilandmarks warped on every individual, they were

partitioned into four sliding groups: the frontal, the left parietal, the right parietal and the occipital bones (Figure 2; Table 2). Thereafter, we used the R “Morpho” package (Schlager, 2017) to perform the sliding of the semilandmarks. Each four group was slid separately along the tangent to the curve (i.e., curve semilandmarks) or the surface (i.e., surface semilandmarks) so the bending energy of the TPS interpolation between each specimen and the sample Procrustes average was minimized (Bookstein, 1997; Gunz, 2005; Gunz & Mitteroecker, 2013). The semilandmarks (once slid) combined with the traditional landmarks have been converted into Procrustes shape coordinates by Generalized Procrustes Analysis (GPA: Rohlf & Slice, 1990; Bookstein, 1996; Mitteroecker & Gunz, 2009). Each configuration was scaled to have a unit Centroid Size (CS: square root of the summed squared Euclidean distances from all semilandmarks to their centroid; Dryden & Mardia, 1998). Then all configurations are translated and rotated to minimize the overall sum of the squared distances between the corresponding landmarks and semilandmarks.

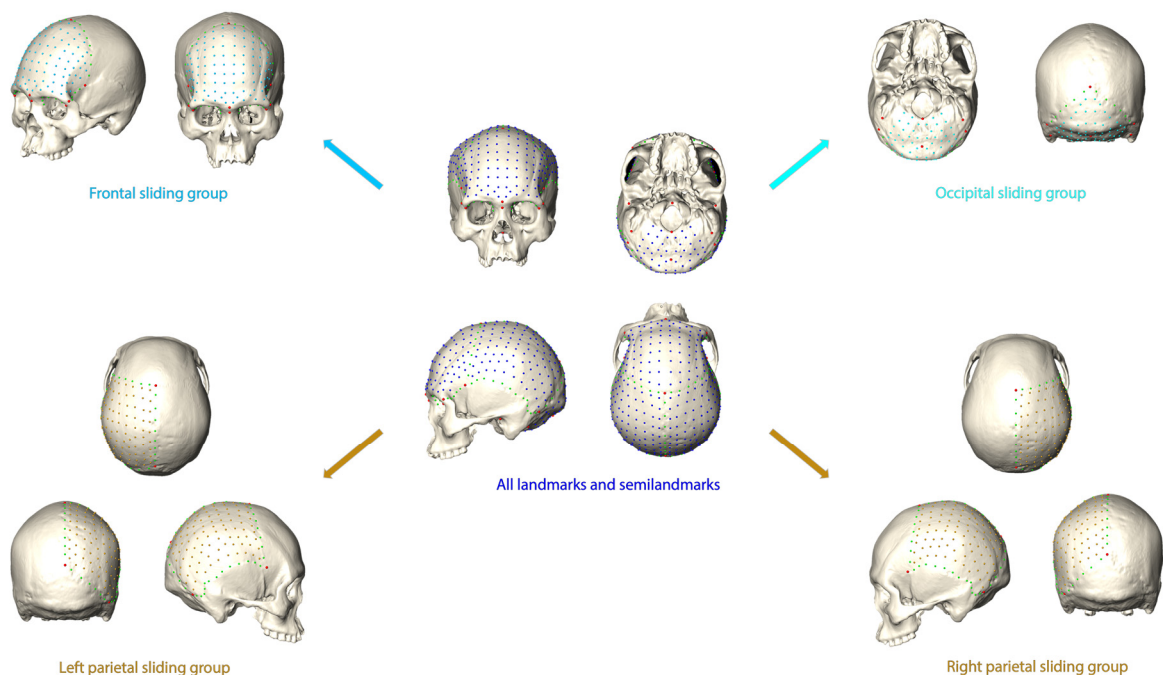


FIGURE 2 The four groups of sliding semilandmarks considered.

TABLE 2 List of landmarks, curve semilandmarks and surface semilandmarks.

No	Anatomical landmarks	Label (see Figure 2)	Unilateral/Bilateral	Comments
1	Nasion	n	Unilateral	
2	Glabella	g	Unilateral	
3	Bregma	b	Unilateral	
4	Lambda	l	Unilateral	
5	Inion	i	Unilateral	
6	Opisthion	op	Unilateral	
7	Basion	ba	Unilateral	
8, 9	Frontomalare temporal	fmt	Bilateral	
10, 11	Frontomalare orbital	fmo	Bilateral	
12, 13	Porion	po	Bilateral	
14, 15	Mastoid notch	mn	Bilateral	
12,18	Asterion	as	Bilateral	
13,19	Pterion	pt	Bilateral	
Curve semilandmarks				
20:25, 26:31	Inferior orbital margin (n= 6 x 2)		Bilateral	Rim of the orbital opening to frontomalare orbital
32:36, 37:41	Sphenofrontal suture (n= 5 x 2)		Bilateral	Cranial suture between sphenoid and frontal bone
42:49, 50:57	Coronal suture (n= 8 x 2)		Bilateral	Cranial suture separating the frontal from the two parietal bones
42:49, 50:57	Squamosal suture (n= 13 x 2)		Bilateral	Cranial suture separating the temporal squama from the two parietal bones
84:89, 90:95	Lambdoid suture (n= 6 x 2)		Bilateral	Cranial suture separating the occipital from the two parietal bones
96:103	Sagittal suture (n= 8)		Bilateral	Cranial suture expanding from bregma to lambda
Surface semilandmarks				
104:154, 284:334	Frontal patch (n= 51 x 2)		Bilateral	
155:253, 335:433	Parietal vault patch (n= 99 x 2)		Bilateral	
254:283, 434:463	occipital vault patch (n= 30 x 2)		Bilateral	

2.3 Quantifying CVT variation

To calculate CVT we used CT-scans. Recently, Del Olmo Lianes et al. (2019) proposed to compute CVT variation using a magnetic caliper. However, because of the important amount of existing variation within our sample (i.e. different types of ACM and unmodified individuals are included), the use of grids with regular intervals (e.g., Ebraheim et al., 1996; Hwang et al., 1999; Jung et al., 2003; Moreira-Gonzalez et al., 2006; Del Olmo Lianes et al., 2019) between the registered points, is likely to cause an homology issue between specimens with very different shapes (Marsh, 2013). In order to address it, we segmented the osseous tissue and the endocast. The endocast corresponds to the negative of the imprints the brain and the surroundings tissues left on the endocranial surface of the inner table (Neubauer et al., 2010). They were virtually extracted using the Endex software (Subsol et al., 2010) that allows an automatic segmentation of the endocranial cavity. Thus, we calculated the CVT as the distance between the ectocranial surface of the calvaria (i.e., the mesh of the calvaria) and its respective endocast surface.

In order to obtain several measures of CVT, we used the semilandmarks once homologous (i.e., after their sliding procedure) to compute it. The distance from each semilandmark to the endocranial surface was calculated via a procedure implemented in the R “Morpho” package (Schlager, 2017) that uses a kd-tree algorithm to find the closest points on a mesh. Those distances represent our variables of CVT (i.e., SemiLandmarks Cranial Vault Thickness or SL_CVT). We used the Cube Root of the Endocranial Volume (CR_EV) as size-variable (e.g., Balzeau et al., 2014; Gunz, 2015) to standardize each SL_CVT (i.e., dividing each by the CR_EV). Thereafter, the standardized CVT measurements were centered by their respective means.

Finally, we used density plots (e.g., Anzelmo et al., 2015) and 3D heatmaps to illustrate the topographic CVT patterns of variation (e.g., Beaudet et al., 2018).

2.4 Quantifying covariation

In order to explore the extent to which ACM may induce a re-arrangement of CVT, we measured the covariation between the CVT and the shape of the calvaria bones in our sample using two-block partial least-squares analyses (2B-PLS or PLS; Rohlf & Corti, 2000). It was

measured for the pooled sample for the frontal and occipital bones. In the case of the two parietal bones, the analyses were performed separately for the fronto-obelionic group since it is the only group for which constraining forces have been directly exerting upon these bones. In the other cases of ACM considered here, the posterior compression is limited to the occipital bone and slightly affect the posterior margins of the parietal bones (Pereira, 2018). Therefore, compression forces (resulting in thinner CVT) and compensation phenomenon (resulting in thicker CVT) are likely to both have occurred within these bones and requires analyzing them individually from the other ACM types.

One block of variables was composed of the CVT variables (i.e., SL_CVT) and the other one of the Procrustes shape coordinates of each isolated calvaria bone. 2D plots of the pair of vectors (one for each block of variables) corresponding to the linear combinations of SL_CVT and shape coordinates (i.e., the singular warps or SW) have been represented. In order to help visualizing the patterns of covariation of bone shape with SL_CVT, we computed the extreme shapes and CVT distribution ($\pm 2sd$) along the SW of each bone. In order to visualize shape variation along the SW we created five 3D digital meshes (one for each of the five bones considered) that were warped toward the Procrustes grand mean using a thin plate spline (TPS) interpolation function (Bookstein, 1991). Thereafter, the surfaces computed for the Procrustes grand means configurations were used to visualize shape variation along the SWs. The shape changes associated to the singular value of a SW were computed as TPS deformations of each bone grand means plus or minus the singular value.

3. RESULTS

3.1 The frontal bone

Figure 3 displays the association of the shape frontal bone variable with the CVT variables (SL_CVT) for the first singular warp (SW1). The biplot shows a differentiation of individuals with ACM from the individuals belonging to the control group along the SW1 of the two blocks. The control group expresses the lowest values for the SW1 Block 1 – Frontal shape and the SW1 Block 2 – Frontal SL_CVT. Furthermore, their dispersion reveals a weak association of the shape and CVT within this control group. On the contrary, the group represented by the fronto-obelionic ACM presents the highest values for the two blocks and a positive association between them. The tabular erect groups exhibits an intermediate position between the control group and the fronto-obelionic group. The scores for the fronto-obelionic group along the SW1

Block 1 – Frontal shape clearly differ from those of the control group while along SW1 Block 2 – Frontal SL_CVT, there is a slight overlap. The tabular erect plano-lambdoid group is the ACM group that displays the lowest SW1 scores for the two blocks, with one individual located within the control group and the two others expressing values close to this group for the SW1 Block 1 – Frontal shape and similar values for the SW1 Block 2 – Frontal SL_CVT (Figure 3).

When examining the extreme shapes computed along the SW1 Block 1 – Frontal shape, the negative shapes observed for the negative SW1 values (-2 sd) are defined by rounder frontal squama combined with an increased height and more projected anterior structures (i.e., glabellar region, supraorbital ridges). The shapes associated with the positive values (+2 sd) are characterized by a flattening of the frontal squama combined with lateral expansion of the temporal lines and of the surroundings of the coronal suture. For the negative values of the SW1 Block 2 – Frontal SL_CVT, the distribution of the Frontal SL_CVT is unimodal (Figure 4). Summary statistics indicates a mean of $3.4 \cdot 10^{-4}$ (Table 3). The positive values exhibit a more homogenous SL_CVT distribution with a mean of $-3.4 \cdot 10^{-4}$ (Table 3).

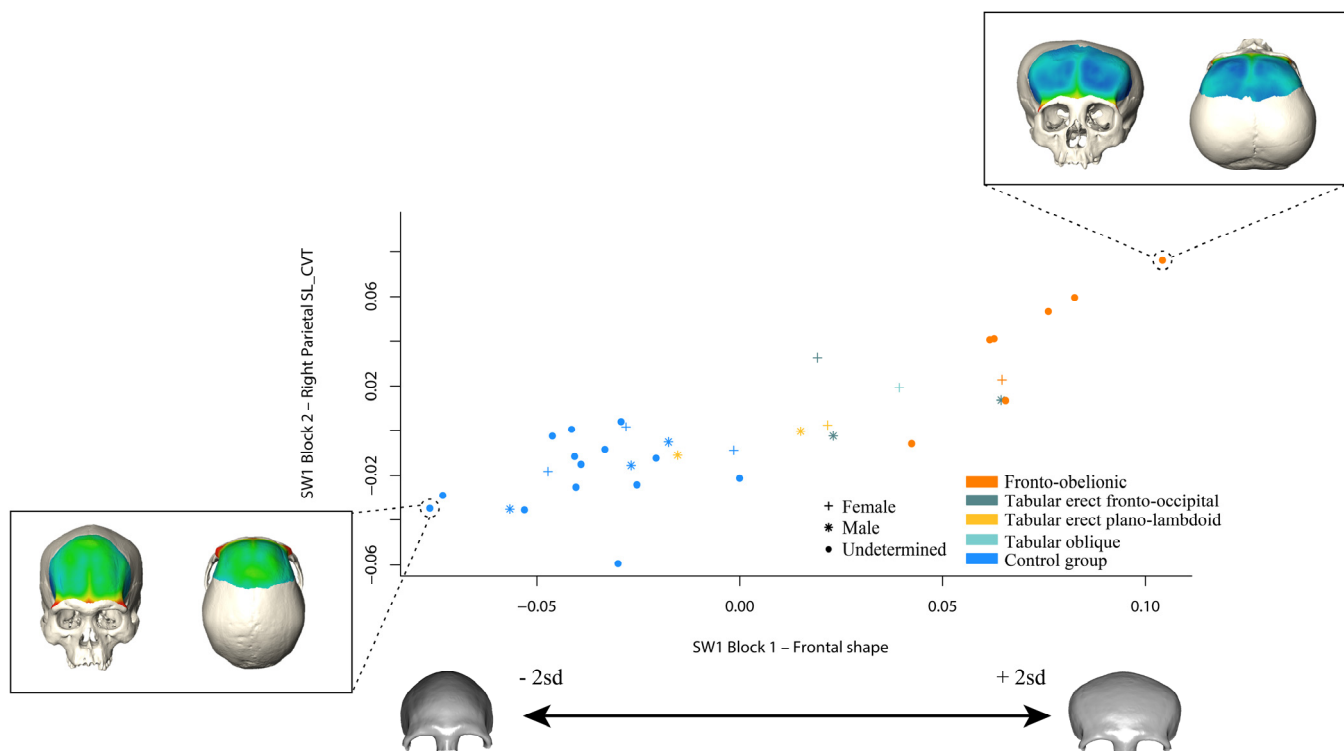


FIGURE 3 Two-blocks partial least squares (PLS) analysis computed for the first pair of singular warps (SW1) between the Procrustes shape coordinates of the frontal bone (Block 1) and their corresponding CVT values (Block 2). The variation of shape along SW1 is visualized by warping the mesh of the mean shape towards the negative and positive values (+/- 2sd) of the first singular warp. Changes of CVT arrangement along SW1 is represented by generating heatmaps of CVT variation for two individuals.

TABLE 3 Summary statistics of the CVT measures associated to the +/- 2sd scores along the SW1.

Frontal		
	CVT for -2sd along SW1	CVT for +2sd along SW1
Min	-0.0206	-0.0174
1st Quartile	-0.0043	-0.0052
Median	0.0015	-0.0012
Mean	0.0003	-0.0003
3rd Quartile	0.0048	0.0036
Max	0.0124	0.0292

Left Parietal (fronto-obelionic group excluded)			Right Parietal (fronto-obelionic group excluded)		
	CVT for - 2sd along SW1	CVT for +2sd along SW1		CVT for - 2sd along SW1	CVT for +2sd along SW1
Min	-0.0118	-0.0116	Min	-0.0136	-0.0142
1st Quartile	-0.0033	-0.0028	1st Quartile	-0.0037	-0.0027
Median	-0.0003	0.0003	Median	-0.0005	0.0006
Mean	-0.0002	0.0003	Mean	-0.0003	0.0003
3rd Quartile	0.0034	0.0041	3rd Quartile	0.0035	0.0030
Max	0.0107	0.0127	Max	0.0113	0.0155

Left Parietal (only the fronto-obelionic and the control groups are considered)			Right Parietal (only the fronto-obelionic and the control groups are considered)		
	CVT for - 2sd along SW1	CVT for +2sd along SW1		CVT for - 2sd along SW1	CVT for +2sd along SW1
Min	-0.0123	-0.0130	Min	-0.0190	-0.0149
1st Quartile	-0.0026	-0.0029	1st Quartile	-0.0037	-0.0031
Median	0.0007	-0.0002	Median	0.0002	0.0009
Mean	0.0001	-0.0003	Mean	-0.0002	0.0002
3rd Quartile	0.0037	0.0034	3rd Quartile	0.0038	0.0038
Max	0.0108	0.0134	Max	0.0106	0.0162

Occipital		
	CVT for -2sd along SW1	CVT for +2sd along SW1
Min	-0.0375	-0.0426
1st Quartile	-0.0119	-0.0094
Median	0.0014	0.0006
Mean	0.0012	0.0001
3rd Quartile	0.0138	0.0109
Max	0.0389	0.0391

3.2 The left parietal bone

Figure 5.a displays the association of the shape of the left parietal bone with the SL_CVT block along SW1. Individuals belonging to the control group display the lowest values along the SW1 of the two blocks with a positive association. The tabular erect fronto-occipital group express an heterogeneous combination of scores since two individuals from this group fall among the highest values of the sample while a third individual clusters with the individuals of the control group. The tabular erect plano-lambdoid group shows an intermediate position between the control group and the two individuals of the tabular erect fronto-occipital group that exhibit the highest scores. The tabular oblique individual differs from the control group along the SW1 Block 1 – Left Parietal shape and shows a similar score to that of the tabular erect plano-lambdoid sample. For the SW1 Block 2 – Left Parietal SL_CVT this individual slightly differs from the scores of the control group and tabular erect plano-lambdoid group.

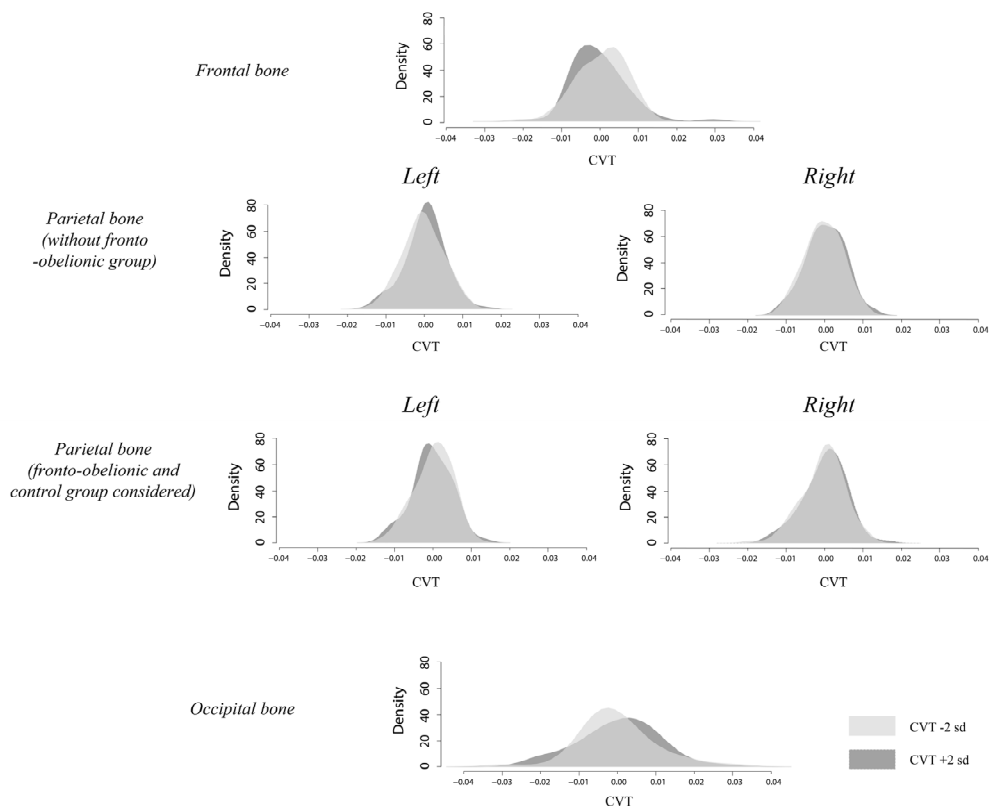


FIGURE 4 Density plot showing the distribution of CVT associated to +/- 2sd along the SW1 for four different bones. For the parietal bones two density plots were generated: one without the fronto-obelionic group and one using exclusively the fronto-obelionic group and the control group.

The shape changes associated with the negative values (-2 sd) of the SW1 Block 1 – Left Parietal shape show an elongated parietal in the antero-posterior dimension. The shapes that characterize the positive values (+2 sd) show a lateral protrusion of the parietal boss, a reduced length as well as an increased height of the parietal. Changes relative to the coronal and lamboid sutures can also be observed with the coronal suture being displaced posteriorly while the lambdoid suture shows a forward motion. The distribution of CVT associated to the lowest scores of SW1 shows the lowest values of CVT with a mean $-1.6 \cdot 10^{-4}$ while the highest scores along the SW1 of the two blocks evidence higher values of CVT with a mean of $3.3 \cdot 10^{-4}$ (Table 3).

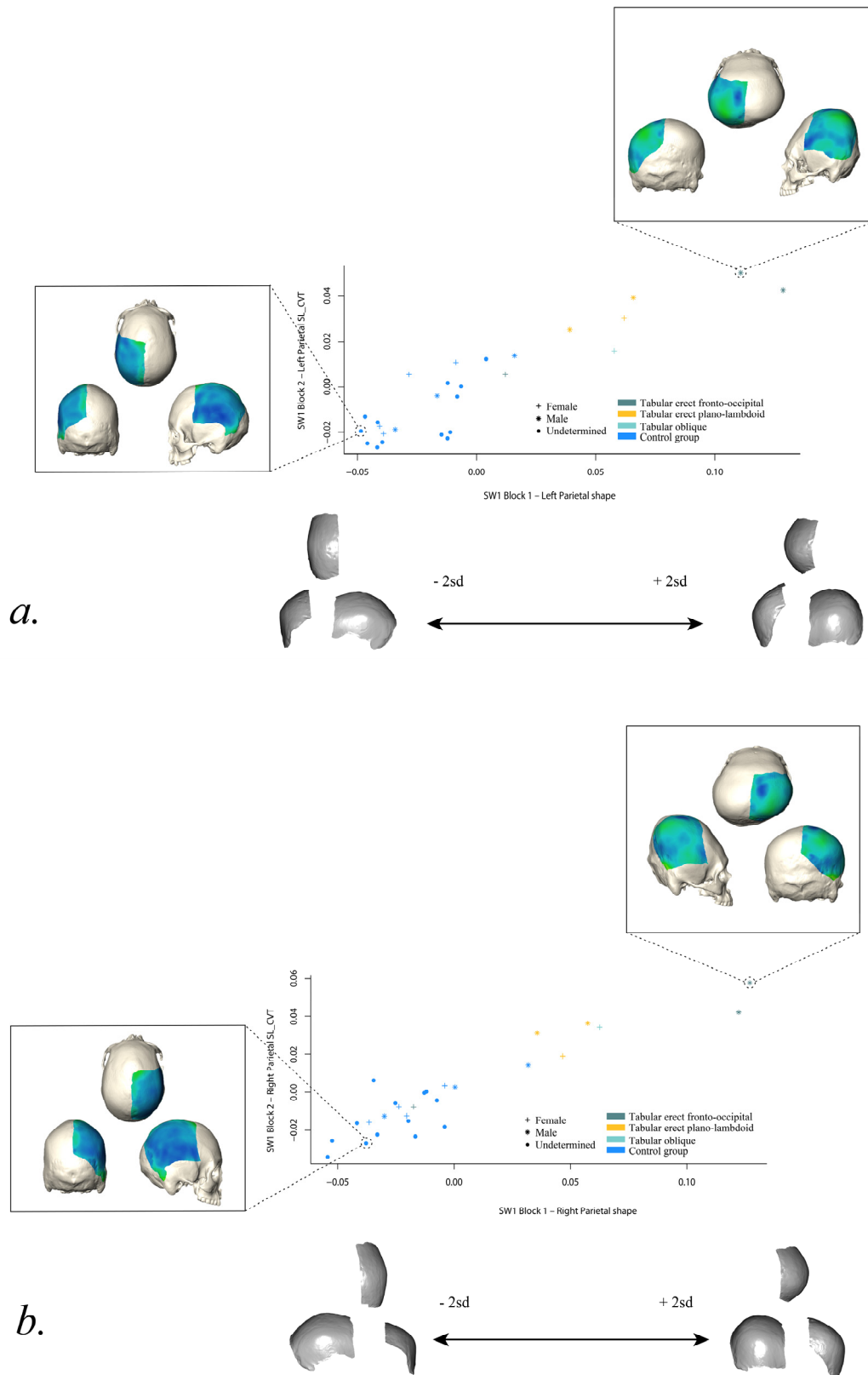


FIGURE 5 Two-blocks partial least squares (PLS) analysis computed for the first pair of singular warps (SW1) between the Procrustes shape coordinates of the left (a.) and right (b.) parietal bones (Block 1) and their corresponding CVT values (Block 2). Individuals belonging to the fronto-obelionic group have been excluded. The variation of shape along SW1 is visualized by warping the mesh of the mean shape towards the negative and positive values ($\pm 2sd$) of the first singular warp. Changes of CVT arrangement along SW1 is represented by generating heatmaps of CVT variation for two individuals.

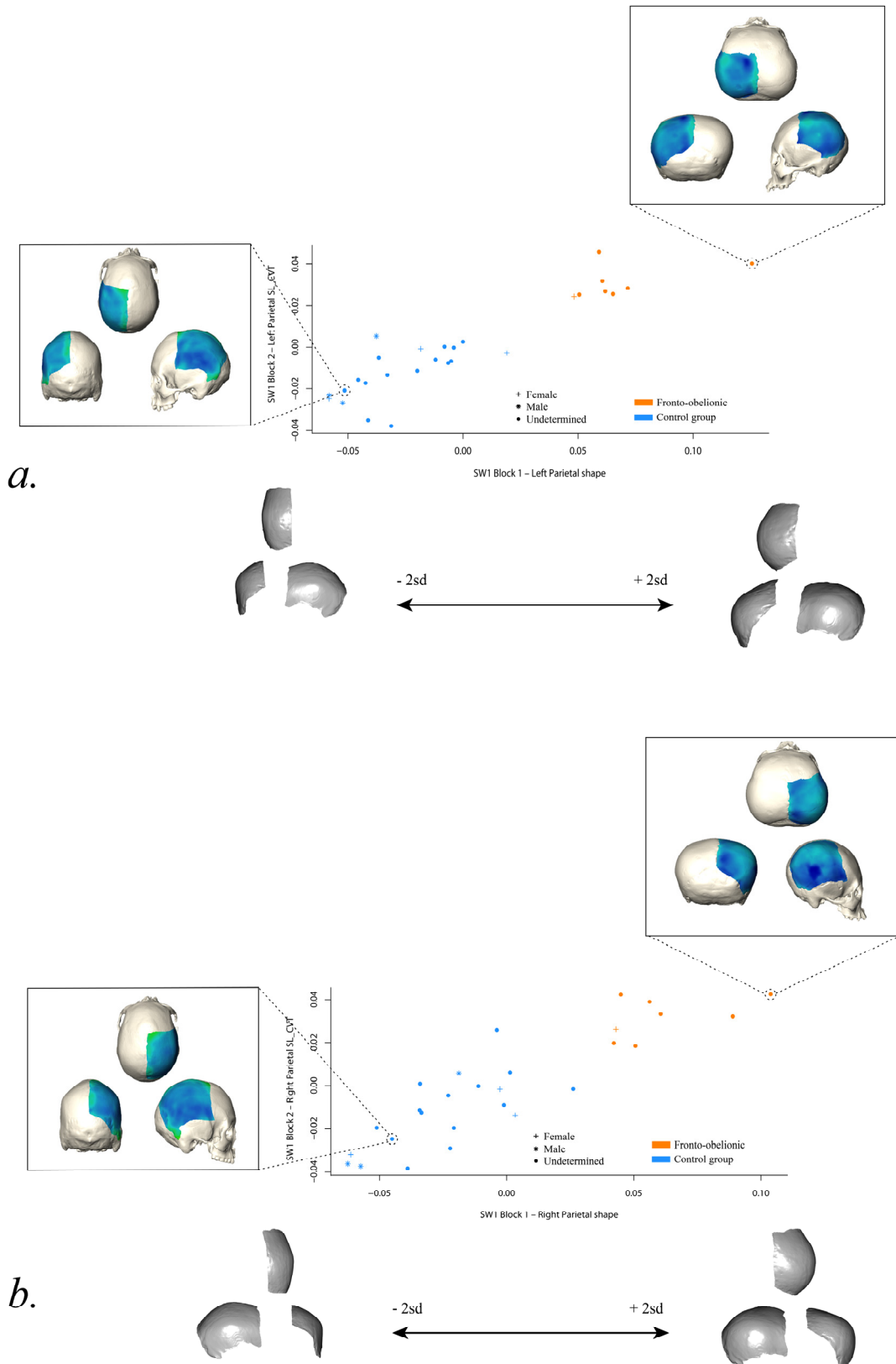


FIGURE 6 Two-blocks partial least squares (PLS) analysis computed for the first pair of singular warps (SW1) between the Procrustes shape coordinates of the left (a.) and right (b.) parietal bones (Block 1) and their corresponding CVT values (Block 2). Only individuals belonging to the fronto-obelionic and control groups have been considered. The variation of shape along SW1 is visualized by warping the mesh of the mean shape towards the negative and positive values ($\pm 2sd$) of the first singular warp. Changes of CVT arrangement along SW1 is represented by generating heatmaps of CVT variation for two individuals.

The specific case of the fronto-obelionic left parietal bone

Individuals belonging to the control group display the lowest scores along the two axis of SW1 (Figure 6.a). The fronto-obelionic group is clearly separated from the control group, showing high scores along SW1 Block 1 – Left Parietal shape and SW1 Block 2 – Left Parietal SL_CVT. One individual is separated from the rest of group and demonstrates the highest score for the SW1 Block 1 – Left Parietal shape, and a high score along SW1 Block 2 – Left Parietal SL_CVT.

The shape differences from negative to positive values ($\pm 2sd$) include a broadening of the parietal boss, a shortened length of the bone and a flattening that strongly affects the anterior two-thirds of the sagittal suture (this is more pronounced for the obelionic region). The CVT arrangement associated to this shape change is showing lower values for the positive scores ($-2.5 \cdot 10^{-4}$) than for the negative ones ($-1.1 \cdot 10^{-4}$; Table 3). The density plot shows a trend for higher CVT associated with the negative values (Figure 4).

3.3 The right parietal bone

Figure 5.b shows the first pair of singular warps between the right parietal shape and its respective values of SL_CVT. The control group displays the lowest scores for both SW1 Block 1 – Right Parietal shape and SW1 Block 2 – Right Parietal SL_CVT. However, one individual among this group is distinct from the others since it presents values much higher for the two blocks. The tabular erect fronto-occipital demonstrates two opposite locations since one individual lies within the control group variation while the two others show the highest scores for both blocks. The tabular erect plano-lambdoid group as well as the tabular oblique individual have close positions along the two SW1 blocks, both differentiating from the control group and the tabular erect fronto-occipital. The scatter pattern is close to that observed for the left parietal bone.

The shape associated with the lower and upper values on the SW1 Block 1 – Right Parietal shape axis are similar to those described for the left parietal (Figure 5.b). The SL_CVT values are lower for the negative scores of the SW1 Block 2 – Right Parietal SL_CVT axis ($-2.7 \cdot 10^{-4}$) and higher in the positive section ($2.8 \cdot 10^{-4}$; Table 3). The CVT distribution shows a slight trend for higher values for the positive scores of SW1 (i.e., $+2sd$; Figure 4).

The specific case of the fronto-obelionic right parietal bone

When considering the right parietal bone (Figure 6.b), the control group shows an important difference since some individuals demonstrate scores for the SW1 Block 2 – Right Parietal SL_CVT axis much higher close to those from the individuals of the fronto-obelionic group. Others present scores similar to the lowest ones of the fronto-obelionic group. The difference between the two groups is clearer along SW1 Block 1 – Right Parietal shape.

