



HAL
open science

Effets de la déformation artificielle sur les structures internes du crâne et l'articulation temporo-mandibulaire

Marion Cottin

► **To cite this version:**

Marion Cottin. Effets de la déformation artificielle sur les structures internes du crâne et l'articulation temporo-mandibulaire. Archéologie et Préhistoire. 2016. dumas-01551821

HAL Id: dumas-01551821

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01551821>

Submitted on 30 Jun 2017

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License



Muséum national d'Histoire naturelle



Erasmus Mundus

**Master Erasmus Mundus en
Quaternaire et Préhistoire**

Effets de la déformation artificielle sur les structures
internes du crâne et l'articulation temporo-mandibulaire.

Marion COTTIN

Tuteurs : Martin Friess et Roman Hossein Khonsari

Année académique 2015/2016



Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide à la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je souhaite remercier Messieurs les Professeurs Denis Vialou et François Sémah, de m'avoir accueillie au sein de la spécialité Quaternaire et Préhistoire du master « Evolution Patrimoine Naturel et Sociétés » au Muséum national d'Histoire naturelle.

Mes remerciements vont également à Monsieur Serge Bahuchet, directeur du département Hommes, Natures et Sociétés.

Je souhaite remercier MH@SU et Monsieur Pascal Frey (Chaire FaciLe, Sorbonne Universités) pour le financement qui a rendu possible ce travail.

Je remercie chaleureusement Monsieur Martin Friess d'avoir accepté de diriger ce stage de recherche, de toute sa disponibilité, de toute l'aide et de toutes les informations qu'il m'a apportées, ainsi que Monsieur Roman Hossein Khonsari pour le co-encadrement de ce mémoire, pour toutes ses suggestions, son aide et sa disponibilité.

Pour l'accès aux collections, je remercie Mesdames Liliana Huet, Aurélie Fort et Véronique Laborde pour leur disponibilité et leur confiance. Pour l'accès au plateau 2D/3D, je remercie ses coordinateurs Messieurs Martin Friess et Florent Détroit.

Je remercie Monsieur Carlos Lorenzo pour son accueil à l'université Rovira i Virgili et pour m'avoir appris à utiliser le logiciel Avizo, nécessaire à mon stage. Merci également à Madame Chafika Falguères et Monsieur David Pleurdeau pour l'organisation de ma mobilité à Tarragone, en Espagne.

Je remercie Madame Anne Dambricourt-Malassé de m'avoir fait découvrir le sujet passionnant de la déformation artificielle crânienne, lors d'un stage dans le cadre de ma deuxième année de licence de Biologie.

Enfin, je souhaite remercier ma famille et tous mes compagnons de master au MNHN et mes compagnons stagiaires au MH, notamment Sébastien et les étudiants Erasmus Mundus Marie, Alice, Janei, Andrea et Mohamed, pour nos discussions scientifiques, leur aide et leur soutien moral.

Résumé

La déformation artificielle du crâne (DAC) est une pratique culturelle très ancienne observée sur tous les continents (Dingwall, 1931). Son étude nous renseigne sur les réactions des différents modules crâniofaciaux face à des contraintes extérieures, sur la croissance de ces modules et leurs interactions. La question de l'effet de la DAC sur la base, et notamment sur l'angle basicrânien, n'est pas résolue et les conséquences des DAC sur l'articulation temporo-mandibulaire ont peu été étudiées.

À partir d'un petit échantillon de crânes déformés boliviens de types antéropostérieur et circonférentiel, de crânes déformés français de type toulousain et de crânes non déformés boliviens et français, l'objectif de ce mémoire est d'explorer l'effet de différents types de DAC sur la base, notamment la flexion basicrânienne, ainsi que sur l'appareil masticateur, notamment la position des fosses mandibulaires, en appliquant la morphométrie géométrique tridimensionnelle à des données tomographiques.

Les résultats de cette étude confirment que la DAC affecte la base et suggèrent qu'elle affecte également l'appareil masticateur, via notamment l'articulation temporo-mandibulaire. Nos résultats suggèrent que les différents types de déformations ont des effets différentiels sur les modules crâniofaciaux.

Mots clefs : Déformation artificielle du crâne, Morphométrie géométrique 3D, Tomographie, Angle basicrânien, Articulation temporo-mandibulaire

Abstract

Artificial cranial deformation (ACD) is a very ancient and widespread cultural practice (Dingwall, 1931). The study of ACDs provides informations on the reactions of the different craniofacial modules to exterior pressure, and on the ontogenic interactions between these modules. The question of the effect of ACD on the skull base, especially on the basicranial angle, is not solved and the effects of ACD on the temporomandibular joint have not been thoroughly studied.

The aim of this master's thesis is to explore based on a small series of non-deformed and deformed skulls including anteroposterior and circumferential Bolivian and "toulousain" type French deformed skulls, the effect of different types of ACD on the base, especially the basicranial flexion, and on the masticatory system, particularly the location of the mandibular fossa, by applying a three-dimensional geometric morphometric approach to tomographic data.

Our results confirm that ACD affects the basicranial shape and indicate that the masticatory system is also affected, via the temporomandibular joint. Our results suggest also differential effects of different types of ACDs on the craniofacial modules.

Key words: Artificial cranial deformation, 3D geometric morphometrics, Tomography, Basicranial flexion, Temporomandibular joint

Sommaire

1. Introduction	12
1.1. Anatomie et physiologie	12
1.2. Contexte historique.....	13
1.2.1. Pratique universelle.....	13
1.2.2. Contexte en Amérique du Sud.....	16
1.2.3. Contexte en France.....	18
1.3. Classification et techniques des déformations crâniennes	24
1.4. Effets des déformations sur la base et la face.....	25
1.5. Méthodologie employée et objectif.....	28
2. Matériels et méthodes	29
2.1. L'échantillon	29
2.2. Acquisition des données	32
2.2.1. Imagerie tridimensionnelle	32
2.2.2. Test de comparaison 170 / 550 coupes	33
2.2.3. Segmentation des données tomographiques	33
2.2.4. Placement des Landmarks.....	36
2.2.5. Erreur intra-observateur	41
2.2.6. Valeurs manquantes.....	41
2.2.7. Mesure de l'angle basicrânien	41
2.3. Morphométrie géométrique.....	42
2.3.1. De la morphométrie « traditionnelle » à la morphométrie géométrique.....	42
2.3.2. Superposition Procrustes	42
2.3.3. Analyses statistiques.....	43
2.3.3.1. Analyse en composantes principales (ACP).....	43
2.3.3.2. Analyse en composantes principales intergroupe (ACP intergroupe)	43
2.3.3.3. Analyse de covariance par "Two-block partial least squares" (2B PLS)	43
3. Résultats	45
3.1. Tests préliminaires	45
3.1.1. Test de comparaison 170 / 550 coupes	45
3.1.2. Erreur intra-observateur.....	46

3.2.	Analyses en Composantes Principales	46
3.2.1.	Avec l'ensemble des points	46
3.2.2.	Sans l'opisthocrânion	53
3.2.3.	Synthèse des résultats sur l'ACP	56
3.3.	Analyses en Composantes Principales intergroupe	57
3.3.1.	Avec l'opisthocrânion	57
3.3.2.	Sans l'opisthocrânion	64
3.3.3.	Synthèse des résultats des ACP intergroupe	64
3.4.	Analyse de covariance par “Two-block partial least squares”	65
3.4.1.	2B PLS sur l'ensemble de l'échantillon	65
3.4.2.	2B PLS sur les AP	69
3.4.3.	2B PLS sur les C	71
3.4.4.	2B PLS sur les ND	75
3.4.5.	2B PLS sur les T	78
3.4.6.	Synthèse 2B PLS	80
3.5.	Angle basicrânien	80
4.	Discussion	82
4.1.	Impacts des différents types de déformations sur la base	82
4.2.	Impacts sur l'articulation temporo-mandibulaire	85
4.3.	Classification des types de déformations	86
5.	Conclusion	88
	Références bibliographiques	90
	Annexes	102
	Annexe 1 : Tableau des informations relatifs aux crânes de l'échantillon de cette étude, soient le type de déformation, l'origine et la date d'entrée en collection au MH	103
	Annexe 2 : Analyse en composantes principales des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes avec les trois crânes obtenus à partir des 170 et 550 coupes sur les CP 3 à 10.	105
	Annexe 3 : Analyse 2B PLS 2 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur les AP	109

Liste des figures

Figure 1: Fermeture de la fontanelle d'un nourrisson jusqu'à l'âge de 3 ans (d'après Vyslozil et al., 2000)	13
Figure 2 : a) Petite fille Mangbetu (Afrique centrale) au crâne allongé (Zagourski, 2001) ; b) bandage d'un nourrisson Arawe, peuple de Nouvelle-Bretagne (Blackwood & Danby, 1955)...	16
Figure 3 : Déformation toulousaine de type moyen. Marie Laynet et François Vales (cinquante-huit ans), nés à Fourquevaux (Haute-Garonne). Collection du docteur F. Delisle (Delisle, 1889).	20
Figure 4 : Bandeaux ou « bendels », portés sous une coiffe par les femmes dans certaines régions de France au XIX ^{ème} siècle.....	21
Figure 5 : Les moyens de contention de la femme dans la région toulousaine : Jeanne Bautens, femme Pourquié Guillaume, de Fourquevaux, Haute-Garonne, 1889. Coll. Delisle (Gélis 1984). a) La femme tête nue, vue de face ; b) La femme tête nue, vue de profil ; c) La femme portant le bandeau (en blanc) et le serre-tête (coiffe noire) ; d) Un second bandeau, brodé de dentelle, est ajouté ; e) Une seconde coiffe noire, le « transparent » recouvre le serre-tête et une partie du bandeau ; f) La coiffe de dentelle s'ajoute par-dessus le tout.....	22
Figure 6 : Figurines représentant des appareils de déformation : a) figurine de la période Maya Classique ; b) figurine de Mexico (Dessinées par B. Ceballos ; cf. Tiesler, 2013, Figures 4.7 et 4.9, p.81, 84).	25
Figure 7 : Position occlusale de la mandibule selon la classification d'Edward Angle (d'après Proffit et al., 2014).....	28
Figure 8 : Crâne déformé de type antéropostérieur positionné selon le plan de Francfort a) en vue latérale ; b) en vue faciale (clichés de l'auteure).....	30
Figure 9 : Crâne déformé de type circonférentiel positionné selon le plan de Francfort a) en vue latérale ; b) en vue faciale (clichés de l'auteure)	31
Figure 10 : Crâne déformé de type toulousain, positionné selon le plan de Francfort a) en vue latérale ; b) en vue faciale (clichés de l'auteure)	31
Figure 11 : Crâne non déformé positionné selon le plan de Francfort a) en vue latérale ; b) en vue faciale (clichés de Martin Friess)	32

Figure 12 : Différences sur le modèle 3D d'un crâne (n° 5268) en fonction du niveau de gris : a) Modèle 3D vue en coupe sagittale au seuil 600 à 3000 ; b) Modèle 3D vue en coupe sagittale - 800 à 3000 ; c) Image médicale en coupe avec sélection à un seuil de 600 à 3000 ; d) Image médicale en coupe avec sélection à un seuil de -800 à 3000.....	34
Figure 13 : Vue de la base interne d'une coupe transverse d'un crâne, avec la localisation des landmarks utilisés.....	39
Figure 14 : Crâne avec la localisation des landmarks utilisés a) en vue basale ; b) en vue faciale ; c) en vue latérale gauche.....	40
Figure 15 : Analyse en composantes principales des résidus de la superposition Procruste sur l'échantillon total des crânes avec les trois crânes obtenus à partir des 170 et 550 coupes (entourés par une ellipse) : CP1 vs. CP2.....	45
Figure 16 : Analyse en composantes principales des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes : CP1 vs. CP2.	47
Figure 17 : Changements de la conformation crânienne le long de la CP1 de l'ACP (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue d'ensemble ; au milieu, vue de la base ; en bas vue de l'angle basicrânien (Na-S-Ba à gauche et fc-S-Ba à droite).	48
Figure 18 : Changements de la conformation crânienne le long de la CP2 de l'ACP (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue d'ensemble ; au milieu, vue de la base ; en bas vue de l'angle basicrânien (Na-S-Ba à gauche et fc-S-Ba à droite).	50
Figure 19 : Analyse en composantes principales des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes : CP1 vs. CP3.	51
Figure 20 : Changements de la conformation crânienne le long de la CP3 de l'ACP (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue d'ensemble ; au milieu, vue de la base ; en bas vue de l'angle basicrânien (Na-S-Ba à gauche et fc-S-Ba à droite).	52
Figure 21 : Analyse en composantes principales des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes, sans l'opisthocrânion : CP1 vs. CP2.	54

Figure 22 : Changements de la conformation crânienne le long de CP1 lors des analyses sans l'opisthocrânion (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives).	54
Figure 23 : Changements de la conformation crânienne le long de CP2 lors des analyses sans l'opisthocrânion (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives).	55
Figure 24 : Analyse en composantes principales intergroupe des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes : CP1 vs. CP2.	58
Figure 25 : Changements de la conformation crânienne le long de CP1 de l'ACP intergroupe (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue d'ensemble ; au milieu, vue de la base ; en bas vue de l'angle basicrânien (Na-S-Ba à gauche et fc-S-Ba à droite).	59
Figure 26 : Changements de la conformation crânienne le long de CP2 de l'ACP intergroupe (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue d'ensemble ; au milieu, vue de la base ; en bas vue de l'angle basicrânien (Na-S-Ba à gauche et fc-S-Ba à droite).	60
Figure 27 : Analyse en composantes principales intergroupe des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes : CP1 vs. CP3.	61
Figure 28 : Analyse en composantes principales intergroupe des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes : CP1 vs. CP2.	62
Figure 29 : Changements de la conformation crânienne le long de CP3 de l'ACP intergroupe (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue d'ensemble ; au milieu, vue de la base ; en bas vue de l'angle basicrânien (Na-S-Ba à gauche et fc-S-Ba à droite).	63
Figure 30 : 2B PLS 1 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur l'ensemble de l'échantillon.	66
Figure 31 : Changements de la conformation de la base en fonction de ceux de la voûte pour la 2B PLS 1 sur l'ensemble de l'échantillon (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue de la voûte ; en bas vue de la base et de l'angle basicrânien (fc-S-Ba).	67

Figure 32 : 2B PLS 2 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur l'ensemble de l'échantillon.....	68
Figure 33 : Changements de la conformation de la base en fonction de ceux de la voûte pour la 2B PLS 2 sur l'ensemble de l'échantillon (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue de la voûte ; en bas vue de la base et de l'angle basicrânien (fc-S-Ba).	69
Figure 34 : 2B PLS 1 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur les crânes AP	70
Figure 35 : Changements de la conformation de la base en fonction de ceux de la voûte pour la 2B PLS 1 sur les crânes AP (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue de la voûte ; en bas vue de la base et de l'angle basicrânien (fc-S-Ba).	71
Figure 36 : 2B PLS 1 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur les crânes C.....	72
Figure 37 : Changements de la conformation de la base en fonction de ceux de la voûte pour la 2B PLS 1 sur les crânes C (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue de la voûte ; en bas vue de la base et de l'angle basicrânien (fc-S-Ba).	73
Figure 38 : 2B PLS 2 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur les crânes C.....	74
Figure 39 : Changements de la conformation de la base en fonction de ceux de la voûte pour la 2B PLS 2 sur les crânes C (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue de la voûte ; en bas vue de la base et de l'angle basicrânien (fc-S-Ba).	75
Figure 40 : 2B PLS 1 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur les crânes ND. Les crânes entourés par une ligne pointillée sont boliviens et ceux entourés par un trait plein sont français.....	76
Figure 41 : Changements de la conformation de la base en fonction de ceux de la voûte pour la 2B PLS 2 sur les crânes ND (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue de la voûte ; en bas vue de la base et de l'angle basicrânien (fc-S-Ba).	77
Figure 42 : 2B PLS 1 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur les crânes T.....	78

Figure 43 : Changements de la conformation de la base en fonction de ceux de la voûte pour la 2B PLS 2 sur les crânes T (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue de la voûte ; en bas vue de la base et de l'angle basicrânien (fc-S-Ba). **79**

Liste des tableaux

Tableau 1 : Type, nombre et provenance des crânes étudiés.....	30
Tableau 2 : Mesures des trois dimensions du crâne sur les modèles 3D, à partir de trois seuils différents de niveau de gris, et sur les crânes directement.....	35
Tableau 3 : Liste des landmarks utilisés pour cette étude.....	37
Tableau 4 : Écart type et variance expliquée par les dix premières composantes principales	46
Tableau 5 : Écart type et variance expliquée par les dix premières composantes principales des ACP effectuées sans opisthocrânion.....	53
Tableau 6 : Valeurs propres, variance et variance cumulée des Composantes Principales intergroupe	57
Tableau 7 : Valeurs-p (p-values) des différences entre groupes deux à deux, basés sur un test de permutation (avec 1000 permutations)	57
Tableau 8 : Valeurs propres, variance et variance cumulée des Composantes Principales intergroupe quand l'ACP est effectuée sans l'opisthocrânion.....	64
Tableau 9 : Valeurs-p (p-values) des différences entre groupes deux à deux, basés sur un test de permutation (avec 1000 permutations), quand l'ACP est effectuée sans l'opisthocrânion.	64
Tableau 10 : Valeurs propres et corrélation entre la voûte et la base pour les deux premières 2B PLS sur l'ensemble de l'échantillon, ainsi que leur valeurs-p (p-value) après 1000 permutations	65
Tableau 11 : Valeurs propres et corrélation entre la voûte et la base pour les deux premières 2B PLS sur les crânes AP, ainsi que leur valeur-p (p-value) après 1000 permutations	70
Tableau 12 : Valeurs propres et corrélation entre la voûte et la base pour les deux premières 2B PLS sur les crânes C, ainsi que leur valeur-p (p-value) après 1000 permutations.....	72
Tableau 13 : Valeurs propres et corrélation entre la voûte et la base pour les deux premières 2B PLS sur les crânes ND, ainsi que leur valeur-p (p-value) après 1000 permutations Erreur ! Signet non défini.	
Tableau 14 : Valeurs propres et corrélation entre la voûte et la base pour les deux premières 2B PLS sur les crânes T, ainsi que leur valeur-p (p-value) après 1000 permutations.....	78
Tableau 15 : Moyenne et écart type de l'angle Na-S-Ba dans chaque groupe de crânes	81
Tableau 16 : Moyenne et écart type de l'angle fc-S-Ba dans chaque groupe de crânes.....	81

Introduction

1.1. Anatomie et physiologie

Le crâne est composé de la boîte crânienne (ou neurocrâne), qui contient le cerveau, de la face et de la mandibule. La boîte crânienne est composée de la voûte crânienne et de la base. La voûte crânienne est formée d'os plats d'origine membraneuse tandis que la face et la base sont formées par des os d'origine cartilagineuse, dits d'origine endochondrale (Bories, 1996). À la naissance, la boîte crânienne du nourrisson n'a pas encore sa forme définitive. Dans les premières années de l'enfant, les os de la voûte crânienne sont unis par des espaces membraneux, les sutures, qui se soudent progressivement avec la croissance (Figure 1) ; on parle de plasticité crânienne. Le tissu osseux va suivre les contraintes qu'exerce le cerveau au cours de sa croissance. Différentes déformations crâniennes pathologiques sont alors possibles telles que la plagiocéphalie positionnelle développée en raison d'une position préférentielle répétée du nourrisson durant son sommeil, provoquant un aplatissement uni- ou bilatéral de l'os occipital (Vernet *et al.*, 2003) ; la craniosynostose due à la fermeture prématurée de suture(s) de la voûte crânienne (Jabs *et al.*, 1993) ; l'hydrocéphalie qui est une anomalie neurologique entraînant une dilatation des espaces contenant le liquide cérébro-spinal (Zhang *et al.*, 2006), la taille et la forme du crâne se trouvant impactées si l'hydrocéphalie apparaît durant la première année de vie ; ou encore la microcéphalie, qui est un trouble du développement du cerveau ayant pour conséquence une petite taille du cerveau et donc du neurocrâne (Cox *et al.*, 2006). Les déformations artificielles crâniennes (DAC) sont également possibles durant les trois premières années de la vie de l'enfant, et à moindre étendue jusqu'à l'âge de 6 ans (Tiesler, 2013). Elles sont le résultat de pratiques culturelles consistant à appliquer des bandages ou des appareils déformants durs, tels que des planches en bois, autour du crâne du nourrisson puis de l'enfant. Les os de la voûte crânienne se rigidifient progressivement au cours du développement de l'enfant et le crâne prend alors sa forme définitive.

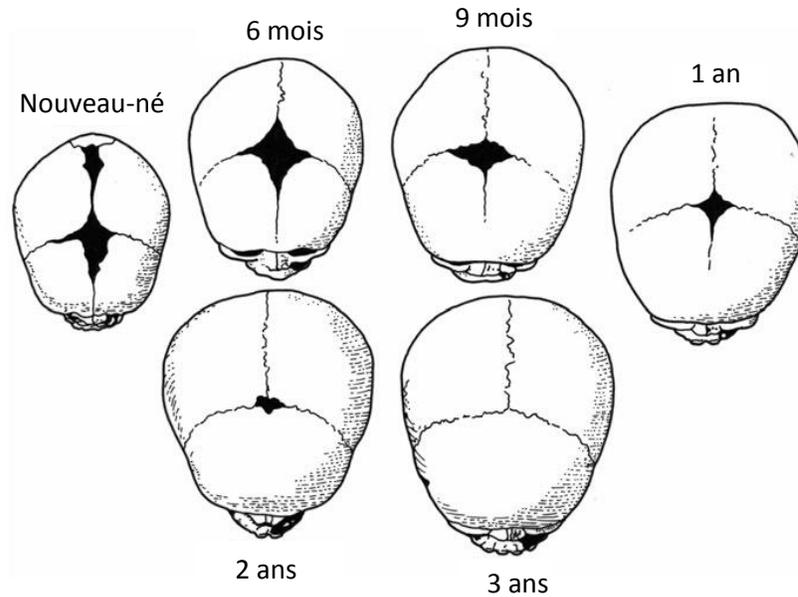


Figure 1: Fermeture de la fontanelle d'un nourrisson jusqu'à l'âge de 3 ans (d'après Vyslozil *et al.*, 2000)

1.2. Contexte historique

1.2.1. Pratique universelle

La DAC est une pratique qui a existé sur tous les continents (Dingwall, 1931). Il s'agit d'une pratique très ancienne. Trinkaus (1982) suggère que la DAC était déjà pratiquée par les Néandertaliens au Moustérien il y a plus de 45 000 ans (grotte Shanidar en Iraq). Cependant, une nouvelle reconstruction de l'un des deux crânes suspectés de déformations remet fortement en cause l'interprétation de Trinkaus (Chech *et al.*, 1999). Les déformations intentionnelles les plus anciennes remonteraient tout de même au Paléolithique ; les crânes déformés artificiellement les plus anciens actuellement connus ont été découverts dans la vallée du Murray, en Australie (Antón & Weinstein, 1999 ; Brown, 1981 ; Durband, 2008, 2014).

La présence des déformations crâniennes est attestée au Proche-Orient au Proto-néolithique et au Néolithique, comme à la grotte Shanidar en Iraq de 9 000 à 8 500 av. J.-C., en Iran entre du VIII^{ème} millénaire et le VI^{ème} millénaire av. J.-C., et en Syrie vers 6500 à 5500 av. J.-C. (Meiklejohn *et al.*, 1992). Cette pratique y est également attestée au Chalcolithique, par exemple au Liban à la seconde moitié du IV^{ème} millénaire av. J.-C. (Özbek, 1974a) et au Sud de la Turquie (Özbek, 1974b), ainsi qu'à l'Âge de Bronze en Syrie (Soto-Heim, 1986).

En Égypte ancienne, des éléments archéologiques datant de l'époque d'Akhenaton (XVIII^{ème} dynastie), tels que des figurines et des sculptures de princesses, suggèrent l'existence d'une déformation annulaire oblique, bien qu'aucun crâne déformé artificiellement n'ait été découvert (Dembo & Imbelloni, 1938 ; Dingwall, 1931). Que la déformation ait été réelle ou uniquement artistique, elle résulterait de la volonté d'imiter la forme du crâne du roi Akhenaton, déformé pathologiquement (Dingwall, 1931). En Afrique, la présence des déformations est attestée en Libye 1 000 ans av. J.-C. (Ricci *et al.*, 2008). En des temps relativement modernes, les déformations crâniennes ont été également observées par exemple au Soudan (Decorse, 1905), en Afrique du Nord, en Éthiopie, au Ghana dans la population Ashanti, au Nigéria, en Ouganda dans la population des Mangbetu et à Madagascar (Dingwall, 1931).

En Asie, les déformations crâniennes ont été pratiquées en Chine, en Inde, en Corée durant la dynastie Han, en Asie du Sud et du Sud-Est, en Asie centrale et en Asie mineure (Dingwall, 1931).

En Australie (Antón & Weinstein, 1999 ; Brown, 1981 ; Durband, 2008, 2014), en Polynésie (Schendel *et al.*, 1980) et en Mélanésie (Blackwood & Danby, 1955), ces pratiques étaient également connues et mises en œuvre.

De nombreux témoignages de voyageurs espagnols vers les Amériques, des éléments archéologiques ainsi que des restes humains et parfois matériels attestent que les déformations crâniennes intentionnelles étaient également pratiquées en Amérique du Nord (Neumann, 1942), en Mésoamérique (Comas & Marquer, 1969 ; Tiesler, 2012) et en Amérique du Sud (cf. 1.2.2).

Les premières descriptions de têtes déformées apparaissent dans les écrits du médecin grec Hippocrate (V^{ème} siècle av. J.-C.) ; *Des airs, des eaux et des lieux* décrit la déformation artificielle du crâne chez les Macrocéphales, peuplade des bords de la Mer Noire : « Dès que l'enfant vient de naître, et pendant que, dans ce corps si tendre, la tête conserve encore sa mollesse, on la façonne avec les mains, et on la force à s'allonger à l'aide de bandages et de machines convenables, qui en altèrent la forme sphérique et en augmentent la [longueur] » (Falkenburger, 1938, p. 1).

La déformation crânienne, principalement le type produit par bandages, a été trouvée dans une vaste zone de l'Europe de l'Ouest, dont les zones les plus importantes étaient la région du Jura, la vallée du Rhin et celle du Danube supérieur (Dingwall, 1931). Des crânes déformés

datant du V^{ème} siècle et du début du VI^{ème} siècle par exemple ont été trouvés en Suisse et seraient liés à l'arrivée des Burgondes dans la région (Simon, 1979). Elle a également été présente en Europe centrale et de l'Est (Dingwall, 1931 ; Molnár *et al.*, 2014 ; Tritsaroli, 2011).

Au XVI^{ème} siècle, les déformations crâniennes étaient répandues en Europe. Scaliger écrit en 1566 dans ses *Commentaires sur Théophraste* que « les Génois ont pris des Maures l'habitude de déformer les têtes » (Scaliger, 1566 in Delisle, 1902, p.147). À la même époque, selon Vésale, « les Belges ont la tête plus longue que d'autres peuples, parce que les mères enveloppent les têtes de leurs enfants avec des bandes et qu'elles les laissent le plus souvent dormir sur les tempes » (Delisle, 1902, p. 147).

Cette pratique a perduré dans certaines régions du monde jusqu'à la première moitié du XX^{ème} siècle comme par exemple chez les Mangbetu, peuple d'Afrique centrale présent essentiellement en République Démocratique du Congo (Figure 2-a.) (Verneau, 1927), pour lesquels il s'agissait d'un signe distinctif d'appartenance à leur culture (Spieser & Sprumont, 2004) ; ou encore chez un peuple de Nouvelle-Bretagne en Mélanésie (Figure 2-b.), pour lequel la motivation était esthétique car la déformation crânienne était considérée comme attractive pour le sexe opposé (Blackwood & Danby, 1955).

Des formes légères de déformations seraient encore répandues à la fin du XX^{ème} siècle dans des groupes caribéens, latino-américains, afro-américains, amérindiens, asiatiques et européens (FitzSimmons *et al.*, 1998). Les mères utilisaient la pression manuelle pour modeler la tête de leurs enfants durant la première année de leur vie, pour améliorer la beauté, la santé et l'intelligence de l'enfant, selon les mères interrogées (FitzSimmons *et al.*, 1998).

La DAC n'est pas un cas isolé de déformations volontaires du corps ; de nombreuses autres pratiques ont existé ou existent encore aujourd'hui telles que la coutume des pieds bandés par des femmes chinoises entre le X^{ème} et le XX^{ème} siècle (Ellenberger, 1980), le port du corset par les femmes du XVI^{ème} au début du XX^{ème} siècle en Europe (Regnault, 1900), les femmes girafes chez les Padaung (qui sont un sous-groupe du peuple Karenni qui vit en Birmanie) et les Ndébélés (peuple d'Afrique du Sud et du Zimbabwe), le port de piercing, l'élargissement des lèvres ou des oreilles par des disques en bois ou en pierre, comme par exemple des femmes Mursi ou Surma d'Ethiopie (Rouers, 2008).



Figure 2 : a) Petite fille Mangbetu (Afrique centrale) au crâne allongé (Zagourski, 2001) ; b) bandage d'un nourrisson Arawe, peuple de Nouvelle-Bretagne (Blackwood & Danby, 1955).

1.2.2. Contexte en Amérique du Sud

La DAC était une pratique relativement ubiquitaire, mais elle était particulièrement fréquente dans les populations autochtones du Nouveau-monde, et notamment dans la région andine (Dembo & Imbelloni, 1938 ; Dingwall, 1931).

De nombreux voyageurs témoignent de leur rencontre avec les indigènes d'Amérique. Christophe Colomb a écrit lors de son premier voyage à la découverte du nouveau monde, que les hommes ont « tous le front et la tête très larges » (Navarrete, 1828, p. 44). Le frère espagnol Diego de Landa raconte qu'au Yucatan, au Mexique, les nourrissons étaient étendus sur des petits lits et que la tête était placée entre deux planchettes : une sur la nuque et une au front (de Landa, 2011). Les explorateurs du Nord-Ouest Pacifique rapportent que les indiens Chinook pratiquaient des mutilations aux fronts de leurs enfants ; il s'agissait d'une marque de noblesse permettant de se distinguer des esclaves, qui n'étaient pas autorisés à pratiquer la déformation crânienne sur les crânes de leurs enfants (Pickering, 1848). Lewis et Clark notent au début du

XIX^{ème} siècle que leurs têtes, chez les deux sexes, étaient aplaties de manière la plus répugnante : « *their heads [are] flattened in a most disgusting manner* » (Lewis & Clark, 1817, p. 389). Les déformations crâniennes ont également été observées parmi de nombreuses autres populations telles que les Nootka et les Kwakiutl (Dingwall, 1931).

Bartolomé de las Casas rapporte au XVI^{ème} siècle qu'au Pérou lorsque les enfants viennent de naître, alors qu'ils ont encore les têtes très tendres, on leur attache des bandes ou des draps, ajustés selon la forme souhaitée (Casas, 1892). Au même siècle, Pedro de Cieza de León rapporte qu'au Nord de Cali, en Colombie, les indiens avaient la tête longue et il ajoute que dans d'autres régions des Indes, la tête des nourrissons prenaient la forme qui plaisait à leurs parents : certains étaient sans nuque (« *sin colodrillo* »), d'autres le front enfoncé (« *la frente sumida* »), d'autres le front très long (« *muy larga* ») (Cieza de León, 1922, p. 85). En Équateur, il dit que les peuples de Manta sur la côte, non contents des têtes que leur avaient données Dieu, plaçaient les nouveau-nés entre deux tablettes et que, plus tard, les enfants avaient une tête soit longue, soit large ; ils pensaient être ainsi plus sains et plus aptes au travail (Cieza de León, 1922). En Équateur, plus au sud, les peuples Cañari et Palta déformaient également leur tête par deux tablettes et ajustaient leur coiffure afin d'exagérer la forme de la déformation artificielle de la tête (Joyce, 1912). En 1601, le chroniqueur espagnol Juan de Castellanos indique que les Panches, en Colombie, avaient le front et la nuque aplatés (Castellanos, 1886). En Colombie, les Quimbayas également pratiquaient cette coutume par l'application de deux planchettes, l'une sur le front et l'autre sur l'occiput (Joyce, 1912). Le jésuite espagnol Christoval de Acuña rapporte qu'un peuple vivant le long de l'Amazone, les Omaguas, dont le nom signifie « têtes plates », appliquait une planchette sur le front des enfants et une seconde planche sur la nuque, si grande que, utilisée comme berceau, elle recevait le corps entier du nouveau-né. La tête était comprimée entraînant un aplatissement du front et de la nuque (de Acuña, Arellano *et al.*, 2009). Laureano de la Cruz décrit au XVII^{ème} siècle une méthode différente chez les Omaguas consistant à bander la tête de l'enfant avec des bandes de coton autour de la tête et à fixer une planche sur le front (de la Cruz, 1900).

Au moment du contact avec les colons espagnols, cette pratique était ainsi très largement répandue sur tout le continent, et l'était probablement depuis un temps considérable (Dingwall, 1931). Les restes squelettiques trouvés par les archéologues lors de fouilles permettent également

d'apporter des informations sur les peuples qui la pratiquaient et sur les types de déformation associés. La DAC est une tradition ancienne pratiquée dans la région andine il y a au moins 6 000 ans av. J.-C. (Gerszten, 1993). Dans la vallée Azapa à Arica, au Chili, environ 1000 av. J.-C., elle était pratiquée pour paraître plus grand ou effrayant (Allison *et al.*, 1981). Quelques siècles plus tard, les Paracas ont utilisé des turbans pour obtenir une voûte crânienne haute, et se sont fusionnés avec les Nazcas (Allison *et al.*, 1981). Au Venezuela dans la vallée Aragua (Lac de Valencia), la pratique n'était pas universelle dans la population, suggérant qu'elle était limitée à certaines classes (Dingwall, 1931). Dans l'Empire Inca, s'étendant de la rivière Ancasmayu au Nord (vers la frontière entre l'Equateur et le Pérou) et le fleuve Maule au Sud (à Constitución au Chili), les peuples vivant vers les côtes avaient des déformations surtout de type antéropostérieur (Dingwall, 1931). Les méthodes de déformation côtière se distinguaient de la méthode Aymara, de type circonférentiel, des peuples en altitude (Dingwall, 1931, p. 196), comme à Tarapaca où vivaient les Collas (ou Aymaras) (Joyce, 1912, p. 219). Chez les Incas péruviens, il s'agissait d'une grande faveur accordée à quelques nobles, et pour les indiens Coragues et Collas la forme de leur crâne les rendait en meilleure santé et plus aptes au travail (McGibbon, 1912). La pratique a également été présente en Guinée, en Argentine, en Pantogonie (Dingwall, 1931).

