



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par : Marie Faruch Bilfeld

le 7 juillet 2015

Titre :

Etude du dimorphisme sexuel de l'os coxal immature en
morphométrie géométrique par une analyse de 400 examens
tomodensitométriques

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED BSB: Anthropobiologie

Unité de recherche :

Laboratoire d'Anthropologie AMIS UMR 5288 CNRS

Directeur/trice(s) de Thèse :

Monsieur le Professeur Norbert Telmon

Monsieur le Docteur Fabrice Dedouit

Jury :

Monsieur le Professeur Alain Blum
Monsieur le Professeur Gérard Quatrehomme
Monsieur le Professeur Nicolas Sans
Monsieur le Docteur Olivier Naggara

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur

Aux membres du jury,

Monsieur le Professeur Norbert Telmon,

Vous avez accepté de me confier ce travail. Vous m'avez conseillée et guidée avec bienveillance. Votre humanisme et votre activité de recherche sont un exemple pour moi. Je vous prie de trouver ici l'expression de ma gratitude et de mon profond respect.

Monsieur le Professeur Nicolas Sans

Votre enseignement et votre exercice de la radiologie ont non seulement guidé et éclairé mes premiers pas, mais aussi ont ouvert et aiguisé ma curiosité et mon intérêt pour cette discipline. Vous avez bien voulu m'honorée de votre confiance. Soyez assuré de ma reconnaissance, de ma gratitude, et de mon plus profond respect.

Monsieur le Professeur Alain Blum

Vous me faites l'honneur d'accepter de juger ce travail. Je vous remercie pour la qualité de votre écoute, de votre bienveillance et vos précieux conseils. Veuillez trouver ici l'expression de mon profond respect.

Monsieur le Professeur Gérard Quatrehomme

Je vous remercie de siéger à ce jury et de nous apporter votre expérience pour juger ce travail.

Monsieur le Docteur Fabrice Dedouit

Au delà de notre rencontre dans cette discipline que nous partageons, de ton écoute et de ta disponibilité, sois assuré que notre amitié m'est précieuse.

Monsieur le Docteur Olivier Naggara

Je vous remercie de votre présence et de me faire l'honneur de juger ce travail.

A Monsieur le Professeur Jean Jacques Railhac

A Maurice

A Elie et Simon

A mon père,

A ma mère,

A mon frère,

A mes grands parents,

A ma famille

Table des matières

1	Introduction.....	10
2	Préambule	11
2.1	La géométrie Morphométrique	11
2.1.1	Historique.....	11
2.1.2	Principe.....	13
2.1.3	Méthode.....	16
2.1.4	Analyse statistique.....	19
2.2	La diagnose sexuelle de l'os coxal	24
2.2.1	Le dimorphisme sexuel de l'os coxal	24
2.2.2	Les méthodes traditionnelles d'estimation du sexe à partir du coxal.....	24
2.2.3	Les méthodes récentes	27
2.2.4	Les méthodes utilisant la géométrie morphométrique	27
2.3	La problématique de l'enfant.....	29
3	Matériel et Méthode	32
3.1	Matériel	32
3.2	Méthode.....	33
3.2.1	Recueil des données.....	33
3.2.2	Morphométrie géométriqueet analyse statistique	40
4	Résultats	47
4.1	Les tests de reproductibilité	47
4.2	La constitution des groupes d'âge	49
4.3	Le dimorphisme sexuel de conformation	50

4.3.1	La conformation selon l'âge et le sexe.....	50
4.3.2	Le dimorphisme sexuel de conformation : étude par âge	53
4.3.3	Evaluation des changements de conformation au cours du temps.....	56
4.4	Localisations anatomiques du dimorphisme	60
4.5	Le dimorphisme sexuel de taille	75
4.5.1	La taille selon l'âge et le sexe.....	75
4.5.2	Evaluation des changements de taille au cours du temps.....	77
4.6	Ontogénie du coxal.....	79
4.6.1	Les variations intra-sexe.....	79
4.6.2	Les variations inter sexe	112
4.7	Synthèse des résultats.....	117
4.7.1	Le dimorphisme sexuel de conformation analyse à partir des résidus Procrustes	117
4.7.2	Le dimorphisme sexuel de conformation analyse à partir de la taille centroïde	120
4.7.3	L'ontogénie du coxal	121
5	Discussion.....	125
5.1	Choix de la méthode	125
5.1.1	Apports de la géométrie morphométrique	125
5.1.2	Avantages de l'exploitation de données tomodynamométriques	127
5.1.3	Le choix des landmarks	128
5.2	Analyse des résultats	130
5.3	La diagnose sexuelle à partir du coxal immature	138
6	Conclusion	139

Sommaire des figures

Figure 2-1 De A à D : étapes de l'Analyse Procrustes Généralisée (AGP), suppression des différences de formes autres que la différence due à la conformation. A. les deux configurations originales ; B. après suppression des différences de positionnement ; C. après suppression des différences d'échelle ; D. après suppression des différences d'orientation.	19
Figure 3-1 Schéma d'un os coxal gauche immature sur lequel sont figurés les 17 landmarks.....	37
Figure 3-2 Recueil des données. A. Positionnement des points repères sur les coupes axiales ou sur les reconstructions MPR. B. Reconstruction 3D-VRT. C. Enregistrement des coordonnées des points repères.	40
Figure 3-3 Représentation de chaque matrice osseuse sur une reconstruction VRT.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 4-1 Evolution des distances Procrustes des consensus des matrices osseuses du coxal des individus masculins (courbe bleue) et des individus féminins (courbe rouge) au cours du temps.	57
Figure 4-2 Evolution des distances Procrustes des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins (courbe bleue) et des individus féminins (courbe rouge) au cours du temps.	58
Figure 4-3 Evolution des distances Procrustes des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins (courbe bleue) et des individus féminins (courbe rouge) au cours du temps.	59
Figure 4-4 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de moins de 1 an (F00 M00).....	60
Figure 4-5 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 1 et 2 ans (F01-02 M01-02).....	61
Figure 4-6 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 3 et 4 ans (F03-04 M03-04).....	61
Figure 4-7 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 5 et 6 ans (F05-06 M05-06).....	62
Figure 4-8 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de moins de 7 et 8 ans (F07-08 M07-08).....	62
Figure 4-9 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de moins de 9 et 10 ans an (F09-10 M09-10)	63
Figure 4-10 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 11 et 12 ans (F11-12 M11-12).....	64
Figure 4-11 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 13 et 14 ans (F13-14 M13-14).....	64
Figure 4-12 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 15 et 16 ans (F15-16 M15-16).....	65
Figure 4-13 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 17 et 18 ans (F17-18 M17-18).....	65
Figure 4-14 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de moins de 1 an (F00 M00).....	66
Figure 4-15 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 1 et 2 ans (F01-02 M01-02).....	66
Figure 4-16 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 3 et 4 ans (F03-04 M03-04).....	67
Figure 4-17 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 5 et 6 ans (F05-06 M05-06).....	67

Figure 4-18 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 7 et 8 ans (F07-08 M07-08)	68
Figure 4-19 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 9 et 10 ans (F09-10 M09-10)	68
Figure 4-20 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 11 et 12 ans (F11-12 M11-12).....	69
Figure 4-21 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 13 et 14 ans (F13-14 M13-14).....	69
Figure 4-22 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 15 et 16 ans (F15-16 M15-16).....	70
Figure 4-23 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 17 et 18 ans (F17-18 M17-18).....	70
Figure 4-24 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de moins de 1 an (F00 M00).....	71
Figure 4-25 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 1 et 2 ans (F01-02 M01-02).....	71
Figure 4-26 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 3 et 4 ans (F03-04 M03-04).....	72
Figure 4-27 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 5 et 6 ans (F05-06 M05-06).....	72
Figure 4-28 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 7 et 8 ans (F07-08 M07-08).....	72
Figure 4-29 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 9 et 10 ans (F09-10 M09-10)	73
Figure 4-30 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 11 et 12 ans (F11-12 M11-12).....	73
Figure 4-31 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 13 et 14 ans (F13-14 M13-14).....	74
Figure 4-32 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 15 et 16 ans (F15-16 M15-16).....	74
Figure 4-33 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 17 et 18 ans (F17-18 M17-18).....	74
Figure 4-34 Evolution des tailles centroïdes des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins (trait plein) et des individus féminins (pointillés) au cours du temps.	78
Figure 4-35 Evolution des tailles centroïdes des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins (trait plein) et des individus féminins (pointillés) au cours du temps.	79
Figure 4-36 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins de moins de 1 an F00-00 (pointillés) et des individus féminins âgés de 1 à 2 ans F01-02 (trait plein).....	82
Figure 4-37 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 1 à 2 ans F01-02 (pointillés) et des individus féminins âgés de 3 à 4 ans F03-04 (trait plein).....	82
Figure 4-38 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 3 à 4 ans F03-04 (pointillés) et des individus féminins âgés de 5 à 6 ans F05-06 (trait plein).....	83
Figure 4-39 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 5 à 6 ans F05-06 (pointillés) et des individus féminins âgés de 7 à 8 ans F07-08 (trait plein).....	83