The shape changes associated with the SW1 Block 1 – Right Parietal shape are identical to those described for the left parietal bones. The CVT means are higher important towards the positive values ($1.6 \cdot 10^{-4}$) of the SW1 Block 2 – Right Parietal SL_CVT axis and lower in the direction of the negative ones ($2.3 \cdot 10^{-4}$; Table 3).

3.4 The occipital bone

The control group displays the lower scores on both axes (Figure 7). The fronto-obelionic group shows scores slightly different from those of the control group for the SW1 Block 1 – Occipital shape. On the SW1 Block 2 – Occipital SL_CVT, they share scores very similar to the individuals that display the highest scores of the control group. The tabular erect fronto-occipital individuals show noteworthy within-group variation, with one individual exhibiting the highest score along the two axis and two presenting values similar to those of the fronto-obelionic group. The tabular erect plano-lambdoid individuals also show marked variation, with one individual located within the range of the control group, another falling within the fronto-obelionic group, and the last one with a high score for SW1 Block 1 – Occipital shape. Finally, the tabular oblique individual locates among the individuals' variation having the highest scores of SW1 Block 2 – Occipital SL_CVT in the control group.

The shape changes that characterize the positive values of the SW1 Block 1 – Occipital shape in comparison to the negative values describe a flattening of the occipital bun and squama associated with small lateral displacements of the areas close to the lambdoid suture. The CVT is higher towards the positive values ($1.8 \cdot 10^{-4}$) of the axis than towards negative values ($-1.8 \cdot 10^{-4}$; Table 3). The CVT values associated to -2sd along the SW1 clearly differ from the +2sd since most of its distribution is located in the negative values (Figure 4).

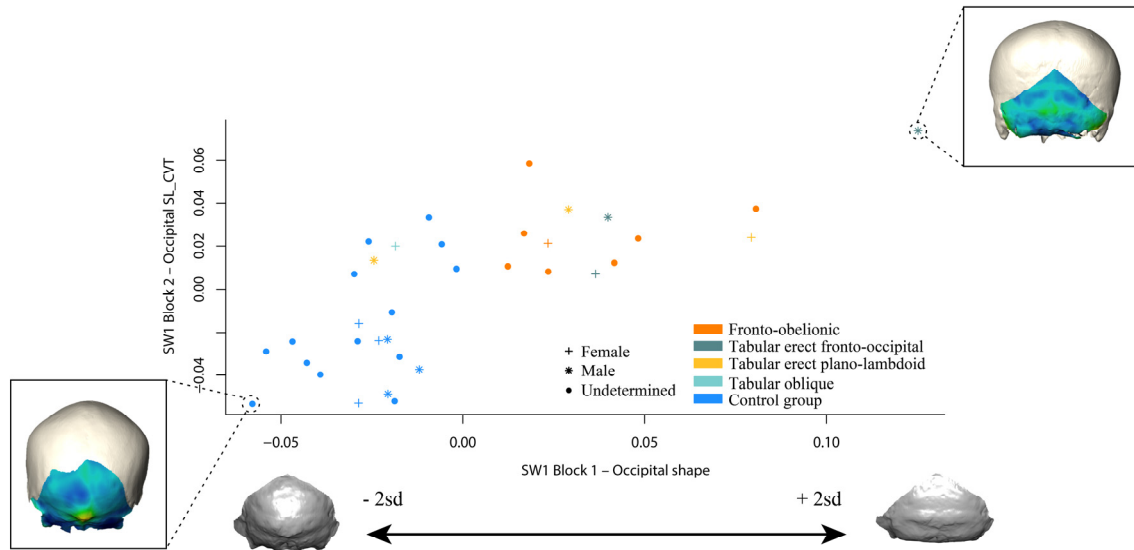


FIGURE 7 Two-blocks partial least squares (PLS) analysis computed for the first pair of singular warps (SW1) between the Procrustes shape coordinates of the occipital bone (Block 1) and their corresponding CVT values (Block 2). The variation of shape along SW1 is visualized by warping the mesh of the mean shape towards the negative and positive values ($\pm 2sd$) of the first singular warp. Changes of CVT arrangement along SW1 is represented by generating heatmaps of CVT variation for two individuals.

4. DISCUSSION

In order to finely quantify the extent to which ACM practices result in a disrupted arrangement of CVT, we have assessed the CVT topographic distribution using semilandmarks as homologous points so multiple variables of CVT could be considered. The study has explored the patterns of covariation between each calvaria bone shape and their respective CVT arrangement in a sample composed of individuals with unmodified skulls (used as a control group) and others displaying different variants of ACM. The variants of ACM investigated are mainly those expressed in West Mesoamerica (Pereira, 2018): the tabular erect fronto-occipital and plano-lambdoid variants, the tabular oblique form and the fronto-obelionic form (according to the typology of Dembo and Imbelloni, 1938).

The study of covariation of isolated calvaria bone shapes and CVT arrangement revealed different patterns according to the bone region considered. For the frontal bone, the shape

pattern describing a flattening of the frontal squama associated with a widening of the bone is associated with thinner CVT arrangement while rounder and narrower frontal shape result in a thicker CVT (as documented in the control group). For the parietal bones, our study provides consistent results of covariation, but only when the fronto-obelionic group is excluded from the analyses. The parietal bones have demonstrated trends for thicker CVT arrangements associated with widening of the parietal bosses, an anteroposterior reduction and an increased in height. When only the fronto-obelionic group is considered, the analyses of both parietals evidence different results between the right and left bones. The CVT associated with the shape changes characteristic of the fronto-obelionic group appears thinner when measured on the left bone, while they are identical when examining the right one. Finally, for the occipital bone the shape changes consistent with the identification of the ACM (i.e., a flattened and broadened occipital squama) were associated with thicker CVT.

Some of our results are consistent with the conclusions proposed in previous works (Crubézy, 1986; Maureille et al., 1995; Khonsari et al., 2013; Boman et al., 2016) and indicate that CVT can substantially help to identify the practice of an ACM. It can also provide important insights on the differentiation of the ACM variants described in West Mesoamerica. Our results also shed light on the way the calvaria responds to accommodate the growth of the brain in biomechanically constrained contexts. We confirmed that the shape changes associated with a flattening of the frontal bone are related to a thinning of the CVT. Some of our results also support the existence of a compensatory mechanism that would create thicker CVT in regions free of any constraints relative to the cephalic device as shown by the parietal bone in the tabular erect fronto-occipital variant. However, this compensatory mechanism relationship is not observed for all ACM variants. The covariation between shape and CVT in parietal bones of the fronto-obelionic group is probably more complex to comprehend since, in this group, the bone undergoes both flattening and expansion. Further studies must consider the patterns asymmetry especially for the fronto-obelionic forms for which an antisymmetry relationship has been evidenced (Natahi et al., 2019), in order to understand the reasons for this specific pattern of covariation among this groups.

Furthermore, our results contrast with the hypothesis that flattening of the bone implies thinner CVT. Indeed, in the occipital bone, the shape changes corresponding to ACM are associated

with thicker CVT. This demonstrates that bones do not respond similarly to mechanical constraints. The discrepancies observed between two different bones that underwent compression forces (e.g., the frontal and the occipital bones) can result from differential mechanical properties (Wang et al., 2014) relative to the region considered.

Our results provide greater depth regarding how ACM can affect the different mechanism involved in growth. When the modeling process of ACM initiates, the anatomical regions of the cranium where the apparatus has been arranged are subject to biomechanical constraints which will have a direct influence on the patterns of neurocranial growth and development. In such cases, it has been proposed that the static loadings the implemented device is exerting would alter the direction of the neural growth vectors and redirect them towards unconstrained areas (Moss, 1958; Delaire & Billet, 1964; McNeill & Newton, 1965; Bolender et al., 1978; Antón et al., 1992; Antón & Weinstein, 1999; Tiesler, 2014). Antón et al. (1992) have shown that sutural complexity does not increase in cases of ACM. They state that the achievement of a modified shape may be accomplished via another mechanism than sutural growth (i.e., bone apposition and resorption). Trends for thicker CVT in areas free of any mechanical constraints could suggest that ACM are likely to affect the bone modeling patterns of the parietal bones. Local stimuli (i.e., brain expansion and muscular activities) are thought to differentially influence the CVT, acting respectively on the inner and outer tables (Moss & Young, 1960). The inner table is thought to respond to internal functional demands (that relate to brain growth and dura mater attachments) while the outer table would be sensitive to external ones (resulting from masticatory activities and chewing musculature); their functional independence being guaranteed by the diploic layer. In this study, the thicker CVT measured in the parietal bosses for certain ACM variants could relate to an increase in bone apposition. It would allow and accommodate the brain for which growth direction has been altered.

As a whole, the study of covariation of isolated calvaria bone shapes and CVT arrangement proved to be an efficient method of ACM identification and differentiation of ACM variants, even in the case of fragmented or poorly preserved remains that often characterize archaeological contexts. Future directions should include larger samples especially for the tabular oblique form. A better comprehension of the CVT arrangements among ACM is a matter of concern since it can provide new critical information to their assessment and differentiation.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to acknowledge the Centro francés de Estudios Mexicanos y Centroamericanos (CEMCA) for facilitating the access to the archaeological material and providing the logistic facilities that enabled the acquisition of CT data. We are also deeply grateful to Isaac Barrientos Juárez and Osiris Quezada Ramírez for their valuable assistance in the transportation of the skulls of the CEMCA collections. We would like to thank the Division of Anthropology Loan Committee from the American Museum of Natural History for having allowed the CT scanning of part of the Lumholtz collection. We are thankful to Gisselle Garcia and Kristen Mable for their help in preparing the skulls so they could be safely transported. We are grateful to Jeffrey T. Laitman for having facilitated the CT scanning and having provided a storage location for the skulls. We are thankful to Renaud Lebrun and Clément Zanolli for fruitful discussions and advices. We also thank Thomas Davies for proofreading this manuscript. We acknowledge the LascArBx: Cluster of Excellence in Archaeological Sciences of Bordeaux (ANR-10-LABX-52) for granting SN a PhD fellowship. Finally, we also thank the ANR MESOMOBILE (ANR-14-CE31-0016), the LascArBx: Cluster of Excellence in Archaeological Sciences of Bordeaux (ANR-10-LABX-52) and the CEMCA for having funded the analyses and the mobility of SN.

References

- Adeloye, A., Kattan, K. R., & Silverman, F. N. (1975). Thickness of the normal skull in the American blacks and whites. *American Journal of Physical Anthropology*, 43(1), 23-30.
- Ambialet, M. J. (1893). *La déformation artificielle de la tête dans la région toulousaine*. (Thèse d'exercice de Médecine), Toulouse.
- Anderson, R., Kieffer, S. A., Wolfson, J. J., Long, D., & Peterson, H. O. (1970). Thickening of the skull in surgically treated hydrocephalus. *American Journal of Roentgenology*, 110(1), 96-101.
- Antón, S. C., Jaslow, C. R., & Swartz, S. M. (1992). Sutural complexity in artificially deformed human (*Homo sapiens*) crania. *Journal of Morphology*, 214(3), 321-332.
- Antón, S. C., Spoor, F., Fellmann, C. D., & Swisher Iii, C. C. (2007). 11 Defining *Homo erectus*: Size Considered. In W. Henke & I. Tattersall (Eds.), *Handbook of Paleoanthropology* (pp. 1655-1693). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Antón, S. C., & Weinstein, K. J. (1999). Artificial cranial deformation and fossil Australians revisited. *Journal of Human Evolution*, 36(2), 195-209.
- Anzelmo, M., Ventrice, F., Barbeito-Andrés, J., Pucciarelli, H. M., & Sardi, M. L. (2015). Ontogenetic changes in cranial vault thickness in a modern sample of *Homo sapiens*. *American Journal of Human Biology*, 27(4), 475-485.
- Baab, K. L., Copes, L. E., Ward, D. L., Wells, N., & Grine, F. E. (2018). Using modern human cortical bone distribution to test the systemic robusticity hypothesis. *Journal of Human Evolution*, 119, 64-82.
- Balzeau, A. (2013). Thickened cranial vault and parasagittal keeling: correlated traits and autapomorphies of *Homo erectus*? *Journal of Human Evolution*, 64(6), 631-644.
- Balzeau, A., Gilissen, E., Holloway, R. L., Prima, S., & Grimaud-Hervé, D. (2014). Variations in size, shape and asymmetries of the third frontal convolution in hominids: paleoneurological implications for hominin evolution and the origin of language. *Journal of Human Evolution*, 76, 116-128.
- Beaudet, A., Carlson, K. J., Clarke, R. J., de Beer, F., Dhaene, J., Heaton, J. L., Pickering, T. R., & Stratford, D. (2018). Cranial vault thickness variation and inner structural organization in the StW 578 hominin cranium from Jacovec Cavern, South Africa. *Journal of Human Evolution*, 121, 204-220.
- Blackwood, B., & Danby, P. M. (1955). A study of artificial cranial deformation in New Britain. *The Journal of the Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland*, 85(1/2), 173-191.
- Blom, D. E. (2005). Embodying borders: human body modification and diversity in Tiwanaku society. *Journal of Anthropological Archaeology*, 24(1), 1-24.
- Bolender, C., Hanzel, B., & Turlot, J.-C. (1978). Analyses multidimensionnelles du profil cranio-facial précolombien et péruvien contemporain. *Revue d'Orthopédie Dento-Faciale*, 12(4), 397-421.
- Boman, F., Froment, A., & Charlier, P. (2016). Variations in the thickness of the cranial vault in a deformed skull from pre-Hispanic Ancón (Peru). *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 28(3-4), 221-225.
- Bookstein, F. L. (1996). Biometrics, biomathematics and the morphometric synthesis. *Bulletin of Mathematical Biology*, 58(2), 313.
- Bookstein, F. L. (1997). Landmark methods for forms without landmarks: morphometrics of group differences in outline shape. *Medical Image Analysis*, 1(3), 225-243.
- Broca, P. (1875). *Instructions craniologiques et craniométriques de la Société d'anthropologie de Paris*. Paris, France: G. Masson.
- Brown, P. (1994). Cranial vault thickness in Asian *Homo erectus* and *Homo sapiens*. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 171, 33-46.
- Brown, T., Pinkerton, S. K., & Lambert, W. (1979). Thickness of the cranial vault in Australian Aborigines. *Archaeology & Physical Anthropology in Oceania*, 14(1), 54-71.
- Brůžek, J. (2002). A method for visual determination of sex, using the human hip bone. *American Journal of Physical Anthropology*, 117(2), 157-168.
- Brůžek, J., Santos, F., Dutailly, B., Murail, P., & Cunha, E. (2017). Validation and reliability of the sex estimation of the human os coxae using freely available DSP2 software for bioarchaeology and forensic anthropology. *American Journal of Physical Anthropology*, 164(2), 440-449.

- Cheverud, J. M., & Midkiff, J. E. (1992). Effects of fronto-occipital cranial reshaping on mandibular form. *American Journal of Physical Anthropology*, 87(2), 167-171.
- Clark, J. L., Dobson, S. D., Antón, S. C., Hawks, J., Hunley, K. L., & Wolpoff, M. H. (2007). Identifying artificially deformed crania. *International Journal of Osteoarchaeology*, 17(6), 596-607.
- Cohen, A. S. (2016). *Creating an Empire: Local Political Change at Angamuco, Michoacan, Mexico*. (Ph. D. dissertation), University of Washington, Seattle, United States of America.
- Comas, J., & Marquer, P. (1969). Crânes déformés de l'île de Sacrificios (État de Veracruz, Mexique). *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 4(3), 209-257.
- Copes, L. (2012). *Comparative and experimental investigations of cranial robusticity in mid-Pleistocene hominins*. (Ph. D. dissertation), Arizona State University, Tempe, United States of America.
- Copes, L. E. (2016). Cranial vault thickness in non-human primates: Allometric and geometric analyses of the vault and its component layers. *Journal of Human Evolution*, 101, 90-100.
- Copes, L. E., & Kimbel, W. H. (2016). Cranial vault thickness in primates: Homo erectus does not have uniquely thick vault bones. *Journal of Human Evolution*, 90, 120-134.
- Copes, L. E., Schutz, H., Dlugozs, E. M., Judex, S., & Garland Jr, T. (2018). Locomotor activity, growth hormones, and systemic robusticity: An investigation of cranial vault thickness in mouse lines bred for high endurance running. *American Journal of Physical Anthropology*, 166(2), 442-458.
- Crubézy, E. (1986). *La nécropole de Rivel (Venerque-Haute-Garonne): étude anthropologique, essai d'interprétation paléthonographique*. (Mémoire de diplôme), Ecole des hautes études en sciences sociales, Toulouse, France.
- Darras, V., & Faugère, B. (2007). Chupícuaro, entre el Occidente y el Altiplano central. Un balance de los conocimientos y las nuevas aportaciones. In B. Faugère-Kalfon (Ed.), *Dinámicas culturales entre el Occidente, el Centro-Norte y la cuenca de México, del Preclásico al Epiclásico* (pp. 51-84). México: El Colegio de Michoacán - Centro de estudios mexicanos y centroamericanos.
- De Boer, H. H., Van der Merwe, A. L., & Soerdjbalie-Maikoe, V. V. (2016). Human cranial vault thickness in a contemporary sample of 1097 autopsy cases: relation to body weight, stature, age, sex and ancestry. *International journal of legal medicine*, 130(5), 1371-1377.
- Del Olmo Lianes, I., Bruner, E., Cambra-Moo, O., Molina Moreno, M., & Martín González, A. (2019). Cranial vault thickness measurement and distribution: a study with a magnetic calliper. *Anthropological Science*, 127(1), 47-54.
- Delaire, J., & Billet, J. (1964). Considération sur les déformations crâniennes intentionnelles. *Rev Stomatol*, 65, 535-541.
- Dembo, A., & Imbelloni, J. (1938). *Deformaciones intencionales del cuerpo humano de carácter étnico*. Buenos Aires, Argentina: José Anesi.
- Demirjian, A., Goldstein, H., & Tanner, J. M. (1973). A new system of dental age assessment. *Human Biology*, 45(2), 211-227.
- Dingwall, E. J. (1931). *Artificial cranial deformation. A contribution to the study of ethnic mutilations*. London, England: Bale.
- Dryden, I. L., & Mardia, K. V. (1998). *Statistical shape analysis*. New York, United States of America: Wiley.
- Ebraheim, N. A., Lu, J., Biyani, A., Brown, J. A., & Yeasting, R. A. (1996). An anatomic study of the thickness of the occipital bone: implications for occipitocervical instrumentation. *Spine*, 21(15), 1725-1729.
- Eisová, S., Rangel de Lázaro, G., Pišová, H., Pereira-Pedro, S., & Bruner, E. (2016). Parietal bone thickness and vascular diameters in adult modern humans: a survey on cranial remains. *The Anatomical Record*, 299(7), 888-896.
- Ewing, J. F. (1950). *Hyperbrachycephaly as influenced by cultural conditioning* (Vol. 23). Cambridge, United States of America: The Museum.
- Falkenburger, F. (1938). Recherches anthropologiques sur la déformation artificielle du crâne. *Journal de la Société des Américanistes*, 1-70.
- Farzana, F., Shah, B. A., Shahdad, S., Haq, P. Z. u., Sarmast, A., & Ali, Z. (2018). Computed tomographic scanning measurement of skull bone thickness: a single center study. *International Journal of Research in Medical Sciences*, 6(3), 913.

- Fernandes, D., Sirak, K., Cheronet, O., Howcroft, R., Čavka, M., Los, D., Burmaz, J., Pinhasi, R., & Novak, M. (2019). Cranial deformation and genetic diversity in three adolescent male individuals from the Great Migration Period from Osijek, eastern Croatia. *PloS one*, *14*(8), e0216366.
- Fletcher, A., Pearson, J., & Ambers, J. (2008). The Manipulation of Social and Physical Identity in the Pre-Pottery Neolithic: Radiographic Evidence for Cranial Modification at Jericho and its Implications for the Plastering of Skulls. *Cambridge Archaeological Journal*, *18*(3), 309-325.
- García, A. B., & Tiesler, V. (2011). El aspecto físico de los dioses mayas: modelado cefálico y otras marcas corporales. *Arqueología mexicana*, *19*(112), 59-63.
- Gould, S. C. (1996). Allometric patterns of cranial bone thickness in fossil hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, *100*(3), 411-426.
- Geller, P. L. (2004). *Transforming bodies, transforming identities: A consideration of pre-Columbian Maya corporeal beliefs and practices*. (Ph. D. dissertation), University of Pennsylvania Philadelphia, United States of America.
- Geller, P. L. (2011). Getting a head start in life: Pre-Columbian Maya cranial modification from infancy to ancestorhood. In M. Bonogofsky (Ed.), *The Bioarchaeology of the Human Head: Decapitation, Deformation, and Decoration* (pp. 241-261). Gainesville, United States of America: University Press of Florida.
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., Paus, T., Evans, A. C., & Rapoport, J. L. (1999). Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience*, *2*(10), 861.
- Gosse, L.-A. (1855). *Essai sur les déformations artificielles du crâne*. Paris, France: J.-B. Baillière.
- Graham, J. M., Kreutzman, J., Earl, D., Halberg, A., Samayoa, C., & Guo, X. (2005). Deformational brachycephaly in supine-sleeping infants. *The Journal of Pediatrics*, *146*(2), 253-257.
- Gunz, P. (2005). *Statistical and geometric reconstruction of hominid crania: reconstructing australopithecine ontogeny*. (Ph.D. Dissertation), Universität Wien, Wien, Österreich.
- Gunz, P. (2015). Computed Tools for Paleoneurology. In E. Bruner (Ed.), *Human Paleoneurology* (pp. 39-55). Cham: Springer International Publishing.
- Gunz, P., & Mitteroecker, P. (2013). Semilandmarks: a method for quantifying curves and surfaces. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, *24*(1), 103-109.
- Gunz, P., Mitteroecker, P., & Bookstein, F. L. (2005). Semilandmarks in three dimensions. In D. E. Slice (Ed.), *Modern morphometrics in physical anthropology* (pp. 73-98). New York, United States of America: Kluwer Academic / Plenum Publishers.
- Hakenbeck, S. (2009). 'Hunnic' modified skulls: physical appearance, identity and the transformative nature of migrations. In D. W. Sayer, Howard (Ed.), *Mortuary Practices and Social Identities in the Middle Ages* (pp. 64-80). Exeter, England: Exeter University Press.
- Hatipoglu, H. G., Ozcan, H. N., Hatipoglu, U. S., & Yuksel, E. (2008). Age, sex and body mass index in relation to calvarial diploe thickness and craniometric data on MRI. *Forensic Science International*, *182*(1-3), 46-51.
- Houston, S. D. (2006). *The memory of bones body, being, and experience among the classic Maya*. Austin, United States of America: University of Texas Press.
- Hrdlička, A. (1912). *Artificial deformations of the human skull, with especial reference to America*. Paper presented at the Actas del XVII Congreso Internacional de Americanistas, Buenos Aires, Argentina.
- Hutchison, B. L., Hutchison, L. A. D., Thompson, J. M. D., & Mitchell, E. A. (2004). Plagiocephaly and brachycephaly in the first two years of life: a prospective cohort study. *Pediatrics*, *114*(4), 970-980.
- Hwang, K., Hollinger, J. O., Chung, R. S., & Lee, S. I. (2000). Histomorphometry of parietal bones versus age and race. *The Journal of Craniofacial Surgery*, *11*(1), 17-23.
- Hwang, K., Kim, J. H., & Baik, S. H. (1999). The thickness of the skull in Korean adults. *The Journal of Craniofacial Surgery*, *10*(5), 395-399.
- Ishida, H., & Dodo, Y. (1990). Populations in Japan. *Human biology*, *62*(3), 389-401.
- Jung, Y.-S., Kim, H.-J., Choi, S.-W., Kang, J.-W., & Cha, I.-H. (2003). Regional thickness of parietal bone in Korean adults. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, *32*(6), 638-641.

- Khonsari, R. H., Friess, M., Nysjö, J., Odri, G., Malmberg, F., Nyström, I., Messo, E., Hirsch, J. M., Cabanis, E. A. M., & Kunzelmann, K. H. (2013). Shape and volume of craniofacial cavities in intentional skull deformations. *American journal of physical anthropology*, *151*(1), 110-119.
- Khudaverdyan, A. Y. (2011). Trepanation and artificial cranial deformations in ancient Armenia. *Anthropological Review*, *74*(1), 39-55.
- Knudson, K. J., & Torres-Rouff, C. (2009). Investigating cultural heterogeneity in San Pedro de Atacama, northern Chile, through biogeochemistry and bioarchaeology. *American Journal of Physical Anthropology*, *138*(4), 473-485.
- Lenhossék, J. (1878). *Des déformations artificielles du crâne en général, de celles de deux crânes makrocéphales trouvés en Hongrie et d'un crâne provenant des temps barbares du même pays*. Budapest, Hongrie: Université royale de Hongrie.
- Lenroot, R. K., & Giedd, J. N. (2006). Brain development in children and adolescents: insights from anatomical magnetic resonance imaging. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *30*(6), 718-729.
- Lestrel, P. E., & Roche, A. F. (1979). The cranial thickness in Down's Syndrome: Fourier analysis. *Proceedings of the 1st International Congress of Auxology*, *1*, 108-118.
- Lieberman, D. E. (1996). How and why humans grow thin skulls: experimental evidence for systemic cortical robusticity. *American Journal of Physical Anthropology*, *101*(2), 217-236.
- Lieberman, D. E., Pearson, O. M., & Mowbray, K. M. (2000). Basicranial influence on overall cranial shape. *Journal of Human Evolution*, *38*(2), 291-315.
- Lillie, E. M., Urban, J. E., Lynch, S. K., Weaver, A. A., & Stitzel, J. D. (2016). Evaluation of skull cortical thickness changes with age and sex from computed tomography scans. *Journal of Bone and Mineral Research*, *31*(2), 299-307.
- Loder, R. T. (1996). Skull thickness and halo-pin placement in children: the effects of race, gender, and laterality. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, *16*(3), 340-343.
- Lorentz, K. (2003). Cultures and Physical Modifications: Child Bodies in Ancient Cyprus. *Stanford Journal of Archaeology*, *2*.
- Lozada, M. C. (2011). Marking ethnicity through pre-mortem cranial modification among the Pre-Inca Chiribaya, Perú. In M. Bonogofsky (Ed.), *The Bioarchaeology of the Human Head: Decapitation, Deformation, and Decoration* (pp. 228-240). Gainesville, United States of America: University Press of Florida.
- Lynnerup, N. (2001). Cranial thickness in relation to age, sex and general body build in a Danish forensic sample. *Forensic science international*, *117*(1-2), 45-51.
- Manin, A. (2015). *Aspects matériels et symboliques de l'utilisation des animaux dans le nord de la Mésoamérique, entre le Classique et la Conquête (200-1521 ap. J.-C.)*. (Thèse de doctorat), Museum National d'Histoire Naturelle, Paris, France.
- Marcus, J., & Flannery, K. V. (2004). The coevolution of ritual and society: New 14C dates from ancient Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*(52), 18257-18261.
- Marsh, H. (2013). *Beyond Thick versus Thin: Mapping Cranial Vault Thickness Patterns in Recent Homo sapiens*. (Ph.D. Dissertation), University of Iowa, Iowa City, United States of America.
- Martínez-Abadías, N., Paschetta, C., de Azevedo, S., Esparza, M., & González-José, R. (2009). Developmental and genetic constraints on neurocranial globularity: insights from analyses of deformed skulls and quantitative genetics. *Evolutionary Biology*, *36*(1), 37-56.
- Maureille, B., Castex, D., Depierre, G., & Bar, D. (1995). Les crânes déformés de Saint-Etienne (Beaune, Côte d'Or, Ve-VIe siècles). Données archéologiques et anthropologiques. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, *7*, 49-67.
- Mayall, P., & Pilbrow, V. (2019). A review of the practice of intentional cranial modification in Eurasia during the Migration Period (4th–7th c AD). *Journal of Archaeological Science*, *105*, 19-30.
- Mayall, P., Pilbrow, V., & Bitadze, L. (2017). Migrating Huns and modified heads: Eigenshape analysis comparing intentionally modified crania from Hungary and Georgia in the Migration Period of Europe. *PloS One*, *12*(2).
- McNeill, W. R., & Newton, G. N. (1965). Cranial base morphology in association with intentional cranial vault deformation. *American Journal of Physical Anthropology*, *23*(3), 241-253.

- Menegaz, R. A., Sublett, S. V., Figueroa, S. D., Hoffman, T. J., Ravosa, M. J., & Aldridge, K. (2010). Evidence for the influence of diet on cranial form and robusticity. *The Anatomical Record*, 293(4), 630-641.
- Mitteroecker, P., & Gunz, P. (2009). Advances in geometric morphometrics. *Evolutionary Biology*, 36(2), 235-247.
- Moreira-Gonzalez, A., Papay, F. E., & Zins, J. E. (2006). Calvarial thickness and its relation to cranial bone harvest. *Plastic and reconstructive surgery*, 117(6), 1964-1971.
- Morton, S. G. (1839). *Crania Americana; or, a comparative view of the skulls of various aboriginal nations of North and South America: to which is prefixed an essay on the varieties of the human species*: Philadelphia: J Dobson; London: Simpkin, Marshall & co.
- Moss, M. L. (1958). The pathogenesis of artificial cranial deformation. *American Journal of Physical Anthropology*, 16(3), 269-286.
- Moss, M. L. (1962). The functional matrix. In B. S. Kraus & R. Reidel (Eds.), *Vistas in orthodontics* (pp. 85-98). Philadelphia, United States of America: Lea & Febiger.
- Moss, M. L. (1968). A theoretical analysis of the functional matrix. *Acta Biotheoretica*, 18(1), 195-202.
- Moss, M. L., & Young, R. W. (1960). A functional approach to craniology. *American journal of physical anthropology*, 18(4), 281-292.
- Murail, P., Brůžek, J., Houët, F., & Cunha, E. (2005). DSP: a tool for probabilistic sex diagnosis using worldwide variability in hip-bone measurements. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 17(3-4), 167-176.
- Natahi, S., Coquerelle, M., Pereira, G., & Bayle, P. (2019). Neurocranial shape variation among Tarascan populations: Evidence for varying degrees in artificially modified crania in pre-Hispanic West Mexico (1200–1400 AD). *American Journal of Physical Anthropology*, 170(3), 418-432.
- Natahi, S., Coquerelle, M., Pereira, G., & Bayle, P. (in prep) Evaluating the efficiency of isolated calvaria bones shape changes in the identification and differentiation of artificial cranial modification techniques among pre-Hispanic west Mesoamerican populations
- Nawrocki, S. P. (1991). *A Biomechanical model of cranial vault thickness in archaic Homo*. (Ph.D. Dissertation), State University of New York Binghamton, United States of America.
- Neubauer, S., Gunz, P., & Hublin, J.-J. (2010). Endocranial shape changes during growth in chimpanzees and humans: a morphometric analysis of unique and shared aspects. *Journal of human evolution*, 59(5), 555-566.
- Neumann, G. K. (1942). Types of artificial cranial deformation in the eastern United States. *American Antiquity*, 7(3), 306-310.
- O'Brien, T. G., & Stanley, A. M. (2013). Boards and cords: discriminating types of artificial cranial deformation in prehispanic South Central Andean populations. *International Journal of Osteoarchaeology*, 23(4), 459-470.
- Okumura, M. (2014). Differences in types of artificial cranial deformation are related to differences in frequencies of cranial and oral health markers in pre-Columbian skulls from Peru. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, 9(1), 15-26.
- Olivier, G. (1975). Biometry of the human occipital bone. *Journal of Anatomy*, 120(Pt 3), 507.
- Özbek, M. (2001). Cranial deformation in a subadult sample from Degirmentepe (Chalcolithic, Turkey). *American Journal of Physical Anthropology*, 115(3), 238-244.
- Pereira, G. (1999). *Potrero de Guadalupe : anthropologie funéraire d'une communauté pré-tarasque du nord du Michoacan, Mexique*. Oxford, England: Archaeopress (B.A.R. International Series, 816 ; Monographs in American Archaeology, 5).
- Pereira, G. (2018). Dinámicas poblacionales y modificación cefálica artificial en el Michoacán prehispánico. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica* (Vol. 2, pp. 649-680). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Pereira, G., Forest, M., Elsa, J., & Darras, V. (in press). Ephemeral cities? The longevity of the Postclassic Tarascan urban sites of Zacapu Malpaís and its consequences on the migration process. In M.-C. Arnauld, C. Beekman & G. Pereira (Eds.), *Ancient Mesoamerican cities: populations on the move*. Boulder, United States of America: University Press of Colorado.