Les autorités espagnoles ont tenté à plusieurs reprises de stopper cette pratique notamment par des décrets leur interdisant la déformation crânienne intentionnelle sur les nouveaux nés (Dingwall p 215). La pratique a alors fortement diminuée.

Les conséquences pathologiques de ces pratiques ont peu été étudiées. Allison et collaborateurs (1981) ont trouvé une fermeture prématurée des sutures qui peut être attribuée à la DAC. Il est également possible qu'une mort prématurée des enfants au crâne déformé soit liée à la déformation (Dembo & Imbelloni, 1938). L'influence de la DAC sur les orbites pourrait potentiellement induire une exophtalmie (Khonsari, et al., 2013).

1.2.3. Contexte en France

Les déformations crâniennes ont été pratiquées dans l'ouest de l'Europe – notamment dans la région du Jura, la vallée du Rhin et celle du Danube supérieur (Dingwall, 1931) – à différentes époques, parfois distantes chronologiquement, si bien qu'il est difficile d'établir un rapport entre les déformations les plus anciennes en Europe et celles observés plus tard en France

entre le XVI^{ème} et le XIX^{ème} siècle après J.-C. (Delisle, 1902). En France, l'étude de sépultures suggère que cette pratique a existé dès le néolithique (Ampoulange *et al.*, 1953 ; Lagotala, 1921 ; Peyre & Carré, 1989), qu'elle était présente à l'Âge du fer (Dingwall, 1931), puis parmi les populations gallo-romaines (Baudouin, 1912 ; Ulrich, 1957) et parmi les Mérovingiens dans le Sud-Ouest de la France (Crubézy, 1990). Au Moyen-âge, des déformations de type antéro-postérieur (Maureille *et al.*, 1995) et de type toulousain (Pereira da Silva & Cussenot, 1989 ; Pereira da Silva *et al.*, 1990) ont été mises en évidence. Plus tard, les DAC sont également présentes dans différentes régions du XI^{ème} ou XIII^{ème} siècle (Delisle, 1902 ; Pereira *et al.*, 1984) jusqu'au XIX^{ème} siècle, durant lequel ces pratiques auraient été abandonnées progressivement. D'autres parties du corps étaient concernées par les déformations volontaires : les oreilles étaient écrasés par les bandes de compression utilisées pour la déformation crânienne (il s'agit d'une conséquence indirecte de la déformation crânienne ; notez la partie supérieure de l'oreille de Marie Laynet de la Figure 3), le nez était tiré avec les doigts pour l'allonger, le bout des seins des filles après l'accouchement étaient étirés afin qu'elles soient disposées à nourrir, etc. (Gélis, 1984).

En France, deux modèles de déformation crânienne semblent avoir dominé : la « tête ronde » liée habituellement au mode de couchage et la « tête longue » liée à de fortes contraintes (Delisle, 1902 ; Gélis, 1984).

Dans le premier cas, l'enfant était placé dans un berceau plat rectangulaire avec un oreiller plat et assez dur, les couvertures étaient maintenues des deux côtés du berceau par des liens et la tête de l'enfant était immobilisée par un mouchoir ou un linge triangulaire. La mère ne sortait l'enfant du berceau que pour les soins de propreté. Par ce mode de couchage, le diamètre antéropostérieur de la tête était diminué. Delisle a rencontré cette déformation dans les départements du Lot-et-Garonne, du Gers, des Landes et de la Gironde (Delisle, 1902).

La plupart des déformations crâniennes artificielles françaises étaient des déformations annulaires où le crâne était fortement serré selon un plan droit et oblique – obtenant « la tête longue ». Dans ce cas, des bandes ou bandeaux de toile, des mouchoirs ou des foulards, des cordons de fil ou des courroies de cuir, enfin des bonnets étroitement ajustés – les serre-têtes – étaient appliqués au nouveau-né. Il n'est pas toujours aisé de distinguer les pratiques volontaires de celles qui ne le sont pas. En effet, certains pensent que la déformation toulousaine est involontaire au XIX^{ème} siècle (Broca, 1871 ; Delisle, 1889). Broca pense qu'elle serait le résultat

des coiffures traditionnelles, pratiquées au départ avec la volonté de transformer, et le but aurait été oublié (Broca, 1871). Le matériel de contention variait selon les régions ; et un même appareil ou bandeau n'était pas appliqué partout avec la même intensité et durant le même temps chez tous les enfants. Il en résultait différents degrés de déformation selon les individus (Gélis, 1984 ; Delisle, 1902). Des variations marquées en degré et en forme existent entre les deux sexes. Les déformations étaient souvent plus fortes chez les filles car elles gardaient leur bandeau ou serre-tête plus longtemps que les garçons ; elles les conservaient toute leur vie (Delisle, 1902).



Figure 3 : Déformation toulousaine de type moyen. Marie Laynet et François Vales (cinquante-huit ans), nés à Fourquevaux (Haute-Garonne). Collection du docteur F. Delisle (Delisle, 1889).

Certains auteurs distinguent les déformations annulaires françaises selon le moyen de contention utilisé. Quatre variantes régionales ont pu ainsi être distinguées : la déformation dite « toulousaine », la déformation de Saint-Gaudens, la déformation poitevine et la déformation normande (Gélis, 1984). Au milieu du XIX^{ème} siècle, de nombreux médecins et anthropologues – dont Broca – ont décrit les déformations qu'ils observaient, notamment dans des asiles. La déformation toulousaine, décrite par Broca (1871), était présente dans tout le Languedoc au XIX^{ème} siècle. Les moyens de contention utilisés étaient des serre-têtes et bandeaux en toile assez forte, qui étaient portés dès la naissance. Le serre-tête était une « sorte de petit sac de toile, coulissé derrière et fortement serré sur la tête par des rubans plats, de 1 centimètre environ de largeur, qui, suivant à peu près la suture coronale, revenaient se nouer sous la nuque en contournant deux fois la tête » (Delisle, 1889, p. 661). Il pouvait être maintenu par des fils solides qui passaient à l'arrière de la nuque, se croisaient au-devant du front et se rejoignaient de nouveau au niveau de la nuque, où ils étaient noués. Le bandeau ou « *bendel* » était un long tissu

blanc, souligné d'une fine dentelle et solidement nouée au niveau de la nuque par une attache de coton (Figure 4). Une dernière pièce, une sorte de coiffe en étoffe noire ou blanche - le « *transparent* » - pouvait compléter cet ensemble en couvrant le serre-tête et une partie du bandeau (Figure 5) (Gélis, 1984).



Figure 4 : Bandeaux ou « bendels », portés sous une coiffe par les femmes dans certaines régions de France au XIX^{ème} siècle (<http://www.lauragais-patrimoine.fr/PATRIMOINE/COIFFES/COIFFES.html>)



Figure 5 : Les moyens de contention de la femme dans la région toulousaine : Jeanne Bautens, femme Pourquoié Guillaume, de Fourquevaux, Haute-Garonne, 1889. Coll. Delisle (Gélis 1984). a) La femme tête nue, vue de face ; b) La femme tête nue, vue de profil ; c) La femme portant le bandeau (en blanc) et le serre-tête (coiffe noire) ; d) Un second bandeau, brodé de dentelle, est ajouté ; e) Une seconde coiffe noire, le « transparent » recouvre le serre-tête et une partie du bandeau ; f) La coiffe de dentelle s'ajoute par-dessus le tout.

La déformation de Saint-Gaudens se distingue de la déformation toulousaine par le passage des bandelettes du bandeau sous le menton et non au niveau de la nuque ; cela entraînait un affaissement de la partie centrale de la voûte crânienne. La déformation poitevine et limousine était obtenue par le port autour de la tête du nouveau-né d'un bandeau dont les deux bandelettes étaient nouées au sommet du crâne. Ce dernier présentait un allongement oblique, un aplatissement prononcé du front et de la région occipitale. Le bandeau était ensuite abandonné vers l'âge de deux à trois mois et remplacé par une calotte en carton – appelé le « capot » ou « fromage » ; plus tard, la fille et la femme y ajoutaient un fil de fer – « Varcelet » – qui assurait la stabilité de la coiffe. La déformation normande est également obtenue par le port autour de la tête du nouveau-né d'un bandeau dont les extrémités sont nouées sur la tête. Sous le bonnet était placé le « *crémé* », un bandeau fortement serré qui restait en place pendant deux ou trois semaines après le baptême.

Ces types régionaux sont tous des déformations circonférentielles obtenues par compression annulaire due à une coiffe traditionnelle. Il en résulte des différences difficiles à prendre en compte. Par conséquent, les différents types français de déformation annulaire seront considérés dans ce mémoire comme des déformations toulousaines ; les crânes français déformés de l'échantillon étudié ont été étudiés comme tels par certains auteurs (Khonsari *et al.*, 2013).

Une vaste enquête a été menée dans des asiles de France à la fin du XIX^{ème} siècle, permettant à Ferdinand Delisle de réaliser un état des lieux, malheureusement incomplet, de la distribution des déformations artificielles en France. Ainsi, plus de la moitié des départements français à cette période pratiquaient ces déformations ; mais ces dernières étaient « destinées à disparaître à bref délai » au vu de la diminution du nombre de déformés au cours du XIX^{ème} siècle (Delisle, 1902, p. 166).

Diverses raisons justifiant le port du bandeau et du serre-tête qui déformaient le crâne, ont été évoquées. Certains évoquent la volonté pour les mères de protéger leur enfant des chocs et des intempéries – la déformation serait dans ce cas plus accidentelle que volontaire – ou bien la volonté de réduire la fontanelle. Pour d'autres, il s'agit d'un idéal esthétique : il a été rapporté à Gosse que « chez les campagnards du Languedoc, on considère encore la tête allongée en arrière et à front fuyant, comme la plus élégante. » (Gosse, 1855, p. 131). D'autres raisons

également sont évoquées telles que le développement de la mémoire et de l'intelligence, ou encore la symbolique sexuelle (Gélis, 1984).

Au cours du XIX^{ème} siècle, la pratique de la déformation crânienne a été peu à peu abandonnée. Certains médecins, tels que Lunier et Foville, voyaient un lien de cause à effet entre la déformation crânienne et l'affaiblissement des facultés mentales (Foville, 1834 ; Delisle, 1902), idée à laquelle s'opposait Delisle (1902) ; Foville se préoccupait également de la mauvaise hygiène des enfants en bas âge, liée à ces pratiques et de ce fait à l'absence de peignage (Foville, 1834), et menait des campagnes de persuasion afin d'influencer les familles. L'action des médecins aurait donc conduit à l'abandon de cette pratique ; mais pour certains anthropologues, ce sont les variations de la mode qui en sont la cause (Delisle, 1902).

1.3. Classification et techniques des déformations crâniennes

Différents types de classification des DAC ont été proposés aux XIX^{ème} et XX^{ème} siècles. Morton (1839) a signalé la présence de quatre types de déformations (présents en Amérique), auxquels Gosse (1855) en a ajouté douze dans son *Essai sur les déformations artificielles du crâne*. Diverses classifications apparaissent par la suite (e.g. : Broca, 1875 ; Falkenburger, 1938 ; Dembo & Imbelloni, 1938 ; Magitot, 1885). Celle qui est la plus utilisée par les chercheurs (Antón, 1989 ; Cussenot *et al.*, 1992 ; Frieß & Baylac, 2003 ; McNeill & Newton, 1965) distingue deux principaux types de déformations : la déformation antéropostérieure ou tabulaire (AP) – provoquée par des planchettes ou des pierres dures fixées à la tête (Figure 6-a.) ou encore par un berceau d'une telle façon que la tête est compressé contre une surface aplatie (Figure 6-b.) ; et la déformation circonférentielle ou annulaire (C) – obtenue par bandages (Figure 2-b.) ou bonnets. Selon cette classification, il y a un lien entre l'appareil déformateur utilisé et la forme du crâne obtenue. Une subdivision entre les formes « oblique » et « droite » (ou « érigée ») différencie respectivement les crânes dont l'orientation de l'écaille occipitale est oblique et ceux dont l'orientation est verticale (Dembo & Imbelloni, 1938). Dans la classification binaire des crânes déformés, les crânes à déformation toulousaine (T) – obtenus par le port de bandeaux (Figure 5) – fait partie des crânes circonférentiels (Dembo & Imbelloni, 1938). Pour cette étude, cependant, s'agissant d'un groupe différent géographiquement et culturellement des Boliviens, ils formeront un troisième groupe.



Figure 6 : Figurines représentant des appareils de déformation : a) figurine de la période Maya Classique ; b) figurine de Mexico (Dessinées par B. Ceballos ; cf. Tiesler, 2013, Figures 4.7 et 4.9, p.81, 84).

1.4. Effets des déformations sur la base et la face

La base, la voûte et la face du crâne proviennent de régions embryologiques distinctes : le chondrocrâne, le splanchnocrâne et le desmocrâne (Lieberman *et al.*, 2010). Elles fonctionneraient comme trois modules semi-autonomes (Cheverud, 1982 ; Simonis-Sueur, 2006). La base est un sujet d'intérêt en recherche par la place qu'elle occupe dans le crâne : elle est connectée avec le reste du crâne, s'articule avec la mandibule par l'articulation temporo-mandibulaire (les fosses mandibulaires) et avec la colonne vertébrale, assure les fonctions circulatoires et neurales par de nombreux foramens et forme le toit du nasopharynx.

La base subit des modifications au cours de la croissance, telles que la fermeture de l'angle basicrânien (Anderson & Popovich, 1983 ; May & Sheffer, 1999). La forme de la voûte crânienne est en relation avec celle de la base crânienne (Björk, 1955). En effet, la largeur de la

base a un effet sur toutes les proportions crâniennes ; elle a également une influence sur la conformation de la face (Lieberman *et al.*, 2000).

Les études sur les DAC peuvent apporter de précieuses informations quant à la plasticité crânienne et les réactions des différents modules crâniofaciaux. Les appareils déformants se situent sur la voûte crânienne. Il en résulte des modifications directes au niveau de la voûte. Les études précédentes ont noté pour les crânes AP un fort raccourcissement de la longueur crânienne avec un aplatissement des os frontal et occipital, un élargissement (Antón, 1989 ; Cocilovo *et al.*, 2011) et une augmentation de la hauteur de la voûte (Pereira Da Silva & Sakka, 1980). Dans le cas des déformations C, les études précédentes ont noté une voûte conique allongée postéro-supérieurement (Antón, 1989) ou antéropostérieurement (Kohn *et al.*, 1993), et plus étroite (Antón, 1989 ; Cocilovo *et al.*, 2011). Les chercheurs ont noté chez les crânes T un front fuyant à partir de la région sourcillière, ou plus haut, et jusqu'au sommet du crâne, en position fortement plus postérieure (Broca, 1871 ; Delisle, 1902).

Les effets de la DAC sur la face et la base ont également été mis en évidence (Antón, 1989 ; Kohn *et al.*, 1993). En général, les déformations de type C sont associées à une augmentation de la hauteur faciale et une diminution de la largeur (Antón, 1989 ; Blackwood & Danby, 1955 ; Kohn *et al.*, 1993) ; Frieß et Baylac (2003) ont trouvé une plus forte projection faciale antérieure et inférieure. Les déformations de type AP sont associées à une augmentation de la largeur faciale (Antón, 1989). Selon les études précédentes, la déformation C causerait une augmentation antéropostérieure de la base crânienne et une diminution dans les dimensions médio-latérale et supéro-inférieure (Kohn *et al.*, 1993) ; la déformation AP causerait une augmentation de la largeur de la base (Antón, 1989) et une diminution de sa longueur (Cocilovo *et al.*, 2011).

Des modifications au niveau de l'angle de la base du crâne ont été observées mais les chercheurs ne sont pas en accord. La plupart des études (Antón, 1989 ; Cussenot *et al.*, 1992 ; Hanzel, 1977 ; Mc Neill & Newton, 1965) suggèrent une tendance à la platybasie pour les deux types de déformations AP et C, et Oetteking (1924) a également trouvé une tendance à la platybasie pour des crânes amérindiens de type AP. Au contraire, Moss (1958) a trouvé une cyphose basale pour les crânes de type « vertical » et une platybasie basale pour les crânes de type « oblique ». La classification utilisée par Moss est peu claire et a déjà été interprétée différemment et discutée par les chercheurs (Antón, 1989 ; McNeill & Newton, 1965 ; Frieß &

Baylac, 2003). McNeill et Newton (1965) ont corrélé les groupes « vertical » et « oblique » de Moss avec respectivement les déformations AP et C. Antón (1989) affirme au contraire qu'aucun des groupes ne contient exclusivement des C. La déformation T, comme le type C, a une tendance à la platybasie (Cussenot *et al.*, 1992 ; Pereira da Silva *et al.*, 1990). Une étude sur des crânes hawaïens (Schendel *et al.*, 1980) ne montre pas de différence significative entre les crânes déformés (de type « oblique ») et ceux non déformés.

Gosse (1855) a observé un prognathisme associé à des DAC et l'étude de l'impact des DAC sur la position mandibulaire a été étudiée sur un échantillon de crânes hawaïens (Schendel *et al.*, 1980).

Des études ont suggéré que des variations basicrâniennes avaient des conséquences sur la morphologie et la position de la mandibule et que des corrélations existaient entre l'angle basicrânien et la morphologie mandibulaire (Björk, 1955 ; Bastir *et al.*, 2004 ; Delaire *et al.*, 1981 ; Schendel *et al.*, 1980). Une étude sur la flexion de la base et la position des fosses mandibulaires sur des enfants n'ayant pas subi de déformation, suggère que ceux qui avaient un angle basicrânien plus ouvert, avaient une plus courte région basale postérieure, que les condyles mandibulaires étaient localisés plus haut et postérieur, et que ces enfants montraient une plus grande tendance à avoir une disto-occlusion (une malocclusion dentaire de type II, Figure 7) (Anderson & Popovich, 1982), c'est-à-dire une mauvaise position des dents où la cuspidé mésiobuccale de la première molaire supérieure n'est pas alignée avec le sillon de la première molaire inférieure et est en position plus avancée, ce qui résulte en un rétrognathisme. D'autres études montrent au contraire que l'angle basicrânien ne joue pas un rôle majeur dans la malocclusion (Dhopatkar *et al.*, 2002). Des études ont montré également que la position de l'articulation temporo-mandibulaire jouait un rôle dans l'occlusion dentaire. Les fosses mandibulaires en position postérieure peuvent entraîner une malocclusion de classe II tandis que les fosses mandibulaires en position antérieure entraîneraient une malocclusion de classe III, où la cuspidé mésiobuccale de la première molaire supérieure est en position plus reculée, résultant en un prognathisme (Delaire *et al.*, 1981).

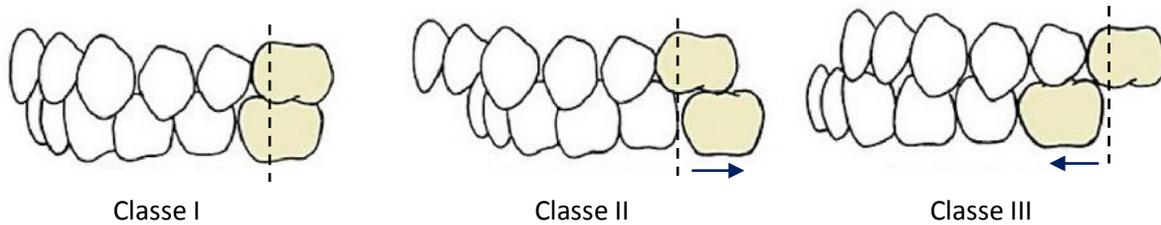


Figure 7 : Position occlusale de la mandibule selon la classification d'Edward Angle (d'après Proffit *et al.*, 2014)

1.5. Méthodologie employée et objectif

De nombreuses études ont examiné les impacts de la DAC sur le crâne par les méthodes traditionnelles (Pereira da Silva & Sakka, 1983 ; Peirera da Silva *et al.*, 1990), par l'étude d'images bidimensionnelles telles que des images radiologiques (Antón, 1989 ; Hanzel, 1977 ; McNeil & Newton, 1965 ; Moss, 1958 ; Oettekling, 1924 ; Peirera da Silva *et al.*, 1990), par la prise de coordonnées tridimensionnelles directes (Cheverud *et al.*, 1992 ; Kohn *et al.*, 1993), par des méthodes de morphométrie géométrique bidimensionnelle (Frieß & Baylac, 2003) ou plus récemment et plus rarement par l'étude des crânes au moyen de l'imagerie tridimensionnelle (Khonsari *et al.*, 2013). Certaines études ont utilisé la technique des éléments finis pour examiner les changements morphologiques du neurocrâne, de la base crânienne et de la face, dus à la DAC (Kohn *et al.*, 1993 ; Cheverud *et al.*, 1992). Notre étude utilise pour la première fois la morphométrie géométrique tridimensionnelle sur des données tomographiques afin d'étudier les impacts de la DAC sur la base et l'appareil masticateur. Compte tenu d'un cadre temporel d'un mémoire de Master 2, il s'agit d'une étude exploratoire sur un petit échantillon.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier par la morphométrie géométrique les effets de la DAC sur la base du crâne, dont notamment ses proportions et la flexion basicrânienne, et sur des aspects morphologiques liés à la face et à la mastication comme la position de la fosse mandibulaire, informant sur la position de la branche montante de la mandibule. Nous étudierons également les corrélations entre la voûte et la base crâniennes. L'un des intérêts de cette étude repose sur la méthode utilisée : la morphométrie géométrique tridimensionnelle sur des données tomographiques. Elle permet d'analyser les conformations des structures externes et internes des crânes en prenant en compte un ensemble de variations de conformations.

2. Matériels et méthodes

2.1. L'échantillon

L'échantillon étudié comprend 49 crânes adultes (Khonsari *et al.*, 2013) déformés et non déformés de la collection du Musée de l'Homme à Paris (Annexe 1), ainsi qu'un crâne d'adolescent (numéro 18240) et un crâne d'enfant (numéro 18389), les âges ayant été déterminés par la dentition et le degré de fusion de la synchondrose sphéno-occipitale. Les crânes proviennent de Bolivie et du Sud-ouest de la France (Tableau 1). Les crânes déformés ont été préalablement attribués (Khonsari *et al.*, 2013) à deux types de déformations en suivant la classification de Dembo et Imbelloni (1938) pour les crânes boliviens : celle antéropostérieure (AP, Figure 8), sous-divisée en variantes droite (APe) et oblique (APo), et celle circonférentielle (C, Figure 9). Les crânes français déformés appartiennent au type toulousain (T, Figure 10). Les crânes non déformés (ND, Figure 11) servent de référence. La déformation toulousaine est similaire à la déformation annulaire quant à la forme et la manière dont le crâne a été déformé (Broca 1871 ; Dembo & Imbelloni, 1938). Dans le cadre de cette étude, les crânes obtenus par les déformations toulousaine et annulaire seront considérés comme deux groupes distincts afin de pouvoir observer d'éventuelles différences entre ces deux groupes. Le sexe est une donnée souvent inconnue pour les crânes de notre échantillon. Par conséquent, le dimorphisme sexuel ne sera pas pris en compte dans cette étude. Dans les études précédentes sur les déformations crâniennes qui ont pris en compte le sexe, les résultats suggéraient que les individus féminins et masculins réagissaient de façon similaire aux déformations crâniennes antéropostérieures (Cheverud & Midkiff, 1992 ; Cheverud *et al.*, 1992) et circonférentielles (Kohn *et al.*, 1993).

Tableau 1 : Type, nombre et provenance des crânes étudiés

Type de crânes	Nombre	Provenance
Antéropostérieur droit	11	Bolivie
Antéropostérieur oblique	8	Bolivie
C	10	Bolivie
T	7	France
Non déformés	10	Bolivie
	5	France
Total	51	



Figure 8 : Crâne déformé de type antéropostérieur positionné selon le plan de Francfort a) en vue latérale ; b) en vue faciale (clichés de l'auteur)



Figure 9 : Crâne déformé de type circonférentiel positionné selon le plan de Francfort a) en vue latérale ; b) en vue faciale (clichés de l'auteur)

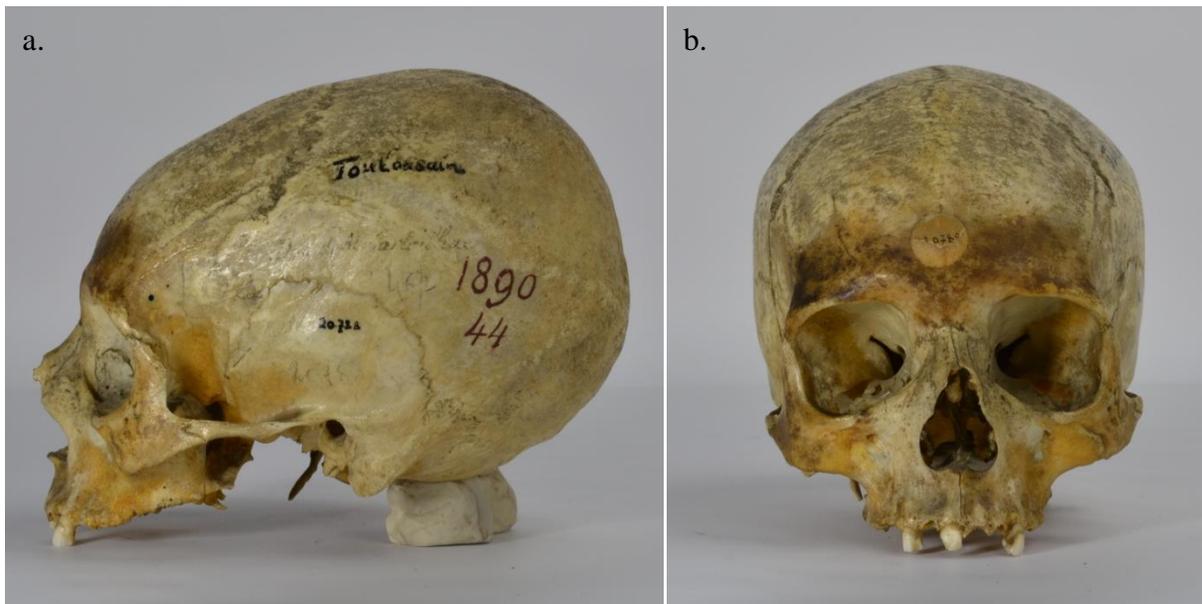


Figure 10 : Crâne déformé de type toulousain, positionné selon le plan de Francfort a) en vue latérale ; b) en vue faciale (clichés de l'auteur)



Figure 11 : Crâne non déformé positionné selon le plan de Francfort a) en vue latérale ; b) en vue faciale (clichés de Martin Friess)

2.2. Acquisition des données

2.2.1. Imagerie tridimensionnelle

Cette étude s'appuie sur les techniques d'imagerie médicale tridimensionnelle, qui, initialement conçues pour des applications médicales, sont de plus en plus utilisées dans la recherche en anthropologie biologique car elles offrent de nouveaux axes de recherche. Elles comportent de nombreux avantages tels que l'obtention d'une image virtuelle permettant de limiter la manipulation des pièces plus ou moins fragiles et d'étudier l'objet sans grande contrainte une fois scanné (Semal *et al.*, 2005), la visualisation des structures internes des objets sans destruction (Semal *et al.*, 2005), la reconstruction de parties anatomiques manquantes (Dutailly *et al.*, 2007), et des applications en morphométrie géométrique (Slice, 2006 ; Friess, 2010).

Les données ont été préalablement obtenues (Khonsari *et al.*, 2013) par un scanner médical standard selon un protocole adapté au matériel anthropologique (Badawi-Fayad *et al.*, 2005). Le principe du CT-scan (CT : *computerized tomography*), également appelé tomodensitométrie, est de fournir des images en coupe des crânes, sous forme numérique.

Chaque coupe est composée d'unités cubiques appelées « voxels », dont la taille est comprise ici entre $0,4 \times 0,4 \times 0,4 \text{ mm}^3$ et $0,5 \times 0,5 \times 0,4 \text{ mm}^3$ pour la majorité des crânes. L'image en coupe est générée dans une orientation qui dépend de la position du crâne sur le plateau pendant l'acquisition. Le plan x/y est scanné directement et l'axe z est orienté perpendiculairement au scan et à l'image plan, et ainsi parallèle à l'axe de rotation du scan (Kalender, 2011). Pour 47 crânes, le nombre de coupes 2D était environ 550 coupes et la taille des voxels était ainsi comprise entre $0,4 \times 0,4 \times 0,4 \text{ mm}^3$ et $0,5 \times 0,5 \times 0,4 \text{ mm}^3$. Pour quatre des crânes (numéros 17070, 18213, 18232 et 20790), seules les données avec environ 170 coupes étaient exploitables, la taille des voxels étant ainsi comprise entre $0,4 \times 0,4 \times 1,25 \text{ mm}^3$ et $0,5 \times 0,5 \times 1,25 \text{ mm}^3$.

2.2.2. Test de comparaison 170 / 550 coupes

Afin de pouvoir inclure dans l'analyse les crânes ayant environ 170 coupes 2D, nous avons segmenté une deuxième fois, trois des crânes (numéros 17060, 17069 et 17117) pour lesquels la segmentation pouvait s'effectuer avec 170 et 550 coupes. Les landmarks ont été placés sur les deux modèles 3D obtenus pour chacun des ces trois crânes.

2.2.3. Segmentation des données tomographiques

Pour chacun des crânes, les images médicales en coupe ont été segmentées en deux composantes (l'os et ce qui ne l'est pas) afin d'obtenir un modèle 3D numérique. La segmentation s'effectue en choisissant un seuil de niveau de gris à partir duquel les voxels sont considérés comme correspondant à de l'os. Les frontières séparant l'os et l'air sont plus graduelles qu'abruptes. Sur une graduation de niveau de gris, placer un point est imprécis. Une valeur seuil de niveau de gris doit donc être choisie afin de séparer l'os de l'air. Des études ont montré que la frontière se situe au point médian entre la valeur de gris maximum et la valeur de gris minimum de chaque côté de l'interface le long d'une rangée de valeurs qui couvre la frontière. Ce niveau de gris est appelé HMH (*half-maximum height*, Spoor *et al.*, 1993). L'os n'a pas la même densité pour toutes les structures du crâne donc le HMH est différent tout le long de la frontière os – air. Si un seuil élevé est défini pour tout le crâne, les structures à densité faible, telles que les os vomer et ethmoïde, seront considérées comme de l'air (Figure 12-a. et c.).

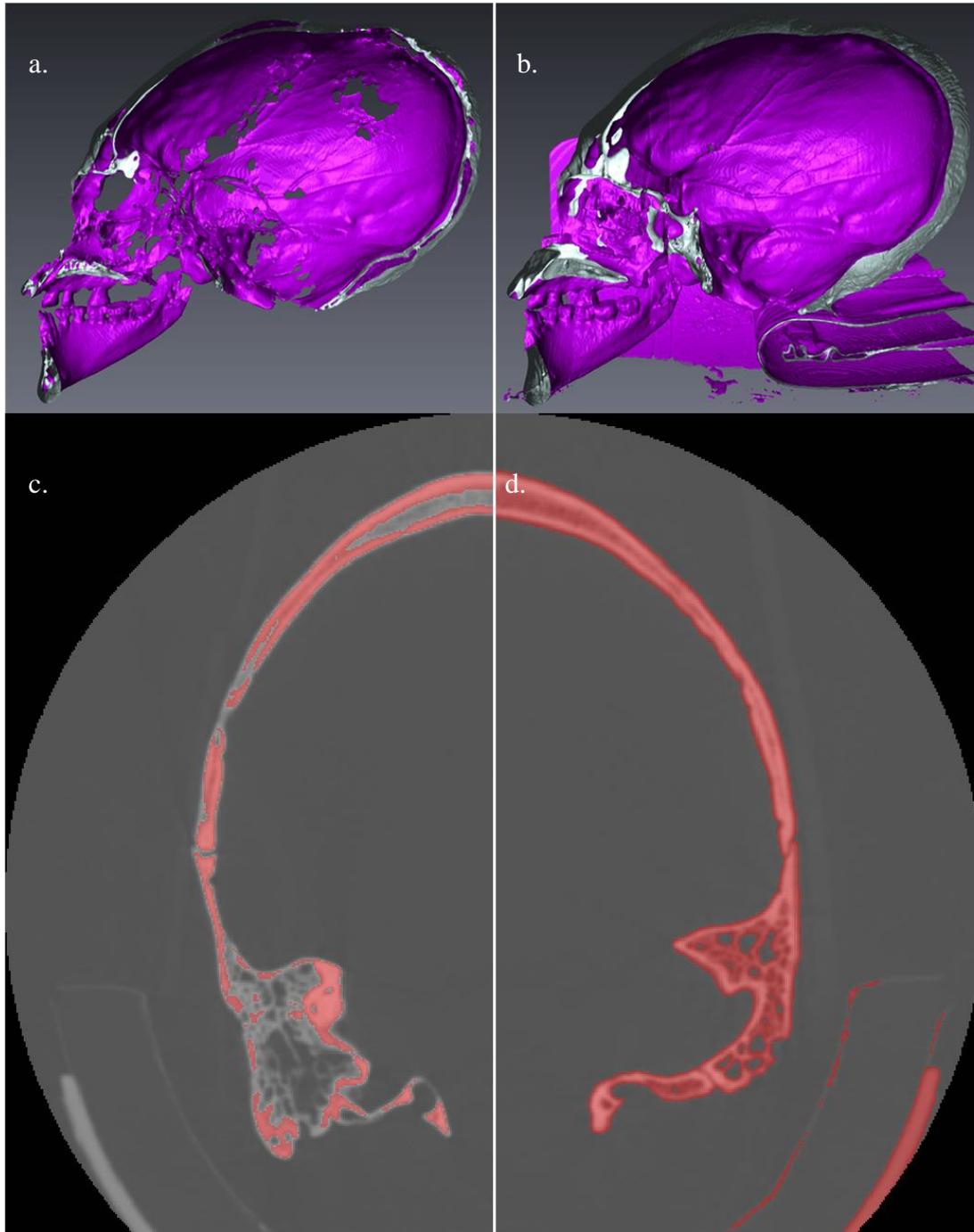


Figure 12 : Différences sur le modèle 3D d'un crâne (n° 5268) en fonction du niveau de gris : a) Modèle 3D vue en coupe sagittale au seuil 600 à 3000 ; b) Modèle 3D vue en coupe sagittale -800 à 3000 ; c) Image médicale en coupe avec sélection à un seuil de 600 à 3000 ; d) Image médicale en coupe avec sélection à un seuil de -800 à 3000.

À l'inverse, si le seuil défini est bas, les structures à haute densité, telles que l'os cortical de la voûte crânienne, risquent d'être plus épaisses qu'en réalité (Figure 12-b. et d.). L'utilisation des données tomographiques pour obtenir des modèles 3D a l'avantage d'avoir accès aux structures internes, mais le principal inconvénient est que la segmentation est très chronophage.