Figure 4-40 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 7 à 8 ans F07-08 (pointillés) et des individus féminins âgés de 9 à 10 ans F09-10 (trait plein)	84
Figure 4-41 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 9 à 10 ans F09-10 (pointillés) et des individus féminins âgés de 11 à 12 ans F11-12 (trait plein).....	84
Figure 4-42 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 11 à 12 ans F11-12 (pointillés) et des individus féminins âgés de 13 à 14 ans F13-14 (trait plein).....	85
Figure 4-43 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 13 à 14 ans F13-14 (pointillés) et des individus féminins âgés de 15 à 16 ans F15-16 (trait plein)	85
Figure 4-44 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 15 à 16 ans F15-16 (pointillés) et des individus féminins âgés de 17 à 18 ans F17-18 (trait plein).....	86
Figure 4-45 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins de moins de 1 an M00-00 (pointillés) et des individus masculins âgés de 1 à 2 ans M01-02 (trait plein)	86
Figure 4-46 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 1 à 2 ans M01-02 (pointillés) et des individus masculins âgés de 3 à 4 ans M03-04 (trait plein).....	87
Figure 4-47 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 3 à 4 ans M03-04 (pointillés) et des individus masculins âgés de 5 à 6 ans M05-06 (trait plein).....	87
Figure 4-48 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 5 à 6 ans M05-06 (pointillés) et des individus masculins âgés de 7 à 8 ans M07-08 (trait plein).....	88
Figure 4-49 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 7 à 8 ans M07-08 (pointillés) et des individus masculins âgés de 9 à 10 ans M09-10 (trait plein)	88
Figure 4-50 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 9 à 10 ans M09-10 (pointillés) et des individus masculins âgés de 11 à 12 ans M11-12 (trait plein).....	89
Figure 4-51 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 11 à 12 ans M11-12 (pointillés) et des individus masculins âgés de 13 à 14 ans M13-14 (trait plein).....	89
Figure 4-52 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 13 à 14 ans M13-14 (pointillés) et des individus masculins âgés de 15 à 16 ans M15-16 (trait plein).....	90
Figure 4-53 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 15 à 16 ans M15-16 (pointillés) et des individus masculins âgés de 17 à 18 ans M17-18 (trait plein).....	90
Figure 4-54 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins de moins de 1 an F00-00 (pointillés) et des individus féminins âgés de 1 à 2 ans F01-02 (trait plein).....	94
Figure 4-55 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 1 à 2 ans F01-02 (pointillés) et des individus féminins âgés de 3 à 4 ans F03-04 (trait plein).....	94
Figure 4-56 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 3 à 4 ans F03-04 (pointillés) et des individus féminins âgés de 5 à 6 ans F05-06 (trait plein).....	95
Figure 4-57 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 5 à 6 ans F05-06 (pointillés) et des individus féminins âgés de 7 à 8 ans F07-08 (trait plein).....	95
Figure 4-58 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 7 à 8 ans F07-08 (pointillés) et des individus féminins âgés de 9 à 10 ans F09-10 (trait plein)	96
Figure 4-59 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 9 à 10 ans F09-10 (pointillés) et des individus féminins âgés de 11 à 12 ans F11-12 (trait plein)	96
Figure 4-60 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 11 à 12 ans F11-12 (pointillés) et des individus féminins âgés de 13 à 14 ans F13-14 (trait plein).....	97
Figure 4-61 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 13 à 14 ans F13-14 (pointillés) et des individus féminins âgés de 15 à 16 ans F15-16 (trait plein).....	97
Figure 4-62 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 15 à 16 ans F15-16 (pointillés) et des individus féminins âgés de 17 à 18 ans F17-18 (trait plein).....	98

Figure 4-63 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins de moins de 1 an M00-00 (pointillés) et des individus masculins âgés de 1 à 2 ans M01-02 (trait plein).....	98
Figure 4-64 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 1 à 2 ans M01-02 (pointillés) et des individus masculins âgés de 3 à 4 ans M03-04 (trait plein).....	99
Figure 4-65 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 3 à 4 ans M03-04 (pointillés) et des individus masculins âgés de 5 à 6 ans M05-06 (trait plein).....	99
Figure 4-66 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 5 à 6 ans M05-06 (pointillés) et des individus masculins âgés de 7 à 8 ans M07-08 (trait plein).....	100
Figure 4-67 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 7 à 8 ans M07-08 (pointillés) et des individus masculins âgés de 9 à 10 ans M09-10 (trait plein).....	100
Figure 4-68 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 9 à 10 ans M09-10 (pointillés) et des individus masculins âgés de 11 à 12 ans M11-12 (trait plein).....	101
Figure 4-69 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 11 à 12 ans M11-12 (pointillés) et des individus masculins âgés de 13 à 14 ans M13-14 (trait plein).....	101
Figure 4-70 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 13 à 14 ans M13-14 (pointillés) et des individus masculins âgés de 15 à 16 ans M15-16 (trait plein).....	102
Figure 4-71 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 15 à 16 ans M15-16 (pointillés) et des individus masculins âgés de 17 à 18 ans M17-18 (trait plein).....	102
Figure 4-72 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins de moins de 1 an F00-00 (pointillés) et des individus féminins âgés de 1 à 2 ans F01-02 (trait plein).....	106
Figure 4-73 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 1 à 2 ans F01-02 (pointillés) et des individus féminins âgés de 3 à 4 ans F03-04 (trait plein).....	106
Figure 4-74 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 3 à 4 ans F03-04 (pointillés) et des individus féminins âgés de 5 à 6 ans F05-06 (trait plein).....	107
Figure 4-75 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 5 à 6 ans F05-06 (pointillés) et des individus féminins âgés de 7 à 8 ans F07-08 (trait plein).....	107
Figure 4-76 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 7 à 8 ans F07-08 (pointillés) et des individus féminins âgés de 9 à 10 ans F09-10 (trait plein).....	107
Figure 4-77 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 9 à 10 ans F09-10 (pointillés) et des individus féminins âgés de 11 à 12 ans F11-12 (trait plein).....	108
Figure 4-78 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 11 à 12 ans F11-12 (pointillés) et des individus féminins âgés de 13 à 14 ans F13-14 (trait plein).....	108
Figure 4-79 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 13 à 14 ans F13-14 (pointillés) et des individus féminins âgés de 15 à 16 ans F15-16 (trait plein).....	108
Figure 4-80 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 15 à 16 ans F15-16 (pointillés) et des individus féminins âgés de 17 à 18 ans F17-18 (trait plein).....	109
Figure 4-81 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins de moins de 1 an M00-00 (pointillés) et des individus masculins âgés de 1 à 2 ans M01-02 (trait plein).....	109
Figure 4-82 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 1 à 2 ans M01-02 (pointillés) et des individus masculins âgés de 3 à 4 ans M03-04 (trait plein).....	110
Figure 4-83 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 3 à 4 ans M03-04 (pointillés) et des individus masculins âgés de 5 à 6 ans M05-06 (trait plein).....	110
Figure 4-84 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 5 à 6 ans M05-06 (pointillés) et des individus masculins âgés de 7 à 8 ans M07-08 (trait plein).....	110