- Pomeroy, E., Stock, J. T., Zakrzewski, S. R., & Lahr, M. M. (2010). A metric study of three types of artificial cranial modification from north-central Peru. *International Journal of Osteoarchaeology*, 20(3), 317-334.
- Rangel de Lázaro, G., Eisová, S., Pířová, H., & Bruner, E. (2018). The endocranial vascular system: tracing vessels. In E. Bruner, N. Ogiwara & H. C. Tanabe (Eds.), *Digital Endocasts* (pp. 71-91): Springer.
- Ricci, F., Fornai, C., Tiesler Blos, V., Rickards, O., Di Lernia, S., & Manzi, G. (2008). Evidence of artificial cranial deformation from the later prehistory of the Acacus Mts.(Southwestern Libya, Central Sahara). *International Journal of Osteoarchaeology*, 18(4), 372-391.
- Roche, A. F. (1953). Increase in cranial thickness during growth. *Human Biology*, 25(2), 81.
- Rogers, G. F. (2011). Deformational plagiocephaly, brachycephaly, and scaphocephaly. Part I: terminology, diagnosis, and etiopathogenesis. *Journal of Craniofacial Surgery*, 22(1), 9-16.
- Rohlf, F. J., & Corti, M. (2000). Use of two-block partial least-squares to study covariation in shape. *Systematic Biology*, 49(4), 740-753.
- Rohlf, F. J., & Slice, D. E. (1990). Extensions of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks. *Systematic Biology*, 39(1), 40-59.
- Romano, A. (1965). *Estudio morfológico de la deformación craneana en Tamuín, S.L.P., y en la Isla del Idolo, Veracruz*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Romano, A. (1974). Deformación cefálica intencional. In J. Comas (Ed.), *Antropología física, época prehispánica* (pp. 197-227). Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Ross, A. H., Jantz, R. L., & McCormick, W. F. (1998). Cranial thickness in American females and males. *Journal of Forensic Science*, 43(2), 267-272.
- Ross, M. D., Lee, K. A., & Castle, W. M. (1976). Skull thickness of Black and White races. *South African Medical Journal*, 50(16), 635-638.
- Scheuer, L., & Black, S. (2000). *Developmental Juvenile Osteology*. London, England: Academic Press.
- Schlager, S. (2017). Morpho and Rvcg – Shape Analysis in R: R-Packages for Geometric Morphometrics, Shape Analysis and Surface Manipulations. In Zheng Guoyan, Li Shuo & S. Gabor (Eds.), *Statistical shape and deformation analysis* (pp. 217-256). London, England: Academic Press.
- Sharapova, S., & Razhev, D. (2011). Skull Deformation during the Iron Age in the Trans-Urals and Western Siberia. In M. Bonogofsky (Ed.), *The Bioarchaeology of the Human Head: Decapitation, Deformation, and Decoration* (pp. 203-227). Gainesville, United States of America: University press of Florida.
- Shashanka, M. J. (2011). *Study of the thickness of cranial vault and diploeic space in relation to age sex head circumference and body habitus in paediatric age group*. (Ph.D. Dissertation), M.S. Ramaiah Medical College, Bangalore, India.
- Smith, P., Wax, Y., Becker, A., & Einy, S. (1985). Diachronic variation in cranial thickness of Near Eastern populations. *American Journal of Physical Anthropology*, 67(2), 127-133.
- Subsol, G., Gesquiere, G., Braga, J., & Thackeray, F. (2010). *3D automatic methods to segment "virtual" endocasts: state of the art and future directions*. Paper presented at the American Journal of Physical Anthropology.
- Tiesler, V. (1998). *La costumbre de la deformación cefálica entre los antiguos mayas: aspectos morfológicos y culturales*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Tiesler, V. (2010). "Olmec" head shapes among the Preclassic period Maya and cultural meanings. *Latin American Antiquity*, 21(3), 290-311.
- Tiesler, V. (2014). *The bioarchaeology of artificial cranial modifications new approaches to head shaping and its meanings in pre-Columbian Mesoamerica and beyond*. New York, United States of America: Springer.
- Tiesler, V., & Cucina, A. (2010). La deformación craneana como emblema de identidad, etnicidad y reproducción cultural entre los mayas del Clásico. In H. Hernández & M. Pool (Eds.), *Identidades y cultura material en la región maya* (pp. 111-134). Mérida, México.
- Topinard, P. (1879). Présentation de crânes. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 2(2), 335-336.

- Torres-Rouff, C. (2002). Cranial Vault Modification and Ethnicity in Middle Horizon San Pedro de Atacama, Chile. *Current Anthropology*, 43(1), 163-171.
- Twisselmann, F. (1941). Méthode pour l'évaluation de l'épaisseur des parois crâniennes. *Bulletin du Musée royal d'Histoire naturelle de Belgique*, 17(48), 33.
- Varela, H. H., & Cocilovo, J. A. (2002). Genetic drift and gene flow in a prehistoric population of the Azapa Valley and Coast, Chile. *American Journal of Physical Anthropology*, 118(3), 259-267.
- Virchow, R. (1888). *La craniologie américaine*. Paper presented at the Congrès International des Americanistes, Berlin, Allemagne.
- Wang, J., Zou, D., Li, Z., Huang, P., Li, D., Shao, Y., Wang, H., & Chen, Y. (2014). Mechanical properties of cranial bones and sutures in 1–2-year-old infants. *Medical science monitor: international medical journal of experimental and clinical research*, 20, 1808.
- Weidenreich, F. (1943). The skull of *Sinanthropus pekinensis*: a comparative study on a primitive hominid skull. *Paleontologia Sinica, Series D*, 10, 96-157.
- Weiss, P. (1962). Tipología de las deformaciones cefálicas de los antiguos peruanos, según la osteología cultural. *Revista del Museo Nacional*, 31, 15-42.

6 Synthèse et perspectives

A l'issue de notre recherche, nous en proposons un bilan et mettons en avant les perspectives qui se dégagent des trois axes d'étude principaux qui l'ont constituée, et qui ont chacun fait l'objet d'un article.

Le premier article issu de notre recherche a eu pour but d'évaluer la variation morphologique neurocrânienne au sein d'un échantillon composé d'individus issus de deux sites du bassin de Zacapu datant du Postclassique moyen (1200 – 1400 apr. J.-C.) : El Palacio et Malpaís Prieto. Cette étude faisait suite aux observations de Pereira (1999, 2018) qui avait constaté une diminution drastique de la fréquence d'expression des modifications artificielles du crâne par rapport aux périodes préclassiques (600 av. J.-C. – 300 apr. J.-C.) et classiques/épiclassiques (300 – 900 apr. J.-C.). De plus, pour certains cas, Pereira (1999, 2018) avait suspecté l'existence de modifications artificielles du crâne *a minima* difficilement différenciables de la variabilité physiologique neurocrânienne. Ces observations constituent une particularité dans une région où les modifications artificielles crâniennes étaient non seulement généralisées mais également marquées pendant les périodes préclassiques et classiques/épiclassiques. Afin de tester l'hypothèse proposée par Pereira (1999, 2008) en apportant des données quantitatives fines, les conformations du neurocrâne d'individus provenant des sites d'El Palacio et Malpaís Prieto ont été comparées à celles de deux groupes de contrôle, l'un constitué d'individus indiens Huichol et l'autre d'individus médiévaux issus du site de la Granède, en France. L'analyse des différences de conformation a montré que certains individus différaient de la variation observée pour le groupe de contrôle : les groupes NJ1, NJ2 et NJ3²⁸. Le premier de ces groupes (NJ1) est composé d'individus montrant des modifications fronto-obélioniques marquées tandis que les deux autres groupes font état de modifications plus légères. Le groupe NJ2 montre les caractéristiques d'une modification fronto-obélionique mais dans une version de degré moindre en comparaison avec le groupe NJ1. Le groupe NJ3 est plus difficilement interprétable puisque les variations qu'il présente (réduction antéro-postérieure associée à une augmentation en hauteur de la voûte) ne semblent correspondre à aucun type de modifications artificielles du crâne répertorié pour le bassin de Zacapu. Nous avons proposé que les individus de ce groupe

²⁸ NJ fait référence aux groupes isolés de la variation du groupe de contrôle par la méthode du *neighbor-joining* et qui présentent des caractéristiques morphologiques similaires entre individus du même groupe.

puissent présenter une modification de type pseudo-annulaire, mais des doutes persistent en raison de l'intensité moindre de la modification.

Afin de mieux circonscrire les formes possibles de modifications *a minima*, nous proposons que les futures études bénéficient elles aussi de l'utilisation de la morphométrie géométrique, et cela à des fins de caractérisation plus fine des types de modifications artificielles du crâne. Plus spécifiquement, nous estimons que les individus pour lesquels des doutes persistent quant à leur caractère modifié ou à leur type de modifications, devront être comparés, de manière quantitative, à des formes bien définies de modifications. Ainsi, des analyses en composantes principales (ACP) propres à chaque type de modifications devront être réalisées en incluant un échantillon d'individus constituant le groupe de contrôle et des individus présentant un même type de modification bien marqué (e.g., des formes extrêmes des types tabulaire droit fronto-occipital ou tabulaire droit oblique). Les individus « suspects » seront alors projetés dans chacun de ces sous-espaces morphologiques que représentent les axes de chaque ACP afin de pouvoir, dans un premier temps, identifier la présence ou non d'une modification artificielle du crâne mais également, dans un second temps, en définir le type.

Nous illustrons ce procédé ici en prenant l'exemple des individus appartenant au groupe NJ3. Nous avons réalisé deux ACP : l'une sur les coordonnées Procrustes d'un échantillon composé d'un groupe de contrôle et d'individus présentant la variante marquée tabulaire droit plano-lambdatique, l'autre sur les coordonnées Procrustes d'un échantillon composé d'un groupe de contrôle et d'individus présentant la variante marquée du type tabulaire droit fronto-occipital. Afin de projeter les individus du groupe NJ3 dans les sous-espaces que constituent les axes des ACP, nous avons multiplié leurs coordonnées Procrustes par les vecteurs propres respectifs à l'analyse (cf. Matériels et méthodes).

Qu'ils soient projetés dans le sous-espace morphologique de l'ACP propre aux individus présentant une modification tabulaire droite plano-lambdatique ou dans celui spécifique aux individus pourvus d'une modification droite fronto-occipital, les individus composant le groupe NJ3 sont localisés au sein de la variation du groupe de contrôle pour les deux premières composantes (Figure 6.1). Si la conformation de ces individus avait été une version amoindrie de l'un ou l'autre de ces variants, nous aurions observé une position intermédiaire de ce groupe d'individus entre le groupe de contrôle et le groupe modifié (à l'instar de la position intermédiaire du groupe NJ2 situé entre le groupe de contrôle et le groupe NJ1). Cette analyse révèle que la modification qui caractérise ces individus ne s'apparente à aucun des types

tabulaires droits observés pour cette région de la Mésoamérique et invite donc à élargir à des comparaisons régionales plus larges, notamment avec certaines formes du type pseudo-annulaire que l'on peut retrouver sur la côte du Golfe du Mexique (e.g., Romano, 1965 ; Tiesler, 2010).

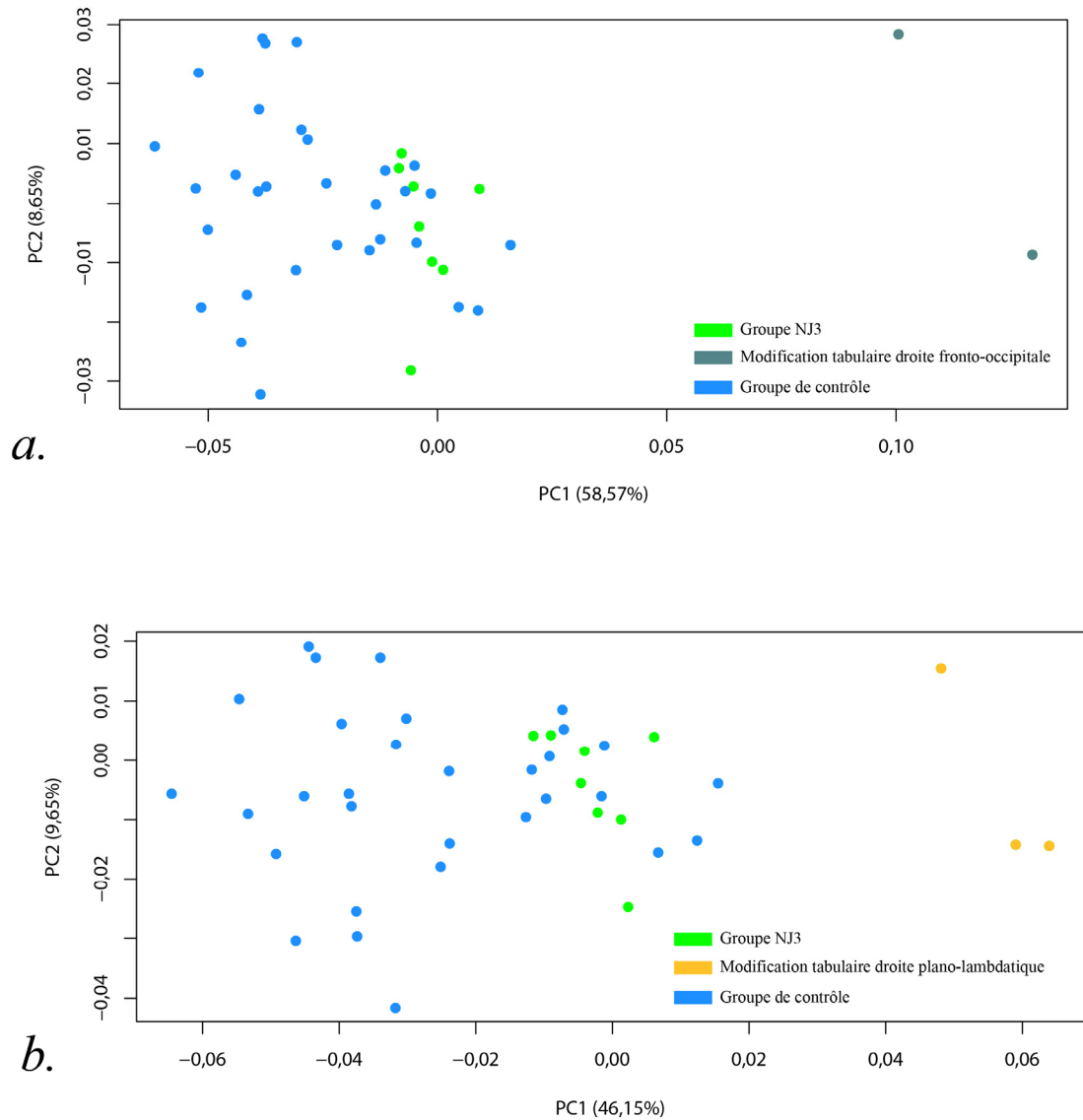


Figure 6.1 Projection des individus appartenant au groupe NJ3 sur les deux premières composantes issues des analyses en composantes principales réalisées sur : (a) des individus présentant des modifications tabulaires droites fronto-occipitales et un groupe de contrôle. (b) des individus présentant des modifications tabulaires droites plano-lambdatices.

La durée d'exposition à l'appareil céphalique, l'âge auquel l'enfant y est exposé ou encore l'intensité des forces à l'œuvre sur le crâne constituent autant de facteurs susceptibles

d'intervenir sur la forme d'un crâne quand celui-ci est soumis à une pratique de modification. Etant donné la variabilité des pratiques, il est donc vraisemblable que ces facteurs puissent être à l'origine de certaines formes *a minima* de modifications artificielles du crâne ; lesquelles sont difficilement différenciables de la variation physiologique « normale ». Les outils analytiques que constituent les analyses morphoscopiques et morphométriques n'ont pas permis jusqu'à présent d'identifier de tels cas, qui semblent pourtant correspondre à de réelles intentions de modifier la forme d'un crâne. Par conséquent, nombre d'auteurs suspectent leur présence sans pouvoir pour autant en garantir l'existence (e.g., Neumann, 1942 ; Romano, 1965 ; Brothwell, 1975 ; Friess & Baylac, 2003 ; Clark et al., 2007 ; Pomeroy et al., 2010)

Par ailleurs, plusieurs auteurs proposent la durée ou le moment d'exposition à l'appareil céphalique comme de potentielles causes de variabilité entre les formes (e.g., Ewing, 1950, p. 59 ; Trinkaus, 1982 ; Özbek, 2001 ; Tiesler, 2012a, 2014). En effet, il semble que ce paramètre varie d'une population à une autre. Walcher (1911), par exemple, estime que les premiers instants de vie postnatale (i.e., premières semaines et mois) sont déterminants dans l'acquisition d'une morphologie neurocrânienne « déformée ». D'autres auteurs, comme Catlin (1857, p. 111), sont plus précis et évoquent que les formes marquées de modifications crâniennes chez les Indiens Chinook étaient obtenues après une durée de trois, cinq ou huit mois d'exposition à l'appareil céphalique associé au berceau. Un constat similaire est rapporté par Rosa (1947) qui présente des durées allant de 3 mois jusqu'à un an. Ewing a recueilli des témoignages établissant que les modifications artificielles du crâne pratiquées par les Maronites des Etats-Unis ne dépassaient jamais les trois premiers mois de vie postnatale (Ewing, 1950, p. 22), tandis qu'au Japon la modification artificielle du crâne qui s'obtenait en allongeant l'enfant dos au sol était régulièrement réalisée pendant les quatre à cinq premiers mois (Ewing, 1950, p. 41). Aussi, cet auteur mentionne la modification artificielle du crâne comme étant pratiquée pendant 9 mois en Asie centrale (Ewing, 1950). Farabee (1922, p. 86) évoque que, chez les Indiens Conebos et Shipibos (dans l'actuel Pérou), la pratique intervient peu de temps après la naissance et que l'appareil céphalique n'est apposé que pour une durée de cinq à six mois. Blackwood & Danby (1955) nous livrent un témoignage précieux : bien que dans les populations de l'île d'Arawe en Papouasie-Nouvelle Guinée, le port de l'appareil céphalique couvrait une durée allant d'un à deux ans, la durée nécessaire à l'obtention d'une morphologie modifiée était probablement plus courte. Schendel et al. (1980) mentionnent comme suffisant l'intervalle de temps de quelques semaines après la naissance jusqu'à trois mois pour la production d'une morphologie artificiellement modifiée. En revanche, Delaire & Billet (1964, p. 536) et Bolender et al. (1978),

de manière un peu arbitraire, considèrent que, pour que la modification du crâne devienne marquée, elle devait être entreprise dès la naissance et pour une durée de quatre ou cinq ans. De manière plus fiable car reposant sur des témoignages directs, Hatt (1915) relate qu'un bonnet pouvait être placé sur le crâne des enfants Samis (originaires de Suède) dès la naissance et pour des périodes excédant les cinq ans. A cette exception près, l'ensemble des témoignages tend à indiquer la première année de vie postnatale comme un intervalle de temps déterminant dans l'acquisition d'une morphologie neurocrânienne « souhaitée ». La durée de l'intervention doit également figurer parmi les possibles facteurs de variation en jeu dans l'obtention de formes *a minima* de modifications.

Dans la mesure où certains appareillages étaient associés à des berceaux, on peut également supposer que le temps passé quotidiennement dans le berceau pouvait avoir une incidence. Sans s'en référer à une quelconque pratique de modification artificielle du crâne, certains auteurs ont montré que le temps passé par un enfant dans un berceau pouvait différer d'une population à l'autre (Aberle, 1932 ; Dennis & Dennis, 1940 ; Lange, 1960 ; Chisholm, 2017). Par exemple, un enfant de trois mois passe entre 15 et 18 heures par jour emmaillotté dans son berceau chez les Indiens Navajos et 23 heures chez les indiens Hopis (Dennis & Dennis, 1940 ; Chisholm, 2017). Chez les indiens Pueblos, ce nombre d'heures se limite entre trois et six pour un enfant de quatre mois (Aberle, 1932 ; Lange, 1960). Si des différences importantes de temps passé dans des berceaux existent entre deux populations, dans le cas de figure où ces berceaux seraient associés à un même système d'appareil céphalique, alors des différences de degrés de modifications pourraient en résulter.

Enfin, le dernier de ces processus concerne l'intensité des forces en exercice sur le crâne lors de la croissance. Ce facteur ne dépend pas exclusivement de la durée d'exercice de la force. Il dépend aussi de l'appareil céphalique qui peut exercer des forces différentes selon sa nature. Malheureusement, il est difficilement mesurable et il est donc complexe d'en apprécier l'incidence sur la morphologie neurocrânienne.

Les massages crâniens pourraient être par exemple assimilés à des cas de pratique de modifications artificielles du crâne de courte durée et de faible intensité. Ils s'inscrivent pleinement dans le cadre de pratiques de modifications artificielles du crâne puisque les praticiens modèlent le crâne de l'enfant afin qu'il puisse correspondre à une forme prédéterminée. Citons, par exemple, le cas d'une étude réalisée par Hatt (1915) sur des populations Samis de Suède, dans laquelle cet auteur fait mention d'une femme prodiguant

régulièrement des massages du crâne à un nouveau-né afin de répondre à des considérations à la fois esthétiques mais aussi protectrices. Hatt, 1915 relate ainsi une importance toute particulière attribuée à la fermeture de la fontanelle. Toutefois, il évoque que ces massages n'étaient réalisés qu'au cours des trois à huit premiers jours après la naissance. Contrairement aux cas où les enfants de ces mêmes populations portaient des bonnets explicitement destinés à contraindre la croissance crânienne d'une certaine manière, la durée et l'intensité des massages laissent présager une morphologie crânienne résultante de ces massages probablement proche de la variation physiologique.

Cette étude a montré que les pratiques de modifications s'exprimaient de manière très variable dans leur intensité : de formes très amoindries aux formes les plus extrêmes. Ce constat n'est sûrement pas limité au contexte mésoaméricain puisque, comme l'ont souligné plusieurs auteurs (Torres-Rouff, 2002 ; Tiesler, 2014 ; Thomas, 2017 ; Mannheim et al., 2018)²⁹, la modification artificielle d'un crâne n'obéit pas seulement à la volonté d'attribuer à son porteur une identité visuelle mais répond également à des considérations culturelles appréhendables d'un point de vue émique (i.e., à l'aune des ontologies des populations préhispaniques). Ainsi, les pratiques de modifications du crâne répondent non seulement à une volonté d'attribution d'une identité visuelle, mais aussi à un système de croyances relatif aux soins du nourrisson. En ce sens, la non-modification d'un crâne est aussi révélatrice d'un système de croyances et doit être, dans des contextes où ce type de pratiques s'avérait quasi-généralisé, perçue également comme un fait culturel à part entière qui connaît un essor particulier au cours du Postclassique moyen dans le bassin de Zacapu.

Les transformations culturelles qui interviennent lors de cette période dans la région de Zacapu ne se limitent pas aux pratiques de modifications artificielles du crâne. Elles sont manifestes également à une plus large échelle (e.g., nouvelles pratiques funéraires, phénomène de nucléation des populations au sein de grands centres urbains, établissement de sites à caractère défensif ; Faugère-Kalfon, 1996 ; Michelet et al., 2005 ; Pereira et al., in press). Les profondes modifications culturelles intervenant à cette période sont interprétées comme liées à l'arrivée et l'installation d'une nouvelle population dans le bassin de Zacapu. Pereira (1999, 2018) a alors proposé de mettre en lien l'arrivée de ce nouveau groupe avec la fréquence élevée d'individus au crâne non-modifié, mais aussi avec l'apparition des types de modifications *a*

²⁹ Nous avons réalisé la revue de l'ouvrage de Thomas (2017) que nous faisons figurer en annexe (Annexe 4) de ce travail puisqu'elle met en avant le propos ci-après (Natahi, 2019).

minima. Il suggère que ces caractères culturels puissent être l’apanage de la nouvelle population d’origine exogène récemment installée dans le bassin de Zacapu.

Du fait de leur pouvoir taxinomique à des échelles macroévolutives mais aussi microévolutives, la morphologie de la jonction émail-dentine (e.g., Skinner et al., 2009 ; Le Luyer, 2016 ; Le Luyer et al., 2016 ; Le Luyer & Bayle, 2017 ; Martin et al., 2017 ; Davies et al., 2019) ainsi que l’épaisseur de l’émail (Martin, 1985 ; Macho & Berner, 1993 ; Kono, 2004 ; Macchiarelli et al., 2006 ; Olejniczak et al., 2008 ; Skinner, 2008 ; Skinner et al., 2008 ; Bayle et al., 2009b ; Dean, 2009 ; Guatelli-Steinberg, 2009 ; Smith et al., 2012 ; Pampush et al., 2013 ; Smith, 2013 ; Zanolli et al., 2015) constituent des variables pertinentes pour évaluer les distances biologiques interindividuelles. Ainsi, afin de tester si les nouvelles tendances que sont la non-modification du crâne et les variantes *a minima* représentées par les groupes NJ2 et NJ3 pouvaient constituer des transformations attribuables à un nouveau groupe humain installé dans le bassin de Zacapu, nous avons donc fait appel à ces deux variables dentaires. Nous avons mené une étude préliminaire dans laquelle ont été comparées les différences de conformation de la jonction émail-dentine et la variation topographique de l’épaisseur de l’émail des deuxièmes molaires supérieures d’un échantillon datant de la période classique/épiclassique (300 – 900 apr. J.-C.) à celles de deux individus issus du site de Malpaís Prieto : Mich31_sep16 et Mich31_sep24. Le premier de ces deux individus présente un neurocrâne non-modifié (localisé au sein de la variation physiologique neurocrânienne représentée par le groupe de contrôle) et le second fait partie du groupe NJ2, qui présente une modification artificielle du crâne fronto-obélique *a minima*.

Nos résultats préliminaires ont montré des différences de conformation importantes au niveau de la conformation de la jonction émail-dentine de la deuxième molaire supérieure entre le groupe classique/épiclassique et les deux individus issus de Malpaís Prieto. Elles sont mises en évidence par une représentation graphique des trois premières composantes de l’analyse en composantes principales (PC1, PC2, PC3 ; Figure 6.2). Les conformations des individus issus de Malpaís Prieto sont caractérisées par une expansion marquée de l’hypocône. En outre, la jonction émail-dentine de ces deux individus montre un contour vestibulaire moins arrondi auquel est associée une réduction du diamètre bucco-lingual (Figure 6.2).

Les variations topographiques d’épaisseurs de l’émail ont également montré des différences entre les individus de Malpaís Prieto et ceux datant des périodes antérieures (Figure 6.3). Alors que l’aspect lingual montre une variation homogène entre les deux groupes, des différences

sont observables du côté buccal. Elles se caractérisent par un émail plus épais dans la deuxième moitié buccale des couronnes chez les individus datant de la période classique/épiclassique (Figures 6.3 et 6.4). Cette différence transparait aussi sur les cartographies montrant, pour la partie supérieure et buccale de l'émail, une épaisseur plus importante pour les individus classique/épiclassique (Figure 6.4). Ces résultats peuvent être interprétés à la lumière de différents mécanismes (e.g., taux de sécrétion d'émail différentiel par les améloblastes, différentes périodicités des stries de Retzius ; Mahoney et al., 2018) ; lesquels nécessiteront des analyses plus approfondies pour en comprendre l'étiologie (à l'aide de coupes histologiques par exemple).

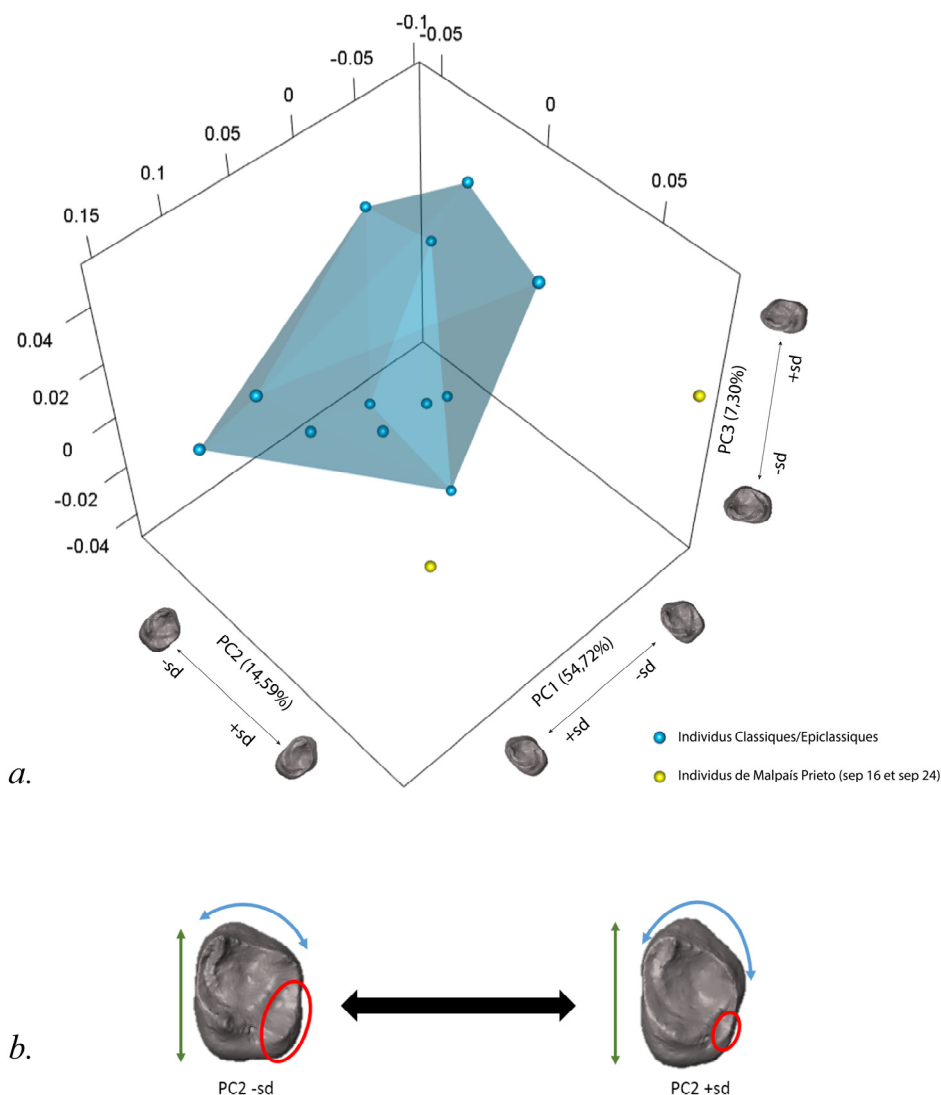
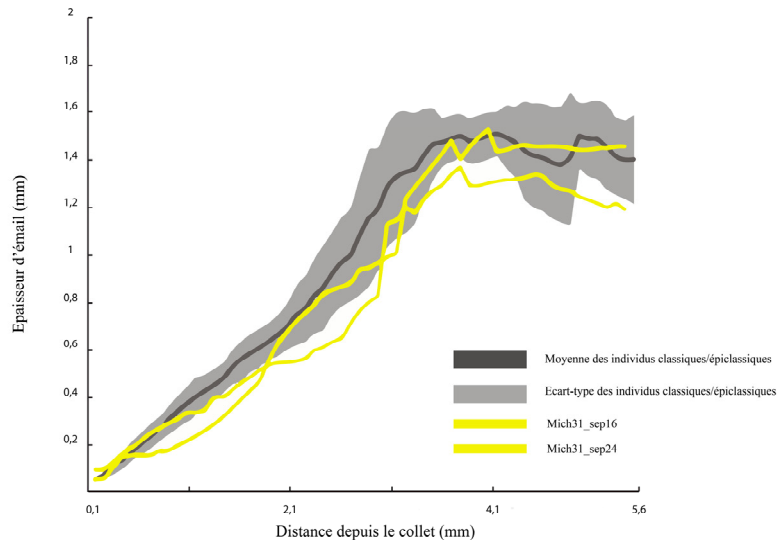


Figure 6.2 (a) Analyse en composantes principales (ACP) comparant les conformations des deuxièmes molaires supérieures chez des individus classiques/épiclassiques avec deux individus du site de Malpais Prieto. (b) Illustration des différences de conformation que caractérise la deuxième composante (PC 2).