Afin de comparer les potentielles différences de distances entre des points du crâne en fonction du seuil de niveau de gris, nous avons mesuré trois distances correspondant aux trois dimensions du crâne – les distances Glabell-Opisthocrânion (Gl-Op), bi-auriculaire et Basion-Bregma (Ba-B) – sur des modèles 3D de crânes obtenus à partir de trois seuils différents avec l'aide du logiciel Geomagic studio (Tableau 2). Ce dernier permet de placer les points exactement aux mêmes endroits entre les crânes ayant différents seuils. Les écarts entre les mesures n'excèdent pas 1 mm. Nous avons également pris ces mesures au millimètre près sur les crânes réels avec un pied à coulisse et un céphalomètre (Tableau 2). Les mesures sont cohérentes avec ceux sur les modèles 3D avec les trois seuils. Le seuil de -500 à 3000 permet d'obtenir un crâne presque complet sans pour autant avoir trop de bruit difficile à retirer. Les mesures à ce seuil sont, au millimètre près, les mêmes que celles prises sur le crâne réel. Il s'agit du seuil que nous choisirons pour segmenter les images CT scan des crânes.

Tableau 2 : Mesures des trois dimensions du crâne sur les modèles 3D, à partir de trois seuils différents de niveau de gris, et sur les crânes directement

Crâne n°	Landmarks	Mesures en mm			Crâne réel
		Seuil -500 à 3000	Seuil 0 à 3000	Seuil 300 à 3000	
17058	Gl-Op	174,9	174,58	174,46	175
	Ba-B	138,68	137,85	137,59	138
	Bi-auriculaires	130,76	130,42	129,84	130
17060	Gl-Op	178,66	178,44	178,36	179
	Ba-B	131,05	130,42	130,06	131
	Bi-auriculaires	128,04	127,28	127,08	128
17069	Gl-Op	175,55	175,05	174,94	175
	Ba-B	132,66	132,00	131,89	133
	Bi-auriculaires	134,56	134,04	133,68	134

Sur une partie des crânes, toutes les structures sont visibles à un seuil de -500 à 3000. Pour d'autres, certaines zones ne le sont pas, auquel cas un seuil de -800 à 3000 a été appliqué aux zones non visibles à un seuil de -500 à 3000 mais utiles au placement des points repères. Afin de vérifier que les coordonnées des points qui pourraient être affectés par ce seuil sont les mêmes entre les deux seuils, nous avons placé tous les points internes sur cinq crânes et mesuré l'écart entre chaque coordonnée. L'écart correspond à la fois à la variabilité intra observateur et la variabilité due au changement de seuil. La moyenne des écarts est de 0,42 mm et l'écart maximum est 0,61 mm.

La segmentation tomographique est réalisée en plusieurs étapes :

- Sélectionner le seuil de gris préalablement défini à -500 – 3000 à l'ensemble des coupes tomographiques.
- Supprimer les débris dus notamment au support ayant servi à scanner le crâne, aux éventuels clous en fer ayant servi auparavant à fixer la mandibule au calvarium, et à la mousse.
- Enlever le haut de la branche montante de la mandibule afin de placer des landmarks au niveau des fosses mandibulaires.

2.2.4. Placement des Landmarks

Une fois le modèle segmenté, nous avons placé à l'aide du logiciel Geomagic Studio 46 landmarks sur ce modèle : il s'agit de landmarks traditionnels (glabellae, nasion, bregma, lambda, inion, opisthocrânion, opisthion, basion, euryons, porions), étant des points anatomiques homologues, c'est-à-dire qu'ils peuvent être localisés de façon équivalente sur tous les crânes humains, soit parce qu'ils ont une homologie (quand ils sont des points d'intersection, par exemple), soit parce qu'ils permettent une description géométrique (des points qui décrivent la largeur ou la longueur maximale) ; des landmarks au niveau de la base ; des landmarks au niveau des deux fosses mandibulaires ; et des landmarks au niveau du palais. Ces points repères ont été placés selon les définitions données dans le tableau 3 sur la surface du modèle 3D de chaque crâne exceptés le *foramen caecum* et la sella, qui ont été placés chacun sur une coupe sagittale passant respectivement par le milieu du *foramen caecum* et de la *sella turcica*.

Tous les points définis selon l'axe antéropostérieur ont été placés lorsque le crâne est positionné selon le plan de Francfort, défini par le point infra-orbitaire gauche et les deux porions. Le plan sagittal a été défini par le basion, le nasion, et un point situé entre bregma et lambda.

Tableau 3 : Liste des landmarks utilisés pour cette étude

Numéros	Nom du point	Description
1	<i>Foramen caecum</i>	Centre de l'ouverture du <i>foramen caecum</i> , sur le plan sagittal
2	<i>Spina ethmoidalis</i>	Point sagittal antérieur du jugum sphénoïdal à la jonction de la lame criblée
3	Jugum sphénoïdal	Point sagittal postérieur du jugum sphénoïdal
4	Sella	Centre de la selle turcique
5, 6	Extrémité courbe sphénoïde	Point maximum de chaque courbe des petites ailes du sphénoïde
7, 8	Clinoïde	Point le plus postérieur du processus clinoïde (<i>processus clinoideus anteriori</i>)
9, 10	Pointe pétreuse	Point le plus antéro-médial de la partie pétreuse de l'os temporal (<i>pars petrosa</i>)
11, 12	Méat auditif interne	Centre du méat auditif interne
13, 14	<i>Foramen lacerum</i>	Centre du trou déchiré antérieur (<i>foramen lacerum</i>)
15	Staphylion	Epine nasale postérieure
16	Prosthion	Point le plus antérieur de l'arche alvéolaire dans le plan sagittal
17	Nasion	Point d'intersection entre les deux os nasaux et l'os frontal, sur le plan sagittal.
18	Glabelle	Point le plus antérieur de la région glabellaire de l'os frontal, sur le plan sagittal (lorsque le crâne est orienté selon le plan de Francfort).
19	Bregma	Point d'intersection des sutures coronale et sagittale.

20	Lambda	Point d'intersection des sutures sagittale et lambdoïde.
21	Opisthocrânion	Point le plus postérieur de l'os occipital sur le plan sagittal, et marquant la longueur crânienne maximale (depuis la glabelle).
22	Inion ¹	Intersection entre la tangente connectant les points supérieurs des lignes nucales supérieures et le plan médian-sagittal.
23	Opisthion	Point le plus postérieur du <i>foramen magnum</i>
24	Basion	Point le plus antérieur du <i>foramen magnum</i>
25, 26	Porion	Point situé sur le toit du méat auditif, à la verticale de l'ouverture de celui-ci.
27, 28	Mastoidale	Point inférieur du processus mastoïdien, marquant l'extrémité de ce dernier.
29, 30	Astérion	Point triple à l'intersection des sutures lambdoïde, pariéto-mastoïdienne et occipito-mastoïdienne.
31, 32	Euryon	Point marquant la largeur maximale, sur l'os pariétal.
33, 34	Point sous-orbitaire	Point situé le plus bas sur le rebord orbitaire
35, 36	Zygomaxillaire	Point inférieur et antérieur de la suture entre le maxillaire et l'os zygomatique
37, 38	Point le plus convexe du palais	Point le plus convexe des courbes du palais
39, 40	Ectomolaire	Point médian sur l'arche alvéolaire au-dessus de la deuxième molaire supérieure
41, 42	Pétreux-tympanique	Point le plus latérale de la fissure pétreux-tympanique
43, 44	Entoglénoïde	Point le plus inférieur du processus entoglénoïde
45, 46	Tubercule articulaire	Point le plus inférieur du tubercule articulaire de la fosse mandibulaire

¹ L'inion suit ici la définition utilisée par une minorité de paléanthropologues tels que Balzeau et collaborateurs (2011), parce qu'il est considéré plus répétable que l'inion suivant la définition traditionnelle (Martin & Saller, 1957).

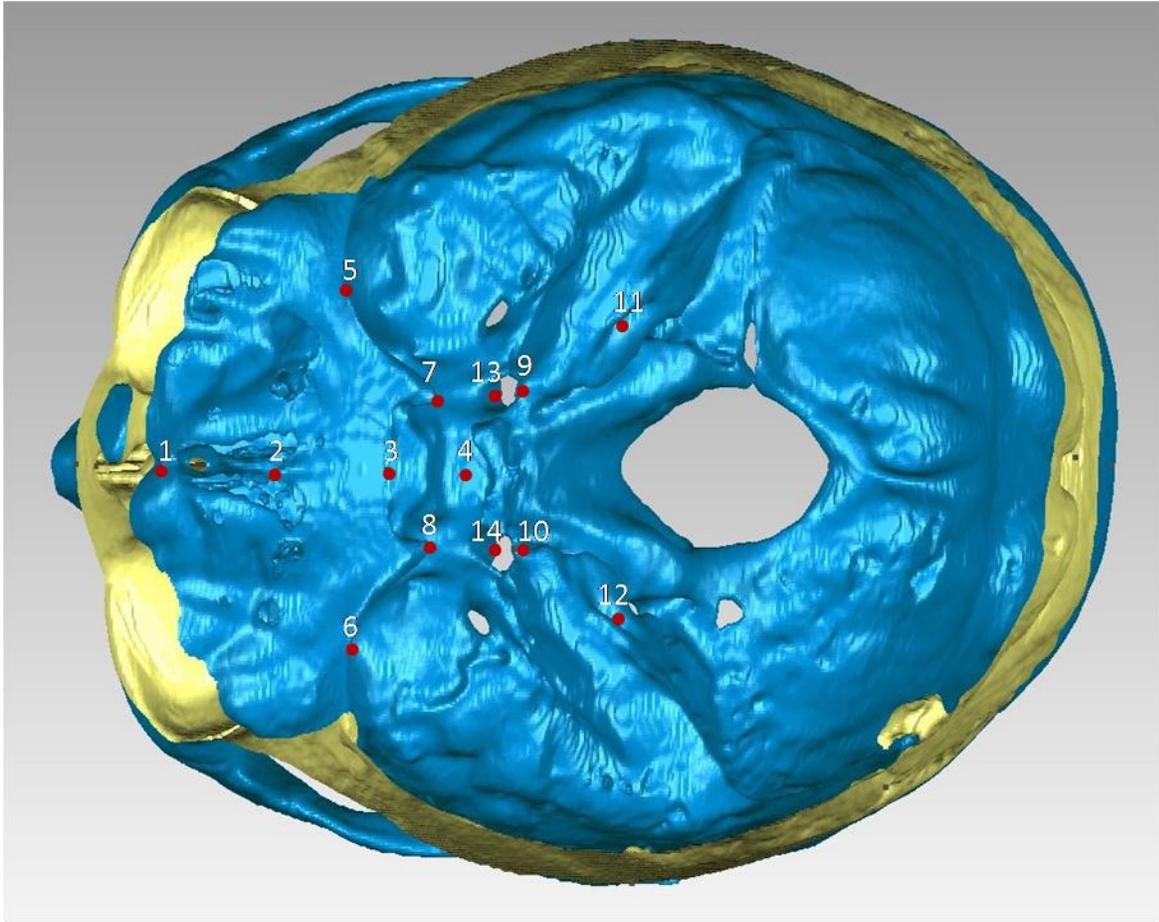


Figure 13 : Vue de la base interne d'une coupe transverse d'un crâne, avec la localisation des landmarks utilisés

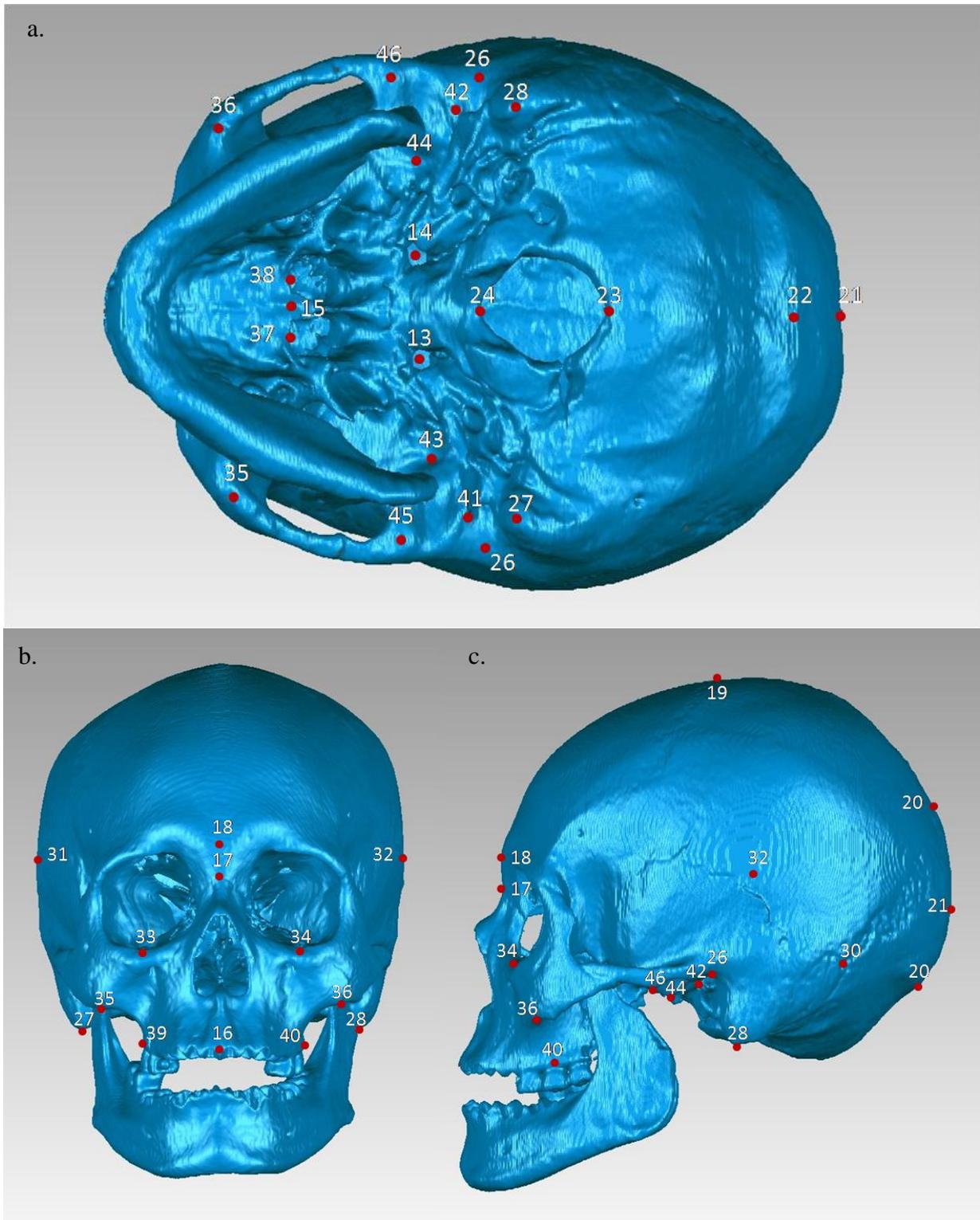


Figure 14 : Crâne avec la localisation des landmarks utilisés a) en vue basale ; b) en vue faciale ; c) en vue latérale gauche

2.2.5. Erreur intra-observateur

Afin de juger si les landmarks ont toujours été placés de la même manière, nous avons placé trois fois les 46 landmarks sur 5 crânes, à une semaine d'intervalle environ entre chaque acquisition. Pour chaque crâne, les coordonnées moyennes des trois acquisitions de coordonnées pour chaque point ont été calculées. Les distances euclidiennes entre les coordonnées tridimensionnelles de chaque mesure individuelle sur un crâne et les coordonnées moyennes ont été calculées pour tous les landmarks avec le logiciel *Microsoft Excel*. Pour chaque point et chaque individu, la moyenne et l'écart type ont été calculés afin d'estimer l'erreur intra-observateur, de repérer les points les moins répétables et éventuellement d'éliminer ces derniers si l'erreur est trop importante.

2.2.6. Valeurs manquantes

Une partie des crânes étant incomplets, certains landmarks n'ont pu être placés sur ces crânes. Les valeurs manquantes ont donc été estimées à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2016) avec le package « Morpho » (Schlager, 2016). La technique utilisée est une interpolation *Thin Plate spline* basée sur les distances Procrustes avec les spécimens les plus proches comportant une configuration de landmarks disponible.

Les crânes respectent le seuil de 20 % de points manquants, au-delà duquel les estimations des landmarks ne sont plus fiables (Couette & White 2010), à l'exception de deux crânes : 390 et 5285, comportant respectivement 28,26 % et 23,91 % de points manquants. Ces deux crânes étant déformés, ils ont tout de même été inclus dans l'étude de façon vigilante.

2.2.7. Mesure de l'angle basicrânien

L'angle basicrânien est obtenu de deux manières dans notre étude : par la mesure de l'angle Nasion-Sella-Basion (Na-S-Ba) et de l'angle *Foramen caecum*-Sella-Basion (fc-S-Ba).

De manière exploratoire, une mesure des angles basicrânien de chaque individu est calculée à partir des coordonnées avec les valeurs manquantes estimées ; la moyenne et l'écart type des deux angles pour chaque groupe de crânes sont calculés.

2.3. Morphométrie géométrique

2.3.1. De la morphométrie « traditionnelle » à la morphométrie géométrique

En anthropologie biologique, la morphométrie dite « traditionnelle » se base sur la comparaison de distances linéaires et d'angles entre différents spécimens. Cette méthode comportait des inconvénients. Par exemple, il était possible d'obtenir le même jeu de données pour deux conformations différentes. Par ailleurs, il est difficile de maîtriser l'influence de la taille sur les différences observées entre individus ou groupes. La morphométrie géométrique permet la séparation des paramètres de taille et de conformation selon l'équation « forme = taille + conformation » (en anglais *Form = Size + Shape* : Needham 1950). Il est alors possible d'analyser les différences réelles de conformations. L'avantage majeur de cette méthode concerne la conservation de la géométrie : elle permet la visualisation des différences de conformations entre les individus et l'identification des landmarks où des variations sont observées.

2.3.2. Superposition Procrustes

La superposition Procrustes généralisée, basée sur la méthode des moindres carrés, se réalise en trois étapes :

- la normalisation : les crânes sont mis à une taille unitaire – la taille centroïde, correspondant mathématiquement à la racine carrée de la somme des carrés des distances de chaque point avec le barycentre de la configuration ;
- la translation : les crânes subissent une translation de sorte que leurs centres de gravité se superposent ;
- la rotation : ils subissent une rotation autour de leur centre de gravité jusqu'à ce que l'ajustement soit optimal, selon la méthode des moindres carrés (la somme des carrés des écarts entre chaque paire de points repères doit être la plus faible possible).

Ces étapes ont été réalisées à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2016) avec le package « geomorph » (Adams & Otárola-Castillo, 2013).

Les nouvelles coordonnées (coordonnées ou résidus Procrustes) sont les variables analysées statistiquement ; elles contiennent la totalité des informations de conformation sur les spécimens disponibles à partir des points repères utilisés.

2.3.3. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2016) avec les packages « geomorph » (Adams & Otárola-Castillo, 2013), « Morpho » (Schlager, 2016) et « shapes » (Dryden, 2016).

2.3.3.1. Analyse en composantes principales (ACP)

Une ACP est une analyse multivariée dont le but est de trouver des composantes qui maximisent la variance totale d'un ensemble de variables corrélées. Les composantes principales sont les axes qui couvrent la plus grande variation des données en ordre décroissant. Dans un premier temps, les trois crânes qui ont été modélisés à la fois à partir des 170 coupes et à partir des 550 coupes (numéros 17060, 17069 et 17117) ont été inclus en double – avec les deux niveaux de résolution – dans les ACP sur la totalité de l'échantillon. Le but est de juger l'impact de la moindre résolution des voxels sur les résultats, étant donné que quatre crânes ne possèdent que 170 images médicales exploitables, et éventuellement d'exclure des analyses les quatre crânes qui ont été modélisés à partir des 170 coupes si la plus faible résolution affecte les résultats. Si ces crânes ne sont pas affectés par la résolution, dans les ACP et les analyses suivantes, les quatre crânes à faible résolution seront pris en compte et seules les versions à meilleure résolution des trois crânes ayant été modélisés en double seront compris dans l'échantillon, et non les versions à faible résolution.

2.3.3.2. Analyse en composantes principales intergroupe (ACP intergroupe)

Une ACP intergroupe, qui est une analyse multivariée dont le but est de trouver des composantes qui maximisent la variance intergroupe, est effectué sur l'échantillon total afin d'explorer les différences entre les moyennes des trois groupes définis précédemment (cf. 2.1.).

2.3.3.3. Analyse de covariance par “Two-block partial least squares” (2B PLS)

Le but de l'analyse 2B PLS est de trouver des paires de composantes qui maximisent la covariance entre deux jeux de variables (blocs). Chaque composante est une combinaison linéaire des variables originales d'un bloc et de leurs poids respectifs. La première des composantes explique la plus grande covariation entre les deux blocs. Les paires de composantes

suivantes sont orthogonales à la première et entre elles, et expliquent de moins en moins la covariance (Baab, 2013).

Une analyse PLS est effectuée sur l'échantillon total et sur chaque type de déformation afin de déterminer s'il y a des corrélations entre la conformation de la voûte crânienne et celle de la base, et si oui lesquelles. Le crâne numéro 390 possède environ la moitié des points sur la base, les autres étant estimés, et a un poids sur l'analyse des crânes déformés de types toulousains, ceux-ci étant peu nombreux, nous l'avons donc exclu de cette analyse.

3. Résultats

3.1. Tests préliminaires

3.1.1. Test de comparaison 170 / 550 coupes

Une ACP sur l'ensemble de l'échantillon ainsi que chacune des trois paires de crânes pour lesquels le modèle 3D a été obtenu une première fois à partir des 550 coupes et une deuxième fois avec les 170 coupes a été effectuée afin de vérifier que la résolution des voxels ne change pas les résultats sur les ACP. Les résultats de l'ACP sur les deux premières composantes principales (CP) sont donnés dans la Figure 15.

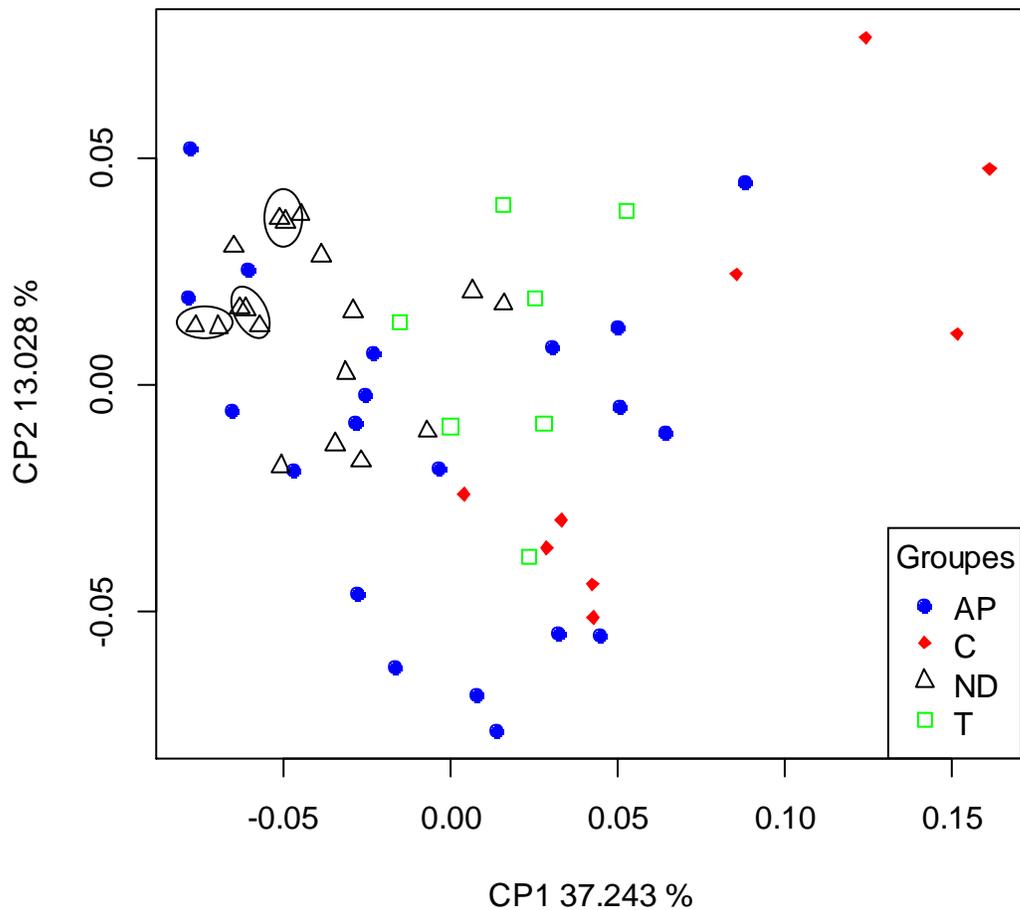


Figure 15 : Analyse en composantes principales des résidus de la superposition Procruste sur l'échantillon total des crânes avec les trois crânes obtenus à partir des 170 et 550 coupes (entourés par une ellipse) : CP1 vs. CP2.

Chaque paire de ces trois crânes se trouve respectivement dans les mêmes directions, et cela pour les dix premières composantes principales (Annexe 2).

3.1.2. Erreur intra-observateur

Afin d'évaluer la variabilité du placement de points repères sur les modèles 3D, un test de répétitivité a été effectué. Les écarts de chaque mesure individuelle et la moyenne de ces mesures par point et par crâne sont compris entre 0,01 et 2,80 mm. La moyenne de ces écarts est de 0,38 mm et l'écart type est de 0,37 mm. Les points les moins répétables sont les euryons, le lambda, l'inion et l'opisthocrânion dont les moyennes des écarts à la moyenne pour chacun de ces points sont comprises entre 0,81 et 1,07 mm. Cela s'explique du fait que les euryons et l'opisthocrânion sont des points géométriques, que l'inion – malgré notre recours à une définition soi-disant plus répétable – est un point extrême de structure peu fiable, et que le lambda est placé de façon géométrique lorsque le crâne possède des os incas.

3.2. Analyses en Composantes Principales

3.2.1. Avec l'ensemble des points

Une ACP en prenant en compte tous les points repères a été effectuée afin d'observer le pattern de variation de la conformation crânienne sur l'ensemble de l'échantillon. L'écart type et la proportion de la variance de chacune des dix premières Composantes Principales sont donnés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Écart type et variance expliquée par les dix premières composantes principales

Composantes Principales	Écart type	Proportion de variance	Proportion cumulée
PC1	0,05659	0,36649	0,36649
PC2	0,03411	0,13311	0,4996
PC3	0,03262	0,12176	0,62137
PC4	0,02143	0,05254	0,6739
PC5	0,02021	0,04673	0,72063
PC6	0,01843	0,03885	0,75948
PC7	0,01432	0,02348	0,78296
PC8	0,01398	0,02238	0,80534
PC9	0,01281	0,01878	0,82412
PC10	0,01209	0,01672	0,84084

Le long de l'axe 1, qui représente environ 37 % de la variance (Tableau 4), la distinction entre les différents groupes n'est pas très nette ; tous les groupes se superposent (Figure 16). Cependant, nous pouvons observer que les crânes se situant à l'extrémité positive sont des crânes C. Avec les crânes T, les crânes C s'opposent aux crânes ND (excepté deux crânes). Vers des valeurs positives, les crânes tendent à avoir la voûte crânienne, la face (dont le maxillaire) et la base moins larges, le neurocrâne allongé postérieurement et supérieurement, la partie inférieure de la face plus antérieure, la partie supérieure de la face plus postérieure, la base interne en position plus inférieure, l'angle basicrânien plus grand, l'angle entre le clivus et le *foramen magnum* (Sella-Basion-Opisthion) plus fermé, et les fosses mandibulaires plus antérieures et médiales. Vers des valeurs négatives, les tendances sont inverses (Figure 17).

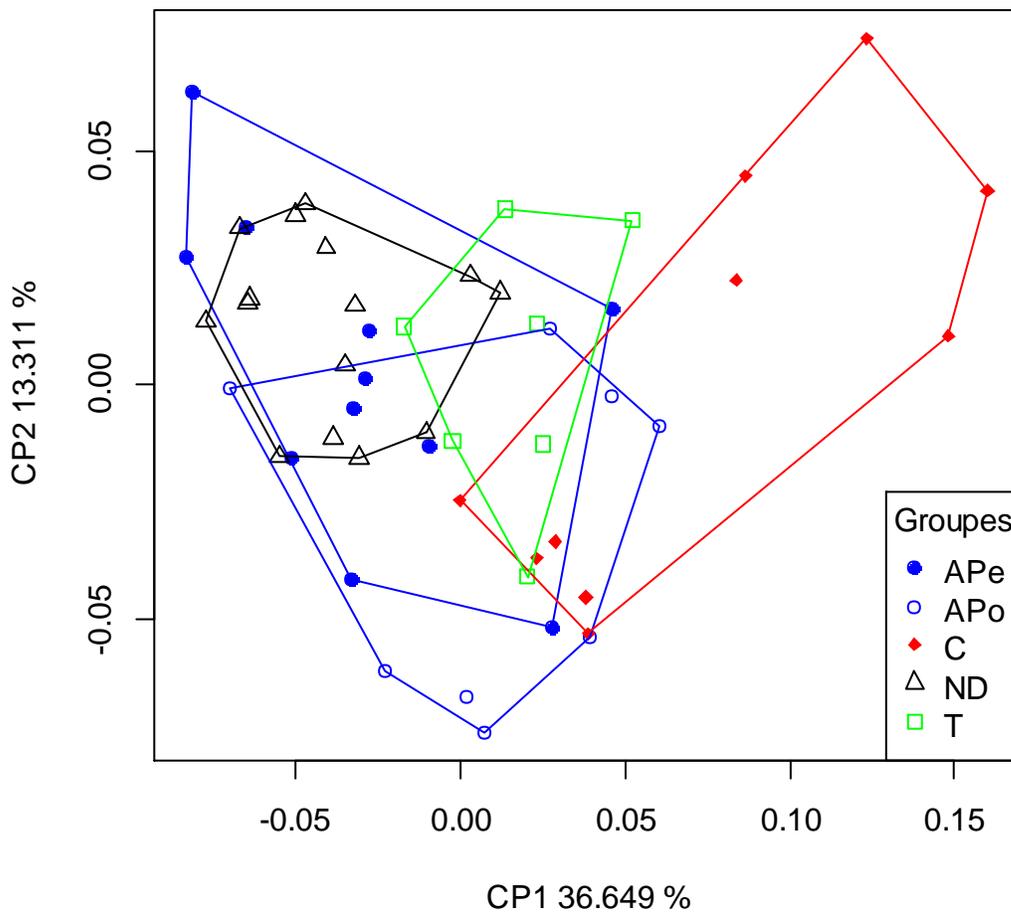


Figure 16 : Analyse en composantes principales des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes : CP1 vs. CP2.

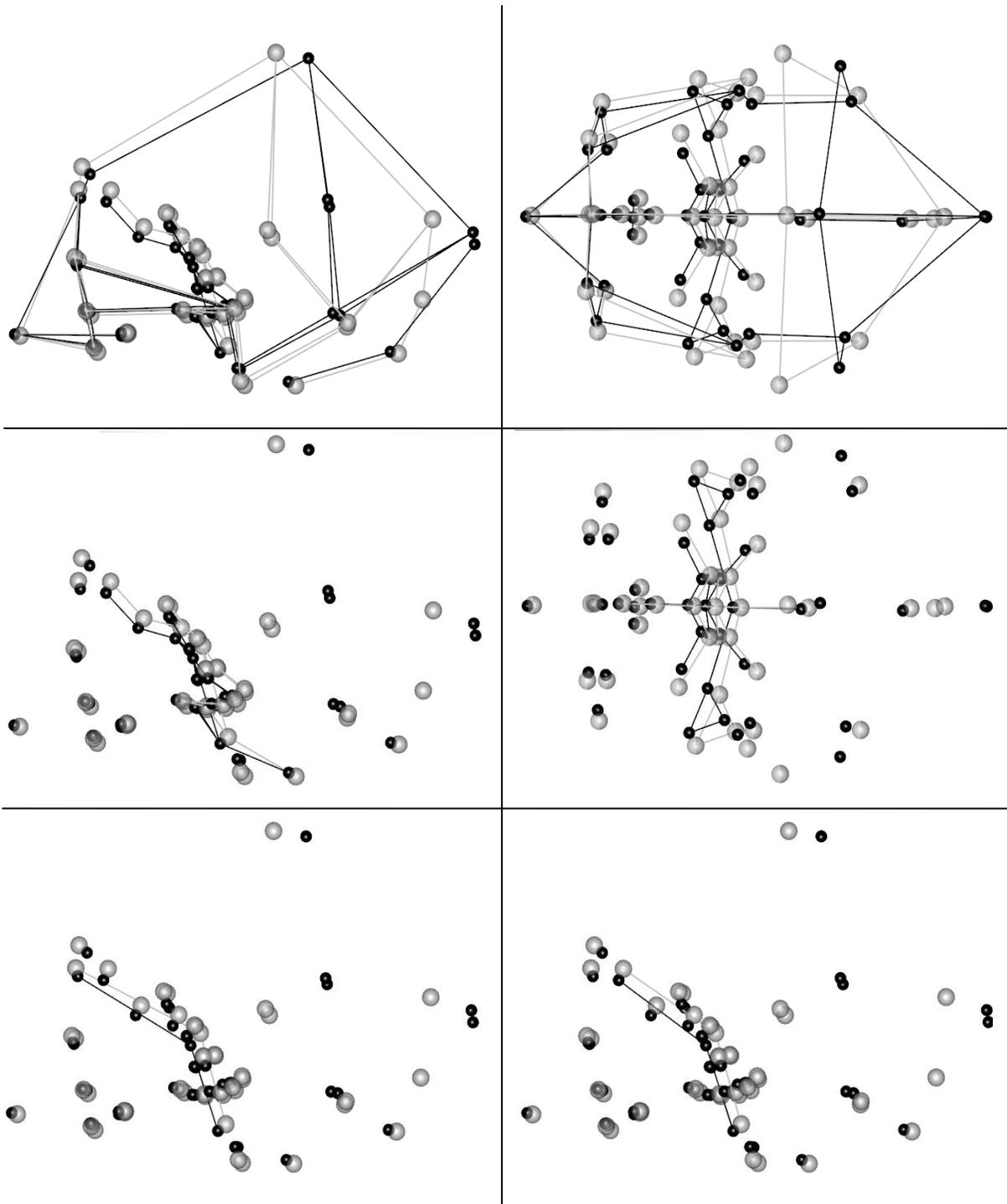


Figure 17 : Changements de la conformation crânienne le long de la CP1 de l'ACP (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue d'ensemble ; au milieu, vue de la base ; en bas vue de l'angle basicrânien (Na-S-Ba à gauche et fc-S-Ba à droite).