Figure 4-85 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 7 à 8 ans M07-08 (pointillés) et des individus masculins âgés de 9 à 10 ans M09-10 (trait plein)	111
Figure 4-86 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 9 à 10 ans M09-10 (pointillés) et des individus masculins âgés de 11 à 12 ans M11-12 (trait plein)	111
Figure 4-87 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 11 à 12 ans M11-12 (pointillés) et des individus masculins âgés de 13 à 14 ans M13-14 (trait plein)	111
Figure 4-88 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 13 à 14 ans M13-14 (pointillés) et des individus masculins âgés de 15 à 16 ans M15-16 (trait plein)	112
Figure 4-89 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 15 à 16 ans M15-16 (pointillés) et des individus masculins âgés de 17 à 18 ans M17-18 (trait plein).....	112
Figure 4-90 Courbes des régressions logarithmiques du premier axe de l'Analyse en Composante Principale (ACP) avec les valeurs des tailles centroïdes pour les matrices osseuses de l'ilium, de l'ischium et du pubis.....	113
Figure 4-91 Analyse en Composante Principale des résidus Procrustes des matrices osseuses du coxal. Les consensus moyens de chaque groupe sont reliés par des segments de droite pour faciliter la visualisation des trajectoires. Les axes 1 et 2 expliquent respectivement 24,91 % et 13,02 % de la variation de l'échantillon.....	114
Figure 4-92 Analyse en Composante Principale des résidus Procrustes des matrices osseuses de l'ilium. Les consensus moyens de chaque groupe sont reliés par des segments de droite pour faciliter la visualisation des trajectoires. Les axes 1 et 2 expliquent respectivement 28,39 % et 14,59 % de la variation de l'échantillon....	115
Figure 4-93 Analyse en Composante Principale des résidus Procrustes des matrices osseuses du pubis. Les consensus moyens de chaque groupe sont reliés par des segments de droite pour faciliter la visualisation des trajectoires. Les axes 1 et 2 expliquent respectivement 32,52 % et 18,52 % de la variation de l'échantillon.....	116
Figure 4-94 schéma résumant les manifestations anatomiques du dimorphisme sexuel à partir de l'étude de la matrice osseuse du coxal.	118
Figure 4-95 schéma résumant les manifestations anatomiques du dimorphisme sexuel à partir de l'étude de la matrice osseuse de l'ilium.	119
Figure 4-96 schéma résumant les manifestations anatomiques du dimorphisme sexuel à partir de l'étude de la matrice osseuse du pubis.	119
Figure 4-97 schéma résumant les manifestations anatomiques des changements de conformation de la matrice osseuse du coxal pour les individus de sexe féminin (rouge) et masculin (bleu).	122
Figure 4-98 schéma résumant les manifestations anatomiques des changements de conformation de la matrice osseuse de l'ilium pour les individus de sexe féminin (rouge) et masculin (bleu).	123
Figure 4-99 schéma résumant les manifestations anatomiques des changements de conformation de la matrice osseuse du pubis pour les individus de sexe féminin (rouge) et masculin (bleu).....	124

Sommaire des tableaux

Tableau 2-1: Dimorphisme sexuel de l'os coxal, d'après Janssens et Perrot (2006-2007).....	26
Tableau 3-1 : Population d'étude, présentée par groupe d'âge et par sexe. Les individus de sexe masculins sont désignés par la lettre « M » et les féminins par la lettre « F ». La dénomination du groupe est définie par les âges des individus du groupe.....	32
Tableau 3-2 Les 17 landmarks : leur ordre de positionnement, leur définition, leur type et les références bibliographiques citant leur implication dans le dimorphisme sexuel de l'os coxal.	35
Tableau 3-3 Plan utilisé pour le positionnement des landmarks.	39
Tableau 3-4 Points repères utilisés pour l'analyse de chaque matrice osseuse.....	42
Tableau 4-1 Pour chaque Landmark est évalué la reproductibilité intra et inter observateur : le pourcentage de variabilité (von Cramon Taubadel, 2007) et le F test (Scholtz, 2011))	48
Tableau 4-2 Répartition de notre effectif en 10 groupes	49
Tableau 4-3 Analyse MANOVA des variations de conformation du coxal en fonction de l'âge et/ou du sexe. En gras sont représentées les valeur de p statistiquement significatives ($p < 0,05$)	51
Tableau 4-4 Analyse MANOVA des variations de conformation du ilium en fonction de l'âge et/ou du sexe. En gras sont représentées les valeur de p statistiquement significatives ($p < 0,05$)	52
Tableau 4-5 Analyse MANOVA des variations de conformation du pubis en fonction de l'âge et/ou du sexe. En gras sont représentées les valeur de p statistiquement significatives ($p < 0,05$)	53
Tableau 4-6 Etude du dimorphisme sexuel de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du Coxal: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)	54
Tableau 4-7 Etude du dimorphisme sexuel de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du Ilium: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)	55
Tableau 4-8 Etude du dimorphisme sexuel de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du Pubis: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)	56
Tableau 4-9 Analyse MANOVA des variations de taille du coxal en fonction de l'âge et/ou du sexe. En gras sont représentées les valeur de p statistiquement significatives ($p < 0,05$)	75
Tableau 4-10 Analyse MANOVA des variations de taille de l'ilium en fonction de l'âge et/ou du sexe. En gras sont représentées les valeur de p statistiquement significatives ($p < 0,05$)	76
Tableau 4-11 Analyse MANOVA des variations de taille du pubis en fonction de l'âge et/ou du sexe. En gras sont représentées les valeur de p statistiquement significatives ($p < 0,05$)	77
Tableau 4-12 Etude des différences de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du coxal des individus féminins: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)	80
Tableau 4-13 Etude des différences de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du coxal des individus masculins: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)	81

Tableau 4-14 Etude des différences de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du ilium des individus féminins: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)	92
Tableau 4-15 Etude des différences de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du ilium des individus masculins: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)	93
Tableau 4-16 Etude des différences de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du pubis des individus féminins: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)	104
Tableau 4-17 Etude des différences de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du pubis des individus masculins: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)	105

1 Introduction

En anthropobiologie et en médecine légale, la détermination du sexe et l'évaluation de l'âge au décès sont des paramètres essentiels à l'identification d'un individu à partir de ses restes osseux (Cattaneo, 2007). L'importance du dimorphisme sexuel du squelette humain est une propriété très abondamment exploitée pour la diagnose sexuelle du squelette. Si, chez l'adulte, il est possible de déterminer le sexe avec une grande fiabilité, permettant plus de 98% de classification correcte pour certaines méthodes, l'estimation de l'âge est beaucoup moins précise (Bruzek, 2002; Murail, 2005).

La situation inverse est observée chez les immatures, pour lesquels, les rares travaux concernant la détermination du sexe exposés dans la littérature présentent des résultats contradictoires.

Par ce travail, nous proposons l'étude en morphométrie géométrique de l'os coxal immature à partir d'examens tomодensitométriques.

L'objectif principal de ce travail est de répondre à la question: existe-il un dimorphisme sexuel sur l'os coxal immature?

Les objectifs secondaires sont :

- de caractériser le dimorphisme par l'analyse séparée des composantes de taille et de conformation,
- d'en préciser les manifestations anatomiques,
- de préciser l'âge auquel il apparaît.

Le troisième objectif est d'analyser l'ontogénie de l'os coxal par l'étude l'évolution de la conformation au cours de la croissance.

2 Préambule

2.1 La morphométrie géométrique

La morphométrie géométrique est un concept développé depuis les années 1990 qui permet d'étudier la forme d'objet et de les comparer, en s'affranchissant du critère taille.

2.1.1 Historique

L'analyse des caractéristiques morphologiques des organismes est depuis toujours une préoccupation fondamentale dans la recherche biologique, et plus particulièrement dans l'étude des mécanismes à l'origine de la diversification des espèces. L'étude de l'évolution s'appuie sur les ressemblances morphologiques des espèces fossiles en mesurant la distance morphologique entre organismes.

Jusque dans les années 90, ces comparaisons utilisent l'analyse morphométrique traditionnelle. Ces études morphométriques reposent sur une étude quantitative de structures mesurables, représentées par des valeurs moyennes, qui peuvent être comparées entre les groupes. Le développement de méthodes statistiques permet de combiner ces données quantitatives à une analyse statistique multivariée des variations pour l'étude de la morphologie (Marcus, 1990).

Cette méthode permet alors d'étudier l'allométrie ou les changements de forme avec la taille (Jolicoeur, 1963). Parce que les distances sont habituellement corrélées à la taille, de nombreux efforts ont été développés pour définir une méthode s'affranchissant du critère taille (Bookstein, 1991). Ainsi, le critère taille éliminé, les paramètres liés à la forme exclusivement peuvent être extraits et étudiés (Sundberg, 1989 ; Jungers, 1995).

Apparaît alors une nouvelle méthode pour définir et analyser les formes, qui ne repose plus sur les mesures de distance ou d'angle : la morphométrie géométrique. L'idée est née du travail fondamental et précurseur du zoologiste écossais D'Arcy Thomson, utilisant des superpositions pour étudier les mécanismes de croissance (Thompson, 1917). Cette méthode définit la forme par le positionnement de points repères ou landmarks et la géométrie de l'objet est définie par leurs positions relatives (Kendall, 1977). Ainsi, les résultats des analyses statistiques multivariées peuvent être visualisées à partir des points repères représentés dans leur espace d'origine sur la structure étudiée. Bien que les premiers travaux de morphométrie géométrique ne concernaient pas la morphologie des organismes vivants (il s'agissait de répondre à des questions portant sur des alignements de mégalithes), et que la morphométrie géométrique soit une méthode statistique, elle peut cependant être considérée comme une méthode d'étude de la morphologie (Kendall, 1977 et 1984). En effet, la morphométrie géométrique nous permet d'une part d'expliquer les différences de conformation (la forme affranchie de la taille) qui ont été analysées mathématiquement, mais elle nous offre aussi les moyens de visualiser ces différences (Zelditch, 2004).