Aspect lingual



Aspect buccal

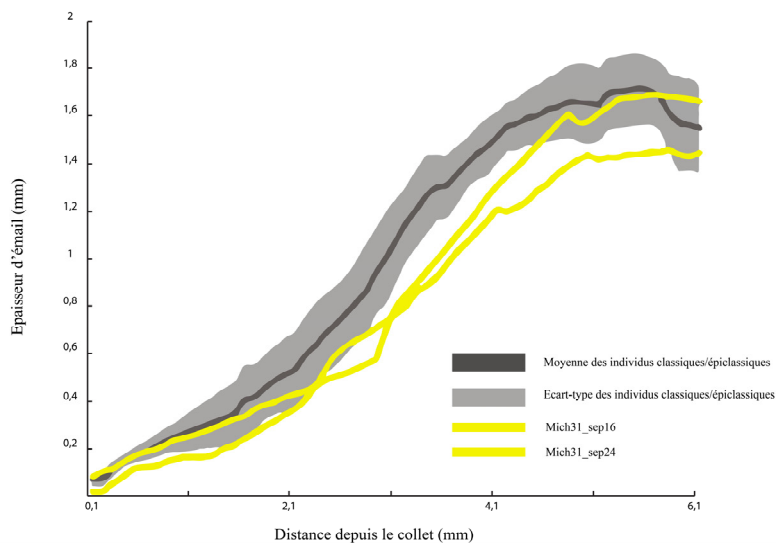
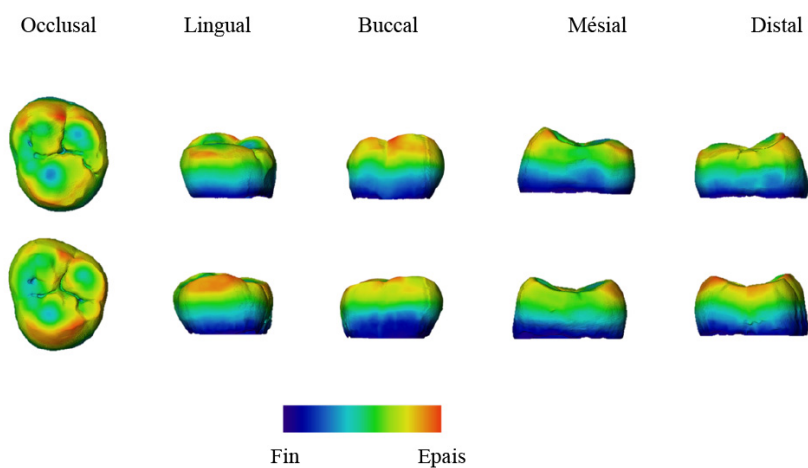


Figure 6.3 Variations topographiques d'épaisseurs d'émail des côtés linguaux et buccaux des deuxièmes molaires supérieures.

Classique/Epiclassique



Malpaís Prieto

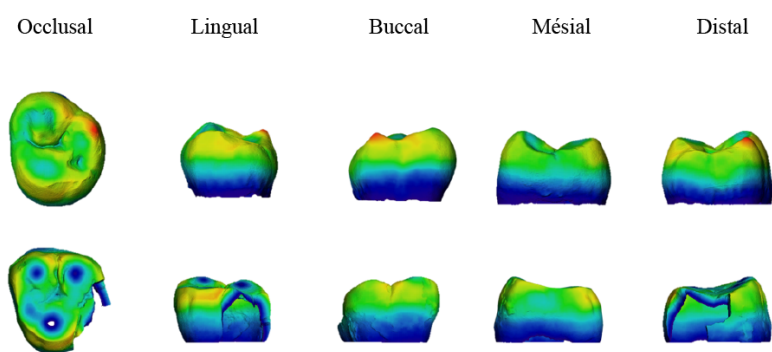


Figure 6.4 Cartographies en 3D de l'épaisseur de l'émail chez deux individus classiques/épiclassiques et les deux individus de Malpaís Prieto.

La présence de différences entre ces deux groupes, en particulier dans la conformation de la jonction émail-dentine renforce l'hypothèse de Pereira (1999, 2018) selon laquelle les pratiques de modifications artificielles du crâne seraient l'apanage de populations autochtones du bassin de Zacapu. Le fait culturel qu'exprime la non-modification du crâne ainsi que les pratiques de modifications *a minima* seraient plutôt attribuables à la population nouvellement installée. De nouvelles acquisitions microtomographiques ont été réalisées pour une série de 24 secondes

molaires supérieures des sites de Cueva del Platanal, El Moro, JR24, Loma Alta, Loma de Jarácuaro, Malpaís Prieto, Nogales, Rincón de las Flores, San Antonio Carupo, TR6 et Yácata El Angel. Les données sont actuellement en cours de traitement et viendront compléter les résultats extrêmement préliminaires que nous avons déjà obtenus³⁰. Une comparaison de plus grande ampleur sera alors possible et permettra de confirmer ou nuancer nos résultats quant à l'existence d'une différence significative dans la morphologie de la jonction émail-dentine entre les individus postclassiques (représentés par le site de Malpaís Prieto) et ceux des périodes antérieures. Les analyses paléogénétiques en cours seront croisées avec les données morphométriques afin de rendre compte de la nature des facteurs évolutifs à l'origine de ces différences. Par ailleurs, il sera aussi important de réaliser des comparaisons selon les types de modifications artificielles afin d'essayer de mieux apprécier si les différences de formes peuvent répondre à des différences populationnelles comme parfois proposés par certains auteurs (Jácome Hernández et al., 2018). Cela nécessitera un échantillon de taille importante pour lequel le caractère modifié et le type de modification ayant affecté le crâne devront être attestés. Il peut s'avérer complexe de mettre en évidence de telles informations, dans la mesure où nombreux sont les individus pour lesquels seuls des os ou des fragments du neurocrâne ont été conservés (e.g., sites du TR6, du JR74, d'El Palacio, du Rincón de las Flores, de Loma Alta, de Yácata El Angel ou encore de Nogales). Ce constat sur les conditions de conservation de la calvaria dans certaines zones du Centre-Ouest mésoaméricain nous a conduits à mesurer, dans le cadre du deuxième article de ce travail de recherche, les possibilités et la fiabilité de l'identification et de la caractérisation des modifications artificielles du crâne à partir d'os isolés de la voûte crânienne.

Si, dans certains contextes, les crânes s'avèrent parfaitement conservés, dans d'autres, ils peuvent être beaucoup moins bien préservés. Etant donné les informations culturelles qu'un type de modification crânienne artificielle est en mesure d'apporter, nous nous sommes donc attachés à évaluer le potentiel informatif d'un os isolé pour l'identification mais aussi pour la caractérisation des modifications crâniennes artificielles. A partir de données 3D obtenues par tomodensitométrie, nous avons pu quantifier les variations inter et intra-type pour différents variants de modifications artificielles du crâne. Nous avons mis en évidence que l'identification du caractère modifié d'un crâne pouvait être réalisée à partir de tout os isolé. La caractérisation

³⁰ Ces résultats préliminaires ont fait l'objet d'une communication affichée lors du 17ème International Symposium on Dental Morphology et 2nd congrès de l'International Association for Paleodontology qui a eu lieu à Bordeaux en 2017, et ont également été présentés lors d'une communication orale au colloque international de l'ANR MESOMOBILE à Mexico en 2018.

du type de modifications artificielles est en revanche plus complexe. Elle est réalisable pour certains types à partir de certains os bien spécifiques de la calvaria. Cette étude a montré que la mauvaise préservation du tissu osseux ou la conservation différentielle de certains os de la voûte ne doivent pas constituer un frein à l'identification et/ou à la caractérisation des pratiques de modification. Les os retrouvés dans ce type de contexte présentent un potentiel informatif quant à ces phénomènes culturels, lequel avait été jusqu'à présent sous-estimé.

La tomodynamométrie peut également être utilisée pour la préservation virtuelle de certaines informations sur la morphologie originale d'un crâne dans des contextes de mauvaise conservation du tissu osseux directement visible au moment de la fouille. En effet, il est possible d'intervenir directement sur la fouille afin d'obtenir une information sur la potentielle présence d'une modification artificielle sur un crâne en prélevant ce dernier en bloc afin d'en restituer le volume original virtuellement. Les individus du site du Rincón de las Flores ont fait l'objet de cette procédure (Pereira et al., 2018). Le site du Rincón de las Flores a été identifié lors d'une prospection et a fait l'objet d'un sondage en 2016 dans le cadre du projet Uacúsecha. Des fouilles extensives furent entreprises la même année et purent permettre la mise au jour de deux chambres funéraires. Si la fouille complète de l'une d'entre elles a été reportée à la campagne suivante, huit individus ont été découverts dans l'autre chambre.

Beaucoup des restes montrant un mauvais état de conservation, en association avec l'*Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía* (ENCRyM), nous avons participé et procédé aux prélèvements en blocs des crânes des individus afin d'en restituer virtuellement le volume original après analyses tomodynamométriques (Figure 6.5). Les données produites par imagerie 3D révèlent une fragmentation importante des crânes et légitiment encore davantage le choix d'un recours à de tels prélèvements, dans la mesure où toute tentative d'identification et de caractérisation de modifications crâniennes se serait avérée stérile une fois chaque fragment du bloc cranio-facial dégagé du sédiment. S'il semble bien que certains individus présentent des déformations crâniennes intentionnelles, il convient tout de même de rester prudent face à cette assertion. En effet, certains fragments osseux de la voûte montrent des anomalies morphologiques susceptibles d'être attribuables à des processus taphonomiques. Comme précédemment évoqué, le poids du sédiment ou certains contextes pédologiques (Laitman & Heimbuch, 1982 ; Franciscus & Trinkaus, 1988 ; Gunz et al., 2009 ; Weber & Bookstein, 2011 ; Tiesler, 2014 ; Jurda et al., 2015) peuvent intervenir de manière directe sur la morphologie d'un crâne et causer des déformations de sa forme. Cela semble être le cas pour certains des individus de Rincón de las Flores. Afin de remédier à ces problèmes

taphonomiques, des auteurs ont proposé et montré l'intérêt des méthodes de rétrodéformation (Arbour & Currie, 2012 ; Tallman et al., 2014 ; Schlager et al., 2018 ; Moya-Costa et al., 2019 ; Profico et al., in press)³¹. Il semble particulièrement intéressant de pouvoir utiliser ce type de méthodes dans le cadre des modifications crâniennes artificielles. Toutefois, il convient de souligner que ce type d'analyse doit être mené avec grande précaution car, comme nous l'avons montré, les modifications artificielles crâniennes sont source d'asymétries marquées (e.g., Natahi et al., 2019). Dans la mesure où la rétrodéformation fait appel à la symétrie d'un crâne en vue d'en restituer la morphologie originelle, il paraît alors primordial de bien identifier en amont de ces analyses les régions anatomiques touchées par ces processus taphonomiques. L'identification et la différenciation des modifications crâniennes artificielles parmi des individus montrant des altérations taphonomiques de cet ordre pourraient également être entreprises à condition que des facteurs autres que la forme/conformation du neurocrâne puissent aussi attester de la présence de ces pratiques. Plusieurs auteurs avaient signalé l'intérêt des structures internes et en particulier de l'épaisseur de la voûte dans la reconnaissance des modifications artificielles du crâne (e.g., Crubézy, 1986 ; Maureille et al., 1995 ; Khonsari et al., 2013 ; Boman et al., 2016 ; Baab et al., 2018). Dans le cadre du présent travail, nous avons testé ce potentiel informatif en évaluant la covariation entre la conformation des os de la calvaria et plusieurs variables d'épaisseurs de voûte.

L'étude de la covariation entre conformation des os de la calvaria et épaisseurs de voûte respectives a montré que l'épaisseur de la voûte constituait un autre signal informatif de la présence et du type de modifications qui ont pu affecter un crâne. Toutefois, son étude doit être encore plus approfondie afin de mieux identifier les processus à l'origine des signaux enregistrés chez les individus présentant des modifications artificielles crâniennes (i.e., amincissement et épaissement de la voûte). Une importance doit être accordée à la distinction entre tables internes et externes, et diploé. Ainsi, des méthodes comme celles proposées par Tsegai et al. (2017a), Tsegai et al. (2017b) ou encore Baab et al. (2018) et qui consistent à caractériser l'épaisseur corticale des deux tables ainsi que celle du diploé, nous paraissent adéquates.

³¹ Ces techniques consistent à déformer virtuellement la ou les partie(s) anatomique(s) d'un individu ayant subi des altérations taphonomiques importantes.

Figure 6.5 Illustration du protocole de reconstitution virtuelle des crânes prélevés en blocs sur le site de Rincón de las Flores

En outre, cette distinction constitue un enjeu dans la mesure où la quantification des différentes structures internes de la voûte pourrait permettre une meilleure compréhension des modalités de croissance du cerveau quand cette dernière est mécaniquement contrainte et dont le caractère modifié du neurocrâne en constitue une réponse plastique (Moss, 1968). L'attention prêtée aux modalités d'intégration, aux contraintes spatiales et fonctionnelles et aux réponses des éléments osseux neurocrâniens, est fondamentale pour comprendre de manière dynamique les procédés par lesquels un crâne acquiert une morphologie modifiée. Approfondir notre compréhension de ce phénomène qu'est la croissance artificiellement contrainte est primordial afin de pouvoir peut-être restituer la « chaîne opératoire » d'une pratique de modification. Une telle ambition apparaît complexe dans la mesure où elle ne peut se limiter à une simple identification et restitution des plans de compression sur un crâne. Elle doit considérer les différences de propriétés biomécaniques d'un os à un autre, mais également d'une classe d'âge à une autre. Enfin, elle doit prendre en compte les concepts de canalisation et de stabilité développementale (Waddington, 1942 ; Debat & David, 2001) pour discuter des différences de degrés d'intensité obtenus entre certaines formes. En effet, Tiesler (2014) propose que, dans les cas d'exposition à des contraintes de courte durée, le neurocrâne de l'enfant tend à regagner une morphologie physiologique. Un tel phénomène est d'ailleurs comparable aux déformations qui affectent le neurocrâne au moment de la naissance (lors du passage du canal pelvien) et qui finissent par s'estomper (Ami et al., 2019).

L'accès aux structures internes pourra également permettre une meilleure compréhension quant aux processus qui sous-tendent l'expression de certains caractères préférentiellement exprimés chez les individus avec des crânes artificiellement modifiés. En effet, Blair (1921) a proposé à l'issue d'une dissection entreprise sur les crânes de deux sujets présentant des dépressions postcoronales, que la manifestation de ces caractères puisse causer une affection de la table externe seule. Il estime que son expression résulte directement d'une contrainte mécanique imposée par une variation morphologique de l'aponévrose épicroânienne. Par extension, Khudaverdyan (2016, 2018) a donc considéré son expression comme l'empreinte d'un élément ayant contraint la croissance du crâne, alors que Tiesler (1999) y voit plutôt une réponse physiologique différentielle de la croissance suturale face à la contrainte mécanique exercée par la modification artificielle du crâne. La distinction et la quantification des trois couches de la voûte crânienne par le biais de tomographie par densitométrie permettraient alors de confirmer ou infirmer les observations de Blair (1921) et de statuer sur l'étiologie de ce caractère chez des individus aux crânes artificiellement modifiés.

Dans son ensemble, le présent travail rend compte de l'efficacité qu'un recours combiné à des techniques d'imagerie 3D et à des observations morphoscopiques peut apporter dans l'identification et la caractérisation des pratiques de modifications crâniennes artificielles. Il a également démontré les possibilités qu'offrait ce type d'analyses dans la mise en évidence de la diversité de ces formes et des techniques utilisées pour les produire. La fréquence importante, au sein des populations préhispaniques, des pratiques de modification artificielle du crâne de plus ou moins forte amplitude soulève la question de la pertinence de l'utilisation de la conformation neurocrânienne dans la reconstitution des histoires populationnelles des groupes humains des Amériques. En outre, une diagnose sexuelle est parfois réalisée à partir de ces crânes sans de réelles connaissances sur l'influence que des pratiques de modification artificielle, même de moindre intensité, pourraient avoir sur l'expression du dimorphisme sexuel.

Il nous revient donc de nous interroger sur la pertinence d'utiliser la conformation crânienne comme indicateur pour reconstituer les modalités de peuplement de certaines régions des Amériques. A minima, il convient, avant toute inférence à ce propos, de procéder à des examens minutieux des crânes afin de statuer sur leur nature modifiée ou non. L'accès aux structures internes que confèrent les méthodes d'imagerie médicale permettrait de dépasser certaines barrières quant aux études de distances biologiques interindividuelles ou quant à la diagnose sexuelle à partir d'éléments crâniens. En effet, plusieurs études ont montré que, chez les hommes modernes, le labyrinthe osseux atteignait sa maturité avant la naissance (Hublin et al., 1996 ; Spoor et al., 2002a ; Spoor et al., 2002b ; Jeffery & Spoor, 2004). Ainsi, ce dernier est peu sensible aux stimuli épigénétiques intervenant après la naissance (à l'instar des manipulations du crâne). Par ailleurs, une récente étude a souligné le signal évolutif neutre du labyrinthe osseux et son potentiel à reconstituer les histoires populationnelles des groupes humains (Ponce de León et al., 2018). De plus, plusieurs autres études (Sato et al., 1991 ; Osipov et al., 2013 ; Braga et al., 2019) ont enregistré l'expression d'un signal dimorphique entre les individus de sexes féminins et masculins. Elles attestent du potentiel que présente le labyrinthe osseux dans la détermination du sexe d'un individu de manière assez fiable quand ce dernier est uniquement représenté par son crâne. Son étude constitue donc une alternative satisfaisante aux méthodes de détermination sexuelle fondées sur l'ensemble du bloc craniofacial et doit être privilégiée dans le contexte des Amériques où les pratiques de modifications artificielles du crâne étaient répandues.

Le présent travail rend compte de l'efficacité des techniques d'imagerie dans l'identification et la caractérisation du phénomène culturel que constitue la pratique de modification artificielle d'un crâne. Il montre l'intérêt de faire appel à une approche intégrée qui comprend aussi bien des données morphoscopiques que morphométriques. L'acquisition d'images 3D de manière systématisée et leur échange par l'intermédiaire de plateformes comme NESPOS (Bayle et al., 2011), MorphoMuseum (Lebrun & Orliac, 2016) ou MorphoSource (Boyer et al., 2016) permettrait alors de franchir une étape vers des comparaisons à plus grandes échelles et, peut-être *in fine* de discuter de la variabilité de ces pratiques et d'en mesurer l'étendue de la distribution.

L'essor des techniques d'imagerie, dont la résolution ne cesse de croître au fil des progrès technologiques, laisse aussi entrevoir de nouvelles perspectives de recherche sur ces pratiques de modification artificielle du crâne, avec comme ambition de pouvoir en restituer les « chaînes opératoires ». Pour cela, l'augmentation significative de la taille des échantillons, ainsi que l'intégration de spécimens immatures, seront déterminantes. Les simulations développementales (e.g., Rogers Ackermann & Krovitz, 2002 ; Mitteroecker et al., 2005 ; Singleton et al., 2010 ; Gunz & Bulygina, 2012 ; Gunz et al., 2012 ; Scott et al., 2014 ; Simons & Frost, 2016) constituent par exemple un moyen de mettre en évidence les différences de modalités de croissance et de développement (i.e., trajectoires de croissance et trajectoires développementales) d'un type de modification artificielle d'un crâne à un autre. Elles offriront aussi une réelle opportunité de quantifier dans quelle mesure les paramètres liés à la durée ou au temps d'exposition à l'appareil céphalique peuvent intervenir sur les différences de modification artificielle du crâne.

Bibliographie

- Aberle, S. B. D. (1932). Child mortality among pueblo Indians. *American Journal of Physical Anthropology*, 16(3), 339-349.
- Adeloye, A., Kattan, K. R., & Silverman, F. N. (1975). Thickness of the normal skull in the American blacks and whites. *American Journal of Physical Anthropology*, 43(1), 23-30.
- Alcalá, J. (2008). *Relación de Michoacán*. Zamora, Michoacán, México: El Colegio de Michoacán.
- Algee-Hewitt, B. F. B., & Wheat, A. D. (2016). The reality of virtual anthropology: Comparing digitizer and laser scan data collection methods for the quantitative assessment of the cranium. *American Journal of Physical Anthropology*, 160(1), 148-155.
- Alvarado Viñas, A., & Manzanilla, L. R. (2018). Modificación cultural de la cabeza. Los casos de Teopancazco, Teotihuacan. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica* (Vol. 1, pp. 373-386). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Ambialet, M. J. (1893). *La déformation artificielle de la tête dans la région toulousaine*. (Thèse d'exercice de Médecine), Toulouse.
- American Academy of Pediatrics. (2000). Task Force on Sudden Infant Death Syndrome. Changing concepts of sudden infant death syndrome. Implications for infant sleeping environment and sleep position. *Pediatrics*, 105, 650-656.
- American Academy of Pediatrics. (2005). Task Force on Sudden Infant Death Syndrome. The changing concept of sudden infant death syndrome: diagnostic coding shifts, controversies regarding the sleeping environment, and new variables to consider in reducing risk. *Pediatrics*, 116(5), 1245.
- Ami, O., Maran, J. C., Gabor, P., Whitacre, E. B., Musset, D., Dubray, C., Mage, G., & Boyer, L. (2019). Three-dimensional magnetic resonance imaging of fetal head molding and brain shape changes during the second stage of labor. *PLoS one*, 14(5), e0215721.
- Antón, S. C. (1989). Intentional cranial vault deformation and induced changes of the cranial base and face. *American Journal of Physical Anthropology*, 79(2), 253-267.
- Antón, S. C., Jaslow, C. R., & Swartz, S. M. (1992). Sutural complexity in artificially deformed human (*Homo sapiens*) crania. *Journal of Morphology*, 214(3), 321-332.
- Antón, S. C., & Weinstein, K. J. (1999). Artificial cranial deformation and fossil Australians revisited. *Journal of Human Evolution*, 36(2), 195-209. doi: <https://doi.org/10.1006/jhev.1998.0266>
- Anzelmo, M., Ventrice, F., Barbeito-Andrés, J., Pucciarelli, H. M., & Sardi, M. L. (2015). Ontogenetic changes in cranial vault thickness in a modern sample of *Homo sapiens*. *American Journal of Human Biology*, 27(4), 475-485.
- Arbour, V. M., & Currie, P. J. (2012). Analyzing taphonomic deformation of ankylosaur skulls using retrodeformation and finite element analysis. *PLoS one*, 7(6), e39323. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0039323>
- Argenta, L. C., David, L. R., Wilson, J. A., & Bell, W. O. (1996). An increase in infant cranial deformity with supine sleeping position. *The Journal of Craniofacial Surgery*, 7(1), 5-11.
- Arnauld, C., Carot, P., & Fauvet-Berthelot, M.-F. (1993). *Arqueología de las Lomas en la cuenca lacustre de Zacapu, Michoacán, México*. México: Centro de estudios mexicanos y centroamericanos.
- Aufderheide, A. C., Rodríguez-Martín, C., & Langsjoen, O. (1998). *The Cambridge encyclopedia of human paleopathology* (Vol. 478). Cambridge, England: Cambridge University Press Cambridge.
- Baab, K. L., Copes, L. E., Ward, D. L., Wells, N., & Grine, F. E. (2018). Using modern human cortical bone distribution to test the systemic robusticity hypothesis. *Journal of Human Evolution*, 119, 64-82.
- Balzeau, A., & Rougier, H. (2010). Is the suprainiac fossa a Neandertal autapomorphy? A complementary external and internal investigation. *Journal of Human Evolution*, 58(1), 1-22.
- Barnes, E. (1994). *Developmental defects of the axial skeleton in paleopathology*. Niwot, United States of America: University Press of Colorado.
- Barrientos Juárez, I. (2012). *Aproximación a la historia biológica de la población de Chupícuaro Guanajuato. Análisis de los sitios TR6 y JR24*. (Tesis de Licenciatura en Antropología Física), Escuela Nacional de Antropología e Historia.

- Bastir, M., & Rosas, A. (2004). Facial heights: evolutionary relevance of postnatal ontogeny for facial orientation and skull morphology in humans and chimpanzees. *Journal of Human Evolution*, 47(5), 359-381.
- Bastir, M., Rosas, A., & O'Higgins, P. (2006). Craniofacial levels and the morphological maturation of the human skull. *Journal of Anatomy*, 209(5), 637-654. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2006.00644.x>
- Baughan, B., Demirjian, A., Levesque, G. Y., & Lapalme-Chaput, L. (1979). The pattern of facial growth before and during puberty, as shown by French-Canadian girls. *Annals of Human Biology*, 6(1), 59-76.
- Bautista, J., & Ortega, A. (2005). *Catálogo de los cráneos aislados de la Colección Solórzano* (Vol. 483). Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Bayle, P. (2008). *Analyses quantitatives par imagerie à haute résolution des séquences de maturation dentaire et des proportions des tissus des dents déciduales chez les Néanderthaliens et les Hommes modernes*. (Thèse de doctorat), Université Toulouse III-Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Bayle, P., Bondioli, L., Macchiarelli, R., Mazurier, A., Puymerau, L., Volpato, V., & Zanolli, C. (2011). Three-dimensional imaging and quantitative characterization of human fossil remains. Examples from the NESPOS database. *Pleistocene databases. Acquisition, storing, sharing. Mettmann: Wissenschaftliche Schriften des Neanderthal Museums*, 4, 29-46.
- Bayle, P., Braga, J., Mazurier, A., & Macchiarelli, R. (2009a). Brief communication: High-resolution assessment of the dental developmental pattern and characterization of tooth tissue proportions in the late Upper Paleolithic child from La Madeleine, France. *American Journal of Physical Anthropology*, 138(4), 493-498.
- Bayle, P., Braga, J., Mazurier, A., & Macchiarelli, R. (2009b). Dental developmental pattern of the Neanderthal child from Roc de Marsal: a high-resolution 3D analysis. *Journal of Human Evolution*, 56(1), 66-75.
- Beudet, A., Carlson, K. J., Clarke, R. J., de Beer, F., Dhaene, J., Heaton, J. L., Pickering, T. R., & Stratford, D. (2018). Cranial vault thickness variation and inner structural organization in the StW 578 hominin cranium from Jacovec Cavern, South Africa. *Journal of Human Evolution*, 121, 204-220.
- Behie, A. M., & Miszkiewicz, J. J. (2019). Enamel neonatal line thickness in deciduous teeth of Australian children from known maternal health and pregnancy conditions. *Early Human Development*, 137, 104821.
- Bigoni, L., Velemínská, J., & Brůžek, J. (2010). Three-dimensional geometric morphometric analysis of cranio-facial sexual dimorphism in a Central European sample of known sex. *Homo*, 61(1), 16-32.
- Björk, A., & Björk, L. (1964). Artificial deformation and cranio-facial asymmetry in ancient Peruvians. *Journal of Dental Research*, 43(3), 353-362.
- Blackwood, B., & Danby, P. M. (1955). A study of artificial cranial deformation in New Britain. *The Journal of the Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland*, 85(1/2), 173-191.
- Blair, D. M. (1921). A note on the post-coronal sulcus, with dissections of the epicranial aponeurosis in two cases of its occurrence. *Journal of Anatomy*, 56(Pt 1), 44.
- Blom, D. E. (2005). Embodying borders: human body modification and diversity in Tiwanaku society. *Journal of Anthropological Archaeology*, 24(1), 1-24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2004.10.001>
- Boas, F. E., & Fleischmann, D. (2012). CT artifacts: causes and reduction techniques. *Imaging in Medicine*, 4(2), 229-240.
- Bolender, C., Hanzel, B., & Turlot, J.-C. (1978). Analyses multidimensionnelles du profil cranio-facial précolombien et péruvien contemporain. *Revue d'Orthopédie Dento-Faciale*, 12(4), 397-421.
- Boman, F., Froment, A., & Charlier, P. (2016). Variations in the thickness of the cranial vault in a deformed skull from pre-Hispanic Ancón (Peru). *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 28(3-4), 221-225.
- Bondioli, L. (2011). MPSAK (my personal swiss army knife), image processing software. Available in: A digital radiographic atlas of the great ape skull and dentition. Dean C.M. & Wood, B. (eds.).

- Bookstein, F. L. (1989). Principal warps: Thin-plate splines and the decomposition of deformations. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 11(6), 567-585.
- Bookstein, F. L. (1991). *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Bookstein, F. L. (1997a). Landmark methods for forms without landmarks: morphometrics of group differences in outline shape. *Medical Image Analysis*, 1(3), 225-243. doi: [https://doi.org/10.1016/S1361-8415\(97\)85012-8](https://doi.org/10.1016/S1361-8415(97)85012-8)
- Bookstein, F. L. (1997b). *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology* : Cambridge University Press.
- Bookstein, F. L., & Mardia, K. V. (2003). The five components of directional asymmetry. *Stochastic geometry, biological structure, and images*, 35-40.
- Boyer, D. M., Gunnell, G. F., Kaufman, S., & McGeary, T. M. (2016). Morphosource: Archiving and sharing 3-d digital specimen data. *The Paleontological Society Papers*, 22, 157-181.
- Bradley, J. P., Shahinian, H., Levine, J. P., Rowe, N., & Longaker, M. T. (2000). Growth restriction of cranial sutures in the fetal lamb causes deformational changes, not craniosynostosis. *Plastic and reconstructive surgery*, 105(7), 2416-2423.
- Braga, J., Zimmer, V., Dumoncel, J., Samir, C., de Beer, F., Zanolli, C., Pinto, D., Rohlf, F. J., & Grine, F. E. (2019). Efficacy of diffeomorphic surface matching and 3D geometric morphometrics for taxonomic discrimination of Early Pleistocene hominin mandibular molars. *Journal of Human Evolution*, 130, 21-35.
- Bräuer, G. (1988). Osteometrie. In R. Knussmann (Ed.), *Anthropologie: Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen; zugleich 4. Auflage des Lehrbuchs der Anthropologie, begründet von Rudolf Martin* (pp. 160-232). Stuttgart, Deutschland: Gustav Fischer.
- Brothwell, D. R. (1963). *Digging up bones. The excavation, treatment and study of human skeletal remains*. London, England: British Museum.
- Brothwell, D. R. (1975). Possible evidence of a cultural practice affecting head growth in some late Pleistocene East Asian and Australasian populations. *Journal of Archaeological Science*, 2(1), 75-77.
- Brown, P. (1981). Artificial cranial deformation: a component in the variation in Pleistocene Australian Aboriginal crania. *Archaeology in Oceania*, 16(3), 156-167. doi: <https://doi.org/10.1002/j.1834-4453.1981.tb00026.x>
- Brown, P. (2010). Nacurrie 1: mark of ancient Java, or a caring mother's hands, in terminal Pleistocene Australia? *Journal of Human Evolution*, 59(2), 168-187. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2010.05.007>
- Brůžek, J. (2002). A method for visual determination of sex, using the human hip bone. *American Journal of Physical Anthropology*, 117(2), 157-168. doi: <https://doi.org/10.1002/ajpa.10012>
- Brůžek, J., Santos, F., Dutailly, B., Murail, P., & Cunha, E. (2017). Validation and reliability of the sex estimation of the human os coxae using freely available DSP2 software for bioarchaeology and forensic anthropology. *American Journal of Physical Anthropology*, 164(2), 440-449. doi: <https://doi.org/10.1002/ajpa.23282>
- Brůžek, J., Schmitt, A., & Murail, P. (2005). Identification biologique individuelle en paléanthropologie. Détermination du sexe et estimation de l'âge au décès à partir du squelette. In O. Dutour, J.-J. Hublin & B. Vandermeersch (Eds.), *Origine et évolution humaine. Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, Paris* (pp. 217-246).
- Bucchi, A., Püschel, T., & Manríquez, G. (2016). Artificial Cranial Modification in San Pedro de Atacama and the Loa Basin: A Quantitative Approach to Its Role as a Marker of Social Identity. *Revista Chilena de Antropología*(34).
- Buikstra, J. E., & Ubelaker, D. H. (1994). *Standards for data collection from human skeletal remains* (Vol. 44). Fayetteville, United States of America.
- Bulygina, E., Mitteroecker, P., & Aiello, L. (2006). Ontogeny of facial dimorphism and patterns of individual development within one human population. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 131(3), 432-443.