Le long de l'axe 2, qui représente 13 % de la variance (Tableau 4), tous les groupes sont mélangés (Figure 16). Cependant, les crânes APo sont plutôt vers des valeurs négatives alors que les ND sont vers des valeurs globalement plus positives. Vers des valeurs positives, la voûte crânienne est plus arrondie, la partie inférieure de la face est plus postérieure et étroite, la partie supérieure de la face est en position plus antérieure, la partie pétreuse de l'os temporal est en position supérieure, le *foramen caecum* est plus antérieur et inférieur, l'angle basicrânien est plus petit, et les parties pétreuses des os temporaux sont moins transverses par rapport au plan sagittal. Vers des valeurs négatives, les tendances sont inversées et le neurocrâne tend à être plus allongé postéro-supérieurement (l'os occipital est plus aplati, l'opisthocrânion plus haut, le bregma en position postéro-supérieur, les euryons sont plus hauts et postérieures) et l'angle basicrânien plus grand (Figure 18).

L'axe 3, qui représente 12 % de la variance (Tableau 4), sépare les crânes AP, qui sont dans des valeurs positives, et les crânes T qui se situent dans les valeurs négatives jusqu'aux plus extrêmes (Figure 19). Les crânes ND sont groupés autour de 0 et des valeurs légèrement négatives et les C sont dispersés et n'atteignent pas les extrêmes. Les crânes AP et les quelques autres crânes vers des valeurs positives tendent à un raccourcissement antéropostérieur marqué de la voûte crânienne et de la base, le neurocrâne est plus large et plus haut, la base interne a subi une rotation supéro-postérieure autour de la selle turcique, l'angle basicrânien est plus petit, le *foramen magnum* est en position plus inférieure, les fosses mandibulaires sont plus hautes, postérieures et latérales, les parties pétreuses des os temporaux forment un angle plus grand par rapport à la sagittale, et la partie supérieure de la face est plus postérieure. Les crânes de type T et les autres crânes tendant vers des valeurs négatives suivent une tendance inversée : le neurocrâne est allongé antéropostérieurement, bas et étroit, la base interne est plus allongée et subit une rotation dans le sens antihoraire, l'angle basicrânien plus grand, les parties pétreuses des os temporaux forment un angle plus grand, le *foramen magnum* est plus haut, la partie supérieure de la face est plus antérieure (Figure 20).

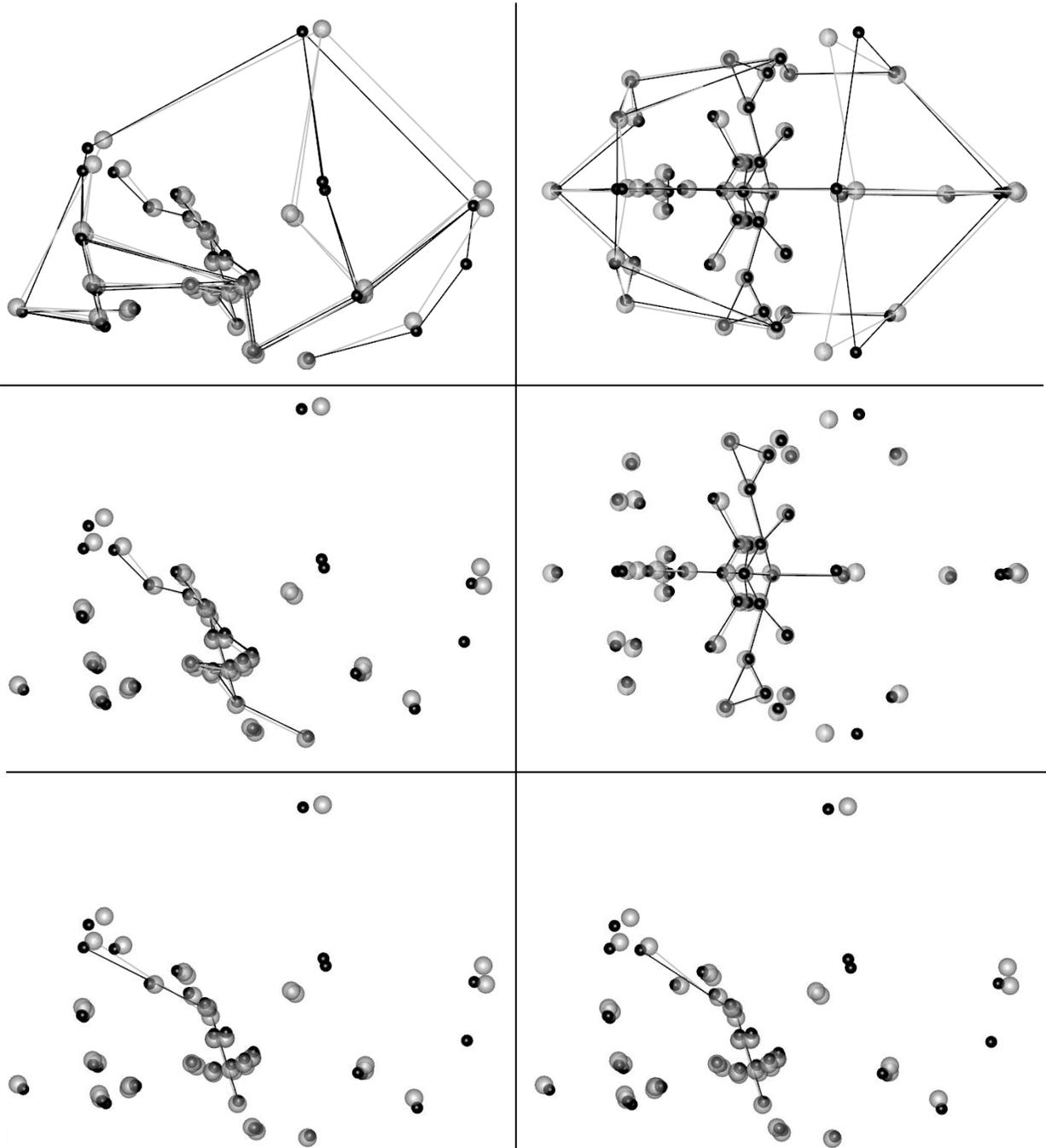


Figure 18 : Changements de la conformation crânienne le long de la CP2 de l'ACP (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue d'ensemble ; au milieu, vue de la base ; en bas vue de l'angle basicrânien (Na-S-Ba à gauche et fc-S-Ba à droite).

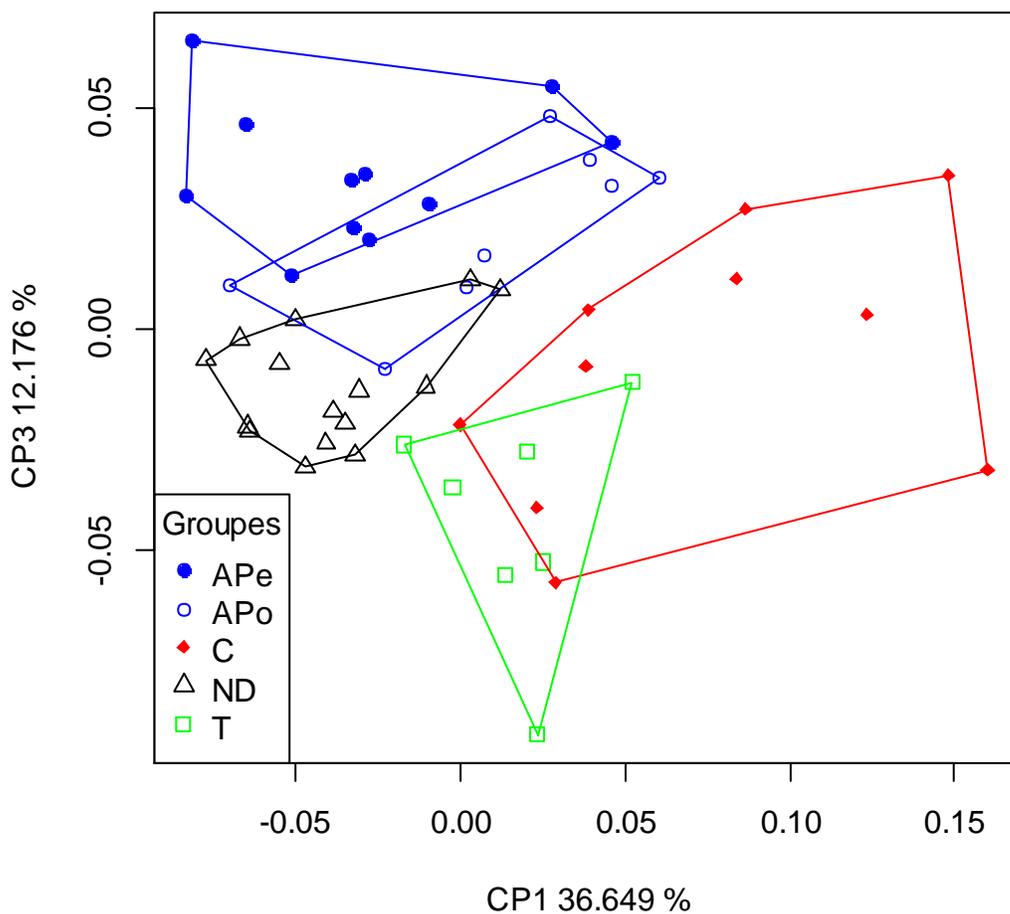


Figure 19 : Analyse en composantes principales des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes : CP1 vs. CP3.

Les AP sont à la fois vers des extrêmes négatives le long de CP1 et dans des valeurs extrêmes positives le long de CP3. Une distinction est notable entre les APo et APe. Les APe sont vers des valeurs les plus extrêmes le long de ces deux composantes alors que les APo sont situés entre les APe et les C. Par rapport aux APo, les APe sont marqués par un raccourcissement plus marqué de la voûte crânienne et de la base, le neurocrâne est plus large et plus haut, les fosses mandibulaires et le maxillaire sont plus larges, et l'angle basicrânien est plus petit (Figures 17 et 20).

A partir de l'axe 4, les groupes sont mélangés. Les trois premières composantes représentent 62 % de variance (Tableau 4).

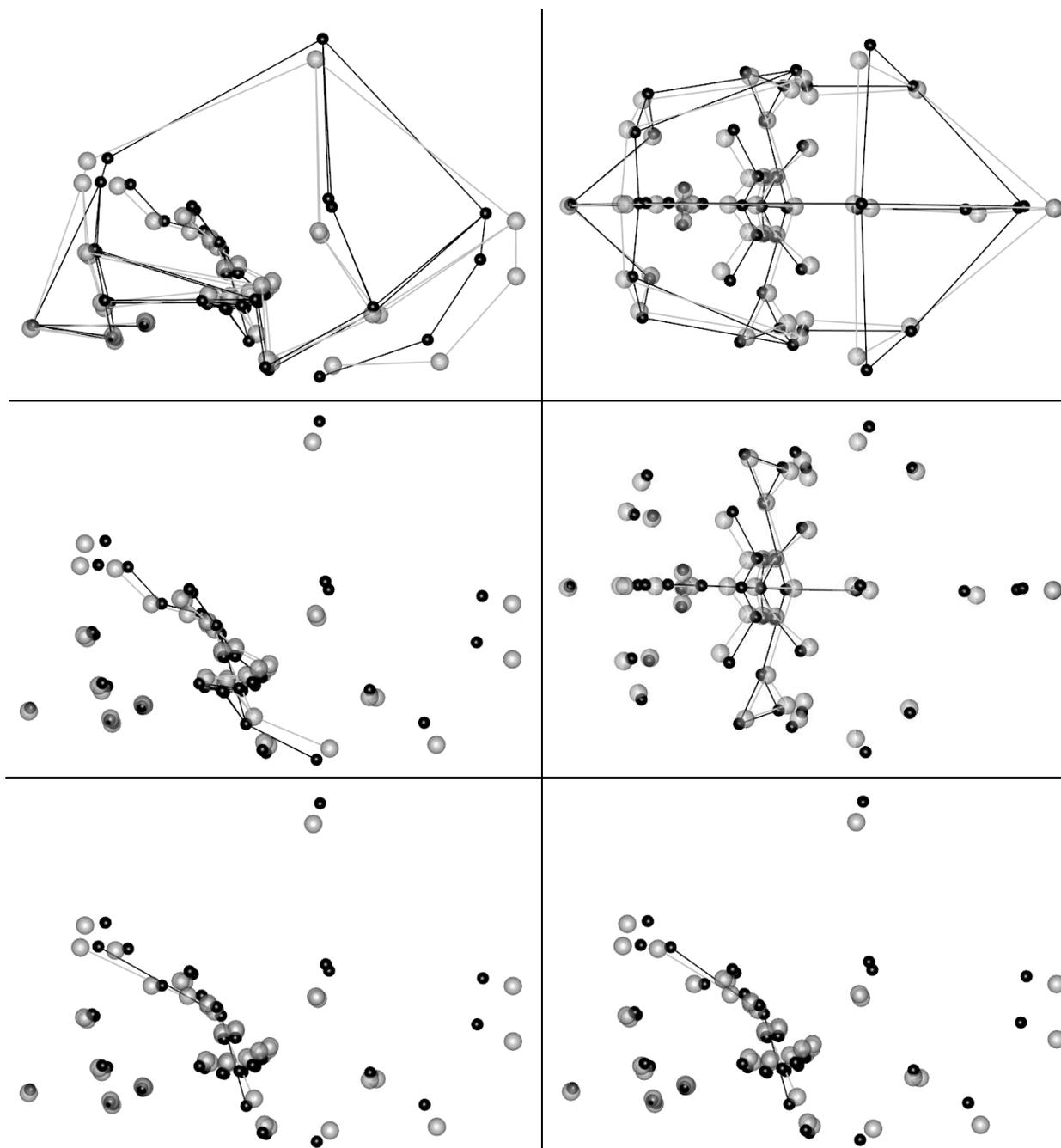


Figure 20 : Changements de la conformation crânienne le long de la CP3 de l'ACP (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue d'ensemble ; au milieu, vue de la base ; en bas vue de l'angle basicrânien (Na-S-Ba à gauche et fc-S-Ba à droite).

3.2.2. Sans l'opisthocrânon

L'opisthocrânon est un point géométrique qui crée du bruit dans l'ACP. Une nouvelle ACP sans ce point a été effectuée et dont le graphique sur les deux premières composantes, représentant environ 49 % de la variance (Tableau 5), est donné en Figure 21.

Tableau 5 : Écart type et variance expliquée par les dix premières composantes principales des ACP effectuées sans opisthocrânon

Composantes principales	Écart type	Proportion de variance	Proportion cumulée
PC1	0,0530	0,3626	0,3626
PC2	0,0312	0,1257	0,4883
PC3	0,02762	0,09850	0,58679
PC4	0,06293	0,06293	0,64972
PC5	0,04728	0,04728	0,69700
PC6	0,03232	0,03232	0,72932
PC7	0,02753	0,02753	0,75685
PC8	0,02404	0,02404	0,78088
PC9	0,02071	0,02071	0,80160
PC10	0,01734	0,01734	0,81894

La CP1, représentant 36 % de la variance (Tableau 5), sépare les crânes ND (excepté 17327 et 18213), situés dans des valeurs négatives, des T et C, situés dans des valeurs positives et légèrement négatives, cependant avec des chevauchements (Figure 21). Les valeurs extrêmes positives correspondent à des crânes C. Cette composante est similaire à la CP1 avec l'opisthocrânon (Figures 16 et 17). Vers des valeurs positives, la voûte crânienne est nettement plus allongé supérieurement et postérieurement et plus étroit, la face (dont le maxillaire) est plus étroite, la base interne est en position plus inférieure et est plus étroite, l'angle basicrânien est plus grand, l'angle entre le clivus et le *foramen magnum* est plus petit, les fosses mandibulaires sont avancées et médiales. Vers des valeurs négatives, la tendance est inverse (Figure 22).

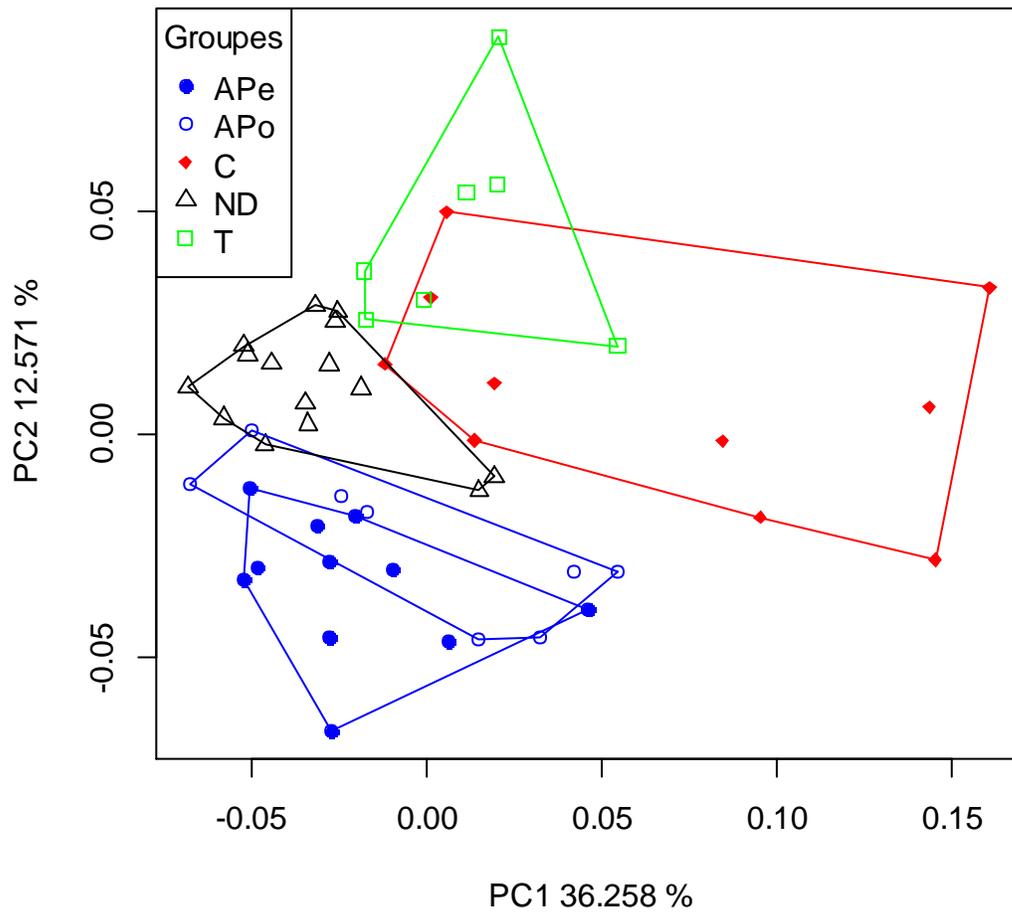


Figure 21 : Analyse en composantes principales des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes, sans l'opisthocrânion : CP1 vs. CP2.

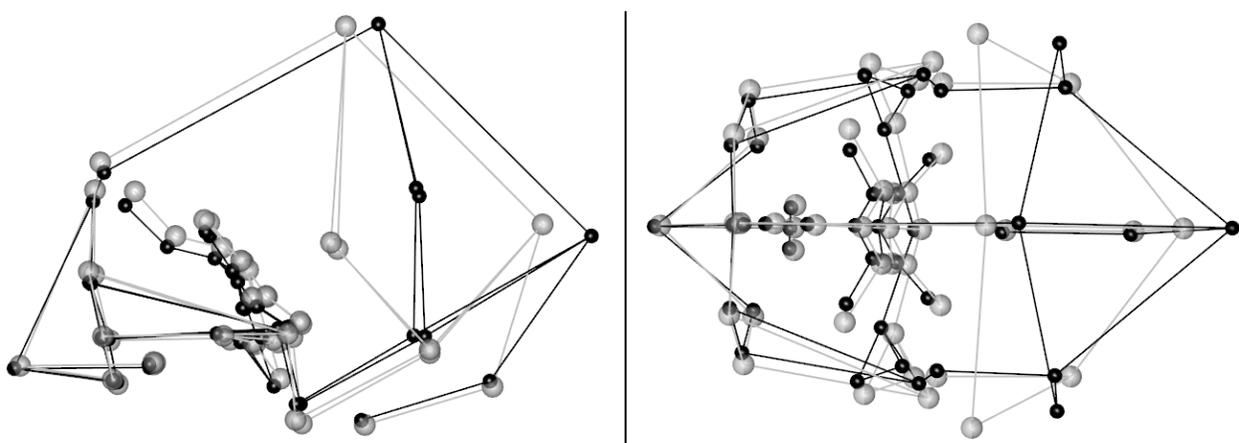


Figure 22 : Changements de la conformation crânienne le long de CP1 lors des analyses sans l'opisthocrânion (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives).

La CP2, représentant environ 13 % de la variance (Tableau 5), sépare les AP, vers des valeurs négatives, des autres. Cette composante est similaire à la CP3 de l'analyse prenant en compte l'opisthocrânion (Figures 19 et 20). Vers des valeurs extrêmes positives sont situés des T, qui tendent à un allongement antéropostérieur avec un inion très bas et en arrière, la voûte crânienne est basse et étroite, la face supérieure est plus antérieure, la base est plus étroite et a subi une bascule autour de la selle turcique de telle sorte que la partie antérieure soit en position plus inférieure, l'angle basicrânien est plus grand, le *foramen magnum* est plus haut, les fosses mandibulaires sont en position plus supérieure et postérieure, et les parties pétreuses des os temporaux forment un angle nettement plus petit. Vers des valeurs négatives, les tendances sont inversées : les AP ont une voûte crânienne plus haute, plus large et plus courte, la face supérieure plus postérieure, la base plus large et avec une rotation autour de la selle turcique, les fosses mandibulaires en position plus inférieure (Figure 23).

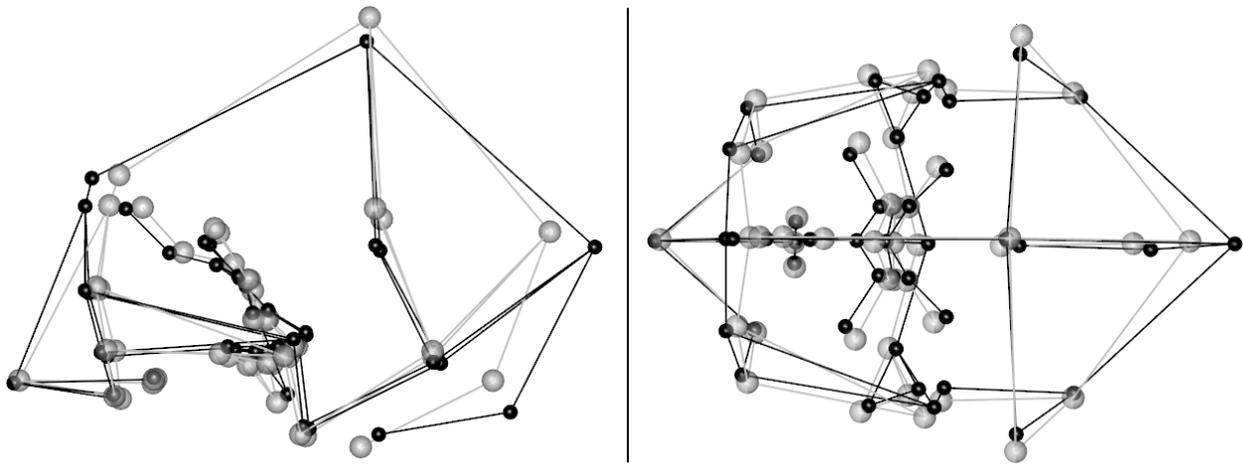


Figure 23 : Changements de la conformation crânienne le long de CP2 lors des analyses sans l'opisthocrânion (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives).

Les CP 1 et 2 combinées (Figure 21), la distinction entre les groupes est nettement plus marquée quand l'opisthocrânion n'est pas pris en compte dans l'ACP. Les APe se placent dans des valeurs plus négatives que les APo le long de CP 1 et 2 donc les APe ont une tendance à un raccourcissement antéropostérieur et un élargissement du neurocrâne plus marqué, un élargissement de la base et de la partie inférieure de la face, et un plus grand écart entre les fosses mandibulaires.

3.2.3. Synthèse des résultats sur l'ACP

L'ACP a été réalisée afin d'observer le pattern de variation sur l'ensemble de notre échantillon. Les groupes ne sont pas complètement distincts les uns des autres, notamment quand l'opisthocrânion est pris en compte dans les ACP. Cependant, certaines combinaisons de composantes principales, comme les CP 1 et 3 quand l'opisthocrânion est pris en compte (Figure 19) et les CP 1 et 2 quand il n'est pas pris en compte (Figure 21), permettent d'identifier des ensembles assez clairement, correspondant aux groupes *a priori*. Des tendances de conformation pour chaque groupe sont donc observées :

- Les crânes de type circonférentiel ont tendance à avoir un allongement supérieur et postérieur du neurocrâne, la voûte, la base et la face crâniennes plus étroites, la base interne en position plus inférieure, un angle basicrânien plus grand, un angle entre le clivus et le *foramen magnum* plus petit, les fosses mandibulaires en position plus antérieure et médiale, le maxillaire plus étroit, la face inférieure plus antérieure et la face supérieure plus postérieure.
- Les crânes de type toulousain ont tendance à avoir un allongement antéropostérieur (la glabelle projetée vers l'avant et l'os occipital est plus développé postérieurement), un neurocrâne moins haut et plus étroit, la base interne plus allongée, en position plus inférieure dans sa partie antérieure et plus supérieure dans sa partie postérieure, un angle basicrânien plus grand, un angle plus petit des parties pétreuses des os temporaux, le *foramen magnum* est plus haut, les fosses mandibulaires sont en position plus supérieure et plus postérieure.
- Les crânes de type antéropostérieur ont tendance à avoir une voûte crânienne plus haute et plus courte, la face supérieure plus postérieure, le maxillaire plus large, la base plus large, la partie antérieure de la base interne en position plus supérieure et la partie postérieure de la base interne plus courte et en position plus inférieure, un angle plus grand des parties pétreuses des os temporaux, le *foramen magnum* est plus inférieur, et les fosses mandibulaires en position plus inférieure par rapport à celles des crânes non déformés. Les crânes de type antéropostérieur droit ont un raccourcissement antéropostérieur, un élargissement de la voûte et de la base plus marqués, le maxillaire plus large, l'écart entre les fosses mandibulaires plus grand, ainsi qu'un angle basicrânien plus fermé que les crânes de type antéropostérieur oblique.

3.3. Analyses en Composantes Principales intergroupe

3.3.1. Avec l'opisthocrânion

Des ACP intergroupe ont été réalisées afin d'explorer les différences entre les moyennes des groupes AP, C et T. Les valeurs propres, la variance expliquée par chaque composante principale et la variance cumulée sont données dans le Tableau 6. Les trois groupes sont deux à deux statistiquement distincts (valeur-p < 0,05) (Tableau 7). Les variantes APe et APo sont distinguées sur les figures afin de visualiser d'éventuelles différences au sein du groupe AP.

Tableau 6 : Valeurs propres, variance et variance cumulée des Composantes Principales intergroupe

Composantes Principales (CP)	Valeurs propres	Variance	Variance cumulée
CP intergroupe 1	0,0023818654	0,65397583	0,6539758
CP intergroupe 2	0,0010509926	0,28856531	0,9425411
CP intergroupe 3	0,0002092727	0,05745885	1,0000000

Tableau 7 : Valeurs-p (*p-values*) des différences entre groupes deux à deux, basés sur un test de permutation (avec 1000 permutations)

	AP	C	ND
C	0,0001	-	-
ND	0,0021	0,0001	-
T	0,0015	0,0154	0,0171

Les CP 1 et 2 combinées (Figure 24), représentant 94 % de la variance (Tableau 6), permettent de mettre en évidence la distinction entre les groupes AP, C, T et ND, à l'exception d'un crâne C parmi les crânes T.

Le long de l'axe 1, qui représente 65 % de la variance (Tableau 6), les crânes se situant à l'extrémité négative sont des crânes C (Figure 24). Ils tendent à avoir la voûte crânienne, la face (dont le maxillaire) et la base moins larges, la voûte crânienne allongée postérieurement et supérieurement, la face inférieure en position plus antérieure, la base interne en position plus inférieure, les fosses mandibulaires plus antérieures et médiales, et un angle basicrânien plus

ouvert. Tous les crânes C sont situés vers des valeurs négatives et les crânes T se situent autour de 0 et vers des valeurs légèrement négatives. Au contraire, les ND sont situés dans des valeurs positives ou très faiblement négatives, ils suivent une tendance de conformation inverse. Au sein des AP, une tendance différente peut-être observée entre les crânes APo, plutôt vers des valeurs négatives, et les APe, plutôt vers des valeurs positives (Figure 25).

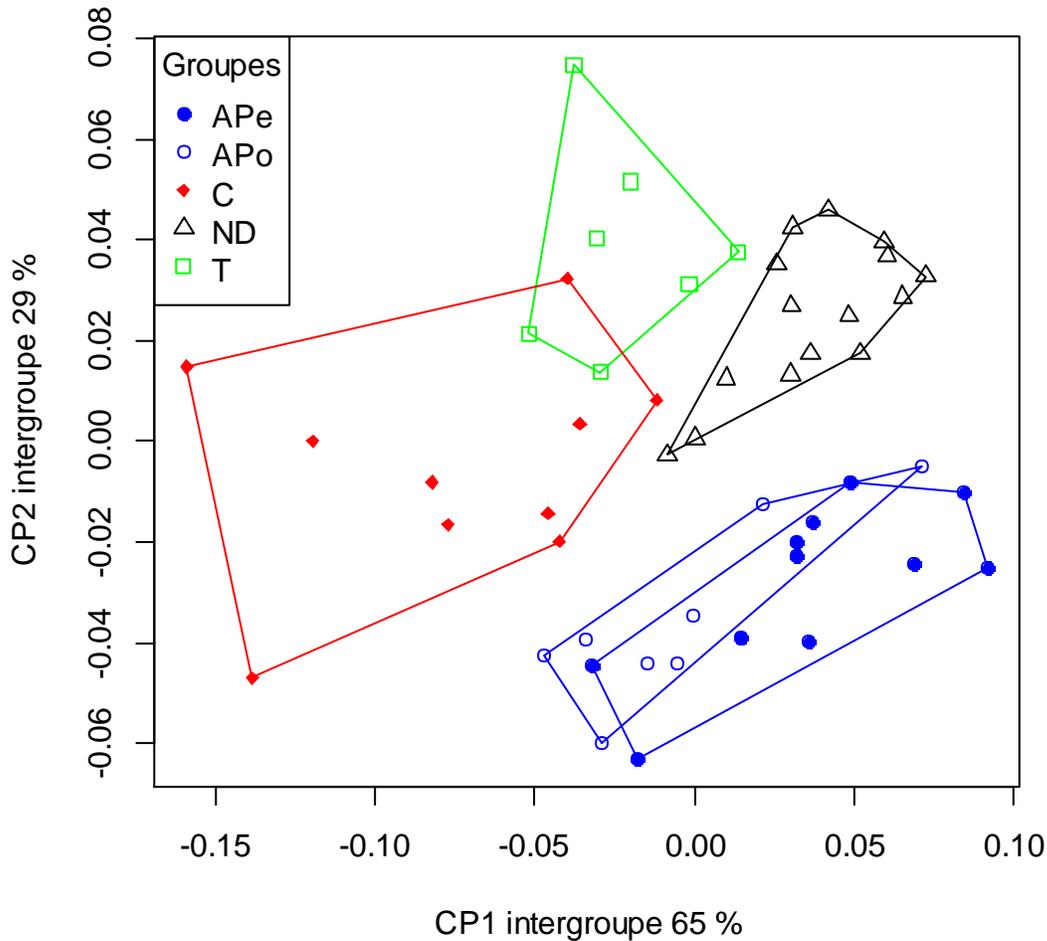


Figure 24 : Analyse en composantes principales intergroupe des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes : CP1 vs. CP2.

Le long de l'axe 2, qui représente 29 % de la variance (Tableau 6), les crânes T et ND sont situés dans des valeurs principalement positives et sont séparés des AP, qui se situent tous dans des valeurs négatives (Figure 24). Vers des valeurs extrêmes positives, la voûte crânienne tend à s'allonger antéropostérieurement, notamment au niveau de l'os occipital, la région glabellaire est en position plus antérieure, la hauteur et la largeur du crâne sont relativement plus

petites ; la base est un peu plus étroite, plus allongée et subit une rotation autour de la sella de telle sorte que la partie basale antérieure s'abaisse, les parties pétreuses des os temporaux sont moins ouvertes et l'angle basicrânien s'ouvre. Cette conformation est la plus extrême pour des crânes de type T. La conformation suit une tendance inverse pour les crânes AP (Figure 26).