2.1.2 Principe

La morphométrie géométrique permet d'analyser des variations morphologiques à partir de données composées de points repères ou points remarquables ou landmarks. Ceux-ci sont définis par Zelditch comme étant des loci anatomiques discrets qui peuvent être identifiés chez tous les spécimens de l'étude (Zelditch, 2004). En d'autres termes, ce sont des points repères, reconnaissables sur tous les objets comparés dans l'analyse (O'Higgins, 2000). Un ensemble de points repères définit l'objet de l'étude en 2 ou en 3 dimensions, cet ensemble est la **forme** ou la **configuration** de l'objet. La morphométrie géométrique permet d'analyser cette configuration en préservant l'information géométrique tout au long de l'analyse menée dans un espace de conformation spécifique (l'espace de **conformation** de Kendall). La forme (ou configuration) définie par les points repères peut être décomposée afin d'en extraire la conformation. Cette conformation est définie par Kendall comme étant l'ensemble de l'information géométrique qui reste lorsque la position, l'échelle et les effets de rotation sont éliminés de l'objet (Kendall, 1977). En d'autres termes, cette conformation représente la morphologie de la configuration de l'objet lorsque la taille est exclue et c'est la variation de « morphologie » entre spécimens que la morphométrie géométrique nous permet d'analyser. Enfin, il est possible de visualiser ces variations de morphologie entre les groupes ou les spécimens considérés au cours de l'étude (O'Higgins, 2000; Zelditch, 2004).

Cette méthode permet de pallier aux problèmes des études réalisées sur la croissance qui ne font pas ou peu de distinction entre ce qui, au cours de la croissance correspond au changement de **taille** : la **croissance** proprement dite, et au changement de **forme** : le **développement** (Treil, 2009).

Les points repères présentent l'avantage de ne pas nécessiter de sélection *a priori*. En d'autres termes, alors qu'une analyse morphométrique conventionnelle nécessite la sélection de variables avant de procéder à l'analyse, l'utilisation de points repères permet de s'affranchir de cette étape. En effet, si les variables métriques utilisées dans l'analyse ne sont pas les plus significatives pour tester l'hypothèse envisagée, les résultats sont « noyés » sous un bruit de fond provoqué par les variables les moins significatives. Au contraire en morphométrie géométrique, les variables n'ont pas à être sélectionnées *a priori*, puisque l'analyse va déterminer *a posteriori* quelles sont les variables les plus significatives (Zelditch, 2004). Les points repères doivent évidemment être choisis avant l'analyse, mais ils permettent d'inclure dans l'analyse toutes les variables qui auraient pu être mesurées entre chacun d'entre eux. Dans le cas où les points repères sélectionnés ne seraient pas assez pertinents, le résultat ne permettrait sans doute pas de tester l'hypothèse suggérée en début d'analyse, mais en aucun cas un bruit de fond non significatif ne viendrait obscurcir le résultat.

Bookstein a défini une nomenclature permettant de distinguer trois classes de points repères (Bookstein, 1991). Le type I regroupe les points repères optimaux, ils sont bien définis localement, leur homologie d'individu à individu est fortement supportée. Par exemple, un point repère défini par trois sutures osseuses est localement défini et identifiable de façon précise chez n'importe quel spécimen. Le type II est intermédiaire, il correspond à des points dont la position est d'abord définie localement à l'aide de structures spécifiques, comme pour les types I, mais il dépend aussi de facteurs moins précis tels que le maximum ou le minimum d'une courbe ou du développement d'une structure particulière. Dans ce cas, l'homologie d'individu à individu n'est supportée que géométriquement et non plus par des structures locales. Le type III ou semi-landmark est plus problématique, les points de cette catégorie peuvent

ne pas être considérés comme de vrais points repères homologues. Ils ne sont pas définis par des structures spécifiques locales, mais plutôt comme étant positionnés à un extrême par rapport à un autre point. Le type III résulte d'une construction. L'homologie de ces points est problématique du fait de l'imprécision de leur définition et il faut s'attendre à une variation importante entre individus. L'interprétation de résultats provenant de points repères de type III est par conséquent plus délicate. Ils sont cependant très utiles pour décrire certaines conformations spécifiques qui ne peuvent être décrites à l'aide de points repères de type I ou II (O'Higgins, 2000 ; Zelditch, 2004).

Des objets de même architecture ou conformation peuvent avoir des tailles différentes ou inversement des objets de même taille peuvent avoir des conformations différentes. La morphométrie géométrique permet l'analyse d'objet par une décomposition en conformation et en taille. L'objet n'est plus analysé par la valeur de paramètres linéaires ou angulaires mais par les coordonnées cartésiennes, calculées dans un repère orthonormé, des points repères homologues (ou landmarks) qui le définissent.

2.1.3 Méthode

2.1.3.1 *Calcul de la taille centroïde*

Les objets, représentés par les coordonnées tridimensionnelles des points repères homologues, sont dans un premier temps ramenés à la même échelle. Lors de ce processus de normalisation des données, la distance entre chaque point est inchangée, c'est le principe d'isométrie. Le paramètre de taille individuelle est extrait à ce moment là de l'analyse. Il correspond à la taille centroïde définie par Gower (1975).

La « taille centroïde » est calculée pour chaque objet. Elle correspond à la racine carrée de la somme des carrés des distances x , y , $\pm z$ selon que l'objet soit en 2 ou 3 dimensions de chaque point repère avec le centre de gravité ou centroïde de l'objet.

Cette mesure est mathématiquement indépendante de la conformation, c'est une mesure naturelle de la taille. Dans la pratique, la taille centroïde peut parfois être corrélée à la conformation parce que les organismes plus grands présentent souvent une conformation différente des plus petits (O'Higgins, 2000 ; Zelditch, 2004). Une fois la taille quantifiée, elle peut-être exclue afin de se concentrer sur la conformation.

2.1.3.2 *Superposition Procrustes*

L'Analyse Procruste Généralisée ou superposition Procrustes est la technique qui permet de s'affranchir de certaines composantes (la taille, l'orientation, la position) pour se concentrer sur l'étude de la conformation des spécimens (la «morphologie» des configurations définies par les points repères) (Gower, 1975 ; Goodall, 1991; Rohlf, 1999). Le nom de « Procrustes» a été choisi pour exprimer la nécessité de donner la même taille à tous les spécimens avant de faire les calculs pour éviter un biais. Ce nom provient de l'aubergiste qui, selon la mythologie grecque, ramenait la taille de ses victimes, par étirement ou raccourcissement, à celle du lit sur lequel il les allongeait.

Cette mise à l'échelle qui supprime les différences de tailles conduit à comparer des proportions relatives.

La superposition Procrustes consiste en trois transformations géométriques, que nous illustrerons en prenant l'exemple de deux parallélépipèdes de position, de taille et d'orientation différentes (Gower, 1975; Bookstein, 1989 ; Marcus, 1990; Rohlf 1990 et 1999 ; Penin, 1999) (Figure 2-1)

La première transformation élimine les différences de position par translation. Les parallélépipèdes sont déplacés de façon à faire coïncider leurs centres géométriques (point à partir duquel la somme des carrés des distances aux trois sommets est minimale).

La seconde transformation consiste à réduire les deux parallélépipèdes à une taille standardisée égale à l'unité. Pour normaliser, les coordonnées des points du parallélépipède sont divisées par la « taille centroïde ».

La troisième transformation est une rotation qui réalise l'ajustement optimal des deux parallélépipèdes, par une procédure répondant au critère des moindres carrés : la somme des carrés des écarts entre points homologues des différents parallélépipèdes doit être la plus faible possible. On obtient ainsi de nouvelles coordonnées des points repères, traduisant les différences de forme pure ou de « conformation » entre les deux parallélépipèdes (Kendall, 1984 ; Bookstein, 1989 et 1991).

Les études de morphométrie ne se limitant pas à la comparaison de deux objets, la méthode Procrustes peut être étendue à une collection d'objets : dans notre étude les 188 coxaux dont chacun est décrit par 17 points repères (Gower, 1975).

Les résultats de superposition sont exprimés par le « consensus » et les « résidus Procrustes ». Le consensus représente la conformation moyenne de l'objet étudié, pour tout l'échantillon. Les résidus Procrustes sont les variables de conformation, c'est-à-dire

les différences entre les coordonnées des points repère de la structure étudiée, après superposition avec les coordonnées homologues du consensus. Les résidus Procrustes définissent la conformation de chaque objet. L'ajustement de superposition se réalisant sur l'ensemble des points, le déplacement d'un point dépend de celui des autres, et son niveau de signification ne peut être testé isolément (Bookstein, 1995).