- Buschang, P. H., Baume, R. M., & Nass, G. G. (1983). A craniofacial growth maturity gradient for males and females between 4 and 16 years of age. *American Journal of Physical Anthropology*, 61(3), 373-381.
- Butler, P. M. (1956). The ontogeny of molar pattern. *Biological Reviews*, 31(1), 30-69.
- Butler, P. M. (1999). *The relation of cusp development and calcification to growth*. Paper presented at the Proceedings of the 11th International Symposium on Dental Morphology, Oulu, Finland.
- Byron, C. D., Borke, J., Yu, J., Pashley, D., Wingard, C. J., & Hamrick, M. W. (2004). Effects of increased muscle mass on mouse sagittal suture morphology and mechanics. *The Anatomical Record Part A: Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology: An Official Publication of the American Association of Anatomists*, 279(1), 676-684.
- Byron, C. D., Hamrick, M. W., & Wingard, C. J. (2006). Alterations of temporalis muscle contractile force and histological content from the myostatin and Mdx deficient mouse. *Archives of oral biology*, 51(5), 396-405.
- Carot, P. (1993). *Le site de loma alta, lac de zacapu, michoacan (mexique)*. (Thèse de doctorat), Université de Paris 1, Panthéon-Sorbonne, Paris, France.
- Caso, A. (1930). *Informe preliminar de las exploraciones realizadas en Michoacan*. Paper presented at the Anales del museo nacional de México.
- Castañeda López, C., & Cano Romero, Y. (1993). Los túmulos funerarios de Chupicuaro: el caso de La Virgen, Guanajuato. *Cuadernos de Arquitectura Mesoamerica*, 25, 23-27.
- Catlin, G. (1857). Illustrations of the manners, customs, and condition of the North American Indians : with letters and notes written during eight years of travel and adventure among the wildest and most remarkable tribes now existing ; with 360 engravings, from the author's original paintings. 2, 265.
- Chervenak, F. A., Jeanty, P., Cantraine, F., Chitkara, U., Venus, I., Berkowitz, R. L., & Hobbins, J. C. (1984). The diagnosis of fetal microcephaly. *American journal of obstetrics and gynecology*, 149(5), 512-517.
- Cheverud, J. M., Kohn, L. A., Konigsberg, L. W., & Leigh, S. R. (1992). Effects of fronto-occipital artificial cranial vault modification on the cranial base and face. *American Journal of Physical Anthropology*, 88(3), 323-345. doi: <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330880307>
- Cheverud, J. M., & Midkiff, J. E. (1992). Effects of fronto-occipital cranial reshaping on mandibular form. *American Journal of Physical Anthropology*, 87(2), 167-171.
- Chisholm, J. S. (2017). *Navajo infancy: An ethological study of child development*. New York, United States of America: Routledge.
- Clark, J. L., Dobson, S. D., Antón, S. C., Hawks, J., Hunley, K. L., & Wolpoff, M. H. (2007). Identifying artificially deformed crania. *International Journal of Osteoarchaeology*, 17(6), 596-607. doi: <https://doi.org/10.1002/oa.910>
- Claude, J. (2008). *Morphometrics with R* : Springer Science & Business Media.
- Cocilovo, J. A., Varela, H. H., & O'brien, T. G. (2011). Effects of artificial deformation on cranial morphogenesis in the south central Andes. *International Journal of Osteoarchaeology*, 21(3), 300-312.
- Cohen, A. S. (2016). *Creating an Empire: Local Political Change at Angamuco, Michoacan, Mexico*. (Ph. D. dissertation), University of Washington, Seattle, United States of America.
- Coleman, M. N., & Colbert, M. W. (2007). CT thresholding protocols for taking measurements on three-dimensional models. *American Journal of Physical Anthropology*, 133(1), 723-725.
- Conroy, G. C., & Vannier, M. W. (1984). Noninvasive three-dimensional computer imaging of matrix-filled fossil skulls by high-resolution computed tomography. *Science*, 226(4673), 456-458.
- Copes, L. (2012). *Comparative and experimental investigations of cranial robusticity in mid-Pleistocene hominins*. (Ph. D. dissertation), Arizona State University, Tempe, United States of America.
- Coquerelle, M. (2011). *Analyse tridimensionnelle du système dento-mandibulaire des hommes modernes et des chimpanzés (Pan troglodytes) au cours de l'ontogénèse*. (Thèse de doctorat), Université Toulouse III-Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Cormack, A. M. (1963). Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. *Journal of Applied Physics*, 34(9), 2722-2727.

- Cottin, M., Khonsari, R. H., & Friess, M. (2017). Assessing cranial plasticity in humans: The impact of artificial deformation on masticatory and basicranial structures. *Comptes Rendus Palevol*, 16(5-6), 545-556.
- Cray, J., Mooney, M. P., & Siegel, M. I. (2010). Timing of ectocranial suture activity in Pan troglodytes as related to cranial volume and dental eruption. *The Anatomical Record: Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology*, 293(8), 1289-1296.
- Crubézy, E. (1986). *La nécropole de Rivel (Venerque-Haute-Garonne): étude anthropologique, essai d'interprétation paléthnographique*. (Mémoire de diplôme), Ecole des hautes études en sciences sociales, Toulouse, France.
- d'Arcy Thompson, W. (1917). *On growth and form* (Vol. 16). Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Daems, A., & Croucher, K. (2007). Artificial cranial modification in prehistoric Iran: Evidence from crania and figurines. *Iranica Antiqua*, 42, 1-21.
- Darras, V., Faugère-Kalfon, B., Durlot, C., Liot, C., Reveles, J., Bérumen, R., Cervantes, O., Caillaud, C., & David, C. (1999). Nouvelles recherches sur la culture Chupicuaro (Guanajuato, Mexique). *Journal de la Société des Américanistes*, 85, 343-351.
- Darras, V., & Faugère, B. (2007). Chupicuaro, entre el Occidente y el Altiplano central. Un balance de los conocimientos y las nuevas aportaciones. In B. Faugère-Kalfon (Ed.), *Dinámicas culturales entre el Occidente, el Centro-Norte y la cuenca de México, del Preclásico al Epiclásico* (pp. 51-84). México: El Colegio de Michoacán - Centro de estudios mexicanos y centroamericanos.
- Dastugue, J., & Torre, S. (1965). *Etude anthropologique des ossements du cimetière Saint-Martin de Caen*. Paper presented at the Annales de Normandie.
- David, C. (2000). *Bilan des connaissances sur les pratiques funéraires à Chupicuaro, Guanajuato, Mexique*. (Mémoire de master), Université Paris 1 - Panthéon Sorbonne, Paris, France.
- Davies, B. R., & Durán, M. (2003). Malformations of the cranium, vertebral column, and related central nervous system: morphologic heterogeneity may indicate biological diversity. *Birth Defects Research Part A: Clinical and Molecular Teratology*, 67(8), 563-571.
- Davies, T. W., Delezene, L. K., Gunz, P., Hublin, J.-J., & Skinner, M. M. (2019). Endostructural morphology in hominoid mandibular third premolars: Geometric morphometric analysis of dentine crown shape. *Journal of Human Evolution*, 133, 198-213.
- Davis, G. R., & Wong, F. S. L. (1996). X-ray microtomography of bones and teeth. *Physiological Measurement*, 17(3), 121.
- De Boer, H. H., Van der Merwe, A. L., & Soerdjbalie-Maikoe, V. V. (2016). Human cranial vault thickness in a contemporary sample of 1097 autopsy cases: relation to body weight, stature, age, sex and ancestry. *International Journal of Legal Medicine*, 130(5), 1371-1377.
- Dean, C. M. (2009). Extension rates and growth in tooth height of modern human and fossil hominin canines and molars. In T. Koppe, G. Meyer, K. W. Alt, A. Brook, M. C. Dean, I. Kjaer, J. R. Lukacs, B. H. Smith & M. F. Teaford (Eds.), *Comparative dental morphology* (Vol. 13, pp. 68-73): Karger Publishers.
- Dean O'Loughlin, V. L. (1996). Comparative endocranial vascular changes due to craniosynostosis and artificial cranial deformation. *American Journal of Physical Anthropology*, 101(3), 369-385.
- Dean O'Loughlin, V. L. (2004). Effects of different kinds of cranial deformation on the incidence of wormian bones. *American Journal of Physical Anthropology*, 123(2), 146-155.
- Dean, V. L. (1995). Sinus and meningeal vessel pattern changes induced by artificial cranial deformation: A pilot study. *International Journal of Osteoarchaeology*, 5(1), 1-14.
- Debat, V., & David, P. (2001). Mapping phenotypes: canalization, plasticity and developmental stability. *Trends in ecology & evolution*, 16(10), 555-561.
- Del Papa, M. C., & Perez, S. I. (2007). The influence of artificial cranial vault deformation on the expression of cranial nonmetric traits: Its importance in the study of evolutionary relationships. *American Journal of Physical Anthropology*, 134(2), 251-262.
- Delaire, J., & Billet, J. (1964). Considération sur les déformations crâniennes intentionnelles. *Rev Stomatol*, 65, 535-541.
- Delattre, A., Fenart, R., Darras, P., Becart, P., & Pelerin, P. (1964). Position vestibulaire du point Z de Klaatsch au cours de quelques ontogenèses crâniennes comparées. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 6(3), 393-442.

- Delisle, F. (1880). *Contribution à l'étude des déformations artificielles du crâne*. (Thèse d'exercice de Médecine), Faculté de Médecine de Paris, Paris.
- Dembo, A., & Imbelloni, J. (1938). *Deformaciones intencionales del cuerpo humano de carácter étnico*. Buenos Aires, Argentina: José Anesi.
- Demirjian, A., Goldstein, H., & Tanner, J. M. (1973). A new system of dental age assessment. *Human Biology*, 45(2), 211-227.
- Dempster, A. P., Laird, N. M., & Rubin, D. B. (1977). Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 39(1), 1-22.
- Dennis, W., & Dennis, M. G. (1940). The effect of cradling practices upon the onset of walking in Hopi children. *The Journal of Genetic Psychology*, 56, 77.
- Desachy, B. (2004). Le sériographe EPPM: un outil informatisé de sériation graphique pour tableaux de comptages. *Revue archéologique de Picardie*, 3(1), 39-56.
- DeSilva, J. M. (2010). Revisiting the "midtarsal break". *American Journal of Physical Anthropology*, 141(2), 245-258.
- Dingwall, E. J. (1931). *Artificial cranial deformation. A contribution to the study of ethnic mutilations*. London, England: Bale.
- Dorsey, G. A. (1897). Wormian bones in artificially deformed Kwakiutl crania. *American Anthropologist*, 10(6), 169-173.
- Drake, R., Vogl, A. W., Mitchell, A. W., Tibbitts, R., & Richardson, P. (2015). *Gray's Atlas of Anatomy E-Book*. Philadelphia, United States of America: Churchill Livingstone, Elsevier.
- Dryden, I. L., & Mardia, K. V. (1998). *Statistical shape analysis*. New York, United States of America: Wiley.
- Duchon, J. (1977). Splines minimizing rotation-invariant semi-norms in Sobolev spaces *Constructive theory of functions of several variables* (pp. 85-100): Springer.
- Duncan, W. N. (2009). Cranial modification among the Maya: Absence of evidence or evidence of absence. In K. Knudson & C. M. Stojanowski (Eds.), *Bioarchaeology and identity in the Americas* (pp. 177-193). Gainesville, United States of America: University Press of Florida.
- Duncan, W. N. (2018). Sellamiento ritual, envoltura y vendaje en la modificación cefálica Mesoamericana. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica. Una perspectiva continental* (Vol. 1, pp. 261-282). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Duncan, W. N., & Hofling, C. A. (2011). Why the head? Cranial modification as protection and ensoulment among the Maya. *Ancient Mesoamerica*, 22(1), 199-210. doi: <https://doi.org/10.1017/S0956536111000162>
- Durband, A. C. (2008). Artificial cranial deformation in Kow Swamp 1 and 5: A response to Curnoe (2007). *HOMO-Journal of Comparative Human Biology*, 59(4), 261-269. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2008.06.001>
- Durband, A. C. (2014). Brief communication: Artificial cranial modification in Kow Swamp and Cohuna. *American Journal of Physical Anthropology*, 155(1), 173-178. doi: <https://doi.org/10.1002/ajpa.22563>
- Dürer, A. (1528). *Hierinn sind begriffen vier Bücher von menschlicher Proportion*. Nürnberg, Deutschland: J. Formschneyder.
- Dwyer, T., Ponsonby, A.-L. B., Newman, N. M., & Gibbons, L. E. (1991). Prospective cohort study of prone sleeping position and sudden infant death syndrome. *The Lancet*, 337(8752), 1244-1247.
- Edwards, J., & Rogers, T. (2018). The accuracy and applicability of 3D modeling and printing blunt force cranial injuries. *Journal of Forensic Sciences*, 63(3), 683-691.
- El-Najjar, M. Y., & Dawson, G. L. (1977). The effect of artificial cranial deformation on the incidence of Wormian bones in the lambdoidal suture. *American Journal of Physical Anthropology*, 46(1), 155-160.
- Enlow, D. H. (1962). A study of the post-natal growth and remodeling of bone. *American Journal of Anatomy*, 110(2), 79-101.
- Enlow, D. H., & Hans, M. G. (1996). *Essentials of facial growth*. Philadelphia, United States of America: W.B. Saunders Company

- Estrada Balmori, E., & Porter de Moedano, M. (1945). La ceramica de Chupicuaro. *Revista Mexicana de Estudios Antropológicos*, 7, 89-112.
- Ewing, J. F. (1950). *Hyperbrachycephaly as influenced by cultural conditioning* (Vol. 23). Cambridge, United States of America: The Museum.
- Falk, D., Hildebolt, C., Smith, K., Morwood, M. J., Sutikna, T., Saptomo, E. W., Imhof, H., Seidler, H., & Prior, F. (2007). Brain shape in human microcephalics and Homo floresiensis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(7), 2513-2518.
- Falkenburger, F. (1938). Recherches anthropologiques sur la déformation artificielle du crâne. *Journal de la Société des Américanistes*, 1-70.
- Farabee, W. C. (1922). *Indian tribes of eastern Peru* (Vol. 10). Cambridge, United States of America: The Museum.
- Faugère-Kalfon, B. (1996). *Entre Zacapu y Río Lerma: culturas en una zona fronteriza* (Vol. 15): Centre français d'études mexicaines et centraméricaines.
- Feldkamp, L. A., Davis, L. C., & Kress, J. W. (1984). Practical cone-beam algorithm. *Journal of the Optical Society of America A*, 1(6), 612-619.
- Ferembach, D. (1954). Contribution a l'étude de la craniotrigonometrie. L'angle central de Klaatsch. *L'Anthropologie*, 58, 62-73.
- Ferembach, D., Schwidetzky, I., & Stloukal, M. (1979). Recommandations pour déterminer l'âge et le sexe sur le squelette. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 6(1), 7-45.
- Fernandes, D., Sirak, K., Cheronet, O., Howcroft, R., Čavka, M., Los, D., Burmaz, J., Pinhasi, R., & Novak, M. (2019). Cranial deformation and genetic diversity in three adolescent male individuals from the Great Migration Period from Osijek, eastern Croatia. *PloS one*, 14(8), e0216366. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216366>
- Ferros, I., Mora, M., Obeso, I., Jimenez, P., & Martinez-Insua, A. (2016). Relationship between the cranial base and the mandible in artificially deformed skulls. *Orthodontics & Craniofacial Research*, 19(4), 222-233.
- Ferros, I., Mora, M. J., Obeso, I. F., Jimenez, P., & Martinez-Insua, A. (2014). The nasomaxillary complex and the cranial base in artificial cranial deformation: relationships from a geometric morphometric study. *European Journal of Orthodontics*, 37(4), 403-411.
- Fisher, C. T., Cohen, A. S., Solinis-Casparius, R., Pezzutti, F. L., Bush, J., Forest, M., & Torvinen, A. (2019). A Typology of Ancient Purépecha (Tarascan) Architecture from Angamuco, Michoacán, Mexico. *Latin American Antiquity*, 30(3), 510-528. doi: <https://doi.org/10.1017/laq.2019.50>
- Flaherty, K., Singh, N., & Richtsmeier, J. T. (2016). Understanding craniosynostosis as a growth disorder. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Developmental Biology*, 5(4), 429-459.
- Fleming, P. J., Gilbert, R., Azaz, Y., Berry, P. J., Rudd, P. T., Stewart, A., & Hall, E. (1990). Interaction between bedding and sleeping position in the sudden infant death syndrome: a population based case-control study. *British Medical Journal*, 301(6743), 85-89.
- Fletcher, A., Pearson, J., & Ambers, J. (2008). The Manipulation of Social and Physical Identity in the Pre-Pottery Neolithic: Radiographic Evidence for Cranial Modification at Jericho and its Implications for the Plastering of Skulls. *Cambridge Archaeological Journal*, 18(3), 309-325. doi: <https://doi.org/10.1017/S0959774308000383>
- Florance, C. A. (1989). *A Survey and Analysis of Late and Terminal Preclassic Settlement Along the Lerma River in Southeastern Guanajuato, Mexico*. (Ph. D. dissertation), Columbia University, New York, United States of America.
- Forest, M. (2014). *L'organisation sociospatiale des agglomérations urbaines du Malpais de Zacapu, Michoacán, Mexique (1250-1450 après J.-C.)*. (Thèse de doctorat), Université de Paris 1, Panthéon-Sorbonne, Paris, France.
- Franciscus, R. G., & Trinkaus, E. (1988). Nasal morphology and the emergence of Homo erectus. *American Journal of Physical Anthropology*, 75(4), 517-527. doi: <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330750409>
- Freddolino, M. K. (1973). *An Investigation into the "Pre-Tarascan" Cultures of Zacapu, Michoacán, México*. (Ph. D. dissertation), Yale University, New Haven, United States of America.
- Frey, L., & Hauser, W. A. (2003). Epidemiology of neural tube defects. *Epilepsia*, 44, 4-13.

- Friess, M. (2012). Scratching the surface? The use of surface scanning in physical and paleoanthropology. *Journal of Anthropological Sciences*, 90, 1-25.
- Friess, M., & Baylac, M. (2003). Exploring artificial cranial deformation using elliptic Fourier analysis of Procrustes aligned outlines. *American Journal of Physical Anthropology*, 122(1), 11-22. doi: <https://doi.org/10.1002/ajpa.10286>
- Frost, H. M. (1987). Bone “mass” and the “mechanostat”: a proposal. *The anatomical record*, 219(1), 1-9.
- Gaffiot, F. (Ed.) (2016) Gaffiot 2016, version V. M. Komarov. : .
- Gagan, J. R., Tholpady, S. S., & Ogle, R. C. (2007). Cellular dynamics and tissue interactions of the dura mater during head development. *Birth Defects Research Part C: Embryo Today: Reviews*, 81(4), 297-304.
- Galdames, F. J. (2012). *Segmentation d'images IRM du cerveau pour la construction d'un modèle anatomique destiné à la simulation bio-mécanique*. (Thèse de doctorat), Université de Grenoble, Grenoble, France.
- Gardner, J., Lewkowicz, D., & Turkewitz, G. (1977). Development of postural asymmetry in premature human infants. *Developmental Psychobiology*, 10(5), 471-480.
- Garn, S. M., Lewis, A. B., & Bonné, B. (1962). Third molar formation and its development course. *The Angle Orthodontist*, 32(4), 270-279.
- Garvin, H. M., & Ruff, C. B. (2012). Sexual dimorphism in skeletal browridge and chin morphologies determined using a new quantitative method. *American Journal of Physical Anthropology*, 147(4), 661-670.
- Garvin, H. M., Sholts, S. B., & Mosca, L. A. (2014). Sexual dimorphism in human cranial trait scores: effects of population, age, and body size. *American journal of physical anthropology*, 154(2), 259-269.
- Geller, P. (2011a). Getting a head start in life: Pre-Columbian Maya cranial modification from infancy to ancestorhood *The bioarchaeology of the human head: Decapitation, decoration, and deformation* (pp. 241-261): University Press of Florida.
- Geller, P. L. (2011b). Getting a head start in life: Pre-Columbian Maya cranial modification from infancy to ancestorhood. In M. Bonogofsky (Ed.), *The Bioarchaeology of the Human Head: Decapitation, Deformation, and Decoration* (pp. 241-261). Gainesville, United States of America: University Press of Florida.
- Gerszten, P. C. (1993). An investigation into the practice of cranial deformation among the Pre-Columbian peoples of northern Chile. *International Journal of Osteoarchaeology*, 3(2), 87-98.
- Gerszten, P. C., & Gerszten, E. (1995). Intentional cranial deformation: a disappearing form of self-mutilation. *Neurosurgery*, 37(3), 374-382.
- Gervais, V. (2001). El uso del mecapal en Guatemala y sus consecuencias sobre la columna cervical (primeras observaciones). *Estudios de Antropología Biológica*, 10(2), 496-501.
- Gill, G. W. (1985). Cultural implications of artificially modified human remains from Northwestern Mexico. In M. S. Foster & P. C. Weigand (Eds.), *The archaeology of West and Northwest Mesoamerica* (pp. 193-215). Boulder, United States of America: Westview Press.
- Gilmore, J. H., Lin, W., Prastawa, M. W., Looney, C. B., Vetsa, Y. S. K., Knickmeyer, R. C., Evans, D. D., Smith, J. K., Hamer, R. M., & Lieberman, J. A. (2007). Regional gray matter growth, sexual dimorphism, and cerebral asymmetry in the neonatal brain. *Journal of Neuroscience*, 27(6), 1255-1260.
- Godinho, R. M., & O'Higgins, P. (2017). Virtual Reconstruction of Cranial Remains: The H. Heidelbergensis, Kabwe 1 Fossil. In D. Errickson & T. Thompson (Eds.), *Human Remains: Another Dimension* (pp. 135-147): Academic Press.
- Gómez-Valdés, J. A., Bautista Martínez, J., & Romano Pacheco, A. (2007). Morfometría geométrica aplicada al estudio de la deformación cefálica intencional. *Estudios de Antropología Biológica*, 13(1), 117-134.
- Gómez-Valdés, J. A., Tiesler, V., & Romano, A. (2018). El modelado cefálico tabular superior. Una visión desde el sitio El Zapotal, Veracruz. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica* (Vol. 2, pp. 457-485). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.

- Goodall, C. (1991). Procrustes methods in the statistical analysis of shape. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 53(2), 285-321.
- Gosse, L.-A. (1855). *Essai sur les déformations artificielles du crâne*. Paris, France: J.-B. Baillière.
- Gottlieb, K. (1978). Artificial cranial deformation and the increased complexity of the lambdoid suture. *American Journal of Physical Anthropology*, 48(2), 213-214.
- Gould, S. J. (1966). Allometry and size in ontogeny and phylogeny. *Biological Reviews*, 41(4), 587-638.
- Graham, J. M., Kreutzman, J., Earl, D., Halberg, A., Samayoa, C., & Guo, X. (2005). Deformational brachycephaly in supine-sleeping infants. *The Journal of Pediatrics*, 146(2), 253-257. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2004.10.017>
- Graw, M., Czarnetzki, A., & Haffner, H. T. (1999). The form of the supraorbital margin as a criterion in identification of sex from the skull: investigations based on modern human skulls. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 108(1), 91-96.
- Guatelli-Steinberg, D. (2009). Recent studies of dental development in Neandertals: Implications for Neandertal life histories. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 18(1), 9-20.
- Gunz, P. (2005). *Statistical and geometric reconstruction of hominid crania: reconstructing australopithecine ontogeny*. (Ph.D. Dissertation), Universität Wien, Wien, Österreich.
- Gunz, P., & Bulygina, E. (2012). The Mousterian child from Teshik-Tash is a Neanderthal: A geometric morphometric study of the frontal bone. *American Journal of Physical Anthropology*, 149(3), 365-379.
- Gunz, P., & Mitteroecker, P. (2013). Semilandmarks: a method for quantifying curves and surfaces. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, 24(1), 103-109. doi: <https://doi.org/10.4404/hystrix-24.1-6292>
- Gunz, P., Mitteroecker, P., & Bookstein, F. L. (2005). Semilandmarks in three dimensions. In D. E. Slice (Ed.), *Modern morphometrics in physical anthropology* (pp. 73-98). New York, United States of America: Kluwer Academic / Plenum Publishers.
- Gunz, P., Mitteroecker, P., Neubauer, S., Weber, G. W., & Bookstein, F. L. (2009). Principles for the virtual reconstruction of hominin crania. *Journal of Human Evolution*, 57(1), 48-62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2009.04.004>
- Gunz, P., Neubauer, S., Golovanova, L., Doronichev, V., Maureille, B., & Hublin, J.-J. (2012). A uniquely modern human pattern of endocranial development. Insights from a new cranial reconstruction of the Neandertal newborn from Mezmaiskaya. *Journal of human evolution*, 62(2), 300-313.
- Gunz, P., Neubauer, S., Maureille, B., & Hublin, J.-J. (2010). Brain development after birth differs between Neanderthals and modern humans. *Current biology*, 20(21), R921-R922.
- Gunz, P., Tilot, A. K., Wittfeld, K., Teumer, A., Shapland, C. Y., Van Erp, T. G. M., Dannemann, M., Vernot, B., Neubauer, S., & Guadalupe, T. (2019). Neandertal introgression sheds light on modern human endocranial globularity. *Current Biology*, 29(1), 120-127. e125.
- Haglund, W. D., & Sorg, M. H. (1996). *Forensic taphonomy: the postmortem fate of human remains*. Boston, United States of America: CRC Press.
- Hakenbeck, S. (2009). 'Hunnic' modified skulls: physical appearance, identity and the transformative nature of migrations. In D. W. Sayer, Howard (Ed.), *Mortuary Practices and Social Identities in the Middle Ages* (pp. 64-80). Exeter, England: Exeter University Press.
- Halenar-Price, L., & Tallman, M. (2019). Investigating the effect of endocranial volume on cranial shape in platyrrhines and the relevance of this relationship to interpretations of the fossil record. *American Journal of Physical Anthropology*, 169(1), 12-30.
- Hammond, A. S., Plavcan, J. M., & Ward, C. V. (2016). A validated method for modeling anthropoid hip abduction in silico. *American Journal of Physical Anthropology*, 160(3), 529-548.
- Haslam, M., Gumert, M. D., Biro, D., Carvalho, S., & Malaivijitnond, S. (2013). Use-wear patterns on wild macaque stone tools reveal their behavioural history. *PLoS One*, 8(8), e72872.
- Hatt, G. (1915). Artificial moulding of the infant's head among the Scandinavian Lapps. *American Anthropologist*, 17(2), 245-256. doi: <https://doi.org/10.1525/aa.1915.17.2.02a00030>
- Hauser, G., & De Stefano, G. F. (1989). *Epigenetic variants of the human skull*. Stuttgart, Deutschland: Schweizerbart.

- Henderson, J. H., Chang, L. Y., Song, H. M., Longaker, M. T., & Carter, D. R. (2005). Age-dependent properties and quasi-static strain in the rat sagittal suture. *Journal of biomechanics*, 38(11), 2294-2301.
- Henderson, J. H., Longaker, M. T., & Carter, D. R. (2004). Sutural bone deposition rate and strain magnitude during cranial development. *Bone*, 34(2), 271-280.
- Herrera-Fritot, R. (1964). *Craneotrigonometría: tratado práctico de geometría craneana*. La Havana, Cuba: Departamento de Antropología, Comisión Nacional de la Academia de Ciencias de la República de Cuba.
- Herring, S. W. (1993). Epigenetic and functional influences on skull growth. In J. Hanken & B. Hall (Eds.), *The skull* (Vol. 1, pp. 153-206). Chicago, United States of America: University of Chicago Press.
- Herring, S. W. (2008). Mechanical influences on suture development and patency *Craniofacial Sutures* (Vol. 12, pp. 41-56): Karger Publishers.
- Heuzé, Y., Martínez-Abadías, N., Stella, J. M., Senders, C. W., Boyadjiev, S. A., Lo, L. J., & Richtsmeier, J. T. (2012). Unilateral and bilateral expression of a quantitative trait: asymmetry and symmetry in coronal craniosynostosis. *Journal of Experimental Zoology Part B: Molecular and Developmental Evolution*, 318(2), 109-122.
- Hill, P. A. (1998). Bone remodelling. *British Journal of Orthodontics*, 25(2), 101-107.
- Houle, D., Pélabon, C., Wagner, G. P., & Hansen, T. F. (2011). Measurement and meaning in biology. *The Quarterly Review of Biology*, 86(1), 3-34.
- Hounsfield, G. N. (1973). Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system. *The British Journal of Radiology*, 46(552), 1016-1022.
- Hrdlička, A. (1912). *Artificial deformations of the human skull, with especial reference to America*. Paper presented at the Actas del XVII Congreso Internacional de Americanistas, Buenos Aires, Argentina.
- Hublin, J.-J., Spoor, F., Braun, M., Zonneveld, F., & Condemi, S. (1996). A late Neanderthal associated with Upper Palaeolithic artefacts. *Nature*, 381(6579), 224.
- Huggare, J., & Rønning, O. (1997). Growth of the cranial vault. *Fundamentals of Craniofacial Growth*. Boca Raton, NY: CRC Press, LLC, 363-387.
- Hutchison, B. L., Hutchison, L. A. D., Thompson, J. M. D., & Mitchell, E. A. (2004). Plagiocephaly and brachycephaly in the first two years of life: a prospective cohort study. *Pediatrics*, 114(4), 970-980. doi: <https://doi.org/10.1542/peds.2003-0668-F>
- Imbelloni, J. (1921). Introducción a nuevos estudios de craneotrigonometría. *Anales del Museo Nacional de Historia Natural de Buenos Aires*, 21, 31-94.
- Immel, A., Le Cabec, A., Bonazzi, M., Herbig, A., Temming, H., Schuenemann, V. J., Bos, K. I., Langbein, F., Harvati, K., & Bridault, A. (2016). Effect of X-ray irradiation on ancient DNA in sub-fossil bones—Guidelines for safe X-ray imaging. *Scientific Reports*, 6, 32969.
- Ishida, H., & Dodo, Y. (1990). Populations in Japan. *Human biology*, 62(3), 389-401.
- Jácome Hernández, C. A., González Zozaya, F., & Almendros López, L. (2018). Deformación Craneal en el Occidente Mesoamericano. Nuevas evidencias e interpretaciones sobre esta práctica cultural. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica* (Vol. 2, pp. 683-707). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Jadot, E. (2013). Sondeos estratigráficos en el sitio de El Palacio (Mich. 23). In G. Pereira, D. Michelet, E. Jadot, A. Manin, M. Elliott & M. Forest (Eds.), *Proyecto Uacúsecha. Informe técnico sobre los trabajos de campo llevados a cabo en Malpaís Prieto y otros asentamientos de la región de Zacapu, Michoacán. Temporada 5 (2012)* (pp. 107-124). México.
- Jadot, E. (2016). *Productions céramiques et mobilités dans la région tarasque de Zacapu (Michoacan, Mexique): continuités et ruptures techniques entre 850 et 1450 apr. J.-C.* (Thèse de doctorat), Université de Paris 1, Panthéon-Sorbonne, Paris, France.
- Jeffery, N., & Spoor, F. (2004). Prenatal growth and development of the modern human labyrinth. *Journal of Anatomy*, 204(2), 71-92.
- Jimenez, P., Martinez-Insua, A., Franco-Vazquez, J., Otero-Cepeda, X. L., & Santana, U. (2012). Maxillary changes and occlusal traits in crania with artificial fronto-occipital deformation. *American Journal of Physical Anthropology*, 147(1), 40-51.