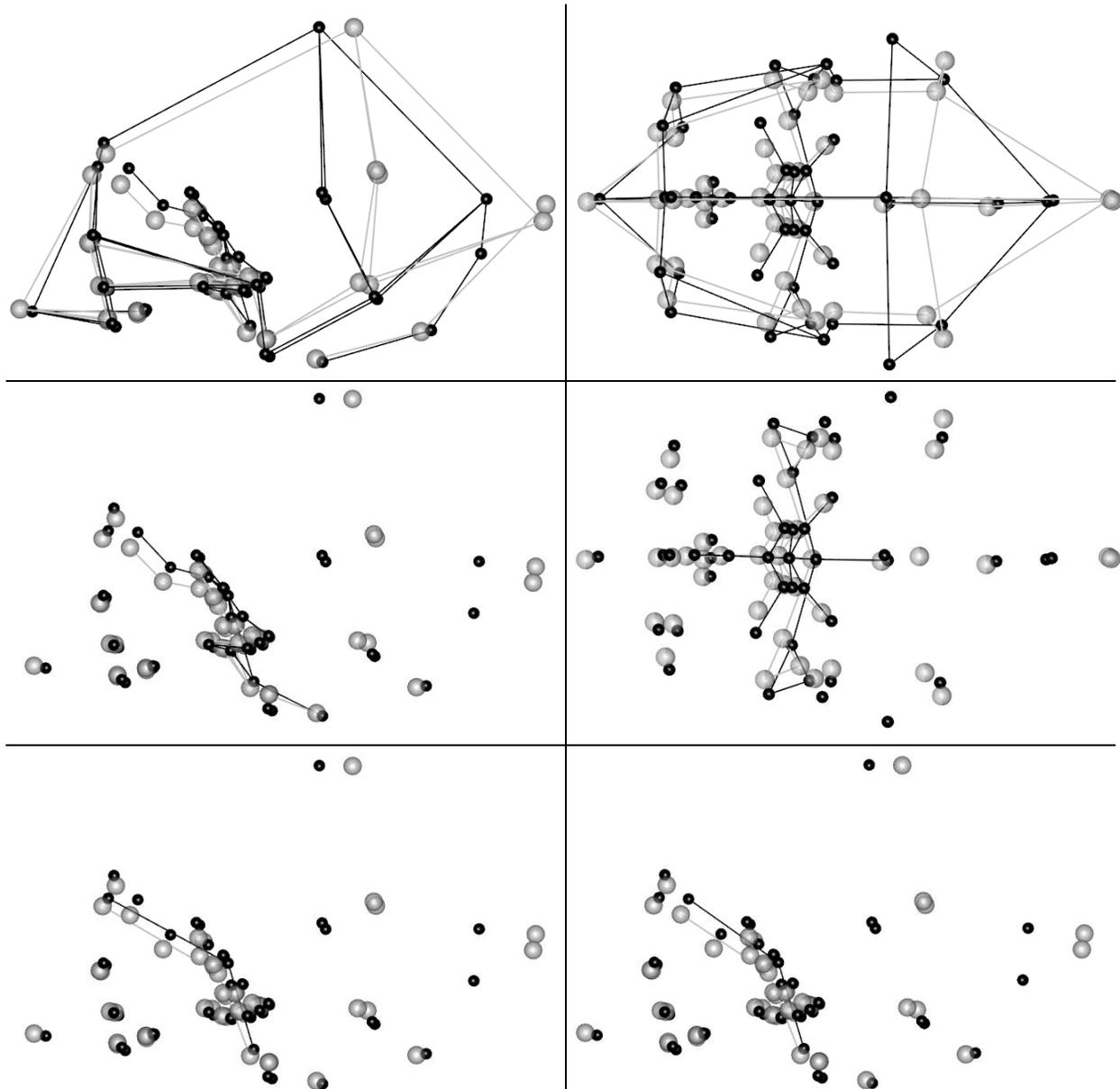


Figure 25 : Changements de la conformation crânienne le long de CP1 de l'ACP intergroupe (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue d'ensemble ; au milieu, vue de la base ; en bas vue de l'angle basicrânien (Na-S-Ba à gauche et fc-S-Ba à droite).

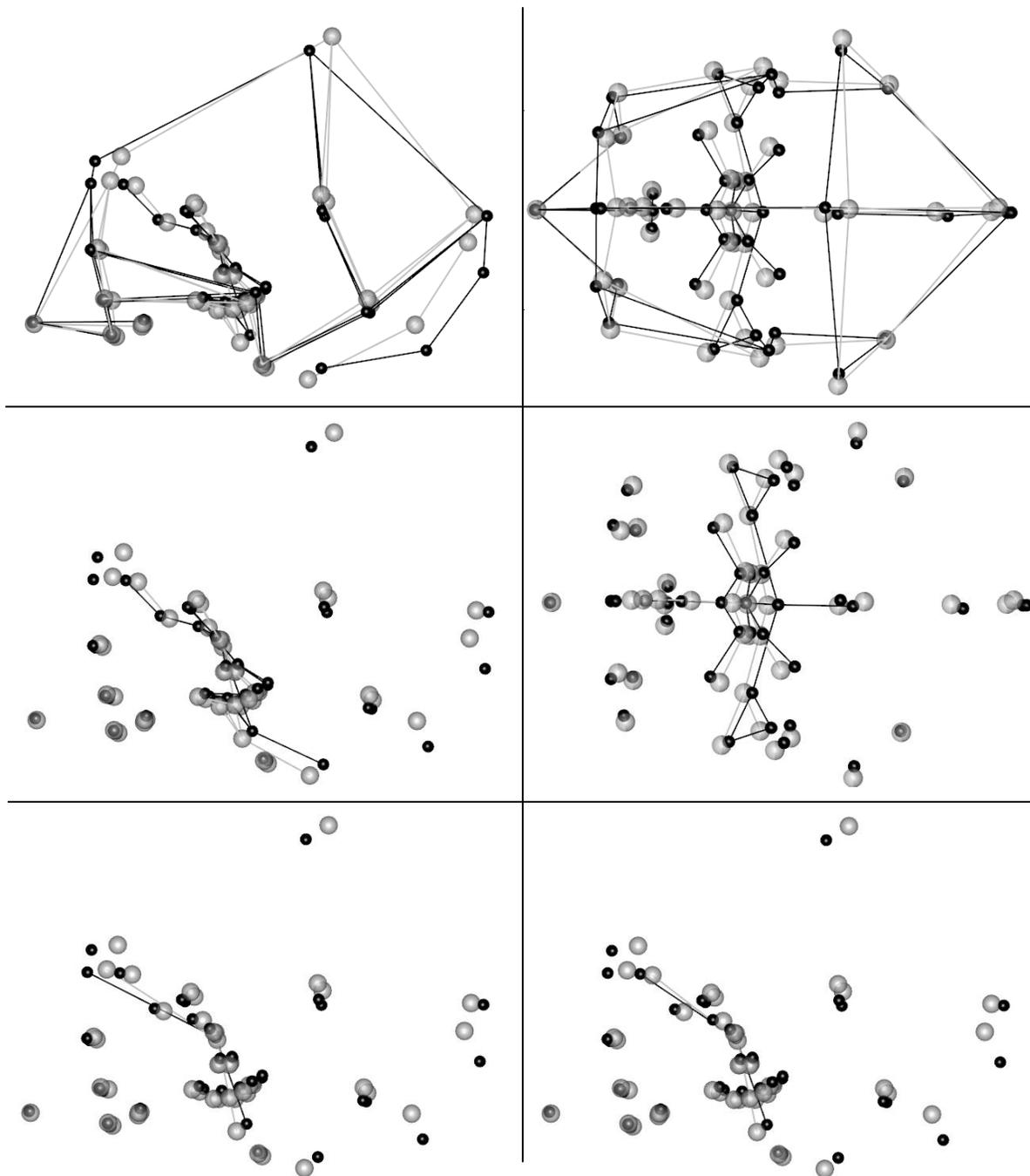


Figure 26 : Changements de la conformation crânienne le long de CP2 de l'ACP intergroupe (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue d'ensemble ; au milieu, vue de la base ; en bas vue de l'angle basicrânien (Na-S-Ba à gauche et fc-S-Ba à droite).

Le long de l'axe 3, qui représente 6 % de la variance (Tableau 6), les groupes T et ND, se distinguent, les premiers vers des valeurs positives et les seconds vers des valeurs plus petites (Figures 27 et 28). À l'extrémité positive, les crânes ont une configuration crânienne avec un neurocrâne moins haut, un front plus fuyant, le *foramen magnum* en position plus supérieure, la partie inférieure de la face plus postérieure, et un angle basicrânien légèrement plus ouvert. Le long de la PC3, les C et les ND ont une tendance opposée aux toulousains. Les APo et les APe sont dans deux directions différentes alors qu'ils ont été considérés comme étant un seul groupe. Les APo sont vers des valeurs plus positives, comme les T, et les APe sont vers des valeurs plus négatives comme les ND et les C. Vers des valeurs négatives, le neurocrâne est plus haut, le front moins fuyant, le *foramen magnum* plus inférieur, la face inférieure plus antérieure, et l'angle basicrânien légèrement plus fermé (Figure 29).

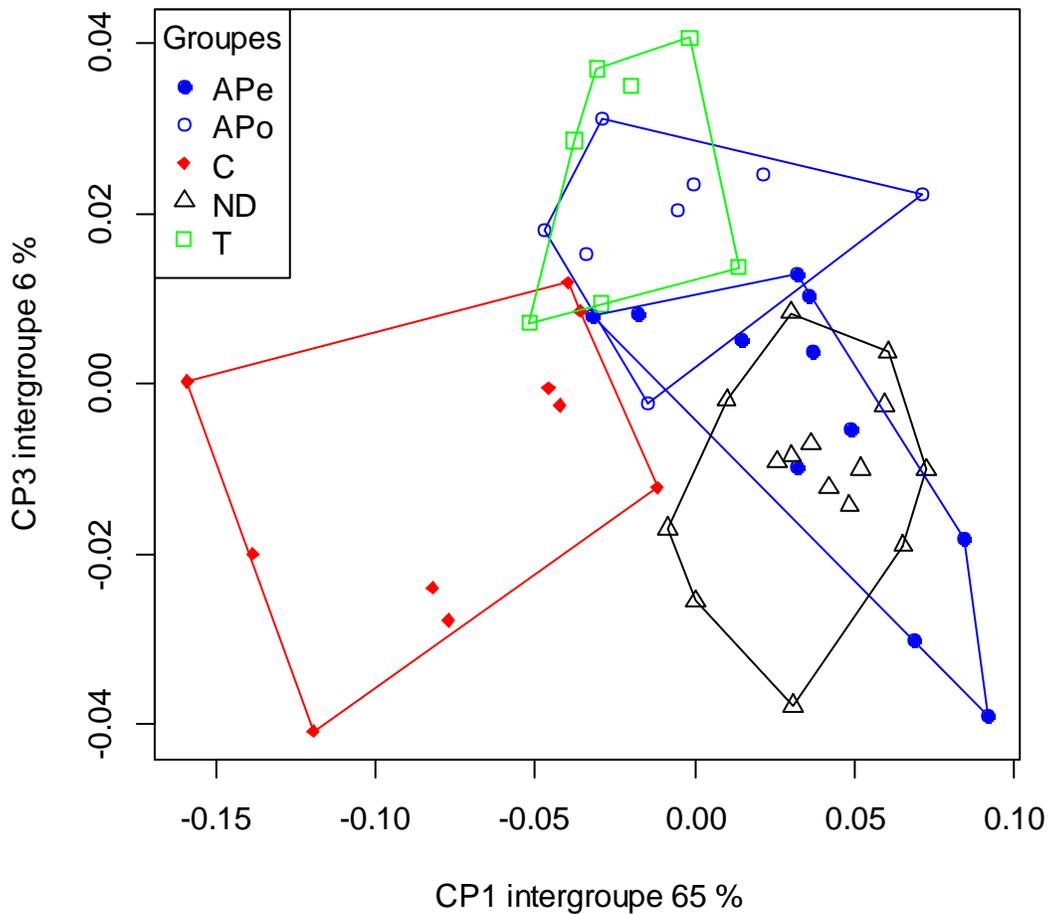


Figure 27 : Analyse en composantes principales intergroupe des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes : CP1 vs. CP3.

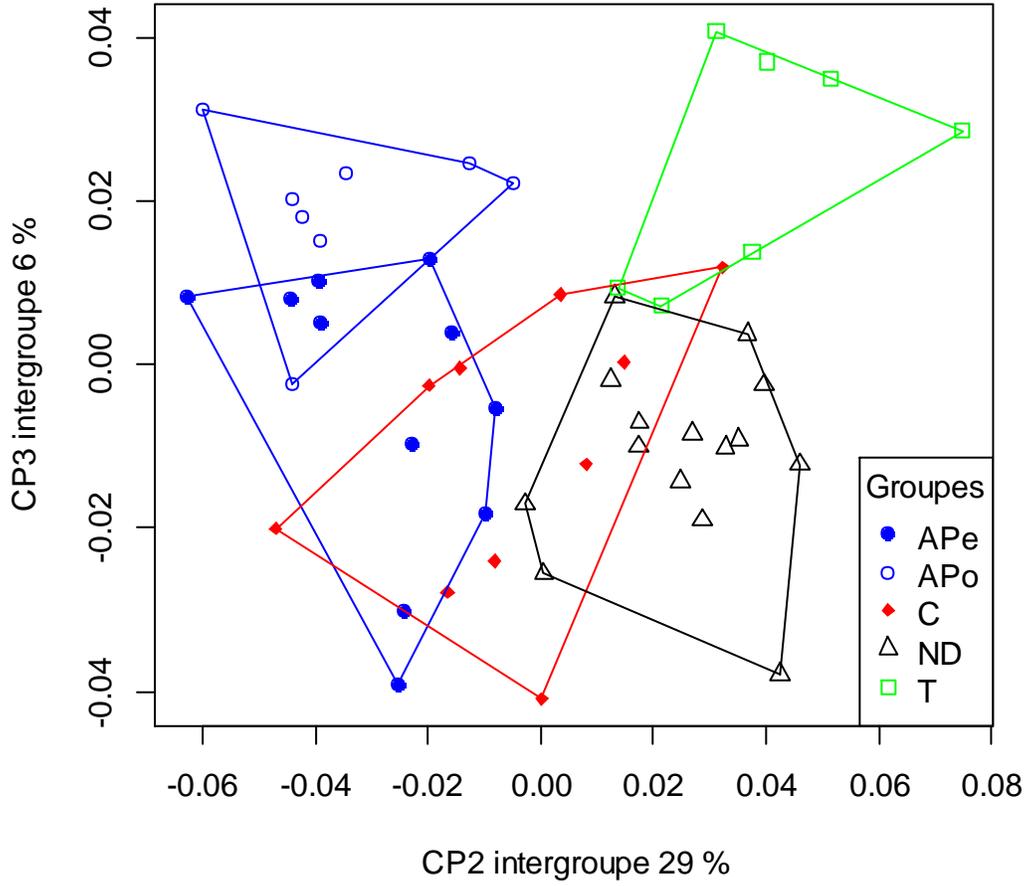


Figure 28 : Analyse en composantes principales intergroupe des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes : CP1 vs. CP2.

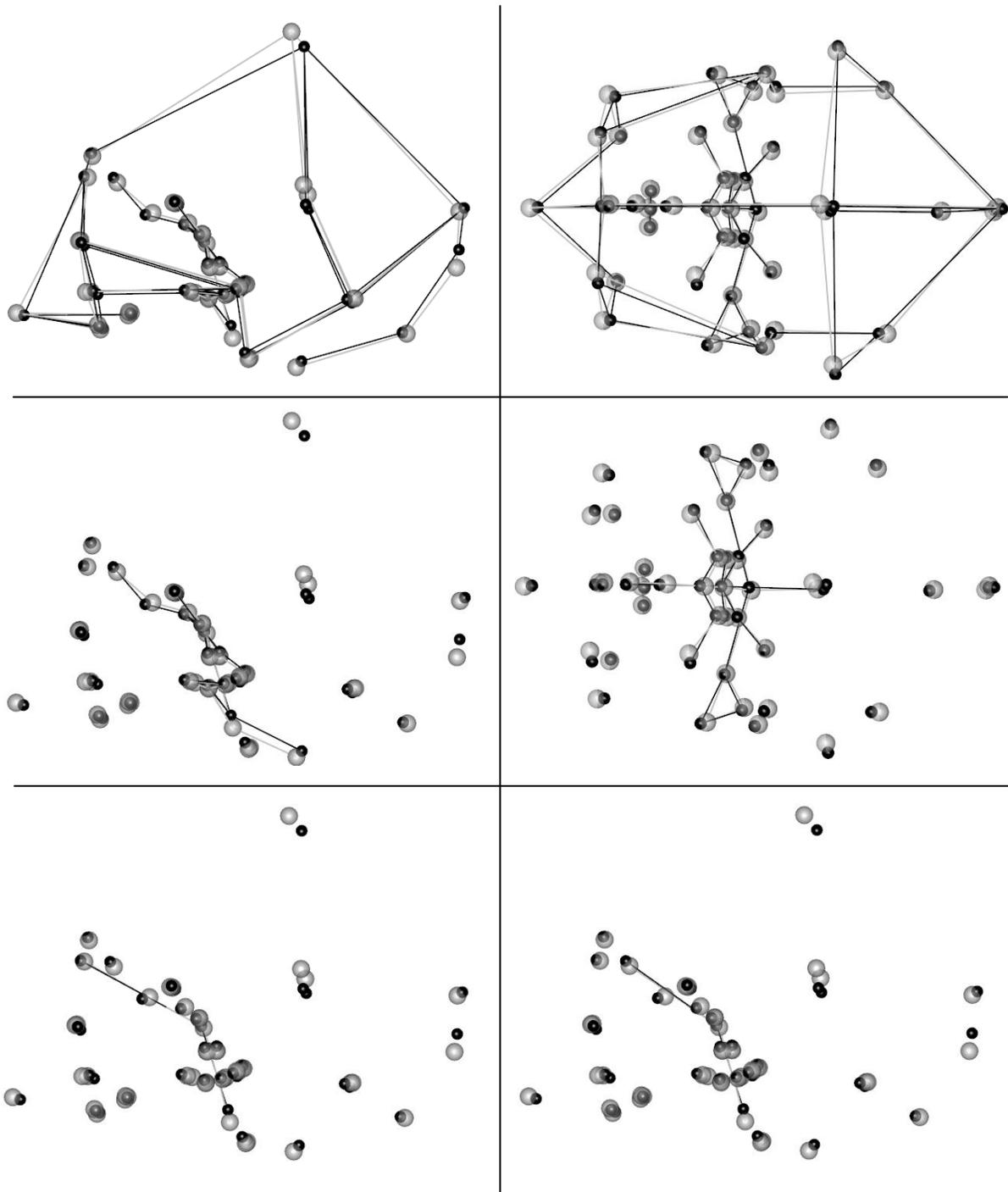


Figure 29 : Changements de la conformation crânienne le long de CP3 de l'ACP intergroupe (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue d'ensemble ; au milieu, vue de la base ; en bas vue de l'angle basicrânien (Na-S-Ba à gauche et fc-S-Ba à droite).

3.3.2. Sans l'opisthocrânion

Une ACP intergroupe sans l'opisthocrânion a été effectuée, les résultats des variances et des statistiques sont similaires à ceux sans le point (Tableaux 8 et 9) et les résultats le long des CP 1, 2 et 3 sont également similaires.

Tableau 8 : Valeurs propres, variance et variance cumulée des Composantes Principales intergroupe quand l'ACP est effectuée sans l'opisthocrânion.

Composantes Principales (CP)	Valeurs propres	Variance	Variance cumulée
CP intergroupe 1	0,0019557378	0,63179784	0, 6317978
CP inter groupe2	0,0009529491	0,30784864	0, 9396465
CP intergroupe 3	0,0001868250	0,06035352	1,0000000

Tableau 9 : Valeurs-p (*p-values*) des différences entre groupes deux à deux, basés sur un test de permutation (avec 1000 permutations), quand l'ACP est effectuée sans l'opisthocrânion.

	AP	C	ND
C	0,0001	-	-
ND	0,0062	0,0001	-
T	0,0011	0.0078	0.0266

3.3.3. Synthèse des résultats des ACP intergroupe

Les groupes AP, C et T sont statistiquement différents, bien que certains groupes se chevauchent sur les trois premières composantes.

- Les crânes déformés de type circonférentiel tendent à avoir la voûte crânienne, la face et la base moins larges ; la voûte crânienne allongé postérieurement et supérieurement ; la face inférieure plus antérieure ; la base interne plus allongée et en position plus inférieure ; les fosses mandibulaires plus antérieures ; et un angle basicrânien plus ouvert par rapport aux crânes non déformés.

- Les crânes déformés de type toulousain ont une tendance à avoir une voûte plus étroite et plus allongée, une base moins large, une hauteur diminuée, un front plus fuyant, un angle basicrânien plus ouvert et le *foramen magnum* plus haut.
- Les crânes déformés de type antéropostérieur tendent à avoir une voûte crânienne plus courte antéropostérieurement, notamment au niveau de l'os occipital ; la voûte, la base et la face plus hautes et plus larges ; la base est plus courte, la partie antérieure à la sella de la base interne est en position plus supérieure et la partie postérieure à la sella est en position plus inférieure, les parties pétreuses des os temporaux sont plus ouvertes, l'angle basicrânien est plus petit et les fosses mandibulaires sont en position plus inférieure et antérieure par rapport aux crânes non déformés.
- Les crânes déformés de type antéropostérieur oblique ont le neurocrâne moins haut, le front plus fuyant, le *foramen magnum* plus haut, la face moins inclinée vers l'arrière, et l'angle basicrânien plus ouvert que pour les crânes déformés de type antéropostérieur droit et que les crânes non déformés.

3.4. Analyse de covariance par “*Two-block partial least squares*”

3.4.1. 2B PLS sur l'ensemble de l'échantillon

L'analyse 2B PLS sur l'ensemble de l'échantillon montre une corrélation entre la voûte crânienne et la base pour les deux premières composantes (Tableau 10).

Tableau 10 : Valeurs propres et corrélation entre la voûte et la base pour les deux premières 2B PLS sur l'ensemble de l'échantillon, ainsi que leur valeurs-p (*p-value*) après 1000 permutations

	Valeur propre	Valeur-p (permutation)	% total covariance	Corrélation	Valeur-p (permutation)
2B PLS1	0,00172586	< 0,0001	84,969	0,94950	< 0,0001
2B PLS2	0,00062610	< 0,0001	11,182	0,94153	< 0,0001

Selon la première composante (Figure 30), une voûte crânienne plus allongée postérieurement et supérieurement est associée à une base interne en position plus inférieure (et l'angle entre le clivus et le *foramen magnum* est plus fermé) et plus étroite (les courbes des

grandes ailes des os sphénoïdes sont plus petites, les méats auditifs internes sont plus proches de la sella), dont l'angle basicrânien est plus ouvert et dont les parties pétreuses des os temporaux forment un angle plus ouvert, et est associée à des fosses mandibulaires plus antérieures. À l'inverse, une voûte crânienne plus courte avec un os frontal moins fuyant est associée à une base interne en position plus supérieure (et l'angle entre le clivus et le foramen magnum est plus ouvert) et plus étroite, dont l'angle basicrânien est plus fermé, et dont les parties pétreuses des os sphénoïdes forment un angle plus fermé, et à des fosses mandibulaires plus postérieures (Figure 31). La covariation décrite ici correspond principalement à la différence de conformation entre les groupes C et ND, les AP étant en partie situés avec les ND et en partie intermédiaire avec les T (Figure 30).

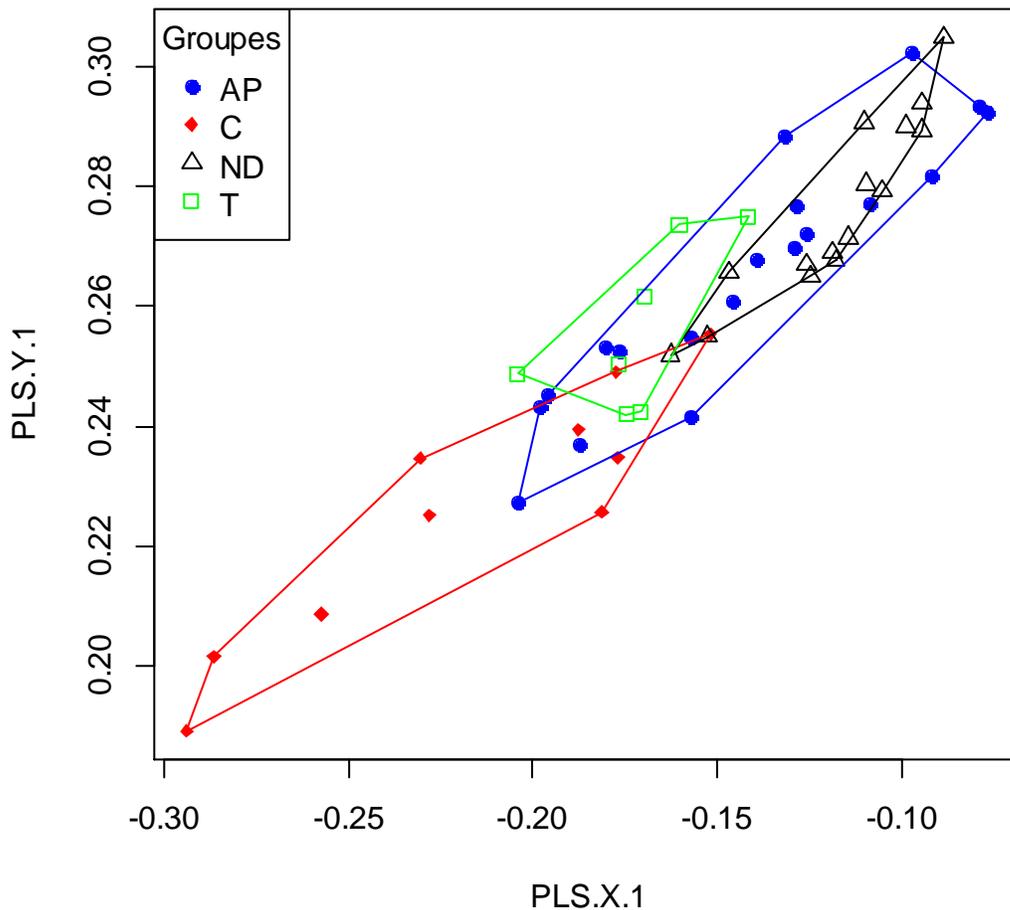


Figure 30 : 2B PLS 1 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur l'ensemble de l'échantillon

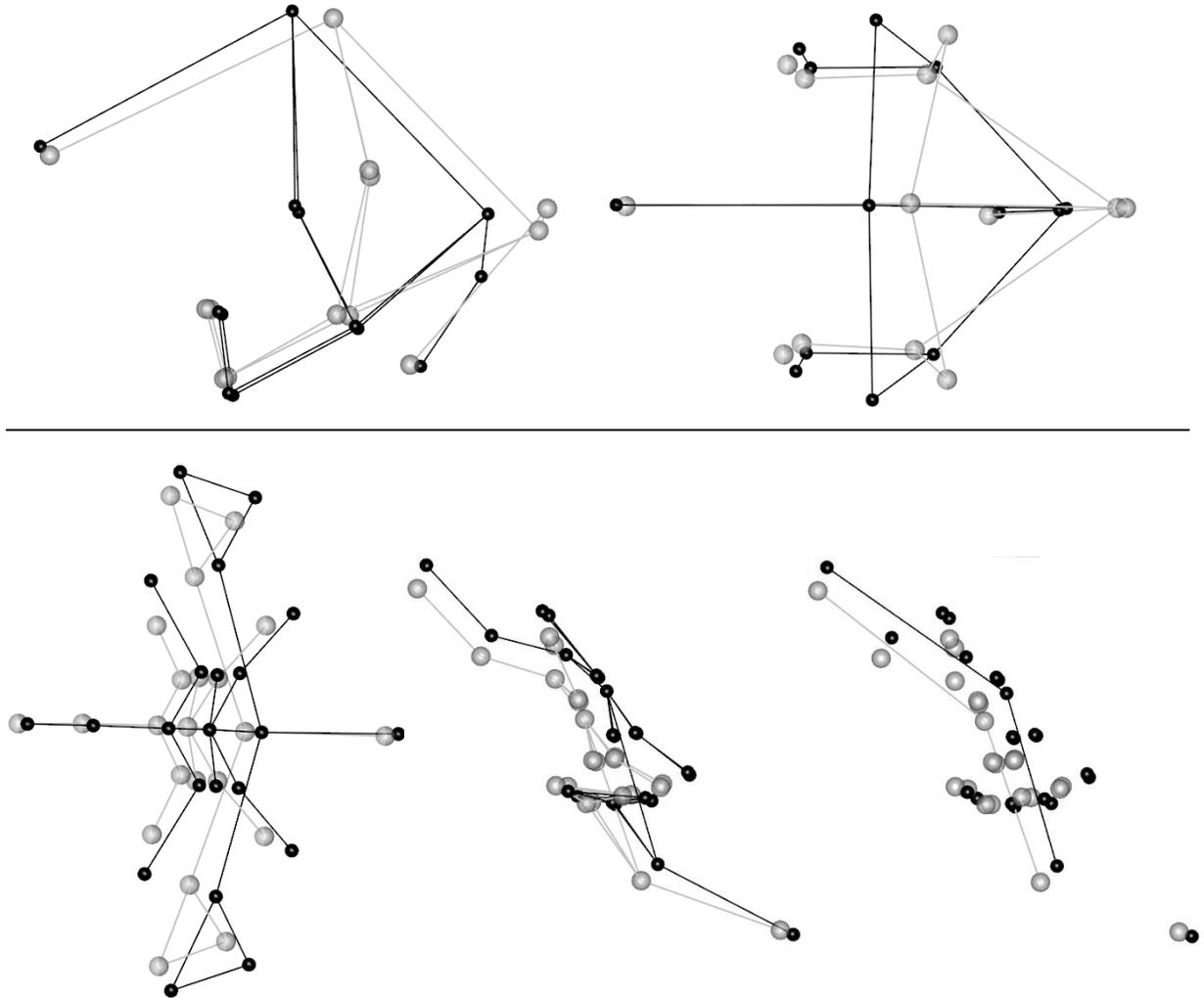


Figure 31 : Changements de la conformation de la base en fonction de ceux de la voûte pour la 2B PLS 1 sur l'ensemble de l'échantillon (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue de la voûte ; en bas vue de la base et de l'angle basicrânien (fc-S-Ba).

Selon la composante 2 (Figure 32), une voûte crânienne basse, étroite et allongée antéropostérieurement (dont l'os occipital est plus bas et postérieur) est associée à une base plus longue, ayant subi une rotation dans le sens antihoraire (la partie basicrânienne antérieure est en position plus antérieure et inférieure, et la partie basicrânienne postérieure est plus postérieure et supérieure), les parties pétreuses des os temporaux forment un angle plus fermé, les courbes des grandes ailes de l'os sphénoïdes sont moins grandes, un angle basicrânien plus ouvert, un angle entre le clivus et le *foramen magnum* plus ouvert, les fosses mandibulaires sont en position plus

supérieure (Figure 33). La covariation décrite ici correspond principalement à la différence de conformation entre les groupes AP et T, le groupe ND se situant plutôt vers le groupe T.

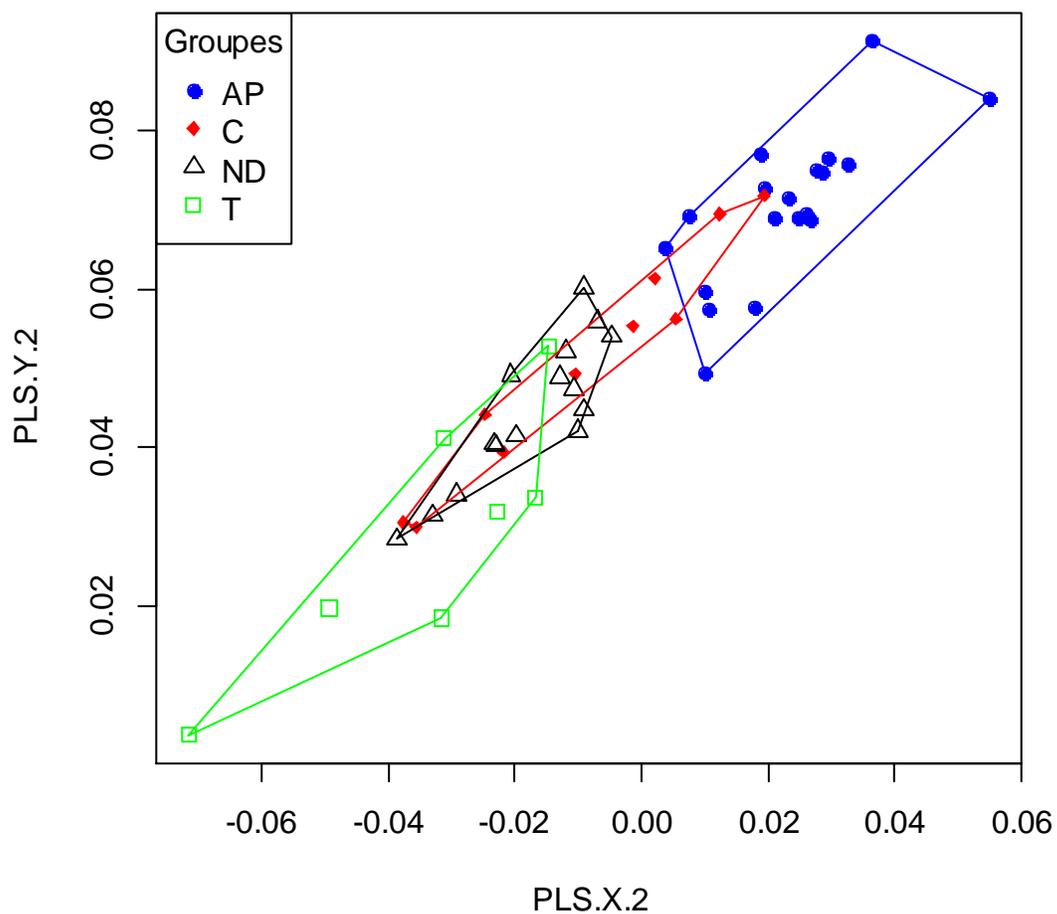


Figure 32 : 2B PLS 2 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur l'ensemble de l'échantillon

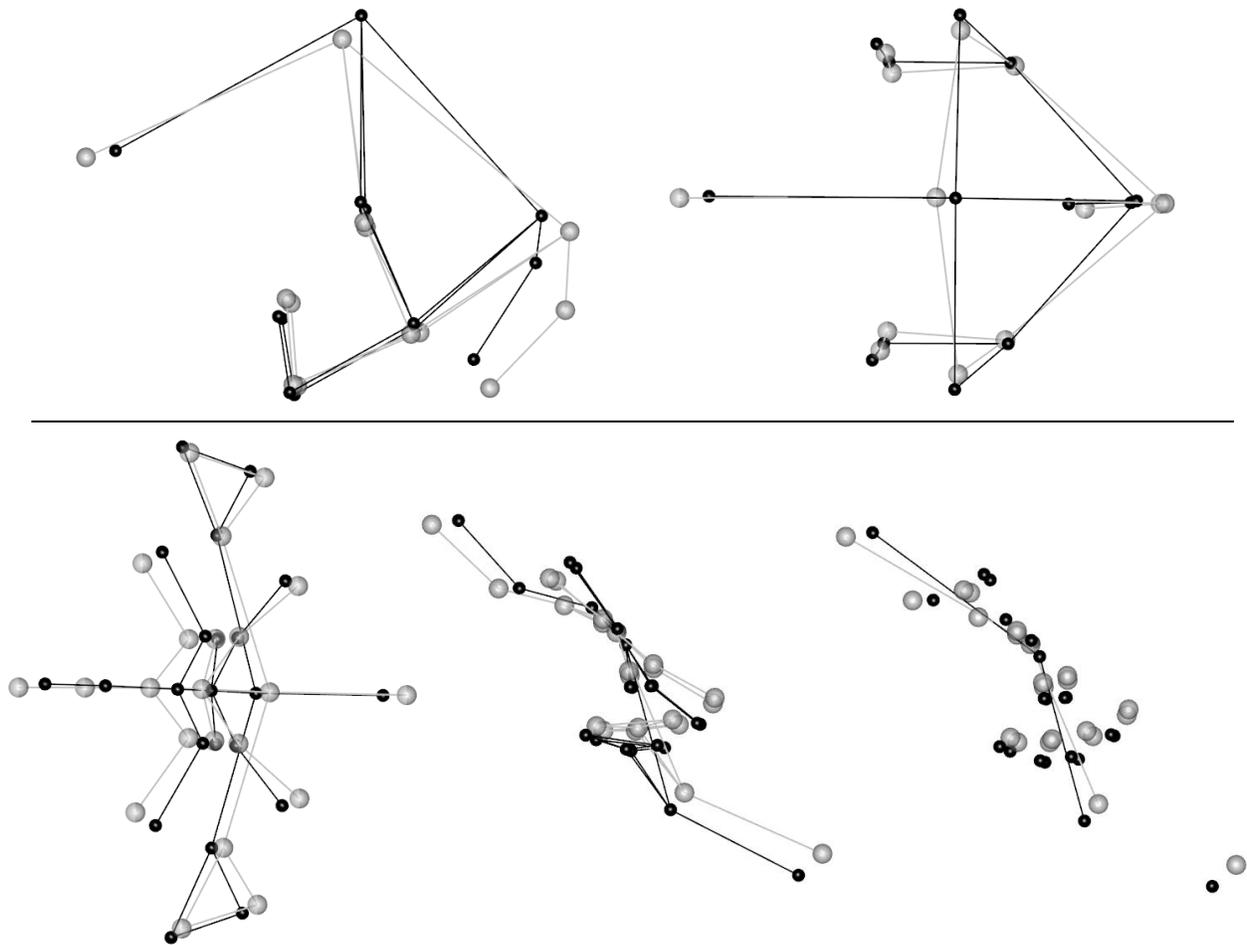


Figure 33 : Changements de la conformation de la base en fonction de ceux de la voûte pour la 2B PLS 2 sur l'ensemble de l'échantillon (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue de la voûte ; en bas vue de la base et de l'angle basicrânien (fc-S-Ba).