Trois étapes principales composent l'analyse Procrustes :

- **La première élimine les différences de position par translation.**
- **La deuxième élimine les différences de taille par mise à l'échelle.**
- **La troisième élimine les différences d'orientation par rotation.**

Après superposition Procrustes une conformation moyenne des objets est calculée. La conformation de chaque objet est définie par ses « résidus Procrustes » : distance de chacun des points repères par rapport aux points repères de la forme moyenne.

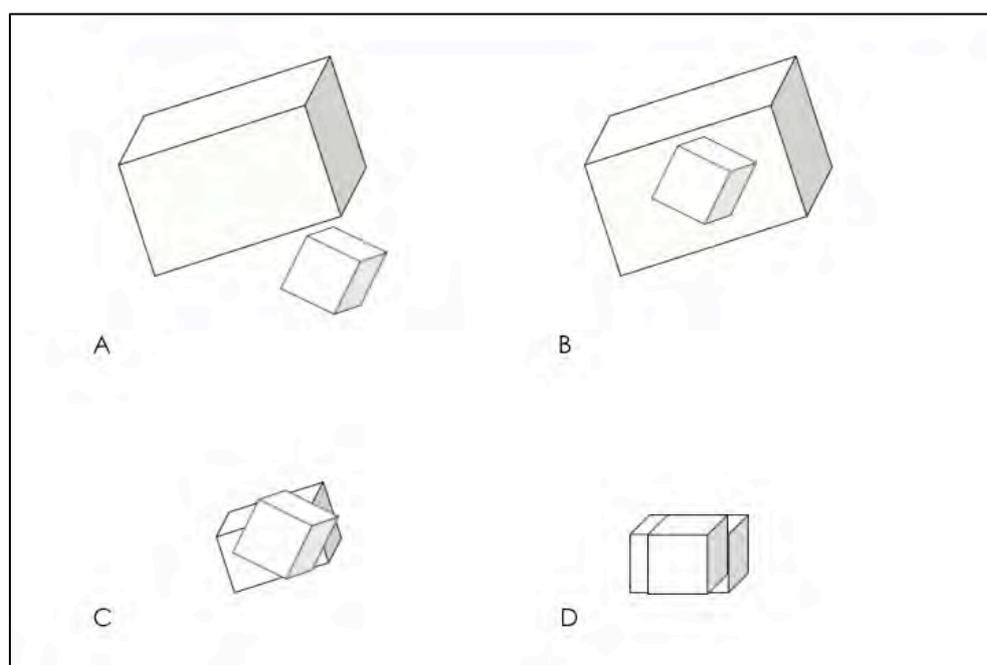


Figure 2-1 De A à D : étapes de l'Analyse Procrustes Généralisée (AGP), suppression des différences de formes autres que la différence due à la conformation. A. les deux configurations originales ; B. après suppression des différences de positionnement ; C. après suppression des différences d'échelle ; D. après suppression des différences d'orientation.

A la fin de ce procédé, les différences de position existant entre chaque point repère homologue représentent la différence de conformation entre les deux objets. Ces différences peuvent être visualisées et sont ensuite analysées statistiquement (cf. Figure 2A)

2.1.4 Analyse statistique

2.1.4.1 *Analyse en Composantes Principales*

Une Analyse en Composante Principale (ACP) de la matrice de covariance des résidus Procrustes permet d'objectiver la variabilité de la conformation des objets indépendamment de la valeur de leur taille centroïde.

L'ACP est une méthode descriptive multidimensionnelle. Elle propose, à partir d'un tableau rectangulaire de données comportant les valeurs de p variables quantitatives pour n unités, des représentations géométriques de ces unités et de ces variables. Les représentations de ces unités permettent de voir s'il existe une structure, non connue a priori, sur cet ensemble d'unités. Ainsi, on cherchera si l'on peut distinguer des groupes dans l'ensemble des unités en regardant quelles sont les unités qui se ressemblent et celles qui se distinguent des autres.

L'ACP est réalisée à partir de la matrice de variance-covariance des résidus Procrustes. Elle fournit une base de vecteurs propres, les « composantes principales de conformation » (Penin, 2000). Chacune de ces composantes est une combinaison

linéaire des variables initiales de conformation (résidus Proustes en deux ou en trois dimensions), décrivant un mouvement simultané et synchrone de l'ensemble des points de la structure étudiée. L'ACP classe les Composantes Principales (CP) par ordre de valeur propre décroissante : plus un type de déformation est retrouvé fréquemment dans l'échantillon, plus la valeur propre de la CP (exprimée en pourcentage de la variance totale) est importante. L'ACP permet de visualiser les structures étudiées dans l'espace des CP, et donc d'aider à repérer les caractéristiques de leur distribution.

La possibilité offerte par la morphométrie géométrique de visualiser les changements de conformation le long des axes des analyses en composantes principales s'avère particulièrement utile pour comprendre la dispersion de l'échantillon et décrire les modifications morphométriques en cause.

L'ACP se prête particulièrement bien à la superposition Proustes, car les résidus sont trop nombreux pour être directement exploitables (Penin, 1997). En effet, un nombre trop élevé de variables crée un excès des degrés de liberté et une diminution de la puissance des tests statistiques (Rao, 1966).

L'ACP permet l'individualisation de groupes au sein d'une population étudiée. Comment différent ces groupes ? Ces différences morphologiques sont elles significatives ? Quels caractères sont les plus importants dans la discrimination des groupes ? Peut on prédire sur les caractéristiques morphologiques d'un individu son appartenance à un groupe ? Ces questions peuvent être résolues selon 3 approches, que nous détaillons dans les paragraphes suivants.

2.1.4.2 Analyse discriminante

L'analyse discriminante est également appelée analyse de la fonction discriminante canonique ou Canonical Variate Analysis (CVA).

Elle est une fonction mathématique qui détermine les différences maximales entre des groupes définis *a priori* en prenant en compte les variations intragroupes (Goodall 1991). La CVA est étudiée par le F du test de Goodall. Ce test est utilisé pour mettre en évidence les différences de forme entre les groupes étudiés. Il permet de décrire les différences globales de forme entre les groupes et prend en compte l'ensemble de la variance de l'échantillon. Les statistiques sont basées sur le rapport des carrés des distances Procrustes des moyennes de chaque groupe et la somme des carrés des distances Procrustes de chaque spécimen. Il donne les valeurs F et p (F). Cette valeur représente la puissance pour qu'un individu appartienne au groupe dans lequel il est attribué, ce qui revient à tester si les deux groupes diffèrent réellement. Alors que l'ACP permet notamment de maximiser la variance de l'échantillon total, l'analyse discriminante canonique a pour but de tester des groupes d'individus constitués *a priori* en les analysant au travers de leurs variables de conformation. Dans notre étude, nous utilisons ces analyses discriminantes pour séparer les groupes féminins des groupes masculins d'âges prédéterminés, sur la base des différences de conformation mises en évidence lors de l'ACP.

2.1.4.3 La distance de Mahalanobis et les distances Procrustes

Mahalanobis est une mesure de distance introduite par P.C. Mahalanobis en 1936 (Mahalanobis, 1936). Ces distances sont basées sur la corrélation entre des variables par lesquelles différents modèles peuvent être identifiés et analysés. Elles sont une manière utile de déterminer la similarité entre une série de données connues et inconnues. Dans notre étude, les distances Procrustes permettent d'estimer les distances entre les groupes masculins et féminins.

2.1.4.4 *L'analyse multivariée de la variance MANOVA*

L'analyse multivariée de la variance permet de déterminer si la différence des échantillons est le fait du hasard (ce qui est significatif).

Elle est étudiée par le "test de Hotelling" (Hotelling, 1933). Dans notre étude, le calcul du p par le test de Hotelling par analyse multivariée permet de déterminer si les distances mises en évidence entre les résidus Procrustes moyens des coxaux féminin et masculin sont statistiquement significatives.

2.1.4.5 *Les validations croisées*

Les validations croisées sont utilisées pour valider le modèle statistique. Elles évaluent la performance de la méthode statistique à donner la structure de l'échantillon étudié. Dans une population où les identités des individus des groupes sont connues, elle permet de vérifier si la prédiction de l'appartenance à un groupe est correcte. Elle permet d'attester avec plus de fiabilité la reproductibilité d'une fonction discriminante.

Pour notre étude, les analyses Procrustes généralisées et les analyses en composantes principales ont été réalisées à l'aide du logiciel Morpho J (Klingenberg, 2008). Les analyses discriminantes ont été réalisées sur le logiciel R 2.2.10 software (R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>, 2008.)