- Jin, S.-W., Sim, K.-B., & Kim, S.-D. (2016). Development and growth of the normal cranial vault: an embryologic review. *Journal of Korean Neurosurgical Society*, 59(3), 192.
- Joganic, J. L., Lynch, J. M., Littlefield, T. R., & Verrelli, B. C. (2009). Risk factors associated with deformational plagiocephaly. *Pediatrics*, 124(6), e1126-e1133.
- Jolicoeur, P., Baron, G., & Cabana, T. (1988). Cross-sectional growth and decline of human stature and brain weight in 19th-century Germany. *Growth, development, and aging: GDA*, 52(4), 201-206.
- Jungers, W. L., Falsetti, A. B., & Wall, C. E. (1995). Shape, relative size, and size-adjustments in morphometrics. *American Journal of Physical Anthropology*, 38(S21), 137-161.
- Jungers, W. L., & Minns, R. J. (1979). Computed tomography and biomechanical analysis of fossil long bones. *American Journal of Physical Anthropology*, 50(2), 285-290.
- Jurda, M., Urbanová, P., & Králík, M. (2015). The Post-Mortem Pressure Distortion of Human Crania Uncovered in an Early Medieval Pohansko (Czech Republic) Graveyard. *International Journal of Osteoarchaeology*, 25(4), 539-549. doi: <https://doi.org/10.1002/oa.2321>
- Kamina, P. (2014). *Carnet d'anatomie Tome 2 - Tête, cou, dos* (3e édition ed.): Maloine.
- Kato, K., Shinoda, K.-i., Kitagawa, Y., Manabe, Y., Oyamada, J., Igawa, K., Vidal, H., & Rokutanda, A. (2007). A possible case of prophylactic supra-inion trepanation in a child cranium with an auditory deformity (pre-Columbian Ancon site, Peru). *Anthropological Science*, 115(3), 227-232.
- Kendall, D. G. (1977). The diffusion of shape. *Advances in applied probability*, 9(3), 428-430.
- Kendall, D. G. (1981). The statistics of shape. *Interpreting multivariate data*, 75-80.
- Ketoff, S., Girinon, F., Schlager, S., Friess, M., Schouman, T., Rouch, P., & Khonsari, R. (2017). Zygomatic bone shape in intentional cranial deformations: a model for the study of the interactions between skull growth and facial morphology. *Journal of Anatomy*, 230(4), 524-531.
- Khonsari, R. H., Friess, M., Nysjö, J., Odri, G., Malmberg, F., Nyström, I., Messo, E., Hirsch, J. M., Cabanis, E. A. M., & Kunzelmann, K. H. (2013). Shape and volume of craniofacial cavities in intentional skull deformations. *American journal of physical anthropology*, 151(1), 110-119.
- Khudaverdyan, A. Y. (2011). Trepanation and artificial cranial deformations in ancient Armenia. *Anthropological Review*, 74(1), 39-55. doi: <https://doi.org/10.2478/v10044-010-0004-1>
- Khudaverdyan, A. Y. (2016). Artificial Deformation of Skulls from Bronze Age and Iron Age Armenia. *The Mankind Quarterly*, 56(4), 513-534.
- Khudaverdyan, A. Y. (2018). Tumpline Deformation on Skulls from Late Bronze and Early Iron Age Armenia: A Cause of Enigmatic Cranial Superstructures? *Mankind Quarterly*, 59(1).
- Kirchhoff, P. (1943). Mesoamérica sus límites geográficos, composición étnica y caracteres culturales. *Acta American*, 2, 92-107.
- Kirchhoff, P. (1960). Mesoamérica sus límites geográficos, composición étnica y caracteres culturales. *Suplemento de la revista TLATOANI*, 3, 13.
- Klaatsch, H. (1909). Kraniomorphologie und Kraniotrigonometrie. *Archiv. fur Anthropologie NF*, 8.
- Klingenberg, C. P. (1996). Multivariate Allometry. In L. F. Marcus, M. Corti, A. Loy, G. J. P. Naylor & D. E. Slice (Eds.), *Advances in Morphometrics* (pp. 23-49). Boston, United States of America: Springer US.
- Klingenberg, C. P. (2016). Size, shape, and form: concepts of allometry in geometric morphometrics. *Development genes and evolution*, 226(3), 113-137.
- Knickmeyer, R. C., Gouttard, S., Kang, C., Evans, D., Wilber, K., Smith, J. K., Hamer, R. M., Lin, W., Gerig, G., & Gilmore, J. H. (2008). A structural MRI study of human brain development from birth to 2 years. *Journal of Neuroscience*, 28(47), 12176-12182.
- Knudson, K. J., & Torres-Rouff, C. (2009). Investigating cultural heterogeneity in San Pedro de Atacama, northern Chile, through biogeochemistry and bioarchaeology. *American Journal of Physical Anthropology*, 138(4), 473-485.
- Kohn, L. A. P., Leigh, S. R., & Cheverud, J. M. (1995). Asymmetric vault modification in Hopi crania. *American Journal of Physical Anthropology*, 98(2), 173-195.
- Kohn, L. A. P., Leigh, S. R., Jacobs, S. C., & Cheverud, J. M. (1993). Effects of annular cranial vault modification on the cranial base and face. *American Journal of Physical Anthropology*, 90(2), 147-168.

- Kono, R. T. (2004). Molar enamel thickness and distribution patterns in extant great apes and humans: new insights based on a 3-dimensional whole crown perspective. *Anthropological Science*, 0404120004-0404120004.
- Kupczik, K., & Hublin, J.-J. (2010). Mandibular molar root morphology in Neanderthals and Late Pleistocene and recent *Homo sapiens*. *Journal of Human Evolution*, 59(5), 525-541.
- Kuzminsky, S. C., Tung, T. A., Hubbe, M., & Villaseñor-Marchal, A. (2016). The application of 3D geometric morphometrics and laser surface scanning to investigate the standardization of cranial vault modification in the Andes. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10, 507-513. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.11.007>
- Lagunas Rodríguez, Z. (1974). Observaciones recientes sobre la lesión suprainiana. *Boletín del Instituto Nacional de Anthropología e Historia Época 2*, 11, 47-54.
- Laitman, J. T., & Heimbuch, R. C. (1982). The basicranium of Plio-Pleistocene hominids as an indicator of their upper respiratory systems. *American Journal of Physical Anthropology*, 59(3), 323-343. doi: <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330590315>
- Lange, C. H. (1960). *Cochiti: A New Mexico pueblo, past and present* (Vol. 44). Austin, United States of America: University of Texas Press.
- Larysz, D., Larysz, P., Filipek, J., Wolański, W., Gzik, M., & Kawlewska, E. (2013). Morphometric analysis of the skull shape in children with hydrocephalus. In J. M. R. S. N. Tavares, Jorge R.M. (Ed.), *Computational vision and medical image processing IV: VIPIMAGE 2013* (pp. 337-340). Boca Raton, United States of America: CRC Press.
- Le Luyer, M. (2016). *Évolution dentaire dans les populations humaines de la fin du Pléistocène et du début de l'Holocène (19000 – 5500 cal. BP) : une approche intégrée des structures externe et interne des couronnes pour le Bassin aquitain et ses marges*. (Thèse de doctorat), Université de Bordeaux, Bordeaux, France.
- Le Luyer, M., & Bayle, P. (2017). Microevolution of outer and inner structures of upper molars in Late Pleistocene and Early Holocene humans. *Comptes Rendus Palevol*, 16(5-6), 632-644.
- Le Luyer, M., Coquerelle, M., Rottier, S., & Bayle, P. (2016). Internal tooth structure and burial practices: insights into the Neolithic necropolis of Gurgy (France, 5100-4000 cal. BC). *PLoS one*, 11(7), e0159688.
- Lebrun, R. (2018). MorphoDig, an open-source 3D freeware dedicated to biology. Available at: <http://morphomuseum.com/morphodig>.
- Lebrun, R., & Orliac, M. J. (2016). Morphomuseum: an online platform for publication and storage of virtual specimens. *The Paleontological Society Papers*, 22, 183-195.
- Leigh, S. R. (2004). Brain growth, life history, and cognition in primate and human evolution. *American Journal of Primatology*, 62(3), 139-164.
- Lenhossék, J. (1878). *Des déformations artificielles du crâne en général, de celles de deux crânes makrocéphales trouvés en Hongrie et d'un crâne provenant des temps barbares du même pays*. Budapest, Hongrie: Université royale de Hongrie.
- Lestrel, P. E., & Roche, A. F. (1976). Fourier analysis of the cranium in trisomy 21. *Growth*, 40(4), 385-398.
- Libby, J., Marghoub, A., Johnson, D., Khonsari, R. H., Fagan, M. J., & Moazen, M. (2017). Modelling human skull growth: a validated computational model. *Journal of the Royal Society Interface*, 14(130), 20170202.
- Lieberman, D. E., McBratney, B. M., & Krovitz, G. (2002). The evolution and development of cranial form in *Homo sapiens*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(3), 1134-1139.
- Lieberman, D. E., Pearson, O. M., & Mowbray, K. M. (2000). Basicranial influence on overall cranial shape. *Journal of Human Evolution*, 38(2), 291-315. doi: <https://doi.org/10.1006/jhev.1999.0335>
- Lin, K. Y., Nolen, A. A., Gampfer, T. J., Jane, J. A., Opperman, L. A., & Ogle, R. C. (1997). Elevated levels of transforming growth factors beta 2 and beta 3 in lambdoid sutures from children with persistent plagiocephaly. *The Cleft palate-craniofacial journal*, 34(4), 331-337.
- López Austin, A. (2004). *Cuerpo humano e ideología: las concepciones de los antiguos Nahuas*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas.

- Lorensen, W. E., & Cline, H. E. (1987). *Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm*. Paper presented at the ACM siggraph computer graphics.
- Lozada, M. C. (2011). Marking ethnicity through pre-mortem cranial modification among the Pre-Inca Chiribaya, Perú. In M. Bonogofsky (Ed.), *The Bioarchaeology of the Human Head: Decapitation, Deformation, and Decoration* (pp. 228-240). Gainesville, United States of America: University Press of Florida.
- Lu, K. H. (1965). Harmonic analysis of the human face. *Biometrics*, 491-505.
- Lumholtz, C. (1902). *Unknown Mexico: A record of five years' exploration among the tribes of the western Sierra Madre; in the tierra caliente of Tepic and Jalisco; and among the Tarascos of Michoacan* (Vol. 2). New York, United States of America: Charles Scribner's sons.
- Lumholtz, C., & Hrdlička, A. (1898). Marked human bones from a prehistoric Tarasco Indian burial place in the State of Michoacan, Mexico. *Bulletin American Museum of Natural History*, 5, 61-79.
- Lynnerup, N. (2001). Cranial thickness in relation to age, sex and general body build in a Danish forensic sample. *Forensic science international*, 117(1-2), 45-51.
- Macchiarelli, R., Bondioli, L., Debénath, A., Mazurier, A., Tournepiche, J.-F., Birch, W., & Dean, C. M. (2006). How Neanderthal molar teeth grew. *Nature*, 444(7120), 748.
- Macchiarelli, R., Mazurier, A., & Volpato, V. (2007). L'apport des nouvelles technologies à l'étude des Néandertaliens. In B. Vandermeersch & B. Maureille (Eds.), *Les Néandertaliens. Biologie et Cultures* (pp. 169-179). Paris, France: Editions du CTHS.
- Macho, G. A., & Berner, M. E. (1993). Enamel thickness of human maxillary molars reconsidered. *American Journal of Physical Anthropology*, 92(2), 189-200.
- Mahgoub, A. N., Reyes-Guzmán, N., Böhnelt, H., Siebe, C., Pereira, G., & Dorison, A. (2018). Paleomagnetic constraints on the ages of the Holocene Malpais de Zacapu lava flow eruptions, Michoacán (Mexico): implications for archeology and volcanic hazards. *The Holocene*, 28(2), 229-245.
- Mahoney, P., Miskiewicz, J. J., Chapple, S., Le Luyer, M., Schlecht, S. H., Stewart, T. J., Griffiths, R. A., Deter, C., & Guatelli-Steinberg, D. (2018). The biorhythm of human skeletal growth. *Journal of anatomy*, 232(1), 26-38.
- Mannheim, B., Davis, A. R., & Velasco, M. C. (2018). Cranial Modification in the Central Andes. In V. Tiesler & M. C. Lozada (Eds.), *Social Skins of the Head: Body Beliefs and Ritual in Ancient Mesoamerica and the Andes* (pp. 223-233). Albuquerque, United States of America: University of New Mexico Press.
- Manríquez, G., González-Bergás, F. E., Salinas, J. C., & Espouey, O. (2006). Deformación intencional del cráneo en poblaciones arqueológicas de Arica, Chile: análisis preliminar de morfometría geométrica con uso de radiografías craneofaciales. *Chungará*, 38(1), 13-34. doi: <https://doi.org/10.4067/S0717-73562006000100004>
- Marcus, J., & Flannery, K. V. (2004). The coevolution of ritual and society: New 14C dates from ancient Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(52), 18257-18261. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.0408551102>
- Marcus, L., Hingst-Zaher, E., & Zaher, H. (2000). Application of landmark morphometrics to skulls representing the orders of living mammals. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, 11(1).
- Mardia, K. V., Bookstein, F. L., & Moreton, I. J. (2000). Statistical assessment of bilateral symmetry of shapes. *Biometrika*, 285-300. doi: <https://doi.org/10.1093/biomet/87.2.285>
- Marghoub, A., Libby, J., Babbs, C., Fagan, M. J., & Moazen, M. (2017). Predicting calvarial growth in normal and craniosynostotic mice using finite element analysis. *Journal of Anatomy*.
- Marks, S. C., & Hermey, D. C. (1996). The structure and development of bone. In J. P. Bilezikian, L. G. Raisz & G. A. Rodan (Eds.), *Principles of Bone Biology* (Vol. 3, pp. 14). San Diego, United States of America: Academic Press.
- Marsh, H. (2013). *Beyond Thick versus Thin: Mapping Cranial Vault Thickness Patterns in Recent Homo sapiens*. (Ph.D. Dissertation), University of Iowa, Iowa City, United States of America.
- Martin, L. (1985). Significance of enamel thickness in hominoid evolution. *Nature*, 314(6008), 260.
- Martin, R. (1914). *Lehrbuch der Anthropologie in systematischer Darstellung: mit besonderer Berücksichtigung der anthropologischen Methoden für Studierende Ärzte und Forschungsreisende*. Jena, Deutschland: Gustav Fischer.

- Martin, R. B. (2000). Toward a unifying theory of bone remodeling. *Bone*, 26(1), 1-6.
- Martin, R. M., Hublin, J.-J., Gunz, P., & Skinner, M. M. (2017). The morphology of the enamel–dentine junction in Neanderthal molars: Gross morphology, non-metric traits, and temporal trends. *Journal of Human Evolution*, 103, 20-44.
- Martínez-Abadías, N., Paschetta, C., de Azevedo, S., Esparza, M., & González-José, R. (2009). Developmental and genetic constraints on neurocranial globularity: insights from analyses of deformed skulls and quantitative genetics. *Evolutionary Biology*, 36(1), 37-56.
- Martínez-Maza, C., Freidline, S. E., Strauss, A., & Nieto-Díaz, M. (2016). Bone growth dynamics of the facial skeleton and mandible in Gorilla gorilla and Pan troglodytes. *Evolutionary Biology*, 43(1), 60-80.
- Martínez-Maza, C., Rosas, A., & García-Vargas, S. (2006). Bone paleohistology and human evolution. *Journal of Anthropological Sciences*, 84, 33-52.
- Martínez Baca, F. (1897). *Estudio craneométrico zapoteca*. Paper presented at the Congreso internacional de americanistas. XI Reunión en México, del 15 al 20 de Octubre 1895, México.
- Martínez de León Mármol, B. L. (2009). La deformación cefálica intencional tipo tabular, variante superior, en el Zapotal, Veracruz. *Estudios de Antropología Biológica*, 14(2).
- Maureille, B., Castex, D., Depierre, G., & Bar, D. (1995). Les crânes déformés de Saint-Etienne (Beaune, Côte d'Or, Ve-VIe siècles). Données archéologiques et anthropologiques. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 7, 49-67.
- Mayall, P., & Pilbrow, V. (2018). Generalized Procrustes analysis of an ontogenetic series of modified crania: Evaluating the technique of modification in the Migration Period of Europe (4th–7th century AD). *American Journal of Physical Anthropology*, 166(1), 156-169. doi: <https://doi.org/10.1002/ajpa.23412>
- Mayall, P., & Pilbrow, V. (2019). A review of the practice of intentional cranial modification in Eurasia during the Migration Period (4th–7th c AD). *Journal of Archaeological Science*, 105, 19-30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2018.12.007>
- Mayall, P., Pilbrow, V., & Bitadze, L. (2017). Migrating Huns and modified heads: Eigenshape analysis comparing intentionally modified crania from Hungary and Georgia in the Migration Period of Europe. *PloS One*, 12(2). doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171064>
- McGibbon, W. (1912). Artificially deformed skulls with special reference to the temporal bone and its tympanic portion. *The Laryngoscope*, 22(10), 1165-1181.
- McNeill, W. R., & Newton, G. N. (1965). Cranial base morphology in association with intentional cranial vault deformation. *American Journal of Physical Anthropology*, 23(3), 241-253.
- Méndez, M. G., Salceda, S. A., & Armengol, M. F. L. (1997). A multivariate analysis of artificially deformed Patagonian skulls. *Anthropological Science*, 105(2), 83-98.
- Mendieta, G. d. (1870). *Historia eclesiástica indiana*. México: Antigua librería.
- Meraviglia, M. V., Villani, D., & Meghi, P. (2014). Definition and Classification. In D. M. Villani, Maria Vittoria (Ed.), *Positional Plagiocephaly* (pp. 7-17): Springer.
- Meyer, A. B. (1881). Ueber künstlich deformirte Schädel von Borneo und Mindanao, nebst Bemerkungen über die Verbreitung der Sitte der künstlichen Schädel-Deformirung (pp. 35). Leipzig und Dresden, Deutschland: B.G. Teubner.
- Michelet, D. (1992). El Centro-Norte de Michoacán: características generales de su estudio arqueológico regional. In A. Demant, J.-N. Labat, D. Michelet & J. Tricart (Eds.), *El Proyecto Michoacán 1983-1987 medio ambiente e introducción a los trabajos arqueológicos* (pp. 55-72). México: Centre d'études mexicaines et centraméricaines.
- Michelet, D., Migeon, G., & Pereira, G. (1995). Informe de los trabajos de campo realizados en el malpaís de Zacapu (Octubre-Noviembre de 1994). México: Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos.
- Michelet, D., Pereira, G., & Migeon, G. (2005). La llegada de los uacúsechas a la región de Zacapu, Michoacán: datos arqueológicos y discusión. In L. Manzanilla (Ed.), *Reacomodos demográficos del Clásico al Posclásico en el centro de México* (pp. 137-154). Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Migeon, G. (1990). *Archéologie en pays Tarasque structure de l'habitat et ethnopréhistoire des habitations tarasques de la région de Zacapu (Michoacan, Mexique) au postclassique récent*. (Thèse de doctorat), Université de Paris 1, Panthéon-Sorbonne, Paris, France.

- Mitteroecker, P., & Bookstein, F. (2007). The conceptual and statistical relationship between modularity and morphological integration. *Systematic Biology*, 56(5), 818-836.
- Mitteroecker, P., & Gunz, P. (2009). Advances in geometric morphometrics. *Evolutionary Biology*, 36(2), 235-247. doi: <https://doi.org/10.1007/s11692-009-9055-x>
- Mitteroecker, P., Gunz, P., & Bookstein, F. L. (2005). Heterochrony and geometric morphometrics: a comparison of cranial growth in *Pan paniscus* versus *Pan troglodytes*. *Evolution & Development*, 7(3), 244-258.
- Mitteroecker, P., Gunz, P., Teschler-Nicola, M., & Weber, G. W. (2004). New morphometric methods in Paleopathology: Shape analysis of a Neolithic Hydrocephalus. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*.
- Mitteroecker, P., & Huttegger, S. M. (2009). The concept of morphospaces in evolutionary and developmental biology: mathematics and metaphors. *Biological Theory*, 4(1), 54-67.
- Montagnat, J. (1999). *Modèles déformables pour la segmentation et la modélisation d'images médicales 3D et 4D*. (Thèse de doctorat), Université Nice Sophia Antipolis, Nice, France.
- Moorrees, C. F. A., Fanning, E. A., & Hunt Jr, E. E. (1963). Age variation of formation stages for ten permanent teeth. *Journal of Dental Research*, 42(6), 1490-1502. doi: <https://doi.org/10.1177/00220345630420062701>
- Morante López, R. (2009). El mecapal. Genial invento prehispánico. *Arqueología mexicana*, 17(100), 70-75.
- Moreira-Gonzalez, A., Papay, F. E., & Zins, J. E. (2006). Calvarial thickness and its relation to cranial bone harvest. *Plastic and reconstructive surgery*, 117(6), 1964-1971.
- Morimoto, K., Nishikuni, K., Hirano, S.-i., Takemoto, O., & Futagi, Y. (2003). Quantitative follow-up analysis by computed tomographic imaging in neonatal hydrocephalus. *Pediatric neurology*, 29(5), 435-439.
- Morrison, C., & Chariker, M. (2006). Positional plagiocephaly: pathogenesis, diagnosis, and management. *The Journal of the Kentucky Medical Association*, 104(4), 136-140.
- Morriss-Kay, G. M., & Wilkie, A. O. (2005). Growth of the normal skull vault and its alteration in craniosynostosis: insights from human genetics and experimental studies. *Journal of anatomy*, 207(5), 637-653.
- Morton, S. G. (1839). *Crania Americana; or, a comparative view of the skulls of various aboriginal nations of North and South America: to which is prefixed an essay on the varieties of the human species* : Philadelphia: J Dobson; London: Simpkin, Marshall & co.
- Mosimann, J. E. (1970). Size allometry: size and shape variables with characterizations of the lognormal and generalized gamma distributions. *Journal of the American Statistical Association*, 65(330), 930-945.
- Mosimann, J. E., & James, F. C. (1979). New statistical methods for allometry with application to Florida red-winged blackbirds. *Evolution*, 33(1Part2), 444-459.
- Moss, M. L. (1958). The pathogenesis of artificial cranial deformation. *American Journal of Physical Anthropology*, 16(3), 269-286. doi: <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330160302>
- Moss, M. L. (1962). The functional matrix. In B. S. Kraus & R. Reidel (Eds.), *Vistas in orthodontics* (pp. 85-98). Philadelphia, United States of America: Lea & Febiger.
- Moss, M. L. (1968). A theoretical analysis of the functional matrix. *Acta Biotheoretica*, 18(1), 195-202.
- Moss, M. L. (1997). The functional matrix hypothesis revisited. 1. The role of mechanotransduction. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 112(1), 8-11.
- Moss, M. L. (2007). The differential roles of periosteal and capsular functional matrices in orofacial growth. *The European Journal of Orthodontics*, 29(suppl_1), i96-i101.
- Moss, M. L., & Salentijn, L. (1969). The primary role of functional matrices in facial growth. *American journal of orthodontics*, 55(6), 566-577.
- Moss, M. L., & Young, R. W. (1960). A functional approach to craniology. *American journal of physical anthropology*, 18(4), 281-292.
- Motte-Florac, E. (1997). La fontanelle chez les P'urhépecha et dans le centre du Mexique; du microcosme au macrocosme, de l'homme à dieu». In I. Bianquis, D. Le Breton & C. Méchin (Eds.), *Usages culturels du corps* (pp. 187-218). Clamecy, France: L'Harmattan.

- Moya-Costa, R., Cuenca-Bescós, G., & Bauluz, B. (2019). Protocol for the reconstruction of micromammals from fossils. Two case studies: The skulls of *Beremendia fissidens* and *Dolinasorex glyphodon*. *PLoS one*, *14*(3), e0213174.
- Murail, P., Brůžek, J., Houët, F., & Cunha, E. (2005). DSP: a tool for probabilistic sex diagnosis using worldwide variability in hip-bone measurements. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, *17*(3-4), 167-176.
- Natahi, S. (2019). Thomas J (2016) Les Incas et la déformation intentionnelle du crâne. Un marqueur social, culturel, ethnique et religieux-Presses universitaires de Nancy-Éditions universitaires de Lorraine, ISBN: 978-2-8143-0278-5, 136 pages, 12€. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, *31*, 199-200.
- Natahi, S., Coquerelle, M., Pereira, G., & Bayle, P. (2019). Neurocranial shape variation among Tarascan populations: Evidence for varying degrees in artificially modified crania in pre-Hispanic West Mexico (1200–1400 AD). *American Journal of Physical Anthropology*, *170*(3), 418-432. doi: <https://doi.org/10.1002/ajpa.23917>
- Nawrocki, S. P. (1991). *A Biomechanical model of cranial vault thickness in archaic Homo*. (Ph.D. Dissertation), State University of New York Binghamton, United States of America.
- Nelson, G., & Madimenos, F. (2010). Obelionic cranial deformation in the Puebloan Southwest. *American Journal of Physical Anthropology*, *143*, 465-472. doi: 10.1002/ajpa.21353
- Neubauer, S., Gunz, P., & Hublin, J.-J. (2010). Endocranial shape changes during growth in chimpanzees and humans: a morphometric analysis of unique and shared aspects. *Journal of human evolution*, *59*(5), 555-566.
- Neubauer, S., Hublin, J.-J., & Gunz, P. (2018). The evolution of modern human brain shape. *Science advances*, *4*(1), eaao5961.
- Neumann, G. K. (1942). Types of artificial cranial deformation in the eastern United States. *American Antiquity*, *7*(3), 306-310. doi: <https://doi.org/10.2307/275486>
- Ni, X., Li, Q., Stidham, T. A., Yang, Y., Ji, Q., Jin, C., & Samiullah, K. (2019). Earliest-known intentionally deformed human cranial fossil from Asia and the initiation of hereditary hierarchy in the early Holocene. *bioRxiv*, 530907. doi: <https://doi.org/10.1101/530907>
- Nolte, M., & Wilczak, C. (2013). Three-dimensional surface area of the distal biceps enthesis, relationship to body size, sex, age and secular changes in a 20th century American sample. *International Journal of Osteoarchaeology*, *23*(2), 163-174.
- O'Brien, T. G., & Stanley, A. M. (2013). Boards and cords: discriminating types of artificial cranial deformation in prehispanic South Central Andean populations. *International Journal of Osteoarchaeology*, *23*(4), 459-470. doi: <https://doi.org/10.1002/oa.1269>
- Oettinger, B. (1924). *Declination of the pars basilaris in normal and in artificially deformed skulls*. New York, United States of America: Museum of the American Indian, Heye Foundation.
- Ogura, M., Al-Kalaly, A., Sakashita, R., Kamegai, T., & Miyawaki, S. (2006). Relationship between anteroposterior cranial vault deformation and mandibular morphology in a pre-Columbian population. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *130*(4), 535-539.
- Okumura, M. (2014). Differences in types of artificial cranial deformation are related to differences in frequencies of cranial and oral health markers in pre-Columbian skulls from Peru. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, *9*(1), 15-26. doi: <https://doi.org/10.1590/S1981-81222014000100002>
- Olejniczak, A. J. (2006). *Micro-computed tomography of primate molars*. (Ph.D. Dissertation), Stony Brook University Brookhaven, United States of America.
- Olejniczak, A. J., Smith, T. M., Feeney, R. N., Macchiarelli, R., Mazurier, A., Bondioli, L., Rosas, A., Fortea, J., de la Rasilla, M., & Garcia-Taberner, A. (2008). Dental tissue proportions and enamel thickness in Neandertal and modern human molars. *Journal of Human Evolution*, *55*(1), 12-23.
- Opperman, L. A. (2000). Cranial sutures as intramembranous bone growth sites. *Developmental dynamics: an official publication of the American Association of Anatomists*, *219*(4), 472-485.
- Opperman, L. A., Gakunga, P. T., & Carlson, D. S. (2005). *Genetic factors influencing morphogenesis and growth of sutures and synchondroses in the craniofacial complex*. Paper presented at the Seminars in Orthodontics.

- Osipov, B., Harvati, K., Nathena, D., Spanakis, K., Karantanas, A., & Kranioti, E. F. (2013). Sexual dimorphism of the bony labyrinth: A new age-independent method. *American Journal of Physical Anthropology*, 151(2), 290-301.
- Ossenberg, N. S. (1970). The influence of artificial cranial deformation on discontinuous morphological traits. *American Journal of Physical Anthropology*, 33(3), 357-371.
- Ott, S. M. (2002). Histomorphometric analysis of bone remodeling *Principles of bone biology* (pp. 303-XXIII): Elsevier.
- Özbek, M. (2001). Cranial deformation in a subadult sample from Degirmentepe (Chalcolithic, Turkey). *American Journal of Physical Anthropology*, 115(3), 238-244. doi: <https://doi.org/10.1002/ajpa.1078>
- Pampush, J. D., Duque, A. C., Burrows, B. R., Daegling, D. J., Kenney, W. F., & McGraw, W. S. (2013). Homoplasy and thick enamel in primates. *Journal of human evolution*, 64(3), 216-224.
- Patte, É. (1937). Étude anthropologique des crânes barbares recueillis par M. Coquillaud à Savigné (Vienne). *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 8(1), 15-62.
- Paus, T. (2005). Mapping brain maturation and cognitive development during adolescence. *Trends in cognitive sciences*, 9(2), 60-68.
- Paus, T., Collins, D. L., Evans, A. C., Leonard, G., Pike, B., & Zijdenbos, A. (2001). Maturation of white matter in the human brain: a review of magnetic resonance studies. *Brain research bulletin*, 54(3), 255-266.
- Pereira, G. (1999). *Potrero de Guadalupe : anthropologie funéraire d'une communauté pré-tarasque du nord du Michoacán, Mexique*. Oxford, England: Archaeopress (B.A.R. International Series, 816 ; Monographs in American Archaeology, 5).
- Pereira, G. (2005). The utilization of grooved human bones: A reanalysis of artificially modified human bones excavated by Carl Lumholtz at Zacapu, Michoacán, Mexico. *Latin American Antiquity*, 16(3), 293-312.
- Pereira, G. (2010). Arqueología de un lugar de pasaje hacia el inframundo. *TRACE. Travaux et recherches dans les Amériques du Centre*(58), 19-28. doi: <https://doi.org/10.22134/trace.58.2010.366>
- Pereira, G. (2013). Unidad de Trabajo 5 : excavación en la estructura S3 y la zona funeraria asociada. In G. Pereira, D. Michelet, E. Jadot, A. Manin, M. Elliott & M. Forest (Eds.), *Proyecto Uacúsecha. Informe técnico sobre los trabajos de campo llevados a cabo en Malpaís Prieto y otros asentamientos de la región de Zacapu, Michoacán. Temporada 5 (2012)* (pp. 107-124). México.
- Pereira, G. (2014). Complementos de excavación en torno a la estructura S3 (UT5). In G. Pereira, D. Michelet, A. Dorison, M. Forest, M. Stevanato, E. Jadot & A. Manin (Eds.), *Proyecto Uacúsecha. Informe técnico sobre los trabajos de campo llevados a cabo en Malpaís Prieto y otros asentamientos de la región de Zacapu, Michoacán. Temporada 6 (2013)* (pp. 107-124). México.
- Pereira, G. (2017). *Projet Uacúsecha. Aux origines du royaume tarasque, Michoacán, Mexique. Rapport sur les opérations menées en 2016-2017 et bilan quadriennal 2014-2017 : CNRS - UMR 8096 Archéologie des Amériques, Université de Paris 1 - Panthéon-Sorbonne, Centre d'Etudes Mexicaines et Centre-Américaines.*
- Pereira, G. (2018). Dinámicas poblacionales y modificación cefálica artificial en el Michoacán prehispánico. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica* (Vol. 2, pp. 649-680). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Pereira, G., Barrientos Juárez, I., & Goudiaby, H. (2015). Complementos de excavación en el sector funerario al oeste de S3 (UT5). In G. Pereira, D. Michelet, A. Dorison, V. Darras, B. Faugère, L. Barba, M. Stevanato, O. Quezada & J. Blanca (Eds.), *Proyecto Uacúsecha. Informe técnico sobre los trabajos de campo llevados a cabo en Malpaís Prieto y otros asentamientos de la región de Zacapu, Michoacán. Temporada 7 (2014-15)* (pp. 8-27). México.
- Pereira, G., Forest, M., Elsa, J., & Darras, V. (in press). Ephemeral cities? The longevity of the Postclassic Tarascan urban sites of Zacapu Malpaís and its consequences on the migration process. In M.-C. Arnauld, C. Beekman & G. Pereira (Eds.), *Ancient Mesoamerican cities: populations on the move*. Boulder, United States of America: University Press of Colorado.