3.4.2. 2B PLS sur les AP

L'analyse 2B PLS sur les crânes de type AP montre une corrélation entre la voûte crânienne et la base pour les deux premières composantes (Tableau 11). Pour la deuxième composante, la valeur propre n'est pas significative. Ne permettant pas une interprétation nette répondant à nos objectifs, les résultats de la deuxième analyse 2B PLS sont donnés en Annexe 3.

Tableau 11 : Valeurs propres et corrélation entre la voûte et la base pour les deux premières 2B PLS sur les crânes AP, ainsi que leur valeur-p (*p-value*) après 1000 permutations

	Valeur propre	Valeur-p (permutation)	% total covariance	Corrélation	Valeur-p (permutation)
2B PLS1	0,00142236	< 0,0001	85,372	0,95486	< 0,0001
2B PLS2	0,00037904	0,6124	6,063	0,85199	< 0,0001

La première composante de l'analyse 2B PLS sur l'ensemble des crânes AP est donnée en Figure 34. Au sein du groupe AP, une voûte crânienne plus courte antéropostérieurement et plus large, avec un opisthocrânion plus éloignée du lambda (correspondant globalement aux APe), est associée à un angle basicrânien plus fermé et un angle entre le clivus et le *foramen magnum* plus ouvert, les courbes des grandes ailes de l'os sphénoïdes plus larges, les fosses mandibulaires en position plus latérale, supérieure et postérieure, les parties pétreuses des os temporaux formant un angle plus fermé (Figure 35).

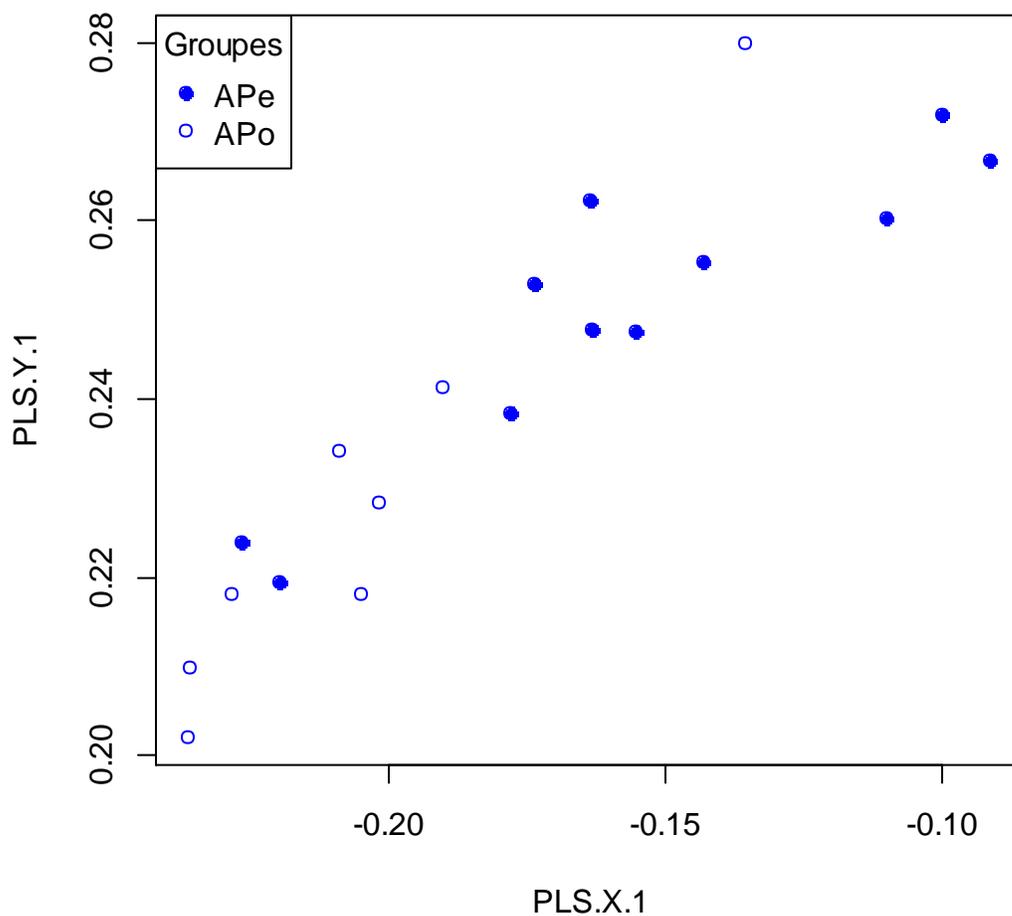


Figure 34 : 2B PLS 1 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur les crânes AP

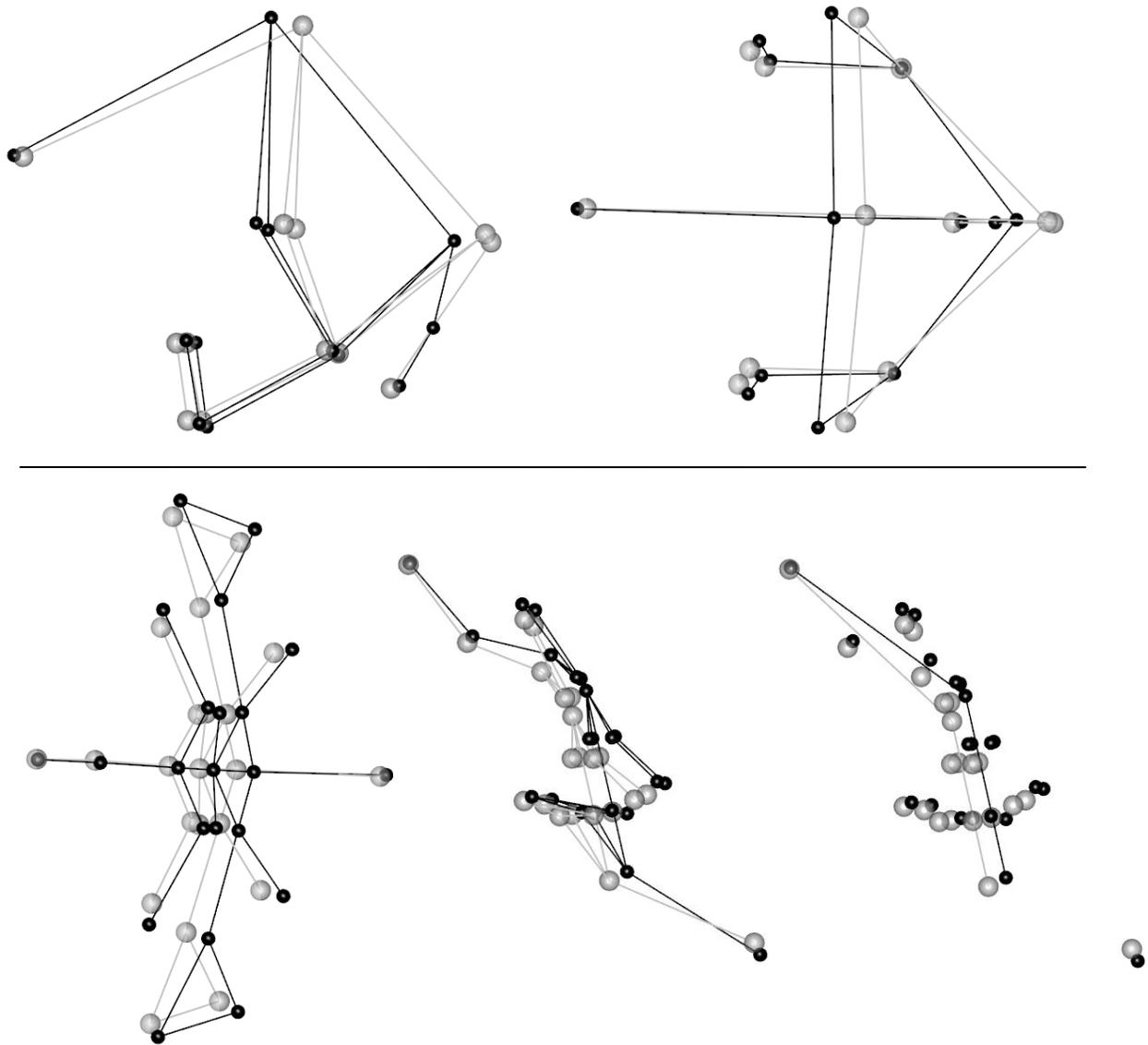


Figure 35 : Changements de la conformation de la base en fonction de ceux de la voûte pour la 2B PLS 1 sur les crânes AP (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue de la voûte ; en bas vue de la base et de l'angle basicrânien (fc-S-Ba).

3.4.3. 2B PLS sur les C

L'analyse 2B PLS sur les crânes de type C montre une corrélation entre la voûte crânienne et la base pour les deux premières composantes mais n'est significative que pour la deuxième ; la valeur propre, c'est-à-dire la part de covariance qu'elle explique, est significative pour les deux composantes (Tableau 12).

Tableau 12 : Valeurs propres et corrélation entre la voûte et la base pour les deux premières 2B PLS sur les crânes C, ainsi que leur valeur-p (*p-value*) après 1000 permutations

	Valeur propre	Valeur-p (permutation)	% total covariance	Corrélation	Valeur-p (permutation)
2B PLS1	0,00226687	0,0013	86,264	0,94177	0,0865
2B PLS2	0,00068193	0,0449	7,806	0,98148	0,0034

La première composante de l'analyse 2B PLS sur les crânes C est donnée en Figure 36. Une voûte crânienne dont l'os frontal est plus inférieur, dont les euryons sont moins écartés et en position plus supérieure et postérieure, dont les porions sont plus antérieurs et dont les points lambda et opisthocrânion plus proches l'un de l'autre, est associée à une base plus étroite en position plus inférieure et antérieure, un angle basicrânien plus ouvert, aux courbes des grandes ailes de l'os sphénoïdes moins larges, aux fosses mandibulaires en position plus médiale, inférieure et nettement plus antérieure (Figure 37).

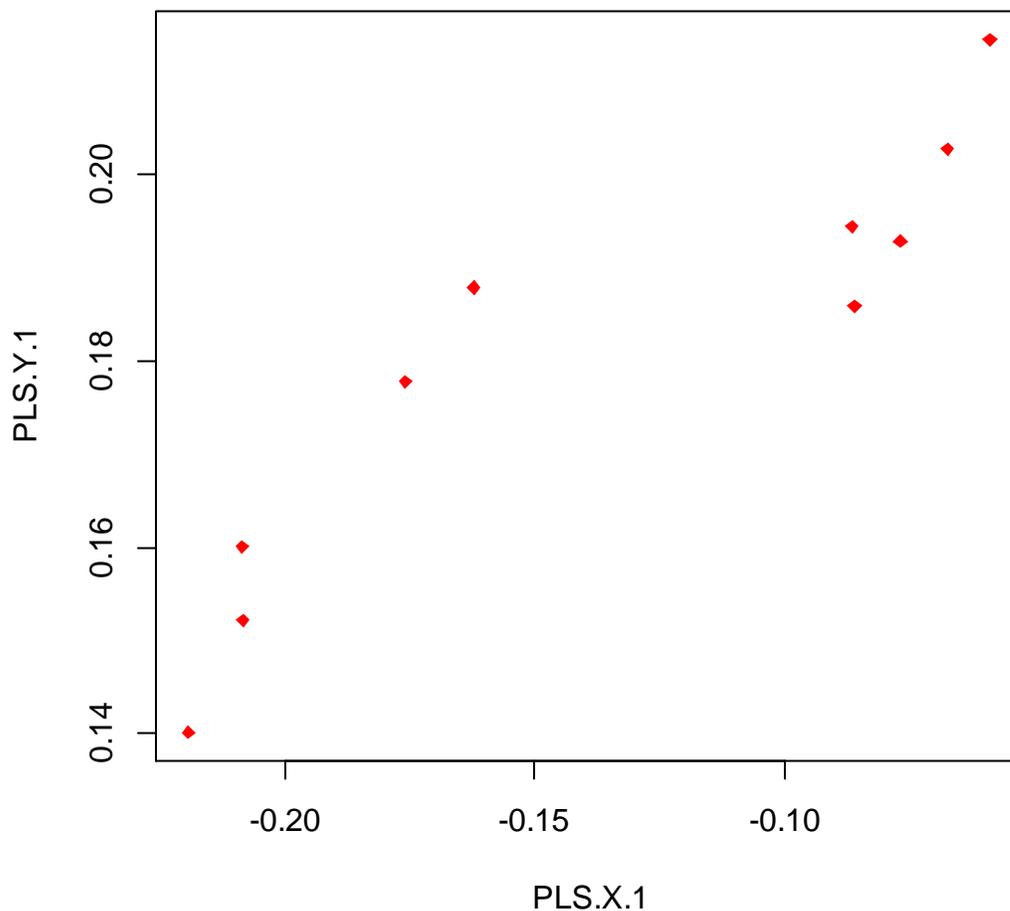


Figure 36 : 2B PLS 1 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur les crânes C

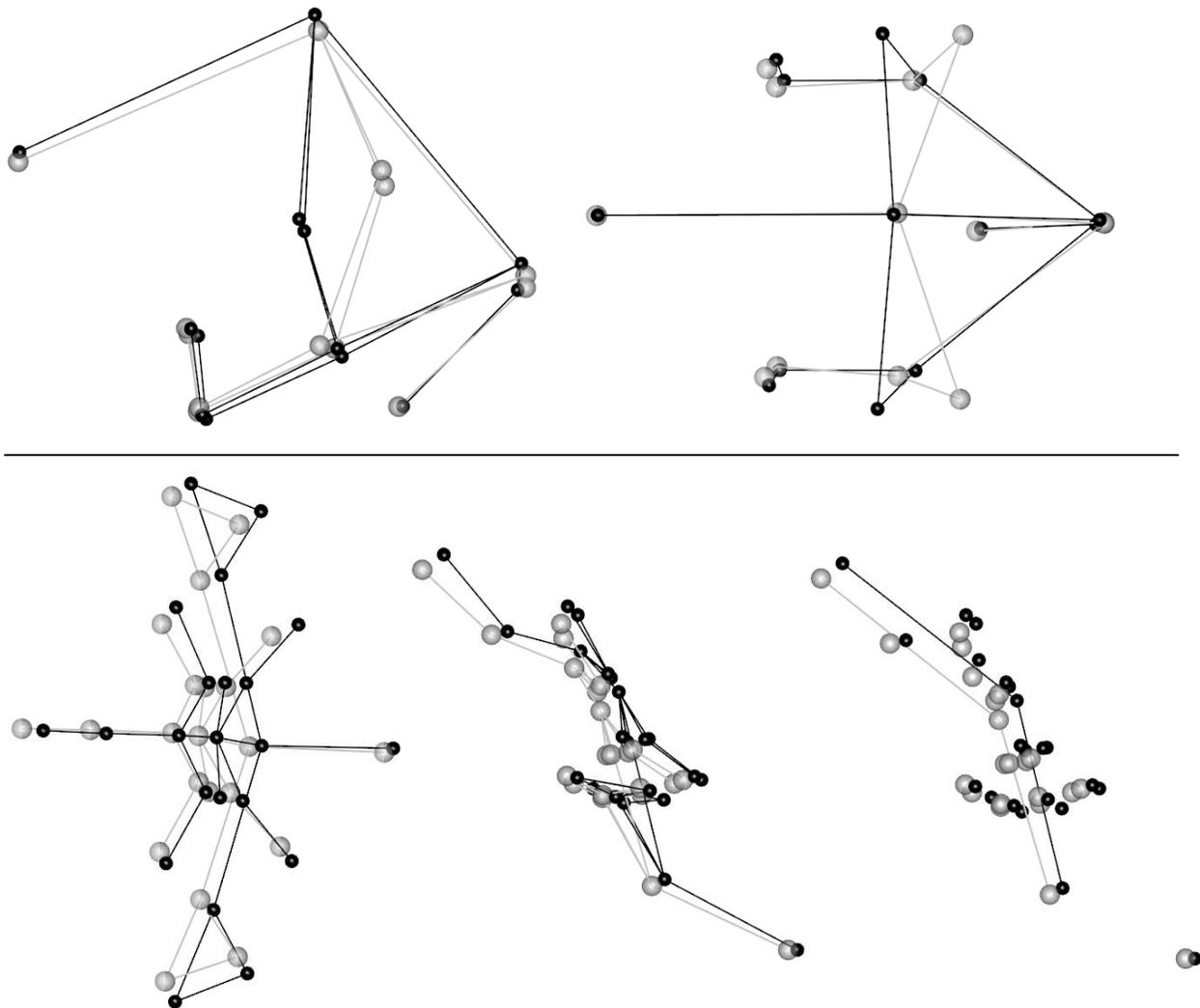


Figure 37 : Changements de la conformation de la base en fonction de ceux de la voûte pour la 2B PLS 1 sur les crânes C (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue de la voûte ; en bas vue de la base et de l'angle basicrânien (fc-S-Ba).

La deuxième composante de l'analyse 2B PLS sur les crânes C est donnée en Figure 38. Une voûte crânienne plus allongée postérieurement (front fuyant, os occipital plus bas et postérieurs) est associée à un angle basicrânien plus fermé, un angle entre le clivus et le *foramen magnum* nettement plus fermé, l'angle entre les parties pétreuses des os temporaux plus grand, un changement de la base avec les fosses mandibulaires, les parties pétreuses des os temporaux, la scelle turcique et les trous déchirés antérieurs plus supérieurs et antérieurs, les fosses mandibulaires et le *foramen magnum* ayant subi une rotation antihoraire, et le *foramen caecum*

plus bas. Au contraire, une voûte crânienne plus en hauteur (front moins fuyant, os occipital plus antérieur et haut) est associée à une base avec des tendances inverses (Figure 39).

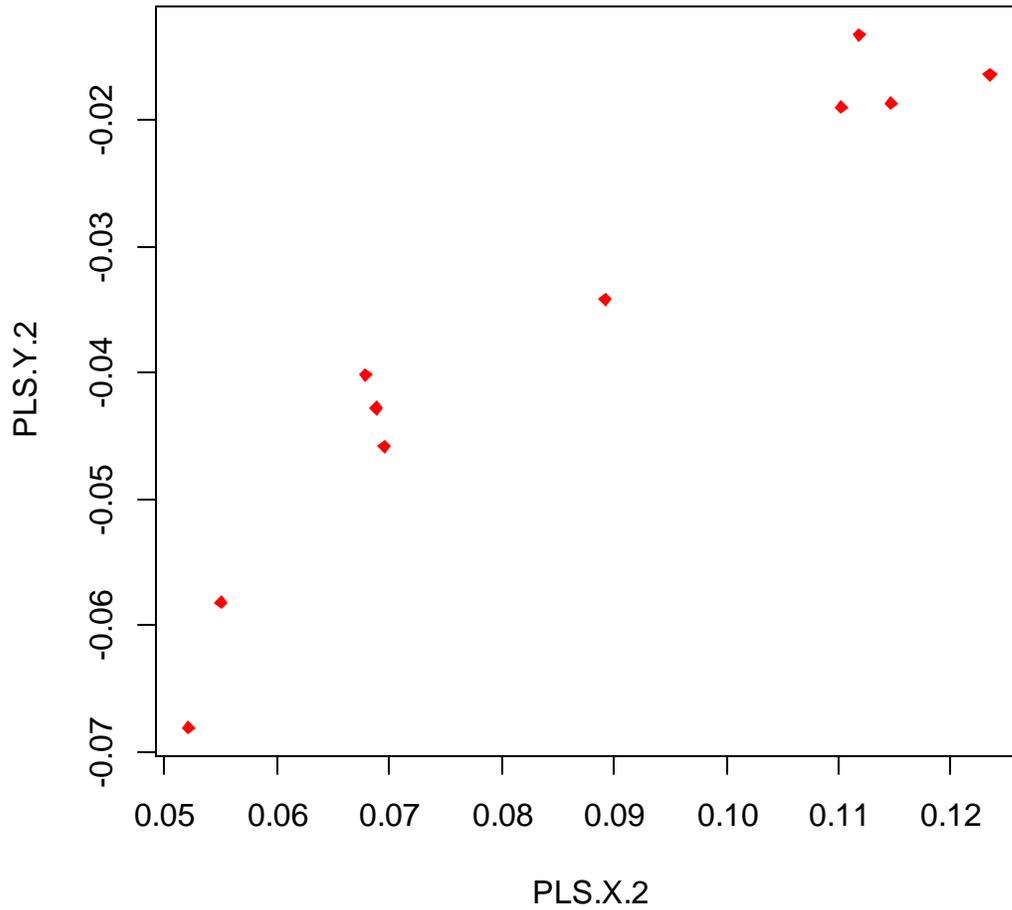


Figure 38 : 2B PLS 2 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur les crânes C

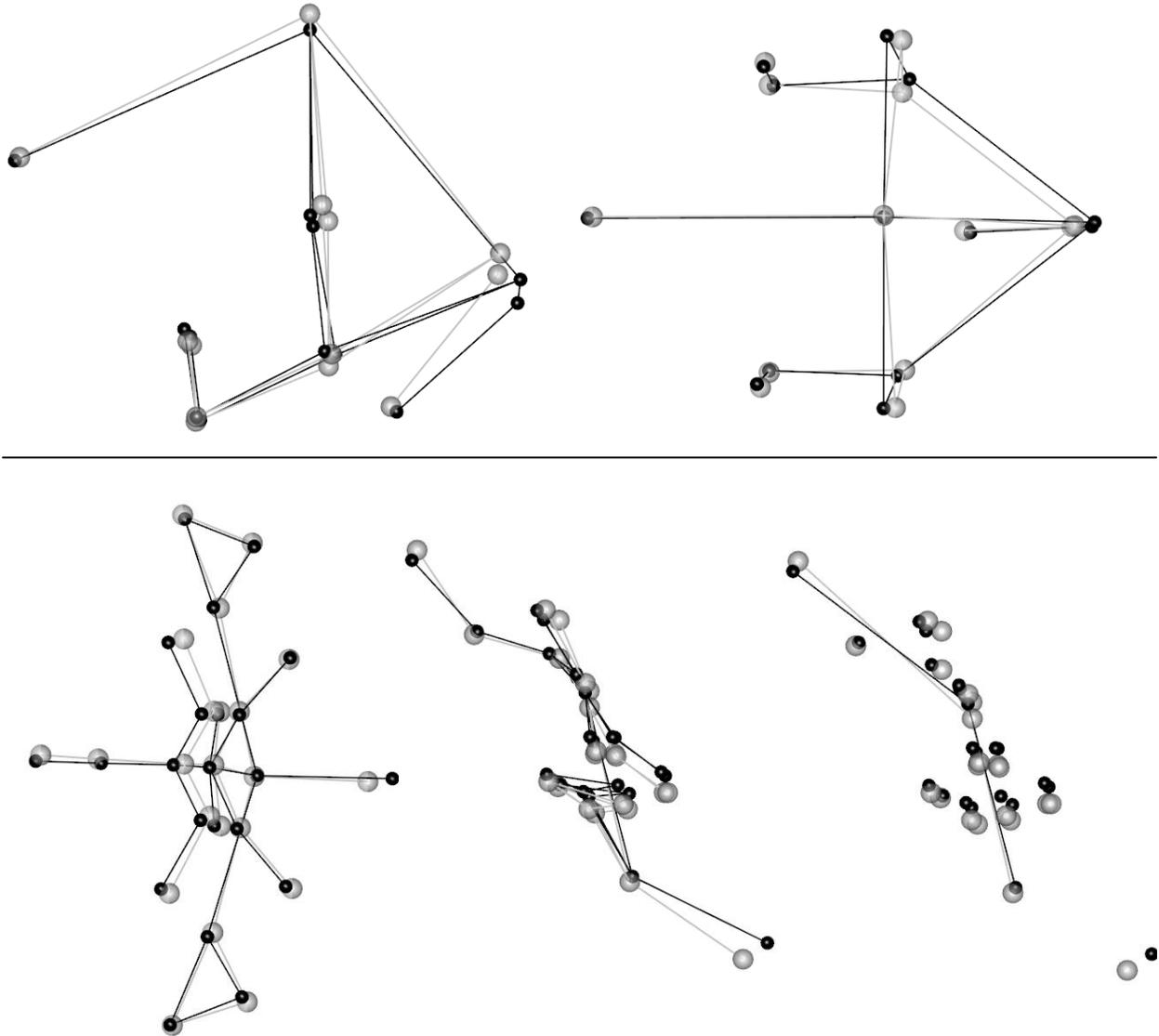


Figure 39 : Changements de la conformation de la base en fonction de ceux de la voûte pour la 2B PLS 2 sur les crânes C (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue de la voûte ; en bas vue de la base et de l'angle basicrânien (fc-S-Ba).

3.4.4. 2B PLS sur les ND

L'analyse 2B PLS sur les crânes non déformés montre une corrélation entre la voûte crânienne et la base pour les deux premières composantes mais n'est significative que pour la première (Tableau 13).

Tableau 13 : Valeurs propres et corrélation entre la voûte et la base pour les deux premières 2B PLS sur les crânes ND, ainsi que leur valeur-p (*p-value*) après 1000 permutations

	Valeur propre	Valeur-p (permutation)	% total covariance	Corrélation	Valeur-p (permutation)
2B PLS1	0,00060600	< 0,0001	62,317	0,96666	0,0032
2B PLS2	0,00027509	0,2179	12,842	0,90585	0,2012

La première composante de l'analyse 2B PLS sur les crânes ND est donnée en Figure 40.

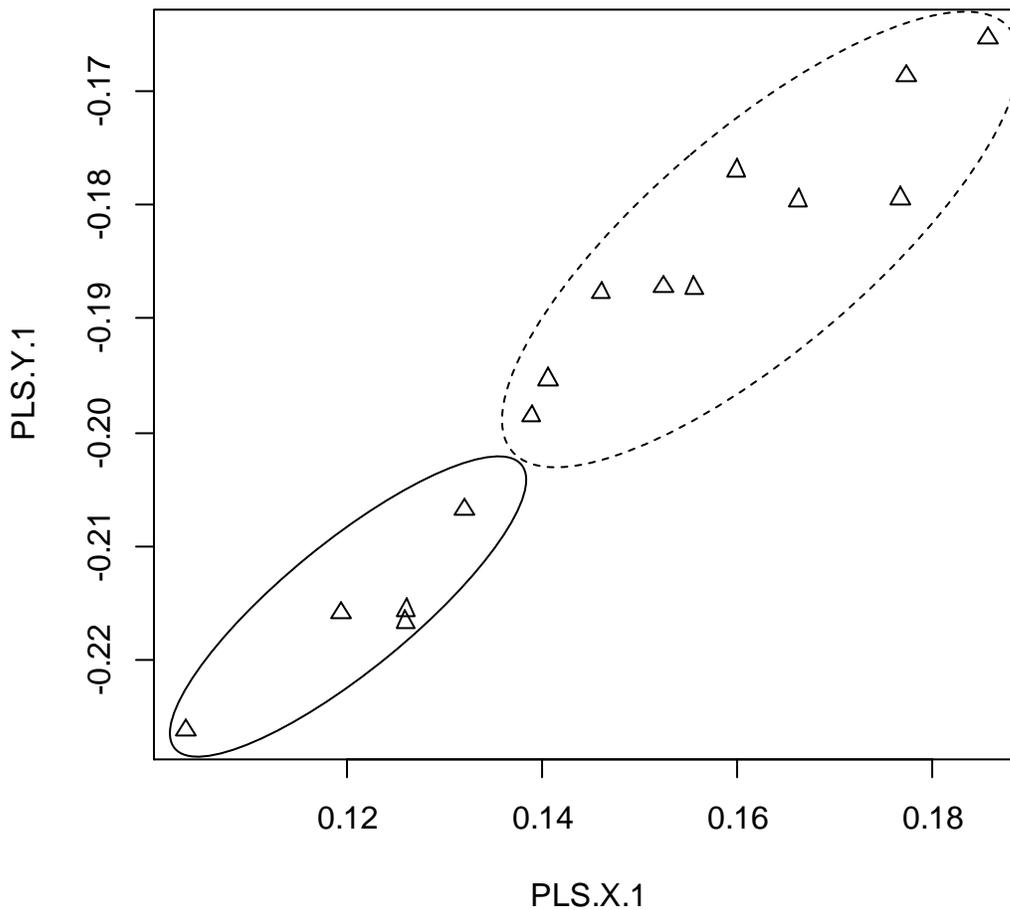


Figure 40 : 2B PLS 1 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur les crânes ND. Les crânes entourés par une ligne pointillée sont boliviens et ceux entourés par un trait plein sont français.

Une voûte crânienne plus allongée antéropostérieurement, un os frontal plus postérieur et des euryons en position un peu plus postérieure et supérieure, sont associés à un angle de la base

plus grand, la partie postérieure de la base plus antérieure et inférieure, et la partie antérieure de la base plus postérieure, les parties pétreuses des os temporaux formant un angle plus grand, les courbes des grandes ailes de l'os sphénoïde plus petites, les entoglénoïdes sont plus antérieurs, les tubercules articulaires plus hauts, et points latéraux des fissures pétreux-tympaniques en position plus antérieure et médiale (Figure 41). Il est à noter que les groupes français et boliviens se distinguent (Figure 40).

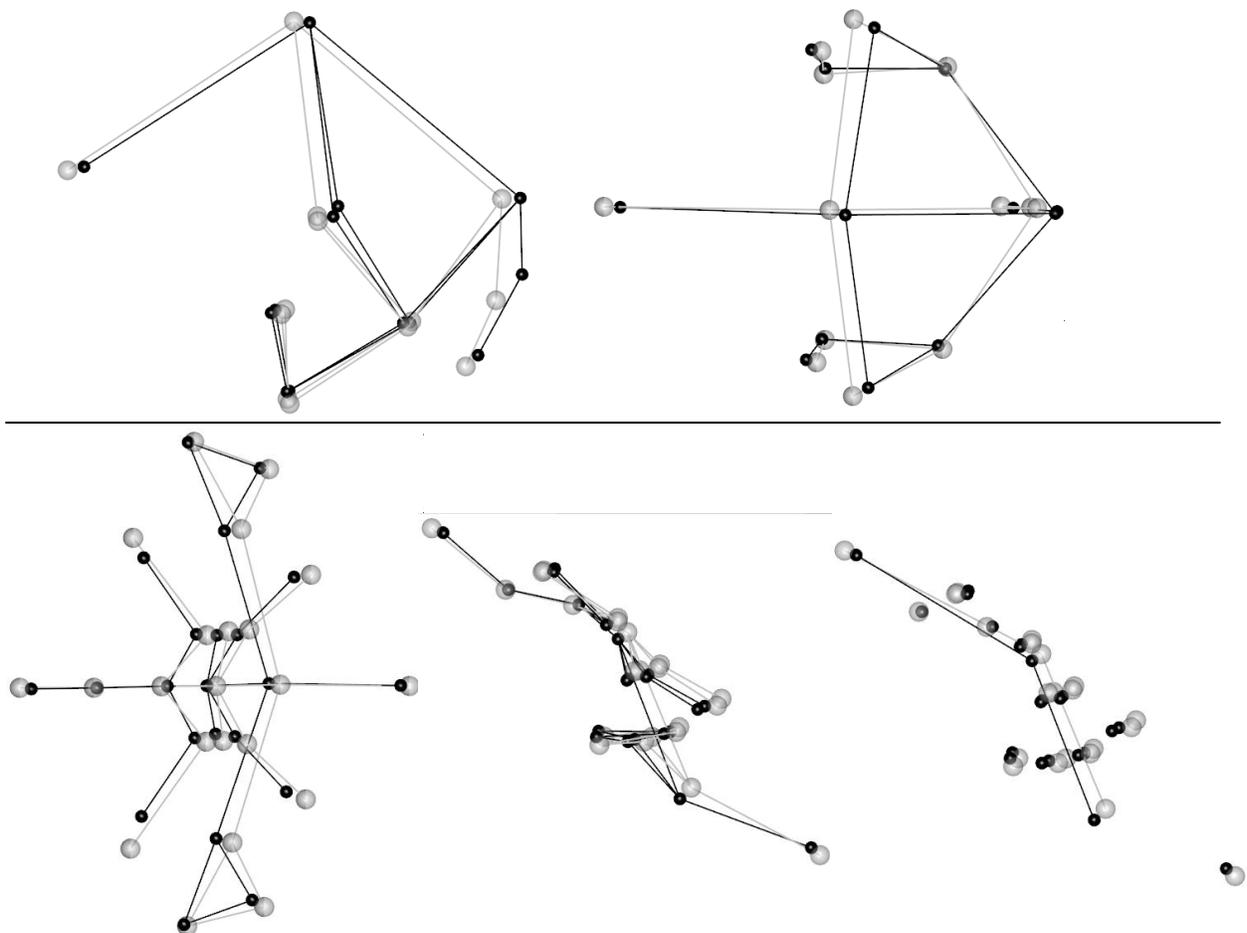


Figure 41 : Changements de la conformation de la base en fonction de ceux de la voûte pour la 2B PLS 2 sur les crânes ND (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue de la voûte ; en bas vue de la base et de l'angle basicrânien (fc-S-Ba).