2.1.4.6 *Représentations graphiques des résultats des analyses statistiques*

Les différences de conformation sont mises en évidence à partir de deux modes de

représentation graphique : des superpositions des schémas des consensus Procrustes des formes moyennes des groupes à comparer ou des grilles de transformation traduisant l'énergie nécessaire pour passer d'une conformation en une autre (Slice, 2007) (cf. Figure 2A). Ces représentations graphiques permettent les mises en évidence des régions anatomiques les plus impliquées dans les différences de formes et une visualisation des différences mises en évidence par les tests statistiques.

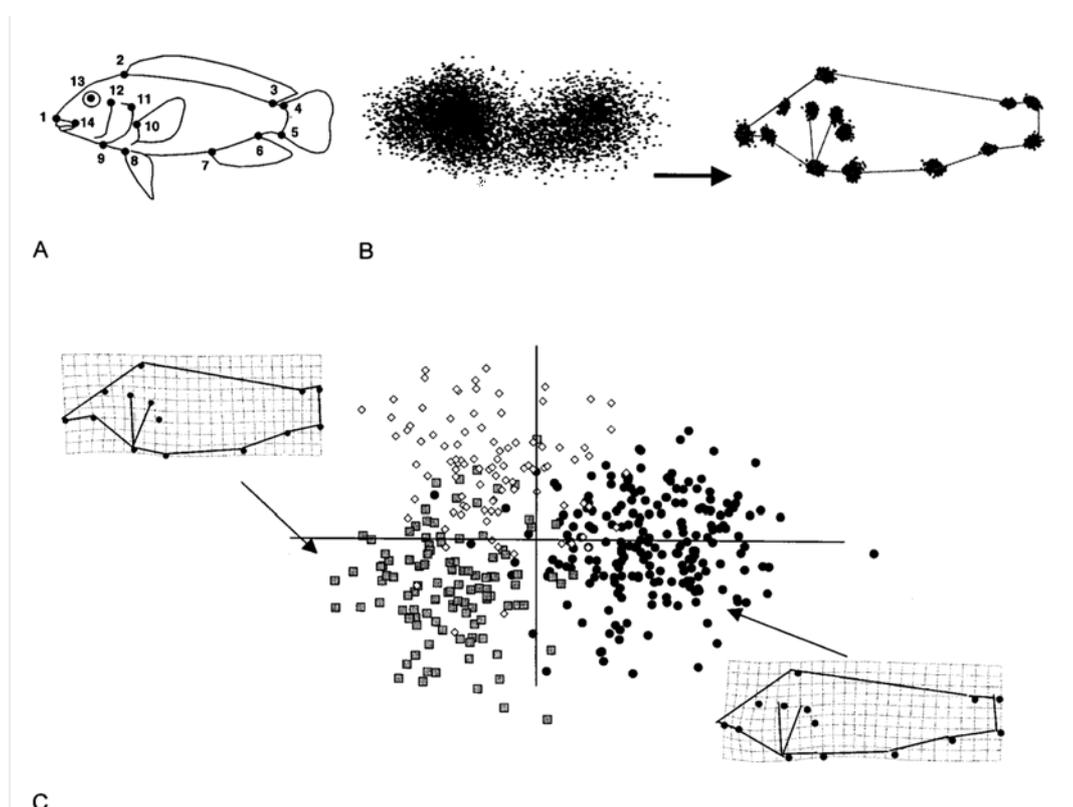


Figure 2A : d'après Adam, 2001. Représentation graphique des 4 étapes du protocole de géométrie morphométrique. A. Positionnement et enregistrement des points repères. B. Elimination des différences de position, de taille et d'orientation par l'analyse Procruste généralisée. C. Analyse statistique (CVA) et représentation graphique des résultats par des grilles de déformation.

2.2 La diagnose sexuelle de l'os coxal

2.2.1 Le dimorphisme sexuel de l'os coxal

La détermination sexuelle à partir de paramètres osseux est une problématique étudiée depuis longtemps dans le domaine de la paléanthropologie et de la médecine légale (Ubelaker, 1978 ; Bass, 2005). La forme particulière du bassin humain est l'un des exemples les plus importants des adaptations biomécaniques à la locomotion bipède mais également à la parturition (Krogman, 1986; Scheuer, 2000). De fait, l'os coxal étant l'os humain présentant la conformation la plus dimorphique, il est par conséquent très largement utilisé en anthropologie et en médecine légale dans le cadre de la détermination de la diagnose sexuelle. En effet, chez l'adulte, l'os coxal est très discriminant car il permet à lui seul plus de 90 % de bonne détermination sexuelle avec les méthodes les plus précises (Phenice; 1969; Bruzek, 2002 ; Murail, 2005).

2.2.2 Les méthodes traditionnelles d'estimation du sexe à partir du coxal

Parmi les nombreuses méthodes proposées dans la littérature, on distingue les méthodes morphologiques ou morphoscopiques, basées sur l'évaluation visuelle de critères anatomiques, des méthodes morphométriques, étudiant des mesures linéaires ou des ratios (Martin 1927 ; Krogman, 1986).

Depuis ses publications en 1969, la méthode de Phenice est devenue la méthode la plus connue et la plus utilisée pour la détermination visuelle du sexe. Cette méthode inclut l'étude de l'arc ventral de la concavité sous pubienne et de l'aspect du ramus ischio pubien (Phenice, 1969). Elle a été testée plusieurs fois (Lovell 1989, Sutherland 1991). En 1994, Rogers et Saunders testent 17 méthodes reportées de la littérature pour

la détermination du sexe de 49 bassins de sexe connu originaire d'un cimetière du XIXe siècle du Canada et démontrent que les trois traits morphologiques étant les meilleurs indicateurs de la méthode Phenice sont l'arc ventral, la concavité sous pubienne et le rameau ischiopubien permettant la détermination sexuelle avec une fiabilité de 88 % (Rogers, 1994).

En 1939, Lazorthes et Lhez mesurent l'ouverture et la profondeur de la grande échancrure sciatique (Lazorthes, 1939).

En 1948, Washburn propose l'indice ischio pubien, repris par Novotny en 1986 (Washburn, 1948; Novotny, 1986).

En 1956, Genovés présente ses travaux sur la détermination métrique du dimorphisme sexuel du bassin à partir de 36 mesures (Genovés, 1959).

De manière traditionnelle, les anthropologues utilisent ces caractères descriptifs classiques pour étudier l'expression du dimorphisme sexuel du bassin. Ces manifestations anatomiques du dimorphisme sont résumées dans le Tableau 2-1 (Janssens ;2006-2007).

Tableau 2-1: Dimorphisme sexuel de l'os coxal, d'après Janssens et Perrot (2006-2007).

CARACTÈRES	SEXE MASCULIN	SEXE FEMININ
Aspect d'ensemble	Robuste, donnant l'impression d'être haut et étroit avec des insertions musculaires accentuées.	Gracile, donnant l'impression d'être bas et large avec des insertions musculaires peu marquées.
Ilium	Plus étroit	Evasé en calice
Surface auriculaire	Hauteur peu élevée	Elevée
Branche ischiopubienne	Plus large, convexe vers le bas	Étroite, concave vers le bas
Symphyse pubienne	Haute	Basse
Angle sous-pubien	Petit, aigu	Grand ouvert
Ischions	Convergents	Divergents
Grande échancrure sciatique	Étroite, angle de 30°	Large, Angle de 60°
Trou obturateur	Plutôt ovalaire et grand, rebords mous	Triangulaire et petit, rebords aigus
Acetabulum	Grand et large	Petit et étroit
Epine sciatique	Aplatie	Pointue
Largeur cotylo-sciatique	Relativement large	Relativement étroite

2.2.3 Les méthodes récentes

Depuis quelques années, à ces méthodes s'ajoutent des techniques mathématiques faisant appel à des analyses discriminantes (Schulter-Ellis, 1983 et 1985; Patriquin, 2005; Benazzi, 2008 et Steyn, 2008).

Deux méthodes récentes se distinguent par leur fiabilité dans la détermination du sexe (Bruzek, 2002; Murail, 2005). Le taux de classification correcte de ces outils avoisine les 100% en s'affranchissant des affinités populationnelles.

En 2002, Bruzek propose une méthode morphologique composite prenant en compte les 5 éléments suivants : la surface préauriculaire, la grande échancrure sciatique, l'arc composé, la marge inférieure de l'os coxal et le rapport ischio-pubien. La prise en compte simultanée de ces caractères morphologiques permet d'approcher les 98% d'identification sexuelle fiable (Bruzek, 2002).

En 2005, Murail propose un nouvel outil de Diagnose Sexuelle Probabiliste (DSP) basé sur les données métriques de l'os coxal, à partir d'un échantillon intégrant la variabilité mondiale (2040 os coxaux adultes provenant de 12 échantillons de référence). Les mesures utilisées sont des mesures standard, publiées auparavant. Cet outil de diagnose sexuelle utilise le principe de l'analyse discriminante et affiche la probabilité individuelle d'appartenir au groupe féminin ou masculin d'un spécimen donné, en comparant les données métriques de l'os coxal à un échantillon de référence mondial (Murail, 2005).