- Pereira, G., Michelet, D., Forest, M., Quezada, O., Céline, G., Julien, S., Divina, P., Barrientos, I., Alejandra, C., Véronique, D. J., Elsa, Manin, A., Mireles, C., Blancas, J., & Ortiz, A. (2018). Proyecto Uacúsecha. Informe técnico sobre los trabajos de campo llevados a cabo en la región de Zacapu, Michoacán. Temporada 9 (2016-17) : CNRS - UMR 8096 Archéologie des Amériques, Université de Paris 1 - Panthéon-Sorbonne, Centre d'Etudes Mexicaines et Centre-Américaines.
- Perez, S. I. (2007). Artificial cranial deformation in South America: a geometric morphometrics approximation. *Journal of Archaeological Science*, 34(10), 1649-1658. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.12.003>
- Perez, S. I., Della Negra, C., Novellino, P., González, P., Bernal, V., Cuneo, E., & Hajduk, A. (2009). Deformaciones artificiales del cráneo en cazadores-recolectores del Holoceno medio-tardío del noroeste de Patagonia. *Magallania*, 37(2), 77-90. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-22442009000200005>
- Perlaza, N. A. (2014). Sex determination from the frontal bone: a geometric morphometric study. *Journal of forensic sciences*, 59(5), 1330-1332.
- Perrine, S. M. M., Wu, M., Stephens, N. B., Kriti, D., van Bakel, H., Jabs, E. W., & Richtsmeier, J. T. (2019). Mandibular dysmorphology due to abnormal embryonic osteogenesis in FGFR2-related craniosynostosis mice. *Disease Models & Mechanisms*, 12(5), dmm038513.
- Perrone Jr, R. V., & Williams, J. L. (2019). Dimensional accuracy and repeatability of the NextEngine laser scanner for use in osteology and forensic anthropology. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 25, 308-319.
- Pilloud, M. A., & Hefner, J. T. (2016). *Biological distance analysis: forensic and bioarchaeological perspectives* : Academic Press.
- Pollack, I. F., Losken, H. W., & Fasick, P. (1997). Diagnosis and management of posterior plagiocephaly. *Pediatrics*, 99(2), 180-185.
- Pomeroy, E., Stock, J. T., Zakrzewski, S. R., & Lahr, M. M. (2010). A metric study of three types of artificial cranial modification from north-central Peru. *International Journal of Osteoarchaeology*, 20(3), 317-334. doi: <https://doi.org/10.1002/oa.1044>
- Ponce de León, M. S., Koesbardiati, T., Weissmann, J. D., Milella, M., Reyna-Blanco, C. S., Suwa, G., Kondo, O., Malaspinas, A.-S., White, T. D., & Zollikofer, C. P. E. (2018). Human bony labyrinth is an indicator of population history and dispersal from Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(16), 4128-4133.
- Ponce de León, M. S., & Zollikofer, C. P. E. (2001). Neanderthal cranial ontogeny and its implications for late hominid diversity. *Nature*, 412(6846), 534.
- Porter, M. N. (1956). Excavations at Chupícuaro, Guanajuato, Mexico. *Transactions of the American Philosophical Society*, 515-637.
- Poza-Rey, E. M., & Arsuaga, J. L. (2011). Development and applications of computed tomography in the study of human fossil crania. In A. M. T. Elewa (Ed.), *Computational Paleontology* (pp. 111-145). Berlin, Germany: Springer.
- Profico, A., Tafuri, M. A., Di Vincenzo, F., Ricci, F., Ottini, L., Ventura, L., Fornaciari, G., Di Lernia, S., & Manzi, G. (in press). Medical imaging as a taphonomic tool. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*.
- Puaux, O. (1989). *Les pratiques funéraires tarasques (approche archéologique et ethnohistorique)*. (Thèse de doctorat), Université de Paris 1, Panthéon-Sorbonne, Paris, France.
- Pucciarelli, H. M. (1974). The influence of experimental deformation on neurocranial wormian bones in rats. *American Journal of Physical Anthropology*, 41(1), 29-37.
- Pucciarelli, H. M. (1978). The influence of experimental deformation on craniofacial development in rats. *American Journal of Physical Anthropology*, 48(4), 455-461.
- Ranly, D. M. (1988). *A synopsis of craniofacial growth*. New York, United States of America: Appleton & Lange.
- Recheis, W., Weber, G. W., Schäfer, K., Knapp, R., Seidler, H., & Zur Nedden, D. (1999). Virtual reality and anthropology. *European Journal of Radiology*, 31(2), 88-96.
- Reyes-Guzmán, N., Siebe, C., Chevrel, M. O., Guilbaud, M.-N., Salinas, S., & Layer, P. (2018). Geology and radiometric dating of Quaternary monogenetic volcanism in the western Zacapu

- lacustrine basin (Michoacán, México): implications for archeology and future hazard evaluations. *Bulletin of Volcanology*, 80(2), 18.
- Rhode, M. P., & Arriaza, B. T. (2006). Influence of cranial deformation on facial morphology among prehistoric South Central Andean populations. *American Journal of Physical Anthropology*, 130(4), 462-470.
- Ricci, F., Fornai, C., Blos, V. T., Rickards, O., Di Lernia, S., & Manzi, G. (2008). Evidence of artificial cranial deformation from the later prehistory of the Acacus Mts. (Southwestern Libya, Central Sahara). *International Journal of Osteoarchaeology*, 18(4), 372-391.
- Richards, G. D., & Antón, S. C. (1991). Craniofacial configuration and postcranial development of a hydrocephalic child (ca. 2500 BC–500 AD): With a review of cases and comment on diagnostic criteria. *American Journal of Physical Anthropology*, 85(2), 185-200.
- Richtsmeier, J. T. (2002). Cranial vault dysmorphology and growth in craniosynostosis. In M. P. Mooney & M. I. Siegel (Eds.), *Understanding Craniofacial Anomalies: The Etiopathogenesis of Craniosynostosis and Facial Clefting* (pp. 321-342). New York: Wiley and Sons.
- Richtsmeier, J. T., & Flaherty, K. (2013). Hand in glove: brain and skull in development and dysmorphogenesis. *Acta neuropathologica*, 125(4), 469-489.
- Riquet, R. (1962). Les Néolithiques d'Hastière. *Bulletin de la Société royale belge d'Anthropologie et de Préhistoire*, 73, 57-116.
- Rogers Ackermann, R., & Krovitz, G. E. (2002). Common patterns of facial ontogeny in the hominid lineage. *The Anatomical Record*, 269(3), 142-147.
- Rogers, G. F. (2011). Deformational plagiocephaly, brachycephaly, and scaphocephaly. Part I: terminology, diagnosis, and etiopathogenesis. *Journal of Craniofacial Surgery*, 22(1), 9-16. doi: <https://doi.org/10.1097/SCS.0b013e3181f6c313>
- Rogers, G. F., Oh, A. K., & Mulliken, J. B. (2009). The role of congenital muscular torticollis in the development of deformational plagiocephaly. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 123(2), 643-652.
- Rohlf, F. J. (1999). Shape statistics: Procrustes superimpositions and tangent spaces. *Journal of Classification*, 16(2), 197-223.
- Rohlf, F. J. (2000). On the use of shape spaces to compare morphometric methods. *Hystrix-the Italian Journal of Mammalogy*, 11(1).
- Rohlf, F. J., & Bookstein, F. L. (2003). Computing the uniform component of shape variation. *Systematic Biology*, 52(1), 66-69.
- Rohlf, F. J., & Slice, D. E. (1990). Extensions of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks. *Systematic Biology*, 39(1), 40-59. doi: <https://doi.org/10.2307/2992207>
- Romano, A. (1965). *Estudio morfológico de la deformación craneana en Tamuín, S.L.P., y en la Isla del Idolo, Veracruz*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Romano, A. (1973). Deformación cefálica intencional en la población prehispánica de Cholula, Puebla. *Comunicaciones Proyecto Puebla Tlaxcala*, 8, 49-51.
- Romano, A. (1974). Deformación cefálica intencional. In J. Comas (Ed.), *Antropología física, época prehispánica* (pp. 197-227). Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Romano, A. (2018). Orígenes de las modificaciones artificiales del cráneo en Mesoamérica una revisión de casos precerámicos y del preclásico en México. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica* (Vol. 1, pp. 329-349). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Rosa, A. d. (1947). Significato etnologico della deformazione del cranio. *Rivista di etnografia*, 1(3-4), 13-22.
- Rosas, A., & Bastir, M. (2002). Thin-plate spline analysis of allometry and sexual dimorphism in the human craniofacial complex. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 117(3), 236-245.
- Ross, A. H., Jantz, R. L., & McCormick, W. F. (1998). Cranial thickness in American females and males. *Journal of Forensic Science*, 43(2), 267-272.
- Ross, A. H., & Ubelaker, D. H. (2009). Effect of intentional cranial modification on craniofacial landmarks: A three-dimensional perspective. *Journal of Craniofacial Surgery*, 20(6), 2185-2187.

- Rouvière, H., & Delmas, A. (2002). *Anatomie humaine: descriptive, topographique et fonctionnelle. Tête et cou* (Vol. 1): Elsevier Masson.
- Sanchez-Lara, P. A., Graham Jr, J. M., Hing, A. V., Lee, J., & Cunningham, M. (2007). The morphogenesis of wormian bones: a study of craniosynostosis and purposeful cranial deformation. *American Journal of Medical Genetics Part A*, *143*(24), 3243-3251.
- Sato, H., Sando, I., & Takahashi, H. (1991). Sexual dimorphism and development of the human cochlea: computer 3-D measurement. *Acta Oto-laryngologica*, *111*(6), 1037-1040.
- Schendel, S. A., Walker, G., & Kamisugi, A. (1980). Hawaiian craniofacial morphometrics: average Mokapuan skull, artificial cranial deformation, and the “rocker” mandible. *American Journal of Physical Anthropology*, *52*(4), 491-500.
- Scherer, A. K. (2018). Head shaping and tooth modification among the classic Maya of the Usumacinta river kingdoms. In V. Tiesler & M. C. Lozada (Eds.), *Social Skins of the Head: Body Beliefs and Ritual in Ancient Mesoamerica and the Andes* (pp. 59-80). Albuquerque, United States of America: University of New Mexico Press.
- Scheuer, L., & Black, S. (2000). *Developmental Juvenile Osteology*. London, England: Academic Press.
- Schlager, S. (2017). Morpho and Rvcg – Shape Analysis in R: R-Packages for Geometric Morphometrics, Shape Analysis and Surface Manipulations. In Zheng Guoyan, Li Shuo & S. Gabor (Eds.), *Statistical shape and deformation analysis* (pp. 217-256). London, England: Academic Press.
- Schlager, S., Profico, A., Di Vincenzo, F., & Manzi, G. (2018). Retrodeformation of fossil specimens based on 3D bilateral semi-landmarks: Implementation in the R package “Morpho”. *PloS one*, *13*(3), e0194073.
- Schotsmans, E. M. J., Márquez-Grant, N., & Forbes, S. L. (2017). *Taphonomy of human remains: forensic analysis of the dead and the depositional environment*. New York, United States of America: John Wiley & Sons.
- Schuh, A., Kupczik, K., Gunz, P., Hublin, J. J., & Freidline, S. E. (2019). Ontogeny of the human maxilla: a study of intra-population variability combining surface bone histology and geometric morphometrics. *Journal of Anatomy*.
- Scott, N., Neubauer, S., Hublin, J.-J., & Gunz, P. (2014). A Shared Pattern of Postnatal Endocranial Development in Extant Hominoids. *Evolutionary Biology*, *41*(4), 572-594. doi: 10.1007/s11692-014-9290-7
- Serna, A., Luciano, P., Gustavo, F., Gustavo, M., Cristian, F. D., & Ivan, P. S. (2019). Does the shape make a difference? Evaluating the ethnic role of cranial modification in the Pampa-Patagonia region (Argentina) during the late Holocene. *Archaeological and Anthropological Sciences*, *11*(6), 2597-2610. doi: <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01010-8>
- Sharapova, S., & Razhev, D. (2011). Skull Deformation during the Iron Age in the Trans-Urals and Western Siberia. In M. Bonogofsky (Ed.), *The Bioarchaeology of the Human Head: Decapitation, Deformation, and Decoration* (pp. 203-227). Gainesville, United States of America: University press of Florida.
- Shearer, B. M., Sholts, S. B., Garvin, H. M., & Wärmländer, S. K. (2012). Sexual dimorphism in human browridge volume measured from 3D models of dry crania: a new digital morphometrics approach. *Forensic Science International*, *222*(1-3), 400. e401-400. e405.
- Sholts, S. B., Wärmländer, S. K. T. S., Flores, L. M., Miller, K. W. P., & Walker, P. L. (2011). Variation in the measurement of cranial volume and surface area using 3D laser scanning technology. *Journal of Forensic Sciences*, *55*(4), 871-876.
- Simons, E. A., & Frost, S. R. (2016). Constructing cranial ontogenetic trajectories: A comparison of growth, development, and chronological age proxies using a known-age sample of *Macaca mulatta*. *American Journal of Physical Anthropology*, *161*(2), 296-308.
- Singleton, M., McNulty, K. P., Frost, S. R., Soderberg, J., & Guthrie, E. H. (2010). Bringing up baby: developmental simulation of the adult cranial morphology of *Rungwecebus kipunji*. *The Anatomical Record: Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology*, *293*(3), 388-401.
- Skinner, M. M. (2008). *Enamel-dentine junction morphology of extant hominoid and fossil hominin lower molars*. (Ph.D. Dissertation), The George Washington University, Washington DC, United States of America.

- Skinner, M. M., Gunz, P., Wood, B. A., Boesch, C., & Hublin, J. J. (2009). Discrimination of extant Pan species and subspecies using the enamel–dentine junction morphology of lower molars. *American Journal of Physical Anthropology*, 140(2), 234-243.
- Skinner, M. M., Gunz, P., Wood, B. A., & Hublin, J.-J. (2008). Enamel-dentine junction (EDJ) morphology distinguishes the lower molars of Australopithecus africanus and Paranthropus robustus. *Journal of Human Evolution*, 55(6), 979-988.
- Slice, D. E. (2005). *Modern morphometrics in physical anthropology*. New York, United States of America: Kluwer Academic / Plenum Publishers.
- Slice, D. E., & Algee-Hewitt, B. F. B. (2015). Modeling bone surface morphology: a fully quantitative method for age-at-death estimation using the pubic symphysis. *Journal of forensic sciences*, 60(4), 835-843.
- Slizewski, A., Friess, M., & Semal, P. (2010). Surface scanning of anthropological specimens: nominal-actual comparison with low cost laser scanner and high end fringe light projection surface scanning systems. *Quartär*, 57, 179-187.
- Slizewski, A., & Semal, P. (2009). Experiences with low and high cost 3D surface scanner. *Quartär*, 56, 131-138.
- Smith, P., Wax, Y., Becker, A., & Einy, S. (1985). Diachronic variation in cranial thickness of Near Eastern populations. *American Journal of Physical Anthropology*, 67(2), 127-133.
- Smith, T. M. (2013). Teeth and human life-history evolution. *Annual Review of Anthropology*, 42.
- Smith, T. M., Olejniczak, A. J., Zermeno, J. P., Tafforeau, P., Skinner, M. M., Hoffmann, A., Radović, J., Toussaint, M., Kruszynski, R., & Menter, C. (2012). Variation in enamel thickness within the genus Homo. *Journal of human evolution*, 62(3), 395-411.
- Sorenti, M., Martín-Torres, M., Martín-Francés, L., & Perea-Pérez, B. (2019). Sexual dimorphism of dental tissues in modern human mandibular molars. *American Journal of Physical Anthropology*, 169(2), 332-340.
- Sperber, G. H. (2001). *Craniofacial development* (. Ed.). Hamilton, Canada: BC Decker Inc.
- Spoor, C. F., Zonneveld, F. W., & Macho, G. A. (1993). Linear measurements of cortical bone and dental enamel by computed tomography: applications and problems. *American journal of physical anthropology*, 91(4), 469-484. doi: <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330910405>
- Spoor, F., Esteves, F., Tecelão Silva, F., & Pacheco Dias, R. (2002a). The bony labyrinth of Lagar Velho 1. In J. Zilhao & E. D. Trinkaus, C (Eds.), *The Lapedo Child, a Gravettian Human Skeleton from the Abrigo Do Lagar Velho*. (pp. 287-292). Lisbon, Portugal: Instituto Portugus de Arqueologia.
- Spoor, F., Hublin, J.-J., & Kondo, O. (2002b). The bony labyrinth of the Dederiyeh child. In T. M. Akazawa, Sultan (Ed.), *Neanderthal Burials. Excavations of the Dederiyeh Cave, Afrin, Syria* (pp. 215-220). Kyoto, Japan: International Research Center for Japanese Studies.
- Stewart, T. D. (1939). A new type of artificial cranial deformation from Florida. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 29(10), 460-465.
- Stewart, T. D. (1948). The true form of the cranial deformity originally described under the name "tête trilobée". *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 38(2), 66-72.
- Stewart, T. D. (1976). Are supra-inion depressions evidence of prophylactic trephination? *Bulletin of the History of Medicine*, 50(3), 414-434.
- Subsol, G., Gesquiere, G., Braga, J., & Thackeray, F. (2010). *3D automatic methods to segment" virtual" endocasts: state of the art and future directions*. Paper presented at the American Journal of Physical Anthropology.
- Tallman, M., Amenta, N., Delson, E., Frost, S. R., Ghosh, D., Klukkert, Z. S., Morrow, A., & Sawyer, G. J. (2014). Evaluation of a new method of fossil retrodeformation by algorithmic symmetrization: crania of papionins (Primates, Cercopithecidae) as a test case. *PloS one*, 9(7), e100833.
- Tate, J. R., & Cann, C. E. (1982). High-resolution computed tomography for the comparative study of fossil and extant bone. *American Journal of Physical Anthropology*, 58(1), 67-73.
- Thomas, A. (2011). *Identités funéraires, variants biologiques et facteurs chronologiques: une nouvelle perception du contexte culturel et social du Cerny (Bassin parisien, 4700-4300 avant J.-C.)*. (Thèse de doctorat), Université Bordeaux 1, Bordeaux, France.

- Thomas, J. (2017). *Les Incas et la déformation intentionnelle du crâne : un marqueur social, culturel, ethnique et religieux*. Nancy, France: Presses universitaires de Nancy, Éditions universitaires de Lorraine.
- Tiesler, V. (1998). *La costumbre de la deformación cefálica entre los antiguos mayas: aspectos morfológicos y culturales*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Tiesler, V. (1999). *Rasgos bioculturales entre los antiguos mayas: aspectos arqueológicos y sociales*. (Ph.D. Dissertation), Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Tiesler, V. (2010). "Olmec" head shapes among the Preclassic period Maya and cultural meanings. *Latin American Antiquity*, 21(3), 290-311.
- Tiesler, V. (2012a). Studying cranial vault modifications in ancient Mesoamerica. *Journal of Anthropological Sciences*, 90, 1-26. doi: <https://doi.org/10.4436/jass.90007>
- Tiesler, V. (2012b). *Transformarse en maya: el modelado cefálico entre los mayas prehispánicos y coloniales*. Mérida, Yucatán, México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Tiesler, V. (2014). *The bioarchaeology of artificial cranial modifications new approaches to head shaping and its meanings in pre-Columbian Mesoamerica and beyond*. New York, United States of America: Springer.
- Tiesler, V. (2019). Cranial Shaping. In S. L. López Varela (Ed.), *The Encyclopedia of Archaeological Sciences* (pp. 1-3). Oxford, England: Wiley-Blackwell.
- Tiesler, V., & Gómez-Valdés, J. A. (2018). Términos y taxonomía empleados en las modificaciones cefálicas. In V. Tiesler & C. Serrano (Eds.), *Modificaciones cefálicas culturales en Mesoamérica* (Vol. 1, pp. 83-134). México: Universidad Nacional Autónoma de Yucatán, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Tiesler, V., & Lacadena, A. (2018). Head Shapes and Group Identity on the Fringes of the Maya Lowlands. In V. Tiesler & M. C. Lozada (Eds.), *Social Skins of the Head: Body Beliefs and Ritual in Ancient Mesoamerica and the Andes* (pp. 37-58). Albuquerque, United States of America: University of New Mexico Press.
- Tiesler, V., & Lozada, M. C. (2018). *Introducing the Social Skins of the Head in Ancient Mesoamerica and the Andes*. Albuquerque, United States of America: University of New Mexico Press.
- Tiesler, V., Romano-Pacheco, A., Gómez-Valdés, J., & Daneels, A. (2013). Posthumous body manipulation in the Classic period Mixtequilla: Reevaluating the human remains of Ossuary I from El Zapotal, Veracruz. *Latin American Antiquity*, 24(1), 47-71.
- Tiesler, V., Romano, A., & Pallán, C. (2009). Las formas cefálicas en las vísperas del periodo posclásico. Implicaciones para el cambio social en el Área Maya. *Los Investigadores de la Cultura Maya*, 18(1), 83-96.
- Tillier, A. M., Arensburg, B., Duday, H., & Vandermeersch, B. (2001). Brief communication: an early case of hydrocephalus: the Middle Paleolithic Qafzeh 12 child (Israel). *American Journal of Physical Anthropology*, 114(2), 166-170.
- Toneva, D., Nikolova, S., & Georgiev, I. (2016). Reliability and accuracy of angular measurements on laser scanning created 3D models of dry skulls. *Journal of Anthropology*, 2016.
- Topinard, P. (1879). Présentation de crânes. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 2(2), 335-336.
- Torgersen, J. (1954). The occiput, the posterior cranial fossa and the cerebellum. In J. Jansen & A. Brodal (Eds.), *Aspects of cerebellar anatomy* (pp. 396-418). Oslo, Norway: Johan Grundt Tanum.
- Torres-Rouff, C., & Yablonsky, L. T. (2005). Cranial vault modification as a cultural artifact: a comparison of the Eurasian steppes and the Andes. *Homo*, 56(1), 1-16.
- Torres-Rouff, C. (2002). Cranial Vault Modification and Ethnicity in Middle Horizon San Pedro de Atacama, Chile. *Current Anthropology*, 43(1), 163-171. doi: <https://doi.org/10.1086/338290>
- Trinkaus, E. (1982). Artificial cranial deformation in the Shanidar 1 and 5 Neandertals. *Current Anthropology*, 23(2), 198-199.
- Tsegai, Z. J., Skinner, M. M., Gee, A. H., Pahr, D. H., Treece, G. M., Hublin, J. J., & Kivell, T. L. (2017a). Trabecular and cortical bone structure of the talus and distal tibia in Pan and Homo. *American Journal of Physical Anthropology*, 163(4), 784-805.

- Tsegai, Z. J., Stephens, N. B., Treece, G. M., Skinner, M. M., Kivell, T. L., & Gee, A. H. (2017b). Cortical bone mapping: an application to hand and foot bones in hominoids. *Comptes Rendus Palevol*, 16(5-6), 690-701.
- Turk, A. E., McCarthy, J. G., Thorne, C. H., & Wisoff, J. H. (1996). The "back to sleep campaign" and deformational plagiocephaly: is there cause for concern? *The Journal of Craniofacial Surgery*, 7(1), 12-18.
- Ulhaas, L. (2007). Computer-Based Reconstruction: Technical Aspects and Applications. In W. Henke & I. Tattersall (Eds.), *Handbook of Paleoanthropology* (pp. 787-813). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Valentin, F., Détroit, F., Spriggs, M. J. T., & Bedford, S. (2016). Early Lapita skeletons from Vanuatu show Polynesian craniofacial shape: Implications for Remote Oceanic settlement and Lapita origins. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(2), 292-297.
- Van Arsdale, A. P., & Clark, J. L. (2012). Re-examining the relationship between cranial deformation and extra-sutural bone formation. *International Journal of Osteoarchaeology*, 22(1), 119-126.
- Van der Klaauw, C. J. (1946). Cerebral skull and facial skull. *Archives Néerlandaises de Zoologie*, 7(1), 16-37.
- Van Der Klaauw, C. J. (1948-1952). Size and position of the functional components of the skull. A contribution to the knowledge of the architecture of the skull, based on data in the literature. *Archives Néerlandaises de Zoologie*, 9(1), 1-556.
- Varela, H. H., & Cocilovo, J. A. (2002). Genetic drift and gene flow in a prehistoric population of the Azapa Valley and Coast, Chile. *American Journal of Physical Anthropology*, 118(3), 259-267.
- Velasco-Suarez, M., Martinez, J. B., Oliveros, R. G., & Weinstein, P. R. (1992). Archaeological origins of cranial surgery: trephination in Mexico. *Neurosurgery*, 31(2), 313-319.
- Velasco, M. C. (2018). Ethnogenesis and social difference in the Andean Late Intermediate Period (AD 1100–1450): A bioarchaeological study of cranial modification in the Colca Valley, Peru. *Current Anthropology*, 59(1), 98-106.
- Velut, J. (2007). *Segmentation par modèle déformable surfacique localement régularisé par spline lissante*. (Thèse de doctorat), institut national des sciences appliquées de Lyon, Lyon, France.
- Verano, J. W. (2016). Differential diagnosis: trepanation. *International Journal of Paleopathology*, 14, 1-9.
- Viðarsdóttir, U. S., O'Higgins, P., & Stringer, C. (2002). A geometric morphometric study of regional differences in the ontogeny of the modern human facial skeleton. *Journal of anatomy*, 201(3), 211-229.
- Vivatbutisiri, P., Ichinose, S., Hytönen, M., Sainio, K., Eto, K., & Iseki, S. (2008). Impaired meningeal development in association with apical expansion of calvarial bone osteogenesis in the Foxc1 mutant. *Journal of Anatomy*, 212(5), 603-611.
- Vives, E., & Bertranpetit, J. (1986). Les traits non métriques et descriptifs du crâne déformé. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 3(4), 237-248.
- Voje, K. L., Hansen, T. F., Egset, C. K., Bolstad, G. H., & Pélabon, C. (2014). Allometric constraints and the evolution of allometry. *Evolution*, 68(3), 866-885.
- Waddington, C. H. (1942). Canalization of development and the inheritance of acquired characters. *Nature*, 150(3811), 563.
- Walcher, G. (1911). Weitere Erfahrung in der willkürlichen Beeinflussung der Form des kindlichen Schädels. *Münchener medizinische Wochenschrift*, 58, 134-137.
- Walrath, D. E., Turner, P., & Brůžek, J. (2004). Reliability test of the visual assessment of cranial traits for sex determination. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 125(2), 132-137.
- Wang, J., Zou, D., Li, Z., Huang, P., Li, D., Shao, Y., Wang, H., & Chen, Y. (2014). Mechanical properties of cranial bones and sutures in 1–2-year-old infants. *Medical science monitor: international medical journal of experimental and clinical research*, 20, 1808.
- Ward, S. C., & Kimbel, W. H. (1983). Subnasal alveolar morphology and the systematic position of *Sivapithecus*. *American Journal of Physical Anthropology*, 61(2), 157-171.
- Watson, J. T., & García, C. (2016). Postclassic expansion of Mesoamerican biocultural characteristics into Sonora, Mexico. *Journal of Field Archaeology*, 41(2), 222-235.
- Weber, G. W. (2015). Virtual anthropology. *American Journal of Physical Anthropology*, 156, 22-42.

- Weber, G. W., & Bookstein, F. L. (2011). *Virtual anthropology: a guide to a new interdisciplinary field*. Vienna, Austria: Springer Verlag.
- Weiss, P. (1962). Tipología de las deformaciones cefálicas de los antiguos peruanos, según la osteología cultural. *Revista del Museo Nacional*, 31, 15-42.
- Weiss, P. (1981). La trepanación ritual suprainiana. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Historia y Filosofía de la Medicina*, 36, 193-211.
- White, C. D. (1996). Sutural effects of fronto-occipital cranial modification. *American Journal of Physical Anthropology*, 100(3), 397-410.
- White, S. (2015). Virtual Archaeology-The NextEngine Desktop Laser Scanner. *Archaeology International*, 18.
- Wilczak, C. A., & Ousley, S. D. (2009). Test of the relationship between sutural ossicles and cultural cranial deformation: results from Hawikuh, New Mexico. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 139(4), 483-493.
- Wind, J. (1984). Computerized X-ray tomography of fossil hominid skulls. *American Journal of Physical Anthropology*, 63(3), 265-282.
- Wind, J., & Zonneveld, F. W. (1985). Radiology of fossil hominid skulls. In P. V. Tobias (Ed.), *Hominid Evolution, Past, Present and Future* (pp. 437-442). New York, United States of America: Alan R. Liss.
- Wu, X.-J., Maddux, S. D., Pan, L., & Trinkaus, E. (2012). Nasal floor variation among eastern Eurasian Pleistocene Homo. *Anthropological Science*, 120709.
- Wu, X. (1961). Study on the Upper Cave man of Choukoutien. *Vertebrata Palasiatica*, 3, 181-203. doi: [https://doi.org/10.1016/0047-2484\(88\)90064-4](https://doi.org/10.1016/0047-2484(88)90064-4)
- Yon, R., Gómez, A., Morales, A. L., Argueta, A., Quiñónez, S., Secaira, C., Garzaro, P., & Suzuki, S. (2017). Modelar la cabeza: una tradición mesoamericana milenaria desde el Preclásico hasta la actualidad. *Estudios de cultura maya*, 50, 157-181. doi: <https://doi.org/10.19130/iifl.ecm.2017.50.794>
- Zanolli, C., Grine, F. E., Kullmer, O., Schrenk, F., & Macchiarelli, R. (2015). The early Pleistocene deciduous hominid molar FS-72 from the Sangiran dome of java, Indonesia: A taxonomic reappraisal based on its comparative endostructural characterization. *American journal of physical anthropology*, 157(4), 666-674.
- Zelditch, M. L., Swiderski, D. L., & Sheets, H. D. (2012). *Geometric morphometrics for biologists: a primer* (2nd ed.). London, England: Academic Press.
- Zhang, Q., Liu, P., Yeh, H. Y., Man, X., Wang, L., Zhu, H., Wang, Q., & Zhang, Q. (2019). Intentional cranial modification from the Houtaomuga Site in Jilin, China: Earliest evidence and longest in situ practice during the Neolithic Age. *American Journal of Physical Anthropology*, 169(4), 747-756. doi: <https://doi.org/10.1002/ajpa.23888>
- Zollikofer, C. P. E., de León, M. S. P., Lieberman, D. E., Guy, F., Pilbeam, D., Likius, A., Mackaye, H. T., Vignaud, P., & Brunet, M. (2005). Virtual cranial reconstruction of Sahelanthropus tchadensis. *Nature*, 434(7034), 755.
- Zollikofer, C. P. E., & Ponce de León, M. S. (2002). Visualizing patterns of craniofacial shape variation in Homo sapiens. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 269(1493), 801-807.
- Zollikofer, C. P. E., & Ponce de León, M. S. (2005). *Virtual reconstruction: a primer in computer-assisted paleontology and biomedicine*: Wiley-Interscience.
- Zollikofer, C. P. E., Ponce De León, M. S., & Martin, R. D. (1998). Computer-assisted paleoanthropology. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews: Issues, News, and Reviews*, 6(2), 41-54.
- Zollikofer, C. P. E., & Weissmann, J. D. (2011). A bidirectional interface growth model for cranial interosseous suture morphogenesis. *Journal of anatomy*, 219(2), 100-114.