3.4.5. 2B PLS sur les T

L'analyse 2B PLS sur les crânes de type T montre une corrélation entre la voûte crânienne et la base pour les deux premières composantes mais n'est pas significative, probablement dû au faible nombre de crânes T (Tableau 14). La composante 1 est donnée en Figure 42.

Tableau 14 : Valeurs propres et corrélation entre la voûte et la base pour les deux premières 2B PLS sur les crânes T, ainsi que leur valeur-p (*p-value*) après 1000 permutations

	Valeur propre	Valeur-p (permutation)	% total covariance	Corrélation	Valeur-p (permutation)
2B PLS1	0,00091649	0,1334	50,953	0,98578	0,1652
2B PLS2	0,00060119	0,8524	21,925	0,90194	0,9210

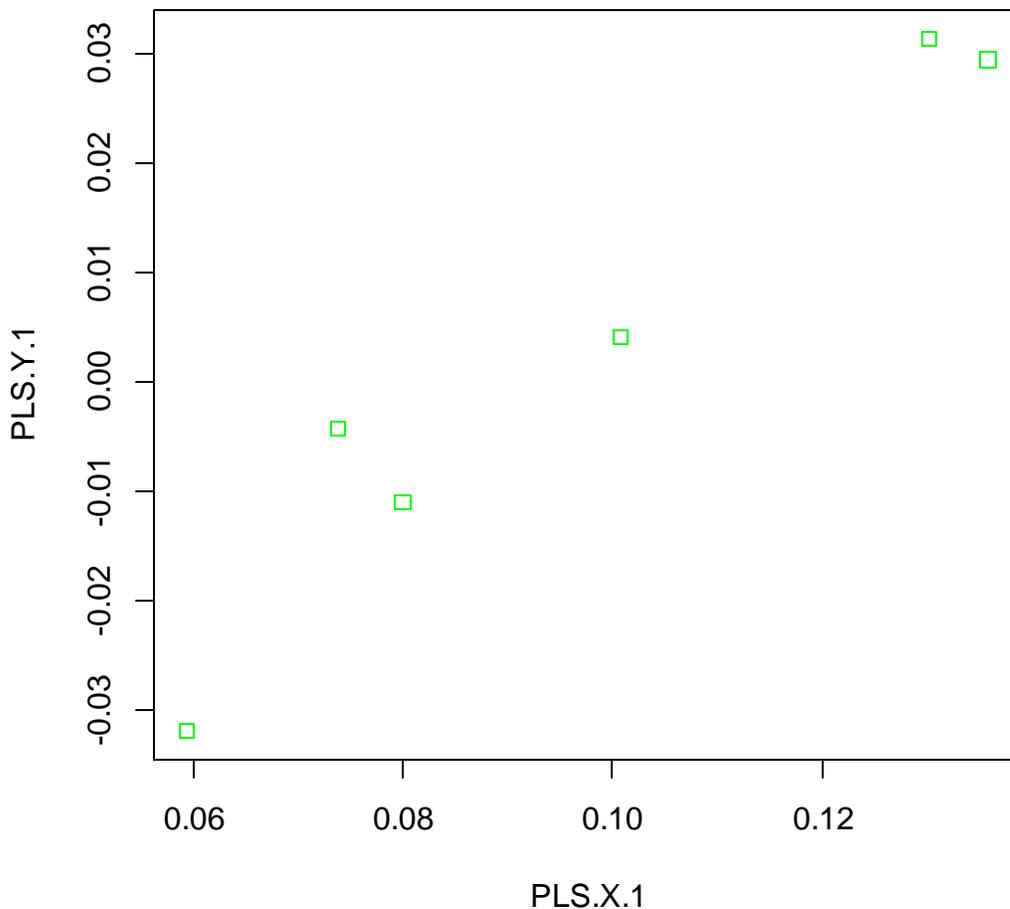


Figure 42 : 2B PLS 1 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur les crânes T

Selon la composante 1 de la PLS au sein des T, la voûte crânienne basse et allongée antéropostérieurement (avec l'opisthocrânion bas) est corrélée à un angle basicrânien plus petit, un angle entre le clivus et le *foramen magnum* plus petit, la base interne plus antérieure et les fosses mandibulaires en position plus supérieure. La valeur propre et la corrélation n'étant pas significatifs, probablement dû au nombre d'individus sur lesquels cette corrélation est basée, nous ne pouvons pas conclure quant à la corrélation entre la voûte et la base pour les crânes de type toulousain.

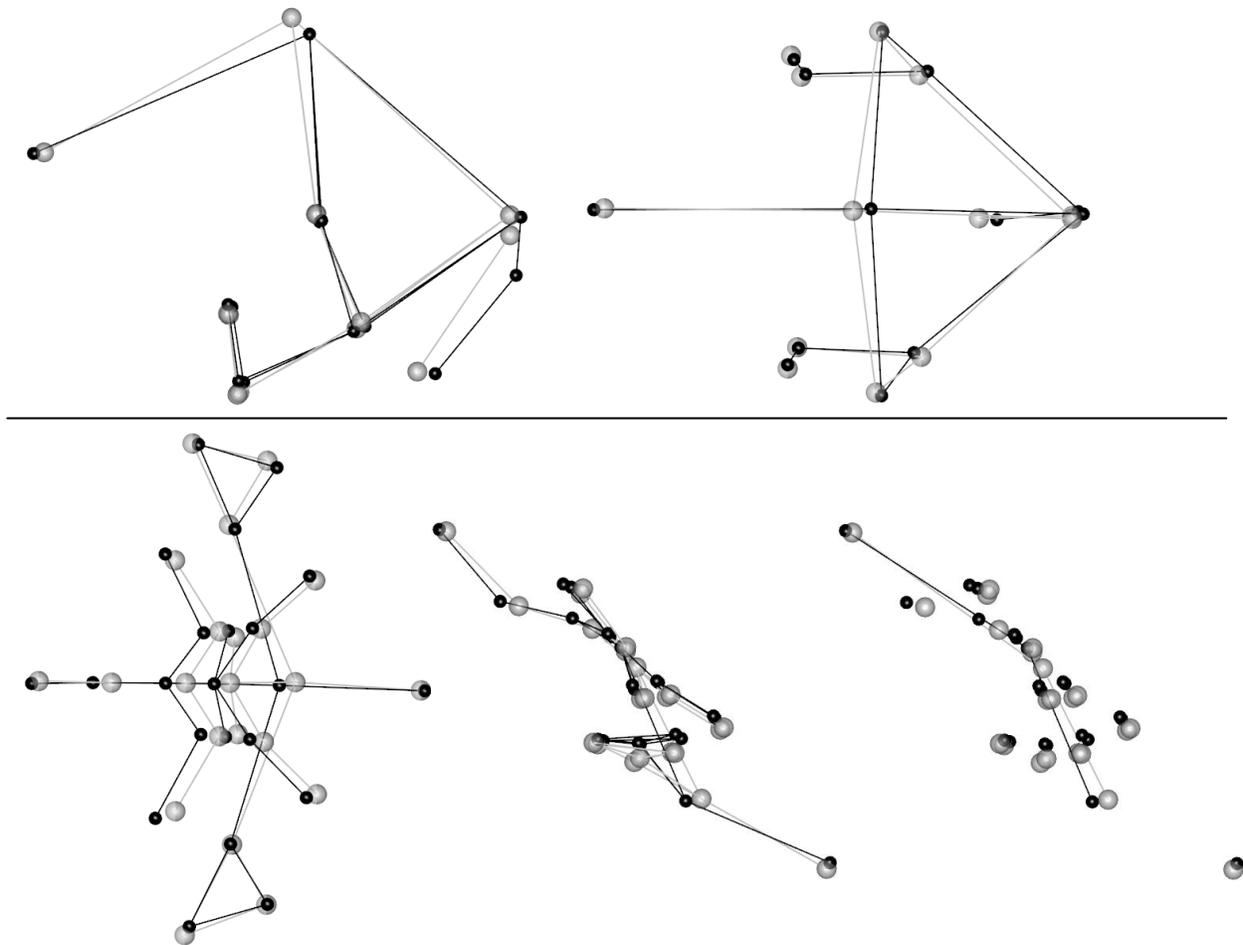


Figure 43 : Changements de la conformation de la base en fonction de ceux de la voûte pour la 2B PLS 2 sur les crânes T (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue de la voûte ; en bas vue de la base et de l'angle basicrânien (fc-S-Ba).

3.4.6. Synthèse 2B PLS

La conformation de la base crânienne interne et de l'appareil masticateur est clairement en corrélation avec la voûte crânienne. Les principales corrélations observées sont les suivantes :

- Une voûte crânienne plus allongée postérieurement et supérieurement est associée à une base interne en position plus inférieure (et l'angle entre le clivus et le *foramen magnum* est plus fermé) et plus étroite (les courbes des grandes ailes des os sphénoïdes sont plus petites, les méats auditifs internes sont plus proches de la sella), dont l'angle basicrânien est plus ouvert et dont les parties pétreuses des os temporaux forment un angle plus ouvert et à des fosses mandibulaires plus antérieures et médiales.
- Une voûte crânienne plus courte antéropostérieurement et plus large est associée à une base plus large dont l'angle basicrânien est plus fermé, les courbes des grandes ailes de l'os sphénoïdes sont plus grandes.

Au sein du groupe des AP, les résultats des PLS suggèrent que :

- Plus la voûte crânienne est courte antéropostérieurement, plus l'angle sphénoïde de la base est aigu et les fosses mandibulaires sont écartées.
- Plus la voûte crânienne est allongée supéro-postérieurement, plus la base est étroite, l'angle sphénoïdal est grand et les fosses mandibulaires sont position antérieure et médiale.

Cela suggère que les APe et les APo ne tendent pas à la même conformation de la base.

3.5. Angle basicrânien

De manière indicative, la moyenne de l'angle basicrânien Na-S-Ba de chaque groupe de crânes est donnée dans les Tableau 15 et l'angle basicrânien fc-S-Ba est donné dans le Tableau 16. Pour le groupe des AP, les moyennes des angles ont été calculées avec et sans l'enfant et l'adolescent.

Tableau 15 : Moyenne et écart type de l'angle Na-S-Ba dans chaque groupe de crânes

	AP	APo	APo sans enfants	APe	C	ND	T
Moyenne	134,48	137,15	137,37	132,54	138,01	134,75	138,58
Écart type	6,06	6,64	4,74	5,04	5,27	5,19	8,27

Tableau 16 : Moyenne et écart type de l'angle fc-S-Ba dans chaque groupe de crânes

	AP	APo	APo sans enfant	APe	C	ND	T
Moyenne	140,60	142,56	143,15	139,18	142,48	141,93	145,83
Écart type	4,89	5,33	4,02	4,21	4,71	5,73	6,89

4. Discussion

Cette étude est basée sur des méthodes de morphométrie géométrique 3D afin d'explorer les différences de conformation entre les crânes déformés et non déformés et entre les différents types de déformation, en examinant les patterns de variation et de covariation de ces crânes sur le plan de la morphologie externe et interne. Les méthodes utilisées dans cette étude ne prennent donc pas en compte leur taille, les observations effectuées s'effectuant ainsi de façon relative à l'ensemble de la conformation crânienne, ni l'asymétrie nettement présente dans certains crânes déformés.

4.1. Impacts des différents types de déformations sur la base

Cette étude permet d'observer les effets de la déformation crânienne sur la base. Des études précédentes suggéraient que les déformations crâniennes artificielles étaient associées à des changements morphologiques au niveau de la base dont notamment une augmentation de la croissance latérale de la base des crânes déformés de type AP (Antón, 1989 ; Cheverud *et al.*, 1992 ; Jimenez *et al.*, 2012) et une réduction de la largeur dans le cas des déformations de type C (Antón, 1989 ; Kohn *et al.*, 1993). Nos résultats confirment ces résultats avec l'observation pour le groupe des crânes de type AP des courbes des grandes ailes du sphénoïde plus larges, les trous déchirés antérieurs (*foramina lacera*) plus éloignés du plan sagittal, et les parties pétreuses des os temporaux plus transverses relativement au plan sagittal ; et avec l'observation, au contraire de courbes sphénoïdes moins larges et les trous déchirés antérieurs plus proches du plan sagittal pour les crânes de type C et T, les parties pétreuses moins obliques relativement au plan sagittal pour les crânes T.

Une tendance à la platybasie est observée pour les groupes de crânes déformés de type C et de type T, la tendance étant plus marquée pour ces derniers. Ces résultats sont en accord avec les études précédentes (Antón, 1989 ; Cussenot *et al.*, 1992 ; Hanzel, 1977 ; Mc Neill & Newton, 1965 ; Pereira da Silva *et al.*, 1990). En revanche, ces mêmes études ainsi qu'Oettinger (1924) ont trouvé une tendance à la platybasie également pour les crânes de type AP ; nos résultats

suggèrent au contraire une tendance à la cyphose pour les crânes AP lorsqu'ils sont groupés ensemble. La séparation entre les APe et les APo permet d'observer une différence entre les deux sous-divisions : les APe ont une tendance à la cyphose tandis que les APo ont une légère tendance à la platybasie. Ces résultats semblent plutôt en accord avec Moss (1958) qui avait trouvé une cyphose basale pour les crânes de type « vertical » et une platybasie basale pour les crânes de type « oblique ». Les différences de résultats que nous avons notées entre les études précédentes et les nôtres peuvent s'expliquer de différentes manières. Dans certains cas, cela peut s'expliquer par la taille de l'échantillon (Cussenot *et al.*, 1992), car la variabilité du degré de l'angle basicrânien entre chaque type de déformation peut être grande et un crâne étudié isolément apporte peu d'informations sur l'ensemble des crânes du même type de déformation que ce crâne. Dans d'autres cas, la classification des crânes est différente ; en effet, nous avons choisi de distinguer les AP et les C et, au vu des résultats, les APe et les APo, alors que d'autres études ne distinguent pas les APe et APo (Antón, 1989 ; Mc Neill & Newton, 1965 ; Oettking, 1924), ce qui ne permet pas de déceler d'éventuelles différences entre les deux sous-groupes. D'autres études, enfin, ont observé l'impact de la déformation sur la base des crânes pour l'ensemble des crânes déformés, tous les types mélangés, comparés aux non-déformés (Hanzel, 1977), ce qui ne permet pas d'observer les différences intra-groupes parmi les crânes déformés. L'attribution d'un individu à un groupe est parfois difficile ou ambigu. L'observation du changement du degré de l'angle basicrânien peut dépendre de la classification effectuée pour l'étude, de la taille et de la composition de l'échantillon étudié, ainsi que de la méthodologie et la nature des mesures. La mesure de la flexion basicrânienne est externe dans certaines études et a été effectuée soit à partir de prises de coordonnées 3D (Cheverud *et al.*, 1992 ; Kohn *et al.*, 1993), soit à partir de données radiologiques 2D (Oettking, 1924) ; dans d'autres, la mesure est interne et est obtenue à partir de données radiologiques (Antón, 1989 ; Hanzel, 1977 ; Mc Neill & Newton, 1965 ; Moss, 1958 ; Pereira da Silva *et al.*, 1990). L'angle Na-S-Ba est le plus couramment utilisé (Antón, 1989 ; Hanzel, 1977 ; Mc Neill & Newton, 1965 ; Pereira da Silva *et al.*, 1990 ; Schendel *et al.*, 1980) bien qu'elle semble inappropriée pour mesurer l'angle basicrânien selon Schendel et collaborateurs (1980) car ce point fait partie de la face et donc peut bouger avec elle. Certaines études utilisent l'angle entre le toit des orbites et le clivus (Antón, 1989), l'angle entre le planum sphénoïdal et le clivus (Antón, 1989 ; Moss 1958), ou encore l'inclinaison de *pars basilaris* (basion – sphénobasion) et de *basis cranii* (basion – nasion) par

rapport au plan de Francfort (Oetteking, 1924). L'étude de cet angle permet une meilleure compréhension de la plasticité crânienne et des dynamiques de croissance cranio-faciale. Il est important de comparer des crânes ayant la même provenance pour que les différences d'angle basicrânien observées ne soient pas liées à l'origine ethnique (Cameron, 1927). L'âge est également un facteur à prendre en compte car l'angle basicrânien se ferme durant la croissance (Anderson & Popovich, 1983) et Leonetti et collaborateurs (1997) ont également trouvé que cet angle variait selon l'âge chez les sujets adultes. Notre échantillon inclut un enfant et un adolescent, tous deux classés dans le groupe des APo. Cependant, leur absence ou leur présence dans l'échantillon ne modifie pas les tendances observées pour la flexion basicrânienne.

Les résultats des 2B PLS sur les crânes ND confirment une corrélation entre les dimensions relatives de la voûte crânienne et l'architecture de la base : plus la voûte est relativement étroite et allongée, plus la base est étroite, le *foramen magnum* est incliné plus horizontalement par rapport au plan de Francfort, l'angle basicrânien s'ouvre et les fosses mandibulaires s'avancent avec le clivus (correspondant aux crânes boliviens), et réciproquement (correspondant aux crânes français). Ces résultats sont en accord avec les études soutenant une association entre la dolichocéphalie (se traduisant par une forme allongée et étroite du crâne, donc par un indice céphalique faible) et la brachycéphalie (se traduisant par une forme courte et large du crâne et donc par un indice céphalique élevé) avec une flexion basicrânienne respectivement plus ouverte ou plus fermée (Lavelle, 1979). En revanche, ils ne soutiennent pas ceux de Björk (1955), de Brondeau (2008) et de Guyot *et al.* (2006), qui ne trouvent pas de corrélation entre l'angle basicrânien et la largeur crânienne.

Les résultats des 2B PLS sur l'ensemble de l'échantillon confirment qu'il existe des corrélations entre la morphologie de la voûte induite par les déformations et l'architecture de la base crânienne. Plus la voûte est relativement étroite et allongée postérieurement et supérieurement, plus la base est étroite, dans une position plus inférieure, l'angle basicrânien ouvert et les fosses mandibulaires en position supérieure. Plus la voûte est basse, étroite et allongée postérieurement, plus la base est étroite, sa partie antérieure avancée, le clivus est plus supérieur et postérieur, et les fosses mandibulaires en position plus supérieure et postérieure, et réciproquement.

La déformation de la voûte crânienne a donc un impact sur la structure de la base et de la position des fosses mandibulaires. L'angle basicrânien et la position horizontale des fosses mandibulaires suivent les mêmes tendances corrélées à la morphologie de la voûte que pour les crânes ND de notre échantillon.

Les pressions sur la voûte crânienne provoquées par les appareils de déformations lors de la croissance crânienne induisent des altérations au niveau de la base dans des directions opposées entre les APe d'une part et les APo, C et T d'autre part, contrairement à ce qui était pensé précédemment (Mc Neill & Newton, 1965). Dans le cas de déformations artificielles, les contraintes exercées sur la voûte crânienne impliquent une orientation de la croissance du cerveau différente (verticale dans le cas des APe, plus ou moins oblique dans le cas des C, T et APo, voire couchée pour les crânes T) et donc une réponse de la croissance cranio-faciale différente.

4.2. Impacts sur l'articulation temporo-mandibulaire

Dans le groupe des crânes C, nos résultats suggèrent que les fosses mandibulaires sont en position antérieure par rapport à celles des ND, ce qui est accompagné d'une position plus antérieure du maxillaire. L'ensemble de l'appareil masticateur est donc plus avancé. Les fosses mandibulaires sont en position plus médiale que celles des crânes non déformés, ce qui est accompagné d'un maxillaire plus étroit.

Dans le groupe des T, nos résultats ne permettent pas d'interpréter clairement la position des fosses mandibulaires.

Dans le groupe des AP, la base interne a tendance à subir une rotation autour de la selle turcique vers l'arrière. La partie postérieure de la base interne se situe ainsi en position plus antérieure et inférieure, et les fosses mandibulaires également. Cette configuration peut être associée avec une malocclusion de type classe III (Figure 7) : la morphologie mandibulaire peut en effet être modifiée en compensation de la position des fosses mandibulaires, avec une fermeture de l'angle gonial et un aspect global de prognathisme (Delaire *et al.*, 1981 ; Proffit *et al.*, 2014). Cependant, les études sur les déformations crâniennes AP semblent indiquer que l'occlusion n'en est pas affectée (Jimenez *et al.*, 2012) ou est même améliorée (Cheverud &

Midkiff, 1992). Les fosses mandibulaires sont plus écartées que dans les crânes non déformés et elles le sont d'autant plus lorsque les crânes ont une voûte crânienne courte antéropostérieurement (notamment les APe), ce qui confirme les résultats de Cheverud et Midkiff (1992) et de Jimenez et collaborateurs (2012). Les fosses mandibulaires sont en position plus latérale que celles des crânes non déformés, ce qui est accompagné d'un maxillaire plus large. Cheverud et Midkiff (1992) avait trouvé que les condyles mandibulaires étaient plus écartés pour les crânes de type AP que pour les ceux non déformés, ce qui est en cohérence avec nos résultats sur l'écartement des fosses mandibulaires.

Des études ont suggéré que des sujets non déformés avec une base crânienne ouverte avaient des fosses mandibulaires plus en arrière et plus haut durant la croissance (Anderson & Popovich, 1983). Nos résultats des corrélations entre la voûte et la base crâniennes sur les ND ne permettent pas de conclure les mêmes corrélations pour des sujets adultes. Cela pourrait être dû à la différence populationnelle entre les crânes boliviens et français.

Björk (1955) avait trouvé que la position verticale et horizontale des fosses mandibulaires dépend de la rotation de la base crânienne, apportant ainsi un changement de position de la mandibule, ce que semblent conforter nos résultats par rapport à la position des fosses mandibulaires dans le groupe AP.

Ces résultats montrent que l'appareil masticateur est intégré avec la base *via* notamment l'articulation temporo-mandibulaire. L'écartement intercondyloire est reflété par l'écartement entre les deux fosses mandibulaires, qui est impacté par les changements structuraux de la base crânienne liés aux déformations.

4.3. Classification des types de déformations

L'une des raisons des désaccords entre les différentes études sur les effets des déformations crâniennes intentionnelles sur la base et la face du crâne est le type de classification utilisé. En effet, les types « oblique » et « vertical » de Moss (1958) ne peuvent pas être comparés à la classification binaire AP et C utilisés par la plupart des chercheurs (Antón, 1989 ; Cussenot *et al.*, 1992 ; Frieß & Baylac, 2003 ; McNeill & Newton, 1965). Frieß & Baylac (2003) émettent la remarque que le système de classification est souvent basé sur la séparation binaire basique des déformations crâniennes (AP et C), pour lesquelles peuvent être observées les

variantes « oblique » et « droit ». Notre étude prend en compte ces variantes pour le groupe AP puisque les deux variantes existaient au sein de ce groupe dans notre échantillon. La comparaison avec Moss (1958) reste cependant difficile puisque nous ignorons si ses types « vertical » et « oblique » regroupe tous les deux les deux types de crânes AP et C ou non. Mc Neil et Newton (1965) avaient supposé que le groupe « vertical » désignait les crânes AP et le groupe « oblique » les crânes C, mais Antón (1989) pensait au contraire qu'aucun des deux groupes n'était constitué uniquement de crânes C.

Dans notre étude, les ACP montrent que la variation de conformation le long des principales directions se chevauche entre les groupes *a priori*, ce qui illustre la difficulté de classer les déformations crâniennes intentionnelles. Les ACP intergroupe permettent de distinguer les groupes choisis préalablement. La classification retenue fonctionne statistiquement ; néanmoins, il est probable que ce ne soit pas la seule possible. Il n'est pas exclu qu'une partie des crânes amérindiens aient été catégorisés comme ND alors qu'ils sont légèrement déformés, car les déformations étaient courantes en Amérique du Sud et il est parfois difficile de détecter la déformation à l'œil nu (Frieß & Baylac, 2003). Dans un même groupe, les crânes peuvent avoir un degré de déformation différent en fonction de la période à laquelle l'appareil déformateur a commencé à être appliqué au nourrisson, de sa durée d'application et de son serrage. Dans un même groupe, l'orientation est également plus ou moins oblique ou verticale ; il n'y a donc pas de difficulté de classer les crânes de variante clairement verticale ou oblique mais il y en aura pour les formes intermédiaires. Enfin, l'échantillon n'est pas complètement homogène pour chaque type de déformation quant à la culture à laquelle appartenait chaque individu (Annexe 1). L'application des bandages ou des appareils déformants peut différer légèrement en fonction de la culture et de l'époque or nous possédons peu d'informations sur l'échantillon de crânes de cette étude. Les crânes boliviens ont été classés dans cette étude selon la classification AP/C et les crânes français ont formé un autre type, le type T, par leur provenance. Cependant, nous avons noté, par exemple, que le crâne bolivien numéro 5276 a une conformation similaire aux toulousains – le front fuyant, le neurocrâne allongé postérieurement – ce qui est visible dans les ACP intergroupe, puisqu'il se situe au sein du groupe T le long des trois premières composantes (Figures 24, 27, 28).

5. Conclusion

Cette étude est basée sur des méthodes de morphométrie géométrique tridimensionnelle, permettant de comparer les conformations externes et internes de crânes déformés et non déformés dans le but de comprendre les effets de la DAC sur la base, et notamment sa flexion, et sur l'appareil masticateur au niveau des fosses glénoïdes.

Les résultats des analyses effectuées dans ce mémoire permettent de confirmer que les DAC ont un impact sur la base et que cet impact est différent selon le type de déformation : les crânes de type AP ont une base plus courte, plus large et en position plus supérieure que celle des ND, et les crânes de types C et T ont une base moins large par rapport celle des ND. Nos résultats sur l'angle basicrânien suggèrent que l'impact sur cet angle est différent entre d'une part les groupes de crânes APo, C et T, pour lesquels une tendance à la platybasie est observée, et d'autre part le groupe de crânes APe, pour lequel une tendance la cyphose est observée. Cela suggère qu'une distinction entre les variantes droite et oblique au sein des AP est peut-être nécessaire afin que les chercheurs soient en accord sur la question de l'angle basicrânien.

Nos résultats suggèrent également que la DAC a un impact sur l'articulation temporo-mandibulaire et sur le maxillaire et que cet impact est différent selon le type de déformation. En effet, comparés aux ND, les AP ont un maxillaire plus large, ils ont un plus grand écart entre les fosses mandibulaires et leur position est plus inférieure et antérieure, cette dernière étant probablement due à la rotation de la base interne. Par rapport aux ND, les C ont un maxillaire plus étroit, un écartement plus petit entre les fosses mandibulaires et leur position est plus antérieure. Cela suggère que l'appareil masticateur est intégré avec la base *via* notamment l'articulation temporo-mandibulaire.

Les résultats des analyses de corrélations entre la voûte crânienne et la base montrent que la corrélation est significative pour l'ensemble de l'échantillon et pour tous les groupes isolément sauf les crânes toulousains, pour lesquels le nombre d'individus était limité. Une voûte plus allongée et plus étroite est associée à une ouverture de l'angle basicrânien, à une base plus étroite et à un écartement entre les fosses mandibulaire plus petit.

Nos résultats confirment que la déformation artificielle sur la voûte crânienne affecte la base et suggère qu'elle affecte également l'appareil masticateur, via notamment l'articulation temporo-mandibulaire. Cela permet de mettre en évidence la plasticité avec laquelle le crâne humain réagit aux facteurs extrinsèques tels que la déformation artificielle et de mieux comprendre les corrélations entre des modules distincts du crâne, tels que la voûte crânienne, la base interne et l'appareil masticateur.

Notre étude est basée sur un échantillon est de petite taille ; une plus grande fiabilité des résultats pourrait être obtenue par des études subséquentes sur un échantillon de taille plus conséquente.

Références bibliographiques

Adams, D.C., & Otarola-Castillo, E. (2013). geomorph: an R package for the collection and analysis of geometric morphometric shape data. *Methods in Ecology and Evolution*, 4:393-399.

Allison, M. J., Gerszten, E., Munizaga, J., Santoro, C., & Focacci, G. (1981). La práctica de la deformación craneana entre los pueblos andinos precolombinos. *Chungara : Revista de Antropología Chilena* (7), 238-260.

Ampoulange, P., Lassort, L. A., & Ampoulange, A. (1953). Sépulture Néolithique dans un gisement du Paléolithique supérieur. *Bulletin de la Société préhistorique de France*, 50 (11/12), 613-624.

Anderson, D., & Popovich, F. (1982). Relation of cranial base flexure to cranial form and mandibular position. *American Journal of Physical Anthropology*, 61 (2), 181-187.

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*, 32 (6), 195-209.

Baab, K. L. (2013). The impact of superimposition choice in geometric morphometric approaches to morphological integration. *Journal of human evolution*, 65 (68), 689-692.

Badawi-Fayad, J., Yazbeck, C., Balzeau, A., Nguyen, T. H., Istoc, A., Grimaud-Hervé, D., & Cabanis, E. A. (2005). Multi-detector row CT scanning in Paleoanthropology at various tube current settings and scanning mode. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 27 (6), 536-543.

Balzeau, A., Grimaud-Hervé, D., & Gilissen, E. (2011). Where are inion and endinion? Variations of the exo-and endocranial morphology of the occipital bone during hominin evolution. *Journal of human evolution*, 61 (4), 488-502.

Bastir, M., Rosas, A., & Kuroe, K. (2004). Petrosal orientation and mandibular ramus breadth: Evidence for an integrated petroso-mandibular developmental unit. *American Journal of Physical Anthropology*, 123 (4), 340-350.

Baudouin, M. (1912). Description anatomique des neuf crânes de la station gallo-romaine des Chiumes, en Saint-Hilaire-De-Riez (Vendée). *Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris*, 3 (5), 321-346.

Björk, A. (1955). Cranial base development: a follow-up x-ray study of the individual variation in growth occurring between the ages of 12 and 20 years and its relation to brain case and face development. *American Journal of Orthodontics*, 41 (3), 198-225.

Blackwood, B., & Danby, P. (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.

Bories, J. (1996). *Le crâne humain: ostéologie-anatomie radiologique*. Paris : Springer Science & Business Media.

Broca, P. (1875). *Instructions craniologiques et craniométriques*. Paris : G. Masson.

Broca, P. (1871). Sur la déformation toulousaine du crâne. *Bulletins de la Société d'anthropologie de Paris*, 6, 100-131.

Brown, P. (1981). Artificial cranial deformation: a component in the variation in Pleistocene Australian Aboriginal crania. *Archaeology in Oceania*, 16 (3), 156-167.

Cameron, J. (1927). The main angle of cranial flexion (the nasion-pituitary-basion angle). *American Journal of Physical Anthropology*, 10 (2), 275-279.

Casas, B. d. (1892). *De las antiguas gentes del Perú*. Madrid: Manuel G. Hernandes.

Castellanos, J. d. (1886). *Historia del nuevo reino de Granada*. Madrid: A. Pérez Dubrull.

- Cech, M., Groves, C. P., Thorne, A., & Trinkaus, E. (1999). A new reconstruction of the Shanidar 5 cranium. *Paléorient*, 25 (2), 143-146.
- Cheverud, J. M. (1982). Phenotypic, genetic, and environmental morphological integration in the cranium. *Evolution*, 36 (3), 499-516.
- 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.
- 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.
- Cieza de León, P. d. (1922). *La crónica del Perú*. Madrid : Calpe.
- 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.
- 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.
- Couette, S., & White, J. (2010). 3D geometric morphometrics and missing-data. Can extant taxa give clues for the analysis of fossil primates? *Comptes Rendus Palevol*, 9 (6), 423-433.
- Cox, J., Jackson, A. P., Bond, J., & Woods, C. G. (2006). What primary microcephaly can tell us about brain growth. *Trends in molecular medicine*, 12 (8), 358-366.
- Crubézy, E. (1990). 12 Merovingian skull deformations in the southwest of France. In D. Austin, & L. Alcock, *From the Baltic to the Black Sea: Studies in Medieval Archaeology* (pp. 189-208). Londres : Unwin Hyman.

Cussenot, O., Da Silva, M. P., & Martin-Bouyer, Y. (1992). Modifications of the skull base in artificial deformations of the circumference of the head. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 14 (1), 43-50.

de Acuña, C., Arellano, I., Borque, J. M., & Santonja, G. (2009). *Nuevo descubrimiento del gran río de las Amazonas*. Madrid : Iberoamericana Editorial.

de Brondeau, F. (2008). *La morphologie de la base du crâne et ses relations avec le maxillaire et la mandibule: variations et auxologie*. Thèse, Université Bordeaux 1, Talence.

de la Cruz, L. (1900). *Nuevo descubrimiento del rio de Maranon llamado de las Amazonas*. Madrid : La Irradiacion.

de Landa, D. (2011). *Relación de las cosas de Yucatán*. Barcelone: Linkgua digital.

Decorse, J. (1905). Le tatouage: les mutilations ethniques et la parure chez les populations du Soudan. *L'Anthropologie*, 16, 9-147.

Delaire, J., Schendel, S. A., & Tulasne, J. F. (1981). An architectural and structural craniofacial analysis: a new lateral cephalometric analysis. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 52 (3), 226-238.

Delisle, F. (1902). Les déformations artificielles du crâne en France. Carte de leur distribution. *Bulletins de la Société d'anthropologie de Paris*, 3, 111-167.

Delisle, F. (1889). Sur les déformations artificielles du crâne dans les Deux-Sèvres et la Haute-Garonne. *Bulletins de la Société d'anthropologie de Paris*, 12, 649-669.

Dembo, A., & Imbelloni, J. (1938). *Deformaciones intencionales del cuerpo humano de carácter étnico* (Vol. 3). Buenos Aires : J. Anesi.

Dhopatkar, A., Bhatia, S., & Rock, P. (2002). An Investigation Into the Relationship Between the Cranial Base Angle and Malocclusion. *The Angle Orthodontist*, 72 (5), 456-463.

Dingwall, E. J. (1931). *Artificial cranial deformation*. Londres : John Bale, Sons & Danielsson, Ltd.

Dryden, I. L. (2016). shapes: Statistical Shape Analysis. R package version 1.1-13.
<https://CRAN.R-project.org/package=shapes>

Durband, A. C. (2008). Artificial cranial deformation in Pleistocene Australians: the Coobool Creek sample. *Journal of human evolution*, 54 (6), 795-813.

Durband, A. C. (2014). Brief communication: Artificial cranial modification in Kow Swamp and Cohuna. *American journal of physical anthropology*, 155 (1), 173-178.

Dutailly, B., Coqueugniot, H., Couture, C., Courtaud, P., Desbarats, P., Gueorguieva, S., & Synave, R. (2007). Imagerie médicale et patrimoine anthropologique: vers un contrôle total de la chaîne des traitements dans l'analyse morphométrique tridimensionnelle. *VRARV'07, Virtual Retrospect, Archéologie et Réalité Virtuelle*, 45-51.