2.2.4 Les méthodes utilisant la morphométrie géométrique

Apparue dans les années 1980, la morphométrie géométrique est utilisée depuis peu en anthropologie. Peu de travaux dans la littérature ont étudié le dimorphisme sexuel de l'os coxal avec cette méthode.

En 2003, Marchal étudie en morphométrie géométrique à partir de données en 2D, le dimorphisme de conformation de l'os coxal complet (Marchal, 2003).

En 2006, Pretorius propose une analyse de la grande échancrure sciatique (Pretorius, 2006).

En 2008, Wilson propose l'analyse de l'aile iliaque et de la grande échancrure à partir de 25 os coxaux juvéniles (Wilson, 2008).

En 2009, Gonzales étudie à partir de semi-landmarks le complexe ischiopubien et la grande échancrure sciatique (Gonzalez, 2009).

2.3 La problématique de l'enfant

Il y a très peu de travaux dans la littérature étudiant le dimorphisme sexuel de l'os coxal immature. De plus, les rares travaux concernant la détermination du sexe exposés dans la littérature présentent des résultats contradictoires. Les travaux publiés n'ont jamais permis de définir des critères avec une sensibilité et une spécificité proche de ceux utilisés sur des bassins matures (Rogers, 1994).

Pour certains auteurs, la diagnose sexuelle de l'immature est possible. Les principales études réalisées sur bassin immature ont porté sur l'ilium. En 1957, Boucher applique les techniques métriques classiques utilisées chez l'adulte pour la diagnose sexuelle du pelvis fœtal (Boucher, 1957). En 1969, Coleman démontre que la forme générale du pelvis et plus particulièrement celle de la grande échancrure sciatique et de l'angle sous-pubien présente un dimorphisme important dès le très jeune âge (Coleman, 1969). En 1980, Weaver démontre que l'étude de la surface auriculaire de l'ilium permet une identification correcte dans 91% des cas pour les individus masculins et 75% pour les individus féminins (Weaver, 1980). En 1993, Schutkowski identifie 4 caractéristiques sur l'ilium : l'angle et la profondeur de la grande échancrure, la courbure de la crête iliaque et « le critère de l'arche », qui permet d'identifier 95% des individus masculins de l'échantillon et 71,4% des individus féminins (Schutkowski, 1993). En 1995, Holcomb et Königsberg proposent l'étude en morphométrie géométrique de l'échancrure sciatique dans sa forme et non dans ses dimensions (Holcomb, 1995). En 2008, Wilson obtient 95% de classification correcte avec l'étude de l'angle de l'échancrure sciatique sur 25 ilium immatures (Wilson, 2008).

D'autres n'observent pas cette différence. En 1980, Weaver n'identifie pas de différence sur l'échancrure sciatique (Weaver, 1980). En 1995, Lavelle postule que les

modifications à l'origine du dimorphisme sexuel n'apparaissent qu'après la puberté (Lavelle, 1995). En 2005, Byers s'appuie sur le fait que le pelvis féminin n'est complètement fusionné qu'après l'âge de 12 ans, date avant laquelle la détermination du sexe de l'enfant apparaît difficile (Byers, 2005). En 2005, Bass rapporte que la détermination du sexe à partir de la région ischio pubienne ne peut être utilisée qu'après la puberté (Bass, 2005). En 2003, 2005, et 2007, Rissech propose 3 études respectivement sur la croissance de l'ilium, de l'ischium et du pubis et conclue que seules les surfaces auriculaires de l'ischium et du pubis seraient discriminantes pour le sexe avant la puberté (Rissech, 2003, 2005 et 2007).

Devant ces résultats contradictoires, il est licite de se demander s'il est possible de déterminer le sexe à partir d'un os coxal immature. En fait, il est difficile de réaliser des études de l'os coxal en croissance du fait des modifications qu'il présente lors du développement. La principale modification est déterminée par la fusion de trois structures osseuses : l'ilium, l'ischium, et le pubis (Scheuer, 2000). Cette difficulté peut être détournée par le choix de points de référence, facile à placer aussi bien sur os immature que mature. L'autre difficulté est l'analyse d'un os en croissance, rendant difficile la distinction des changements de taille (liés à la croissance), des changements de forme (liés au développement). De plus, les phénomènes de croissance et de maturation sont décalés dans le temps pour les filles et les garçons (Tanner, 1976). On comprend ainsi que le biais principal des études morphométriques concernant l'os coxal immature est la confusion des différences de taille, encore appelées robustesse, et des différences de conformation, encore appelées dimorphisme.

La morphométrie géométrique est une solution à cette difficulté. Par la dissociation des composantes de taille et de conformation, elle apparaît comme une méthode idéale pour l'analyse du dimorphisme sexuel d'un os en croissance.

Nous proposons dans ce travail l'étude en morphométrie géométrique de l'os coxal immature à partir d'examens tomодensitométriques. L'objectif de notre travail est d'analyser le dimorphisme sexuel de l'os coxal immature, à la fois dans ses composantes de taille et de conformation, et de définir les caractéristiques anatomiques qui peuvent être utilisées pour la diagnose sexuelle.

3 Matériel et Méthode

3.1 Matériel

Notre matériel est issu de la banque de données numériques des examens tomodensitométriques des hôpitaux de Toulouse (Système d'archivage Mc Kesson). Nous avons analysé de manière rétrospective et aléatoire, **400 examens tomodensitométriques** (204 individus masculins et 196 individus féminins) comprenant le bassin osseux complet. La population d'étude comprend des individus de **0 à 18 ans**, dont le sexe, l'âge et le motif d'examen sont connus. Le **Tableau 3-1** précise la répartition par âge et par sexe de notre population d'étude. Les examens tomodensitométriques ont été réalisés principalement dans le cadre d'exploration de pathologies abdominales. Les patients pour lesquels une pathologie osseuse était connue ou diagnostiquée n'ont pas été inclus dans l'étude. Compte tenu du caractère rétrospectif, l'appartenance géographique des patients n'était pas connue.

Tableau 3-1 : Population d'étude, présentée par groupe d'âge et par sexe. Les individus de sexe masculins sont désignés par la lettre « M » et les féminins par la lettre « F ». La dénomination du groupe est définie par les âges des individus du groupe.

Ages	Nombres d'individus	
	Féminins	Masculins
0	16	25
1-2	21	20
3-4	18	20
5-6	19	21
7-8	20	18
9-10	20	21
11-12	21	20
13-14	21	20
15-16	20	20
17-18	20	19
Total	196	204

3.2 Méthode

3.2.1 Recueil des données

3.2.1.1 *Archivage des examens tomодensitométriques*

Les examens ont été réalisés avec un Scanner Sensation 16 (Siemens, Erlangen, Germany) utilisé pour la pratique clinique dans le service de radiologie de l'hôpital des enfants au CHU Toulouse-Purpan. La collimation était de 16 x 1,5 mm. La matrice de l'image était 512 x 512 pixels. Les acquisitions étaient reconstruites avec des filtres dur (B 60) pour l'analyse osseuse ou avec un filtre mou (B 30) pour l'analyse tissulaire. Des reconstructions de 3 mm (ou 2 mm) tous les 2 mm (ou 1 mm) ont été réalisées.

Les examens tomодensitométriques ont été sauvegardés en format DICOM (Digital Imaging and COmmunicattions in Medicine) et stockés sur un disque dur externe.

3.2.1.2 *Le choix des landmarks*

Nous avons positionnés 17 landmarks (points repères ou points remarquables) sur l'os coxal gauche (

Figure 3-1).

Ces landmarks ont été choisis pour plusieurs raisons (Bytheway, 2010 ; Slice 2007):

- leur localisation anatomique a été décrite dans la littérature comme pertinente pour l'analyse du dimorphisme sexuel de l'os coxal.
- leur positionnement est facile
- Ils sont présents sur un os coxal immature et ne sont pas soumis à des variations anatomiques
- la liaison des landmarks entre eux permet de définir les régions anatomiques que nous voulons étudier : l'os coxal entier, l'ilium, l'ischium et le pubis.

Le choix des 17 points repères utilisés a été élaboré à partir d'études ostéométriques classiques, mais également d'études récentes. Les références bibliographiques qui ont influencé le choix de chaque landmark sont répertoriées dans le **Tableau 3-2**.