Annexes

Annexe 1 Liste des individus considérés dans notre travail

<u>Acquisitions surfaciques et tomodensitométriques</u>					
ID	Site	Collection/Project	Institution	Acquisition surfacique	Acquisition tomodensitométrique (CT-scan)
Angamuco_sep14_ind2	Angamuco	Projet LORE-LPB	CEMCA	Oui	Oui
Angamuco_sep8	Angamuco	Projet LORE-LPB	CEMCA	Oui	Oui
Angamuco_sep9_ind1	Angamuco	Projet LORE-LPB	CEMCA	Oui	Oui
Tarascan122	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Tarascan124	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Tarascan127	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Tarascan130	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan131	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Tarascan135	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan137	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan139	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan140	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Tarascan141	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan145	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Tarascan149	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan150	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan151	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan153	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan154	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan155	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan156	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan157	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan158	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan160	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan164	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Tarascan165	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui

Tarascan167	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Tarascan173	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan174	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Tarascan175	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Tarascan176	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Tarascan178	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Tarascan179	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Tarascan183	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Tarascan211	El Palacio (Mich. 23)	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Oui
Mich215_sep43_ind2	Guadalupe (Mich. 215)	Projet Michoacán	CEMCA	Oui	Oui
Huichol_7536	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_7537	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_99_2332	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_99_2495	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_99_3946	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_99_3947	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_99_51	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_99_52	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_99_53	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_99_54	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_99_55	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_99_56	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_99_59	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_99_60	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_99_62	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_99_63	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
Huichol_99_64	Huichol population	Lumholtz Collection	AMNH	Oui	Non
JR24_sep1	JR24	Projet Chupícuaro	CEMCA	Oui	Oui
JR24_sep6	JR24	Projet Chupícuaro	CEMCA	Oui	Oui
JR24_sep8	JR24	Projet Chupícuaro	CEMCA	Oui	Oui
Pessac_Granède_Sep01_ind002	La Granède	La Granède	Ostéothèque - Pessac	Oui	Non
Pessac_Granède_Sep06_ind004	La Granède	La Granède	Ostéothèque - Pessac	Oui	Non
Pessac_Granède_Sep18_ind015	La Granède	La Granède	Ostéothèque - Pessac	Oui	Non

Pessac_Granède_Sep42_ind049	La Granède	La Granède	Ostéotheque - Pessac	Oui	Non
Pessac_Granède_Sep47_ind043	La Granède	La Granède	Ostéotheque - Pessac	Oui	Non
Pessac_Granède_Sep52_ind038	La Granède	La Granède	Ostéotheque - Pessac	Oui	Non
Pessac_Granède_Sep56_ind034	La Granède	La Granède	Ostéotheque - Pessac	Oui	Non
Pessac_Granède_Sep59_ind051	La Granède	La Granède	Ostéotheque - Pessac	Oui	Non
Pessac_Granède_Sep64_ind050	La Granède	La Granède	Ostéotheque - Pessac	Oui	Non
Pessac_Granède_Sep65_ind046	La Granède	La Granède	Ostéotheque - Pessac	Oui	Non
Pessac_Granède_Sep71_ind117	La Granède	La Granède	Ostéotheque - Pessac	Oui	Non
Pessac_Granède_Sep72_ind057	La Granède	La Granède	Ostéotheque - Pessac	Oui	Non
Pessac_Granède_Sep73_ind058	La Granède	La Granède	Ostéotheque - Pessac	Oui	Non
Pessac_Granède_Sep77_ind059	La Granède	La Granède	Ostéotheque - Pessac	Oui	Non
Pessac_Granède_Sep82_ind074	La Granède	La Granède	Ostéotheque - Pessac	Oui	Non
Loma_Alta_sep27	Loma Alta (Mich. 66)	Projet Michoacán	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep11	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep13	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep16	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep18	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep20	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep24	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep25	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep26	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep33	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep34-01	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep34-02	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep34-03	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep34-04	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep34-05	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep37-01	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep37-02	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep37-05	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep37-06	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep37-10	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui

Mich31_sep37-13	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep40	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep41	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_sep42	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui
Mich31_UE343-18	Malpaís Prieto (Mich. 31)	Projet Uacúsecha	CEMCA	Oui	Oui



Figure S1 Five morphoscopic criteria usually associated with artificial cranial modification (ACM) techniques (Antón & Weinstein, 1999; Tiesler, 2012b, 2014). a. Bone flattening degree (Individual Tarascan 99/151, American Museum of Natural History). b. Sagittal sulcus (Individual Tarascan 99/149, American Museum of Natural History). c. Bilateral postcoronal sulcus (Individual Tarascan 99/155, American Museum of Natural History). d. Suprainiac imprints Individual Tarascan 99/125, American Museum of Natural History). e. Asymmetry Individual Tarascan 99/158, American Museum of Natural History). Their expression has been scored on a 0-2 scale (0 absence; 1 moderate; 2 severe).

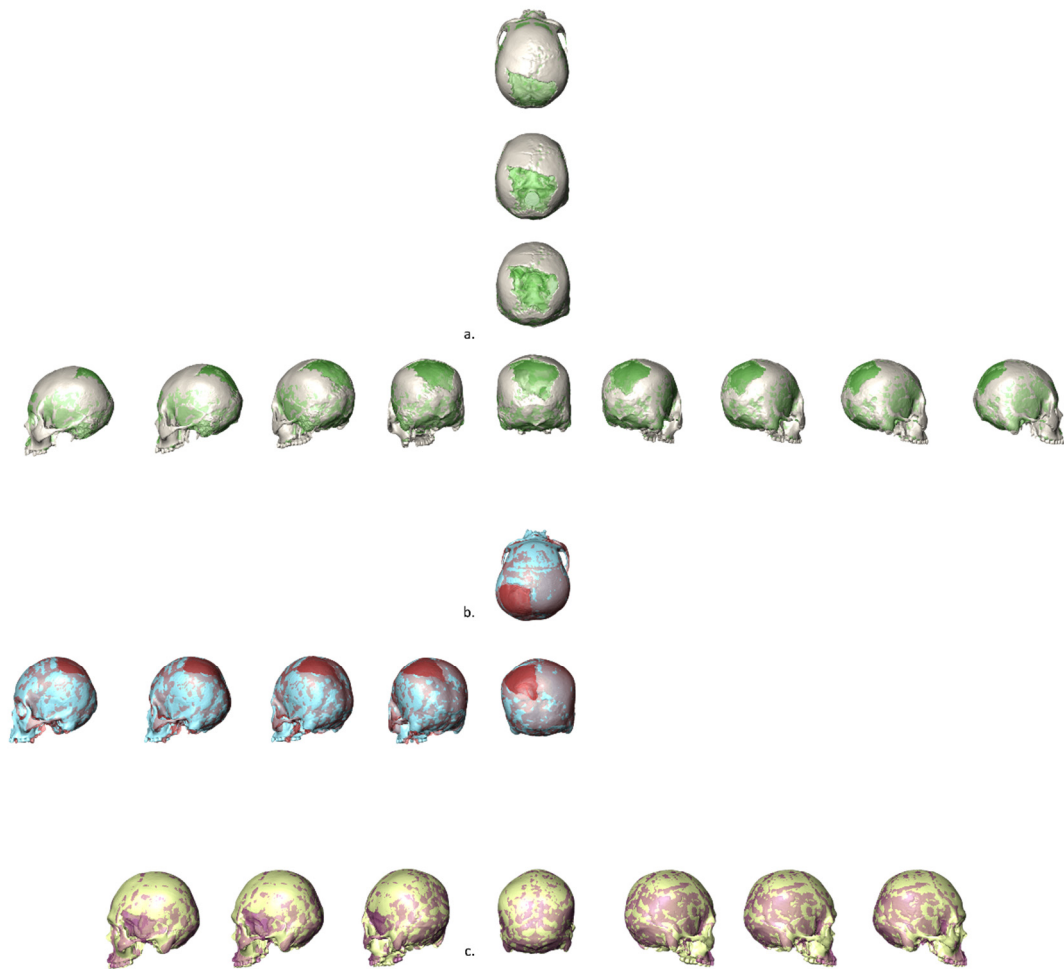


Figure S2 Superposed original and reconstructed meshes of the three individuals exhibiting the highest missing information percentage. Original individuals are represented in opaque and their respective reconstructed version in transparency. a. Mich31 sep 25 (12.4% of missing data) b. Mich31 sep 37-10 (9.3% of missing data) c. Tarascan 175 (6.4% of missing data)

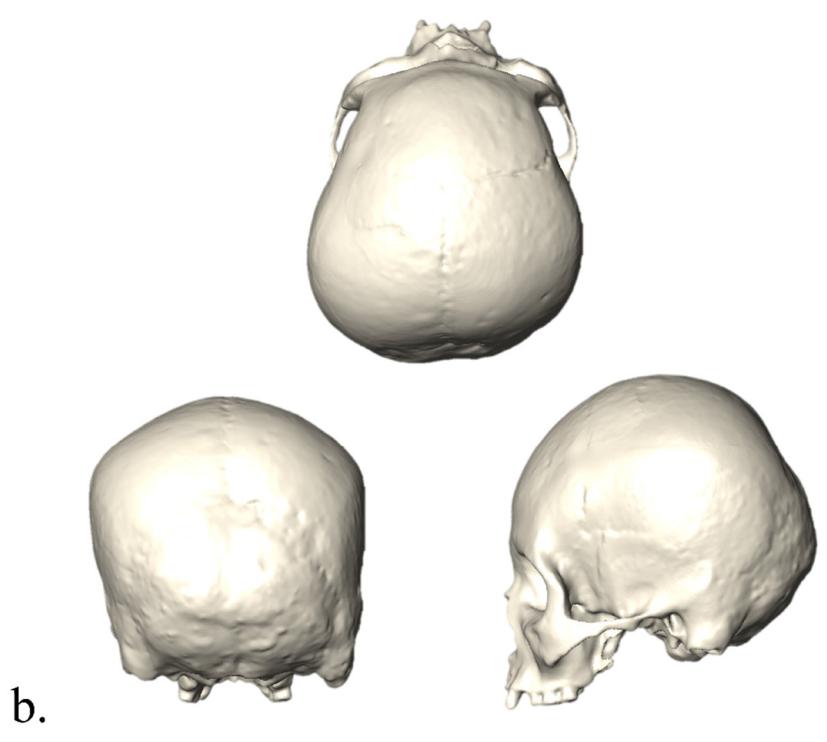
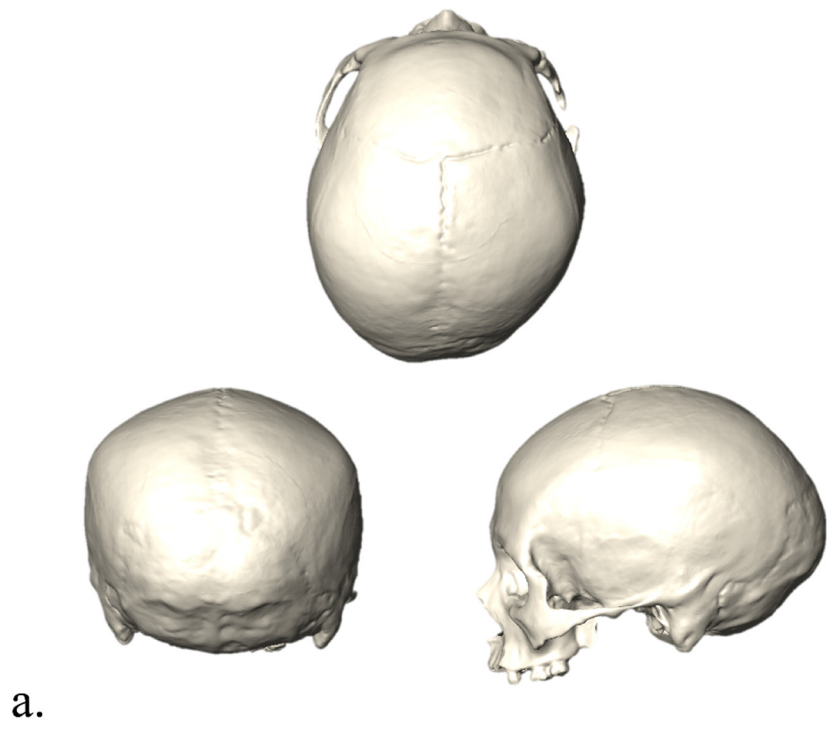


Figure S3 a. Individual Mich31 sep 33. b. Individual Mich31 sep 37-10 reconstructed

Table S1 List of individuals with sites, age group, sex, neighbor joining group (NJ Group) and cluster assignment based on the k-means algorithm

Postclassic sample

ID	Collection	Age group	Sex	NJ Group	Cluster
Tarascan122	El Palacio	Adult	U	NJ2	3
Tarascan124	El Palacio	Adult	U	NJ2	3
Tarascan127	El Palacio	Adult	U		1
Tarascan130	El Palacio	Adult	U		2
Tarascan131	El Palacio	Adult	U		1
Tarascan135	El Palacio	Adult	U	NJ1	4
Tarascan137	El Palacio	Adult	U		2
Tarascan139	El Palacio	Adult	U	NJ3	3
Tarascan140	El Palacio	Adult	U	NJ3	1
Tarascan141	El Palacio	Adult	U		1
Tarascan145	El Palacio	Adult	U	NJ3	2
Tarascan149	El Palacio	Adult	U		3
Tarascan150	El Palacio	Adult	U		2
Tarascan151	El Palacio	Adult	U	NJ1	4
Tarascan153	El Palacio	Sub-adult	U	NJ1	4
Tarascan154	El Palacio	Adult	U	NJ1	4
Tarascan155	El Palacio	Adult	U	NJ1	4
Tarascan156	El Palacio	Adult	U	NJ1	4
Tarascan157	El Palacio	Adult	U	NJ1	4
Tarascan158	El Palacio	Adult	U	NJ1	4
Tarascan160	El Palacio	Adult	U		1
Tarascan164	El Palacio	Adult	U	NJ3	1
Tarascan165	El Palacio	Adult	U		2
Tarascan167	El Palacio	Adult	U	NJ2	3
Tarascan173	El Palacio	Adult	U		1
Tarascan174	El Palacio	Adult	U		1
Tarascan175	El Palacio	Adult	U		2
Tarascan176	El Palacio	Adult	U		3
Tarascan178	El Palacio	Adult	U	NJ3	1
Tarascan179	El Palacio	Adult	U		2
Tarascan183	El Palacio	Adult	U	NJ2	3
Tarascan211	El Palacio	Adult	U		1
Mich31_sep11	Malpaís Prieto	Adult	M	NJ3	1
Mich31_sep13	Malpaís Prieto	Adult	U	NJ3	1
Mich31_sep16	Malpaís Prieto	Adult	U	NJ2	3

Mich31_sep18	Malpaís Prieto	Adult	F	NJ2	3
Mich31_sep20	Malpaís Prieto	Adult	M		1
Mich31_sep24	Malpaís Prieto	Adult	F		1
Mich31_sep25	Malpaís Prieto	Sub-adult	M		3
Mich31_sep26	Malpaís Prieto	Adult	F		3
Mich31_sep33	Malpaís Prieto	Adult	F		3
Mich31_sep34-01	Malpaís Prieto	Adult	U		1
Mich31_sep34-02	Malpaís Prieto	Adult	U		1
Mich31_sep34-03	Malpaís Prieto	Adult	U		1
Mich31_sep34-04	Malpaís Prieto	Adult	U		1
Mich31_sep34-05	Malpaís Prieto	Adult	U	NJ3	1
Mich31_sep37-01	Malpaís Prieto	Adult	F	NJ2	3
Mich31_sep37-02	Malpaís Prieto	Adult	M		1
Mich31_sep37-05	Malpaís Prieto	Adult	M		1
Mich31_sep37-06	Malpaís Prieto	Adult	F		2
Mich31_sep37-10	Malpaís Prieto	Adult	U		3
Mich31_sep37-13	Malpaís Prieto	Sub-adult	U		3
Mich31_sep40	Malpaís Prieto	Adult	M		1
Mich31_sep41	Malpaís Prieto	Adult	F	NJ2	3
Mich31_sep42	Malpaís Prieto	Adult	F		2
Mich31_UE343-18	Malpaís Prieto	Adult	U		1

Control group sample

ID	Collection	Age group	Sex	Cluster
Huichol_7536	Huichol	Adult	U	1
Huichol_7537	Huichol	Adult	U	3
Huichol_99_2332	Huichol	Adult	U	1
Huichol_99_2495	Huichol	Adult	U	1
Huichol_99_3946	Huichol	Adult	U	1
Huichol_99_3947	Huichol	Adult	U	1
Huichol_99_51	Huichol	Adult	U	2
Huichol_99_52	Huichol	Adult	U	2
Huichol_99_53	Huichol	Adult	U	2
Huichol_99_54	Huichol	Adult	U	1
Huichol_99_55	Huichol	Adult	U	1
Huichol_99_56	Huichol	Adult	U	2
Huichol_99_59	Huichol	Adult	U	1
Huichol_99_60	Huichol	Adult	U	3
Huichol_99_62	Huichol	Adult	U	1
Huichol_99_63	Huichol	Adult	U	1
Huichol_99_64	Huichol	Adult	U	3
Pessac_Granède_Sep01_ind002	La Granède	Adult	M	1
Pessac_Granède_Sep06_ind004	La Granède	Adult	F	1
Pessac_Granède_Sep18_ind015	La Granède	Adult	F	1
Pessac_Granède_Sep42_ind049	La Granède	Adult	M	1
Pessac_Granède_Sep47_ind043	La Granède	Adult	F	1

Pessac_Granède_Sep52_ind038	La Granède	Adult	M	1
Pessac_Granède_Sep56_ind034	La Granède	Adult	M	2
Pessac_Granède_Sep59_ind051	La Granède	Adult	M	1
Pessac_Granède_Sep64_ind050	La Granède	Adult	M	2
Pessac_Granède_Sep65_ind046	La Granède	Adult	U	2
Pessac_Granède_Sep71_ind117	La Granède	Adult	F	1
Pessac_Granède_Sep72_ind057	La Granède	Adult	M	1
Pessac_Granède_Sep73_ind058	La Granède	Adult	M	2
Pessac_Granède_Sep77_ind059	La Granède	Adult	M	2
Pessac_Granède_Sep82_ind074	La Granède	Adult	F	1

Annexe 3 Supplementary information Table S1 du deuxième et troisième article présentant les paramètres d'épaisseur de coupe et de taille des pixels des acquisitions tomodensitométriques

Id	Site	Région	Slices Thickness	Slices Pixel Size
Angamuco_sep14_ind2	JR24	Acámbaro Valley	0.625	0.488282
Angamuco_sep8	Angamuco	Pátzcuaro Basin	0.625	0.505859
Angamuco_sep9_ind1	Angamuco	Pátzcuaro Basin	0.625	0.541016
JR24_sep1	Angamuco	Pátzcuaro Basin	0.625	0.541016
JR24_sep6	Loma Alta	Zacapu Basin	0.625	0.496094
JR24_sep8	JR24	Acámbaro Valley	0.625	0.554689
Loma_Alta_sep27	JR24	Acámbaro Valley	0.625	0.503906
Mich215_sep43_ind2	El Palacio	Zacapu Basin	0.625	0.523438
Mich31_sep20	El Palacio	Zacapu Basin	0.625	0.482423
Mich31_sep24	El Palacio	Zacapu Basin	0.625	0.546875
Mich31_sep34_ind1	El Palacio	Zacapu Basin	0.625	0.541016
Mich31_sep34_ind3	El Palacio	Zacapu Basin	0.625	0.505859
Mich31_sep34_ind4	El Palacio	Zacapu Basin	0.625	0.521483
Mich31_sep37_ind2	El Palacio	Zacapu Basin	0.625	0.515624
Mich31_sep37_ind3	Guadalupe	Zacapu Basin	0.625	0.556642
Mich31_sep37_ind6	El Palacio	Zacapu Basin	0.625	0.546875
Mich31_sep40	El Palacio	Zacapu Basin	0.625	0.521483
Mich31_sep42	El Palacio	Zacapu Basin	0.625	0.541016
Tarascan130	El Palacio	Zacapu Basin	0.5	0.425781
Tarascan135	El Palacio	Zacapu Basin	0.5	0.378907
Tarascan137	El Palacio	Zacapu Basin	0.5	0.414063
Tarascan141	El Palacio	Zacapu Basin	0.5	0.425781
Tarascan149	El Palacio	Zacapu Basin	0.5	0.435546
Tarascan150	El Palacio	Zacapu Basin	0.5	0.425781
Tarascan151	El Palacio	Zacapu Basin	0.5	0.414063
Tarascan154	Malpais Prieto	Zacapu Basin	0.5	0.425781
Tarascan155	Malpais Prieto	Zacapu Basin	0.5	0.398438
Tarascan156	Malpais Prieto	Zacapu Basin	0.5	0.40625
Tarascan157	Malpais Prieto	Zacapu Basin	0.5	0.425781
Tarascan158	Malpais Prieto	Zacapu Basin	0.5	0.392579
Tarascan160	Malpais Prieto	Zacapu Basin	0.5	0.443358
Tarascan165	Malpais Prieto	Zacapu Basin	0.5	0.443358
Tarascan173	Malpais Prieto	Zacapu Basin	0.5	0.441406
Tarascan174	Malpais Prieto	Zacapu Basin	0.5	0.462892
Tarascan211	Malpais Prieto	Zacapu Basin	0.5	0.441406

Thomas J (2016) *Les Incas et la déformation intentionnelle du crâne. Un marqueur social, culturel, ethnique et religieux* -Presses universitaires de Nancy -Éditions universitaires de Lorraine, ISBN : 978-2-8143-0278-5, 136 pages, 12 €

S. Natahi

© Société d'Anthropologie de Paris et Lavoisier SAS 2019

Cet ouvrage de Jérôme Thomas est composé de 136 pages au cours desquelles l'auteur aborde la thématique des pratiques de déformations intentionnelles du crâne. L'ouvrage s'appuie sur une littérature abondante puisque l'on compte en tout deux cent seize références écrites en six langues distinctes (Allemand, Anglais, Espagnol, Français, Latin et Portugais).

L'ouvrage est divisé en plusieurs chapitres (au nombre de sept) dont les premiers sont essentiellement consacrés à des considérations généralistes sur la nature de ces pratiques, leur perception au sein de la société moderne ainsi qu'à un historique de la recherche sur le sujet. Le troisième chapitre est quant à lui consacré à un commentaire des sources historiques et ethnohistoriques les plus remarquables qui firent mention de cette coutume. L'auteur offre au lecteur un tour d'horizon des pratiques de déformations intentionnelles du crâne à travers les cinq continents, depuis ses formes d'expression les plus anciennes jusqu'à des périodes plus récentes. Ce travail de documentation conséquent nous permet d'en mesurer pleinement le caractère ubiquiste et rend parfaitement compte de la grande diversité des techniques employées. Il est à noter qu'il s'agit là d'une première synthèse non exhaustive publiée en langue française. Suite à cela, l'auteur va orienter et limiter son propos aux cadres des Amériques.

Dans un réel intérêt porté à la pratique en tant que telle et non à sa résultante finale (i.e. la forme du crâne), l'auteur a fourni un important travail d'archives et exploré un grand nombre de sources historiques, ethno-historiques ou ethnographiques lesquelles constituent de précieux témoignages pour qui souhaite se pencher sur les pratiques de déformation du crâne dans les cultures précolombiennes du continent sud-américain. On pourra tout de même trouver dommage que parmi les illustrations de l'ouvrage ne figurent pas les deux illustrations de Guamán Poma de Ayala [1] qui constituent deux uniques témoignages graphiques de la période coloniale, montrant des enfants emmaillotés dans des ber-

-ceaux et coiffés de ce qui semble s'apparenter à un bonnet ; possible appareil céphalique employé à des fins de modelage de la tête de l'enfant.

La grande force de l'ouvrage, outre la richesse de ses références, réside dans l'effort de son auteur à fournir une lecture plus approfondie et complexe que celles souvent évoquées dans les sources ethnohistoriques, lesquelles attribuent à ces coutumes des considérations un peu trop simplistes, interprétées à l'aune des codes culturels de ceux qui en sont les témoins et rapporteurs directs. De telles coutumes y sont très souvent perçues comme véhiculant des valeurs identitaires ou encore comme porteuses de croyances religieuses ou de distinctions d'ordre social. La dimension utilitaire, certes moins courante, est aussi parfois évoquée : le front plat facilitant, selon certains auteurs, le port de charges lourdes. En effet, nombre de chroniqueurs contemporains de la Conquête à l'instar de Bartolomé de Las Casas, Bernabé Cobo, Juan Ulloa-Mogollón, appréhendent la déformation intentionnelle du crâne comme un vecteur d'affirmation d'une identité et d'une appartenance culturelle que le pouvoir inca aurait artificiellement maintenu afin d'identifier au mieux le lignage de chacun de ses sujets. En se penchant sur une série de témoignages ethnohistoriques de ce type, l'auteur, lui, s'attache à la réalisation d'un véritable travail historique ; celui d'une lecture critique des sources qui cherche à nuancer ce type d'interprétations en mettant en évidence les rapports bien plus complexes qui sous-tendent l'expression de ces pratiques.

Même si ce travail a pour support principal des documents historiques coloniaux, on pourra regretter l'absence d'une partie abordant brièvement la chronologie andine pré-colombienne. Ce chapitre aurait eu le mérite de mettre en contexte les transformations politiques, territoriales et culturelles qui intervinrent au cours de l'Horizon récent (1400-1532 apr. J.-C.), période qui marque l'expansion de l'Empire inca. Il aurait apporté au lecteur, parfois peu familier à l'histoire complexe des populations précolombiennes andines, un regard plus large sur la mise en place d'un État composé d'une mosaïque de cultures réunies sous son joug.

S. Natahi UMR 5199 PACEA, Université de Bordeaux, France

COMPTE RENDU / REPORT

Par ailleurs, l'auteur met judicieusement en avant, dans un premier temps, les rapports indissociables qui existent entre les divers éléments de parure corporelle. En effet, n'étudier qu'un seul de ces aspects au détriment des autres ou en dépit de leur considération ne saurait être pertinent :

« Elles [les têtes déformées] s'inscrivent dans un système global ou la déformation n'est qu'un objet parmi d'autres. [...] De plus, les coiffures et la symbolique de la chevelure doivent être étroitement associés à cette coutume pour en comprendre tout le sens. Déformations, bonnets, coiffures et chevelure doivent être analysés ensemble. » (p. 72)

Dans un second temps, l'auteur s'attache également à souligner les considérations spirituelles attribuées à la tête en tant qu'élément corporel canalisant l'énergie vitale. Il montre son imprégnation de croyances religieuses fortes qui se seraient manifestées au travers de ces manipulations rituelles (déformation du crâne, coiffure, apposition de coiffes) intervenant dès la naissance mais aussi lors de rites de passage d'un âge à un autre.

L'acte de déformer le crâne participerait alors d'un système complexe et indivisible dont la pensée cosmogonique des peuples précolombiens des Andes serait un fondement. Il semble très vraisemblable que ces pratiques relèvent d'un système global d'ornementation, codifié et sous-tendu alors par des considérations multiples (cosmogoniques, identitaires, rituels) et interpénétrées.

Mannheim, Davis et Velasco dans un ouvrage récemment édité par Vera Tiesler et María Cecilia Lozada, dressent d'ailleurs un constat similaire et estiment que ces pratiques ne peuvent être considérées qu'à l'aune de l'ontologie sociale des peuples andins [2]. Dans ce chapitre d'ouvrage, ces mêmes auteurs se penchent sur deux populations de la vallée de Colca (située dans la partie méridionale du haut plateau péruvien) : les Collaguas et les Cavanos. Les auteurs évoquent le fait que ces deux groupes présentaient des pratiques de déformation différentes (de type annulaire pour les Collaguas et tabulaire pour les Cavanos) précédant toutes deux l'avènement de l'État inca et qui se maintinrent par la suite [2-3]. Ces deux groupes, outre leur différenciation linguistique, le premier principalement de langue Aymara et le second de langue Quechua, se distinguaient également par l'occupation de l'espace ; les Collaguas occupant les hautes terres de la vallée tandis que les Cavanos en peuplaient les basses terres [4]. Dans cet exemple, les auteurs parviennent à une conclusion assez similaire à celle de Jérôme Thomas et montrent que la différence de pratiques de déformation crâniennes participerait de concert avec des différenciations linguistiques mais aussi écologiques. La compréhension des facteurs motivant ces pratiques dans les populations andines ne saurait donc avoir de sens sans une prise en compte des considérations sociales, culturelles, religieuses ou écologiques de ces groupes humains.

On conçoit alors toute l'importance que le pouvoir inca, conscient du profond enracinement de ces pratiques au sein

d'un système de croyances séculaires, a attaché à leur codification et leur législation. Leur respect et leur maintien par les peuples qu'il fédère figurent non seulement comme un vœu d'allégeance mais constitue également un instrument au service du pouvoir dans l'objectif d'identifier l'appartenance culturelle de chacun de ses sujets. Comme le montre Jérôme Thomas, les Espagnols avaient bien compris également le caractère rituel de ces pratiques mais n'en avaient peut-être pas mesuré toute la profondeur. Dans le dernier chapitre de l'ouvrage l'auteur se penche ainsi sur les diverses mesures mises en œuvre en vue de leur prohibition du fait de leur nature idolâtre. L'auteur y évoque les vaines (bien que nombreuses) tentatives d'interdiction qui dénotent parfaitement la prégnance de ces pratiques au sein des cultures andines précolombiennes.

On pourra sans doute déplorer l'absence d'une prise en compte des données archéologiques qui auraient apporté un regard diachronique sur l'évolution des pratiques de déformations crâniennes entre l'Intermédiaire récent (1000-1400 apr. J.-C.) et l'Horizon récent, et sans doute donné aux hypothèses de l'auteur une profondeur plus importante. Il aurait été par exemple intéressant de prendre en considération l'hypothèse proposée par Torres-Rouff, laquelle associe conjointement l'homogénéisation des pratiques de déformations crâniennes à la complexification des formes d'organisations sociales [5]. L'ouvrage de Jérôme Thomas n'en demeure pas moins important en ce sens qu'il constitue une première synthèse en langue française sur ce type de pratiques. Les sources documentaires y sont abondantes. L'auteur y a le mérite d'aborder les pratiques de déformation intentionnelles du crâne chez les populations andines dans toute leur complexité, évoquant ainsi la pluralité des caractères qui sous-tendent leur expression.

Références

- 1 F Guamán Poma de Ayala (1613) *Nueva Corónica y Buen Gobierno*, Fac-similé [1989], Institut d'Ethnologie 1168 p
- 2 B Mannheim, AR Davis, MC Velasco (2018) *Cranial Modification in the Central Andes Person, Language, Political Economy*. In V Tiesler, MC Lozada (eds.) *Social Skins of the Head Body Beliefs and Ritual in Ancient Mesoamerica and the Andes*, pp. 223-33. University of New Mexico Press, Albuquerque
- 3 MC Velasco (2016) *Mortuary Tradition and Social Transformation during the Late Intermediate Period (AD 1100-1450): A Bioarchaeological Analysis of Above-Ground Burials in the Colca Valley, Peru*. Unpublished PhD dissertation, Department of Anthropology, Vanderbilt University, Nashville, 321 p
- 4 Wernke (2006) *Collagua "Eco-Logistics": Intermediate Elites and Hybrid Community Structures in the Colca Valley, Peru*. In Elson CM and Covey RA (eds.) *Intermediate Elites in Pre-Columbian States and Empires*, University of Arizona Press, Tucson, pp. 175-210
- 5 Torres-Rouff C (2003) *Shaping Identity: Cranial Vault Modification in the Pre-Columbian Andes*. Unpublished PhD dissertation, Department of Anthropology, University of California, Santa Barbara, 414 p