Ellenberger, H. F. (1980). Mutilations corporelles infligées aux femmes: étude victimologique. *Criminologie*, 13 (1), 80-93.

Falkenburger, F. (1938). Recherches anthropologiques sur la déformation artificielle du crâne. *Journal de la Société des Américanistes*, 30 (1), 1-70.

FitzSimmons, E., Prost, J. H., & Peniston, S. (1998). Infant head molding: a cultural practice. *Archives of family medicine*, 7 (1), 88-90.

Foville, A. (1834). *Déformation du crâne résultant de la méthode la plus générale de couvrir la tête des enfans : Influence des vêtements sur nos organes*. Paris : Madame Prevost-Crocuis éditeur.

Friess, M. (2010). Calvarial shape variation among Middle Pleistocene hominins: an application of surface scanning in palaeoanthropology. *Comptes Rendus Palevol*, 9 (6), 435-443.

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. *American Journal of Physical Anthropology*, 122 (1), 11-22.

Gélis, J. (1984). Refaire le corps: Les déformations volontaires du corps de l'enfant à la naissance. *Ethnologie française*, 14 (1), 7-28.

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.

Gosse, L. A. (1855). *Essai sur les déformations artificielles du crane*. Paris : J.-B. Baillière.

Guyot, L., Richard, O., Adalian, P., Bartoli, C., Dutour, O., & Léonetti, G. (2006). An anthropometric study of relationships between the clival angle and craniofacial measurements in adult human skulls. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 28 (6), 559-563.

Hanzel, B. (1977). Les fluctuations du point sellaire (point S) et de l'angle sphénoïdal dans les déformations artificielles du crâne. *Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris*, 4 (4), 395-412.

Jabs, E. W., Müller, U., Li, X., Ma, L., Luo, W., Haworth, I. S., Klisak, I., Sparkes, R., Warman, M. L., Mulliken, J. B., Snead, M. L., & Maxson, R. (1993). A mutation in the homeodomain of the human MSX2 gene in a family affected with autosomal dominant craniosynostosis. *Cell*, 75 (3), 443-450.

Jiménez, P., Martínez-Insua, A., Franco-Vázquez, 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.

Joyce, T. A. (1912). *South American archaeology*. New York: G. P. Putnam's sons.

Kalender, W. A. (2011). *Computed tomography: fundamentals, system technology, image quality, applications*. Erlangen : Publicis.

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., Salagnac, J.M., Corre, P., Ohazama, A., Sharpe, P.T., Charlier, P., & Olszewski, R. (2013). Shape and Volume of Craniofacial Cavities in Intentional Skull Deformations. *American journal of physical anthropology*, 151(1), 110-119.

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.

Lagotala, H. (1921). Au sujet de quelques crânes déformés provenant du dolmen de Guiry (fouilles de A. de Mortillet). *Association Française pour l'avancement des Sciences. Congrès de Rouen* (pp. 784-787). Paris: Masson et Cie.

Lavelle, C. L. B. (1979). A study of craniofacial form. *The Angle orthodontist*, 49 (1), 65-72.

Léonetti, G., Signoli, M., Hershkovitz, I., Latimer, B., Tervé, J. P., Jellema, L., Cianfarani, F., & Dutour, O. (1997). Variation de l'angle sphénoïdal du crâne humain en fonction du vieillissement. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series III-Sciences de la Vie*, 320 (11), 943-947.

Lewis, M., & Clark, W. (1817). *Travels to the Source of the Missouri River and Across the American Continent to the Pacific Ocean: Performed by Order of the Government of the United States, in the Years, 1804, 1805, and 1806* (Vol. II). Londres: Longman, Hurst, Rees, Orme, and Brown.

Lieberman, D. E., Pearson, O. M., & Mowbray, K. M. (2000). Basicranial influence on overall cranial. *Journal of Human Evolution*, 38, 291–315.

Magitot, E. (1885). Essai sur les mutilations ethniques. *Bulletins de la Société d'anthropologie de Paris*, 8 (1), 21-25.

Martin, R., & Saller, K. (1957). *Lehrbuch der Anthropologie*. Stuttgart : G. Fischer.

Maureille, B., Castex, D., Depierre, G., & Bar, D. (1995). Les crânes déformés de Saint-Étienne (Beaune, Côte d'Or, Ve-VIe siècles). Données archéologiques et anthropologiques. *Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris*, 7 (1), 49-67.

May, R., & Sheffer, D. B. (1999). Growth changes in internal and craniofacial flexion measurements. *American journal of physical anthropology*, 110 (1), 47-56.

McGibbon, W. (1912). Artificially deformed skulls with special reference to the temporal bone and its tympanic portion. *The Laryngoscope*, 22 (10), 1165-1181.

McNeill, R. W., & Newton, G. N. (1965). Cranial base morphology in association with intentional cranial vault deformation. *American journal of physical anthropology*, 23 (3), 241-253.

Meiklejohn, C., Agelarakis, A., Akkermans, P., Smith, P., & Solecki, R. (1992). Artificial cranial deformation in the Proto-Neolithic and Neolithic Near East and its possible origin: evidence from four sites. *Paléorient*, 18 (2), 83-97.

Molnár, M., János, I., Szűcs, L., & Szathmáry, L. (2014). Artificially deformed crania from the Hun-Germanic Period (5th–6th century AD) in northeastern Hungary: historical and morphological analysis. *Neurosurgical focus*, 36 (4), 1-9.

Morton, S. G. (1839). *Crania Americana: or a comparative view of the skulls of various aboriginal nations of North and South America*. Paris : J.-B. Baillière.

Moss, M. L. (1958). The pathogenesis of artificial cranial deformation. *American Journal of Physical Anthropology*, 16 (3), 269-286.

Munizaga, J. R. (1987). Deformación craneana intencional en América. *Revista Chilena de Antropología* (6), 113-147.

Navarrete, M. F. (1828). *Relations des quatre voyages entrepris par Christophe Colomb pour la découverte du Nouveau Monde de 1492 à 1504*. Paris : Treuttel et Wurtz.

Needham, A. E. (1950). The form-transformation of the abdomen of the female pea-crab, *Pinnotheres pisum* Leach. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 137 (886), 115-136.

Neumann, G. K. (1942). Types of Artificial Cranial Deformation in the Eastern United States. *American Antiquity*, 7 (3), 306-310.

Oetteking, B. (1924). *Oetteking, B. (1924). Declination of the pars basilaris in normal and in artificially deformed skulls (No. 25-27)*. New York: Museum of the American Indian, Heye Foundation.

Özbek, M. (1974b). A propos des déformations crâniennes artificielles observées au Proche-Orient. *Paléorient*, 2 (2), 469-476.

Özbek, M. (1974a). Étude de la déformation crânienne artificielle chez les. *Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris*, 1 (4), 455-481.

Pereira da Silva, M. A., & Cussenot, O. (1989). Mise en évidence de la déformation toulousaine du crâne au Moyen Age. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 3, Sciences de la vie*, 309 (2), 49-52.

Pereira da Silva, M. A., Cussenot, O., & Williams, M. (1990). Etude biométrique et radiologique de trois crânes «toulousains» du bas moyen âge. *Cahiers d'anthropologie et biométrie humaine*, 8 (1-2), 185-197.

Pereira Da Silva, M., & Sakka, M. (1980). Plasticité du crâne et déformations crâniennes (préhistoire bolivienne). In M. Sakka, *Morphologie évolutive, morphogenèse du crâne et origine de l'homme* (pp. 125-130). Paris: Editions du CNRS.

Pereira, M., Ricart-Guerrero, N., Audoin, F., & Renimel, S. (1984). Description et interprétation d'une calotte crânienne déformée du gisement de la Charité-sur-Loire (Nièvre). *Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris*, 1 (4), 315-331.

Peyre, E., & Carré, H. (1989). Une déformation artificielle originale du crâne au néolithique en France. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 3, Sciences de la vie*, 309 (8), 309-312.

Pickering, C. (1848). *The races of man and their geographical distribution* (Vol. IX). Boston: Little and Brown.

Proffit, W. R., Fields, H. W., & Sarver, D. M. (2014). *Contemporary orthodontics*. Saint-Louis: Elsevier.

R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

Regnault, F. (1900). L'Evolution du costume (17e conférence transformiste). *Bulletins de la Société d'anthropologie de Paris*, 1 (1), 329-344.

Ricci, F., Fornai, C., Blos, V. T., Rickards, O., Di Lernia, S., & Manzi, S. (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.

Rouers, B. (2008). Les marques corporelles des sociétés traditionnelles: un éclairage pour les pratiques contemporaines. *Psychotropes*, 14 (2), 23-45.

Scaliger, J.-C. (1566). *Commentaria Theophrasti*. Genève.

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.

Schlager, S. (2016). Morpho: Calculations and Visualisations Related to Geometric Morphometrics. R package version 2.3.1.1. <https://CRAN.R-project.org/package=Morpho>

Semal, P., Toussaint, M., Maureille, B., Rougier, H., Crevecoeur, I., Balzeau, A., Bouchneb, L., Louryan, S., De Clerk, N., & Rausin, L. (2005). Numérisation des restes humains néandertaliens belges. Préservation patrimoniale et exploitation scientifique. *Notae praehistoricae*, 25, 25-38.

Simon, C. (1979). La déformation crânienne artificielle de la nécropole de Sézegnin GE. *Archéologie suisse*, 2 (4), 186-188.

Simonis-Sueur, C. (2006). *Morphométrie géométrique appliquée à la compréhension de la variabilité craniofaciale des Homo sapiens adultes*. Thèse, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris.

Slice, D. E. (2006). *Modern morphometrics in physical anthropology*. New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers.

Soto-Heim, P. (1986). Déformation crânienne dans l'Iran ancien. *Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris*, 3 (2), 105-116.

Spieser, C., & Sprumont, P. (2004). La construction de l'image du corps de l'élite égyptienne à l'époque amarnienne. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 16 (3-4), 167-185.

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.

Tiesler, V. (2012). Studying cranial vault modifications in ancient Mesoamerica. *Journal of Anthropological Sciences*, 90, 33-58.

Tiesler, V. (2013). *The bioarchaeology of artificial cranial modifications: New approaches to head shaping and its meanings in Pre-Columbian Mesoamerica and beyond*. (Vol. 7). New York : Springer Science & Business Media.

Trinkaus, E. (1982). Artificial cranial deformation in the Shanidar 1 and 5 Neandertals. *Current Anthropology Chicago*, 23 (2), 198-199.

Tritsaroli, P. (2011). Artificial cranial modification on a female skeleton from the Byzantine site of Maroneia (Thrace, Greece). *International Journal of Osteoarchaeology*, 21 (4), 464-478.

Ulrich, H. (1957). Trois crânes artificiellement déformés du Bas-Rhin. *Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris*, 8 (5), 276-283.

Verneau, M. R. (1927). A propos de la déformation artificielle du crâne chez les Mombouttous de l'Ouellé. *Bulletin du Muséum national d'Histoire naturelle*, 33 (4), 287-300.

Vernet, O., Rilliet, B., Kalina, D., & Cavin, B. (2003). Craniosynostoses et déformations crâniennes positionnelles: aspects diagnostiques et implications thérapeutiques: Neurologie et neurochirurgie pédiatrique. *Revue médicale de la Suisse Romande*, 123 (9), 555-561.

Vyslozil, O., Slavicek, R., & Slavizek, R. (2000). Vyslozil, O., Slavicek, R., & Slavizek, R. (2000). Vergleichsuntersuchung an künstlich deformierten und undeformierten Schädeln. *Annalen des Naturhistorischen Museums in Wien. Serie A für Mineralogie und Petrographie, Geologie und Paläontologie, Anthropologie und Prähistorie*, 245-274.

Woods, C. G., Bond, J., & Enard, W. (2005). Autosomal recessive primary microcephaly (MCPH): a review of clinical, molecular, and evolutionary findings. *The American Journal of Human Genetics*, 76 (5), 717-728.

Zagourski, K. O. (2001). *L'Afrique disparue*. Paris: Skira/Seuil.

Zhang, J., Williams, M. A., & Rigamonti, D. (2006). Genetics of human hydrocephalus. *Journal of neurology*, 253 (10), 1255-1266.

Annexes

Annexe 1 : Tableau des informations relatifs aux crânes de l'échantillon de cette étude, soient le type de déformation, l'origine et la date d'entrée en collection au MH.

Numero	Déformation	Origine du crâne	Date d'entrée en collection
390	T	Lozère, Seine-et-Oise (France)	1854
5268	C	Aymara ancien de Tiahuanaco (Bolivie)	1879
5269	C	Aymara ancien de Tiahuanaco (Bolivie)	1879
5271	C	Aymara ancien de Tiahuanaco (Bolivie)	1879
5273	C	Aymara ancien de Tiahuanaco (Bolivie)	1879
5276	C	Aymara ancien de Tiahuanaco (Bolivie)	1879
5285	C	Aymara ancien d'Huaqui (Bolivie)	1879
5291	C	Aymara ancien de Chililaya (Bolivie)	1879
5295	C	Aymara ancien d'Ancon (bas Pérou)	1879
5299	ND	Aymara moderne de La Paz (Bolivie)	1879
17058	ND	Sauveterre, Lozère	1900
17060	ND	Sauveterre, Lozère	1900
17069	ND	Sauveterre, Lozère	1900
17070	ND	Sauveterre, Lozère	1900
17113	ND	Sauveterre, Lozère	1900
17327	ND	Indien Chamacoco provenant de Puerto 14 de Mayo, Chaco Boréal (Bolivie)	1904
18169	APo	indien de Caleria, Bolivie	1911
18179	APo	indien de Caleria, Bolivie	1911
18197	ND	Asnapujio (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18201	APe	Asnapujio (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18213	ND	Asnapujio (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18221	APe	Asnapujio (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18223	APe	Asnapujio (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18224	APe	Asnapujio (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18229	APe	Asnapujio (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18230	APe	Asnapujio (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18231	APe	Asnapujio (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18232	APe	Asnapujio (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18234	APe	Tocarji (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18240	APo	Tocarji (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18243	APe	Tocarji (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18253	ND	Tocarji (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18259	ND	Tocarji (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18285	ND	Tocarji (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18342	ND	Tocarji (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18372	APo	Rio Panagua (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18381	APo	Rio Panagua (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911

18383	APo	Rio Panagua (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18387	APo	Rio Panagua (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18389	APo	Rio Panagua (Sud-Ouest de la Bolivie)	1911
18408	APe	Visciza (Bolivie)	1911
18430	ND	Tiahuanaco (Bolivie)	1911
18433	ND	Tiahuanaco (Bolivie)	1911
18538	C	indien Urcos de Calacoto (Bolivie)	1914
18540	C	Tiahuanaco (Bolivie)	1914
20787	T	France	1890
20788	T	France	1890
20789	T	Toulouse (France)	1890
20790	T	France	1890
28923	T	France	2002
28927	T	Catcatas	2002

Annexe 2 : Analyse en composantes principales des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes avec les trois crânes obtenus à partir des 170 et 550 coupes sur les CP 3 à 10.

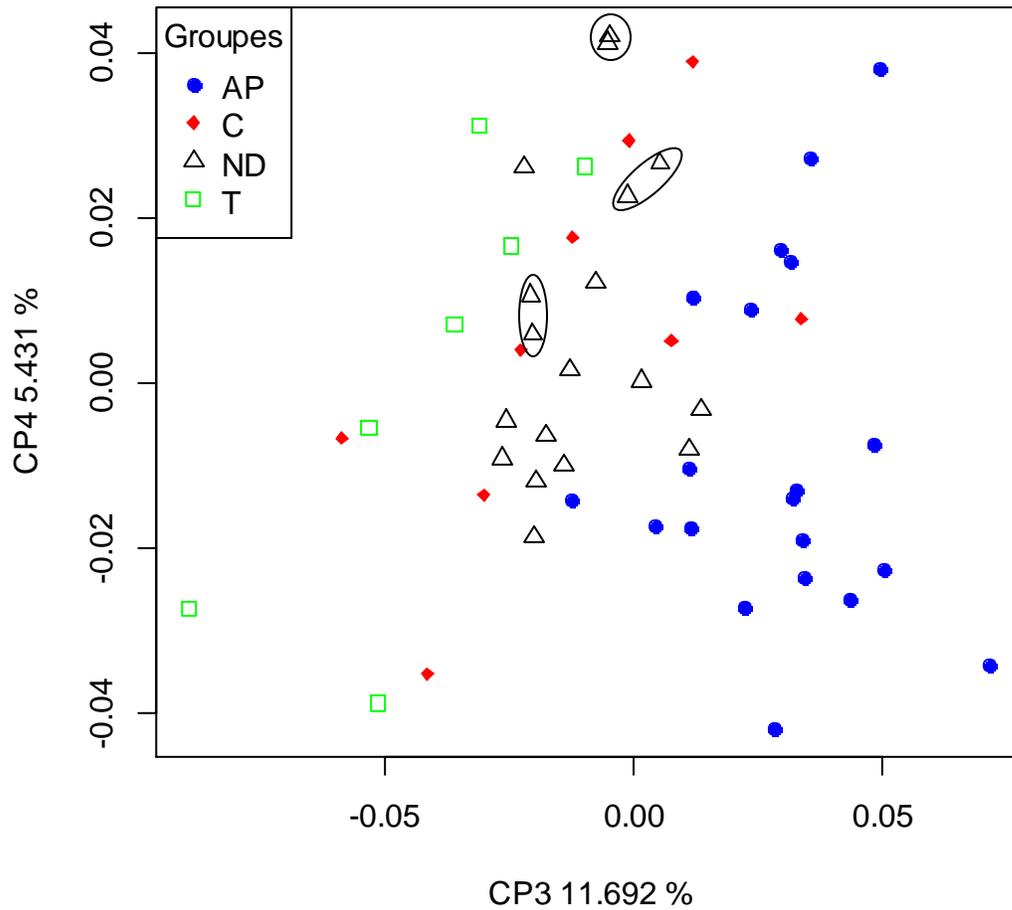


Figure A1 : Analyse en composantes principales des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes avec les trois crânes obtenus à partir des 170 et 550 coupes (entourés par une ellipse) : CP3 vs. CP4.

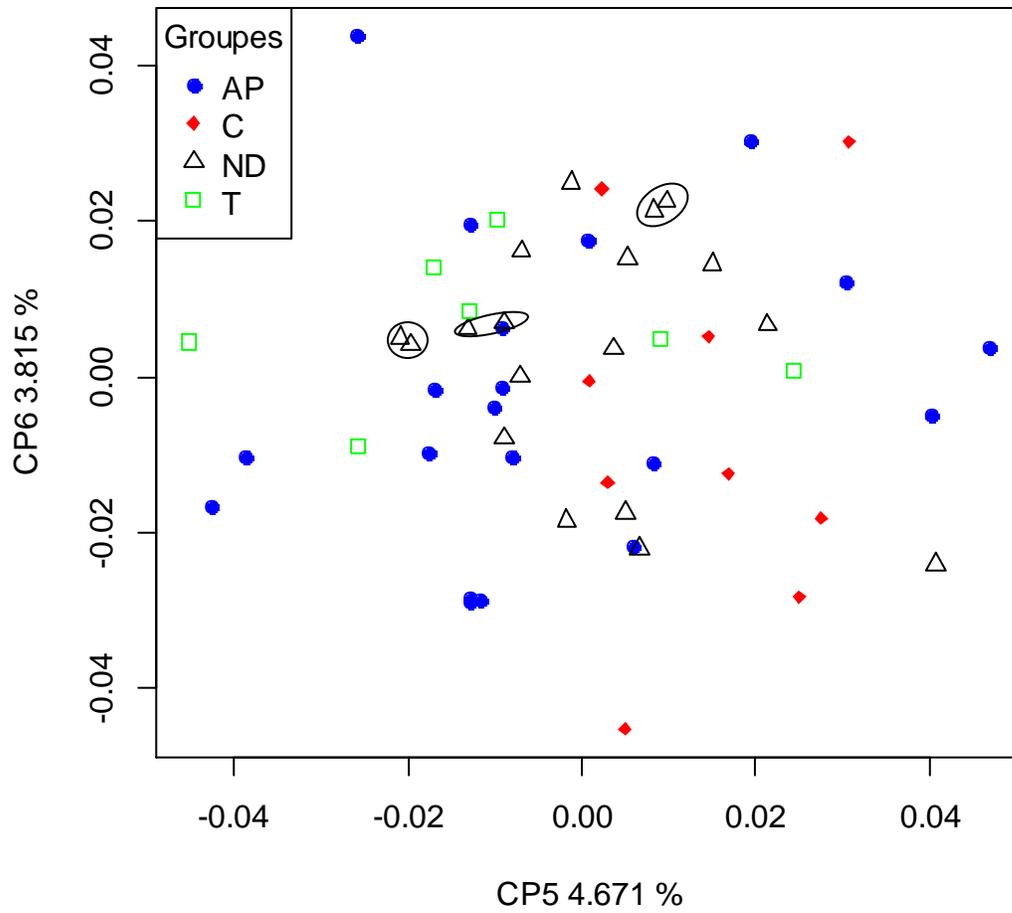


Figure A2 : Analyse en composantes principales des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes avec les trois crânes obtenus à partir des 170 et 550 coupes (entourés par une ellipse) : CP5 vs. CP6.

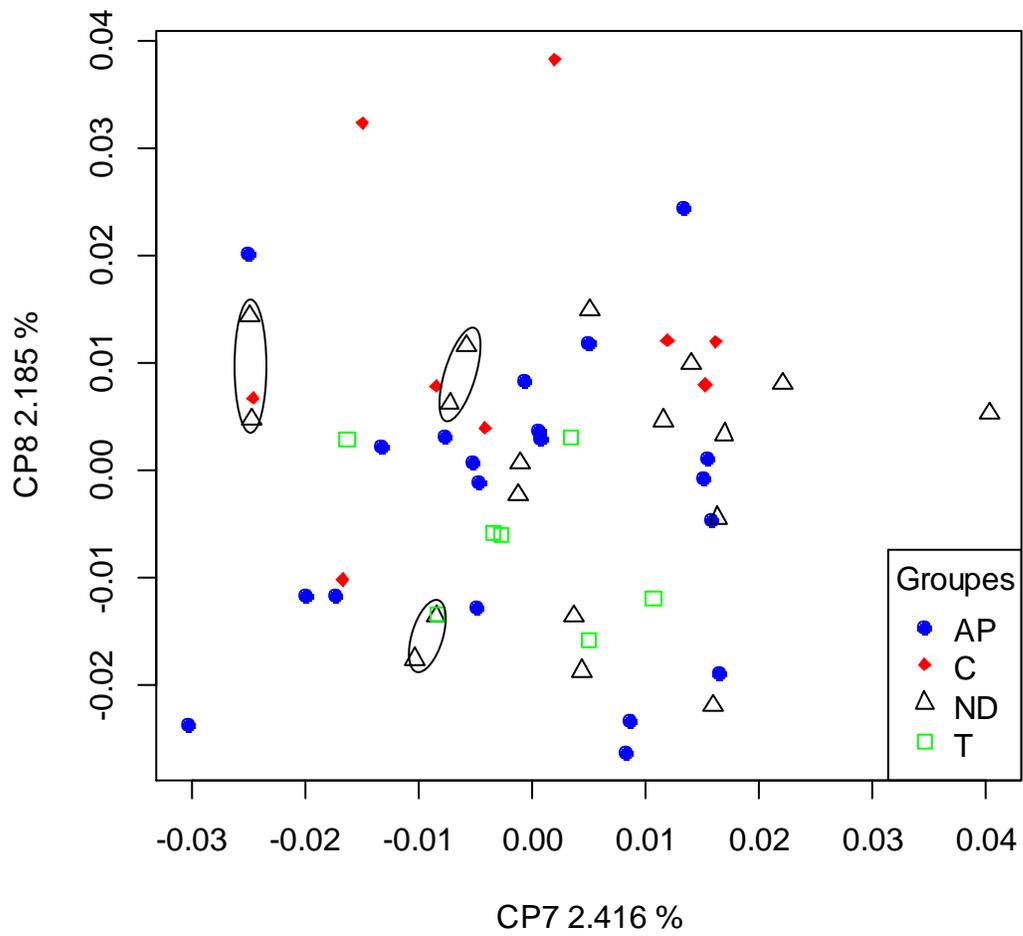


Figure A3 : Analyse en composantes principales des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes avec les trois crânes obtenus à partir des 170 et 550 coupes (entourés par une ellipse) : CP7 vs. CP8.

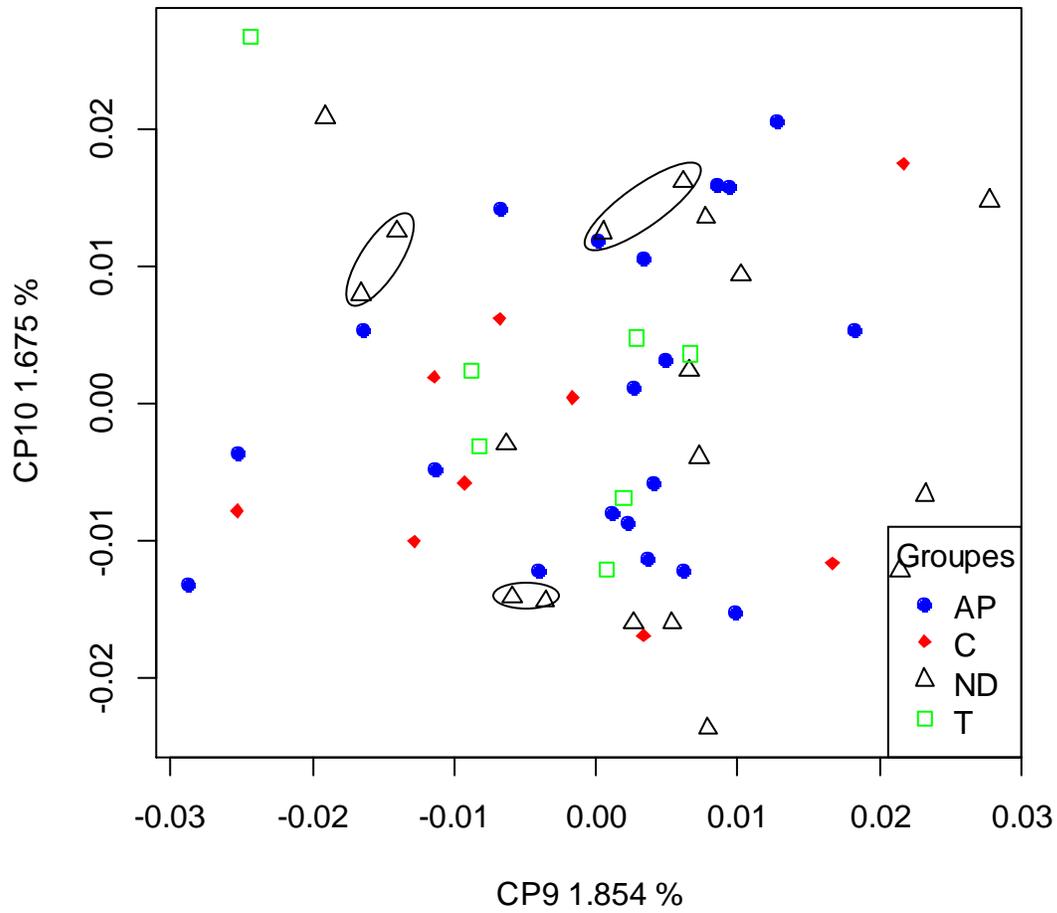


Figure A4 : Analyse en composantes principales des résidus de la superposition Procrustes sur l'échantillon total des crânes avec les trois crânes obtenus à partir des 170 et 550 coupes (entourés par une ellipse) : CP9 vs. CP10.

Annexe 3 : Analyse 2B PLS 2 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur les AP.

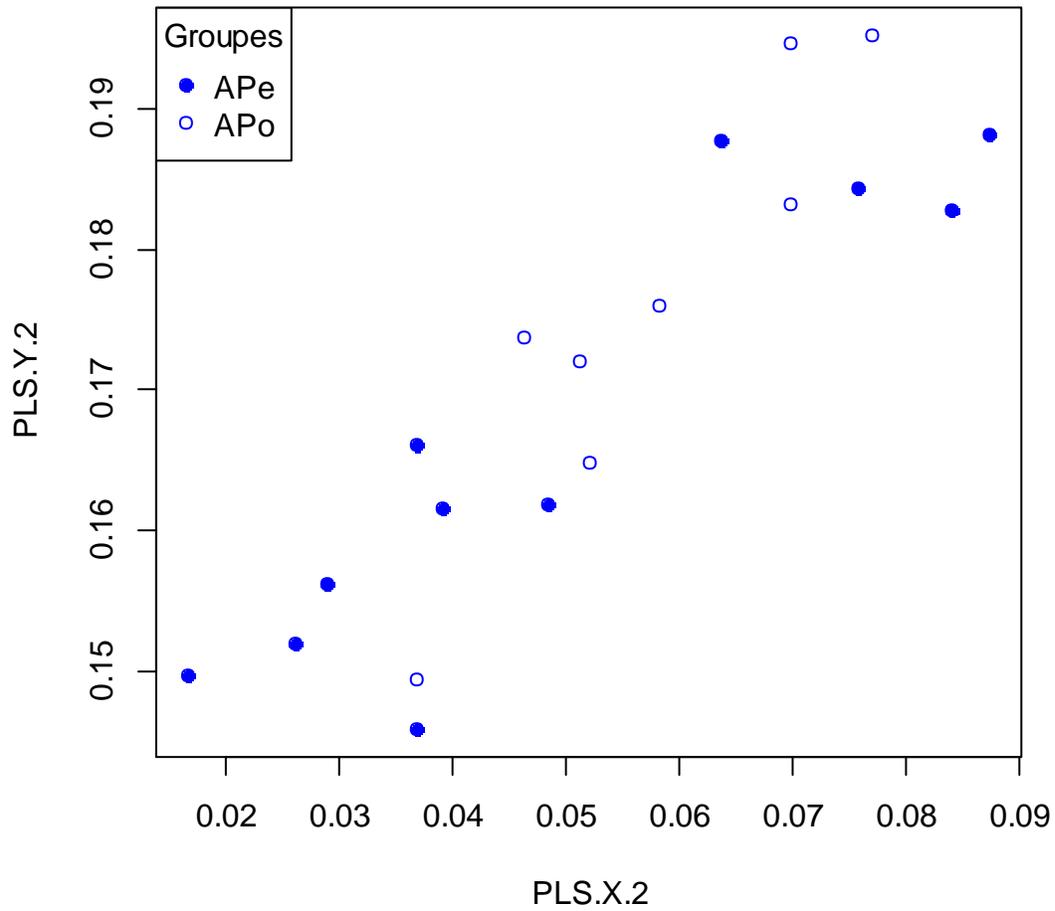


Figure A5 : Analyse 2B PLS 2 entre la voûte crânienne (en abscisse) et la base (en ordonnée) sur les AP.

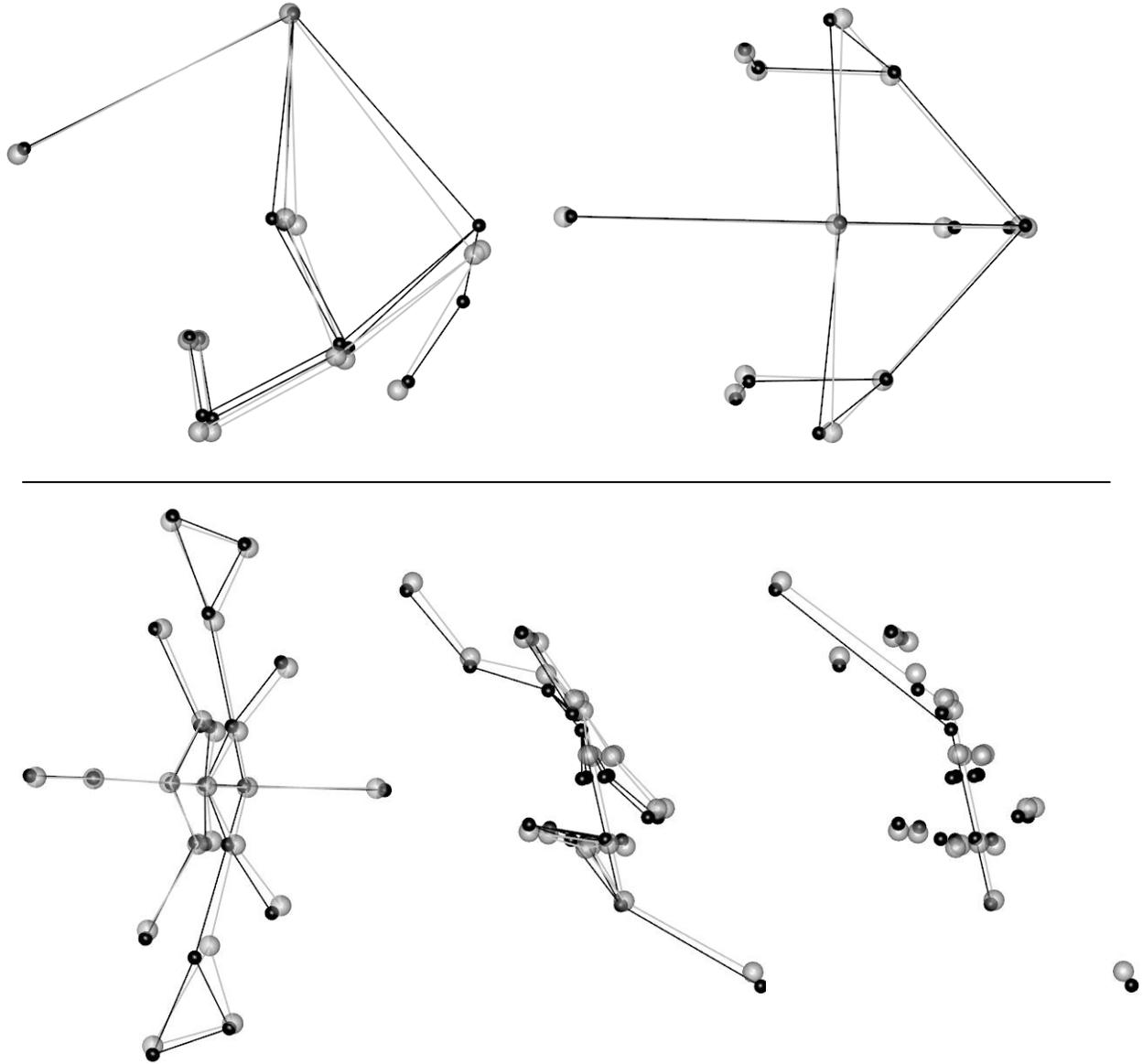


Figure A6 : Changements de conformations pour la 2B PLS 2 sur les crânes AP (ligne noir = vers les valeurs positives, ligne grise = vers les valeurs négatives). En haut, vue de la voûte ; en bas vue de la base et de l'angle basicrânien.