Chaque landmark a été défini selon la typologie de Bookstein. (Bookstein, 1991). Selon cette typologie, les 17 landmarks sont répartis de la façon suivante :

- 5 de type I correspondant à des localisations anatomiques définies et identifiables : l'épine iliaque antéro supérieure (ASS), l'épine iliaque antéro inférieure (AIS), l'épine iliaque postéro supérieure (PSS), l'épine iliaque postéro inférieure (PIS) et l'épine sciatique (IS)
- 11 de type II correspondant à des structures anatomiques définies mais caractérisées par leur position au sommet ou au minimum d'une courbe : le point le plus haut de la crête iliaque (HIC), Le point le plus bas de l'ischium (II), le point le plus latéral de la crête iliaque (LIC), le point le plus haut de la symphyse pubienne (HP), le point le plus bas de la symphyse pubienne (IP), le point le plus haut de l'acétabulum (SA), le point le plus bas de l'acétabulum (IA°), le point le plus antérieur de l'acétabulum (AA), le point le plus postérieur de l'acétabulum (PA), le point le plus antérieur du foramen obturateur (FO) et le point le profond de la grande échancrure sciatique (GSN)
- 1 de type III résultant d'une construction géométrique : le centre de l'acétabulum. Il est défini par l'intersection des plans axial et coronal passant par les milieux des segments AA-IA et AA-PA.

Tableau 3-2 Les 17 landmarks : leur ordre de positionnement, leur définition, leur type et les références bibliographiques citant leur implication dans le dimorphisme sexuel de l'os coxal.

Ordre	Dénomination	Description anatomique	Type de Bookstein	Références bibliographiques
1	HIC	Point le plus haut de la crête iliaque	II	Genovés(1959) ; Patriquin (2005) Steyn (2008)
2	ASS	Epine iliaque antéro supérieure	I	Genovés (1959) Patriquin (2005) Steyn (2008)
3	AIS	Epine iliaque antéro inférieure	I	Genovés (1959)
4	HP	Point le plus haut de la symphise pubienne	II	Washburn (1948) Schulter-Ellis(1983-85) Novotny (1986) Bruzek (2002) Steyn (2008) Patriquin (2005)
5	IP	Point le plus bas de la symphise pubienne	II	Steyn (2008)
6	FO	Point le plus antérieur du foramen obturateur	II	Genovés (1959)
7	II	Point le plus bas de l'ischium	II	Washburn (1948) Genovés (1959) Schulter-Ellis(1983-85) Novotny (1986) Bruzek (2002)

				Steyn (2008)
8	IS	Epine ischiatique	I	Lazorthes(1939) Genovés (1959) Bruzek (2002) Patriquin (2005) Steyn (2008)
9	GSN	Point le plus profond de la grande échancrure sciatique	II	Lazorthes (1939) Genovés (1959) Bruzek (2002) Patriquin (2005) Steyn (2008)
10	PIS	Epine iliaque postéro inférieure	I	Lazorthes (1939) Genovés (1959) Steyn (2008) Bruzek (2002)
11	PSS	Epine iliaque postéro supérieure	I	Genovés (1959) Patriquin (2005) Steyn (2008)
12	LIC	Point le plus lateral de la crête iliaque	II	Genovés (1959) Steyn (2008)
13	SA	Point le plus haut de l'acétabulum	II	Genovés (1959) Novotny (1986) Steyn (2008)
14	IA	Point le plus bas de l'acétabulum	II	Bruzek (2002) Steyn (2008)

15	AA	Point le plus antérieur de l'acétabulum	II	Genovés (1959) Schulter-Ellis (1983-85) Novotny (1986) Bruzek (2002) Patriquin (2005) Steyn (2008)
16	PA	Point le plus postérieur de l'acétabulum	II	Genovés (1959) Schulter-Ellis (1983-85) Patriquin (2005) Steyn (2008)
17	CA	Centre de l'acétabulum	III	Genovés (1959)

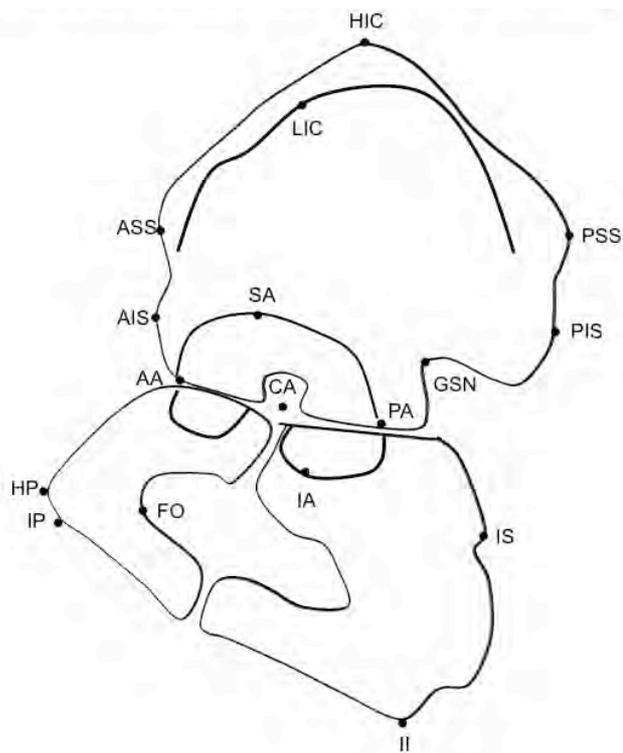


Figure 3-1 Schéma d'un os coxal gauche immature sur lequel sont figurés les 17 landmarks.

3.2.1.3 *Le positionnement des landmarks*

Nous avons utilisé le logiciel AMIRA 4.1.1 (Mercury Computer System, Inc., Chelmsford, MA) pour l'analyse des examens tomodensitométriques et le positionnement des landmarks. Ce logiciel permet une analyse de l'examen en utilisant des reconstructions MPR (Multiplanar Reconstructions) dans les plans coronal et sagittal, mais aussi une analyse en 3-dimensions par des reconstructions volumiques de type VRT (Volume Rendering Technique).

Les landmarks ont été positionnés sur chacun des 400 examens tomodensitométriques de manière manuelle et identique sur chaque spécimen, en suivant le même protocole :

Le positionnement des landmarks a toujours intéressé l'os coxal gauche.

Les 17 landmarks ont toujours été positionnés successivement dans le même ordre.

Chaque landmark a été positionné sur des images en 2-dimensions : soit sur l'acquisition axiale, soit sur les reconstructions sagittale ou coronale. Le choix du plan de référence pour le positionnement a été préalablement défini pour chaque landmark. Les reconstructions VRT ont été une aide au choix du plan de référence (**Tableau 3-3**). Aucun landmark n'a été positionné sur une reconstruction 3D-VRT.

Tableau 3-3 Plan utilisé pour le positionnement des landmarks.

Dénomination	Plan utilisé
HIC	Axial
ASS	Axial
AIS	Axial
HP	Axial
IP	Axial
FO	Axial
II	Axial
IS	Axial
GSN	Axial
PIS	Axial
PSS	Axial
LIC	Sagittal
SA	Coronal
IA	Coronal
AA	Axial
PA	Axial
CA	Axial et coronal

3.2.1.4 *L'enregistrement des données*

L'enregistrement des coordonnées tridimensionnelles (x, y, z) de chaque point repère a été effectuée avec le logiciel Amira puis stockée sur un disque dur indépendant (Figure 3-2).

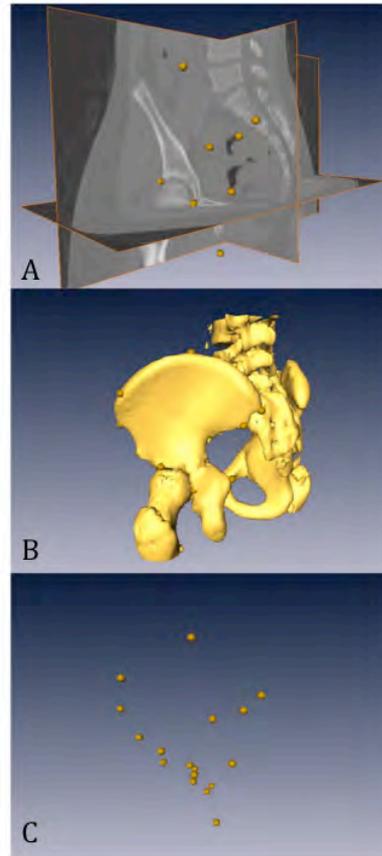


Figure 3-2 Recueil des données. A. Positionnement des points repères sur les coupes axiales ou sur les reconstructions MPR. B. Reconstruction 3D-VRT. C. Enregistrement des coordonnées des points repères.

3.2.2 Morphométrie géométrique et analyse statistique

3.2.2.1 *Méthode d'analyse*

Nous utilisons la **morphométrie géométrique** qui permet d'étudier les formes d'un groupe d'objet et qui comprend une large panoplie d'outil permettant de définir et de **quantifier les variations de taille et de conformation**. (Bookstein, 1991 ; Slice 2007 ; Zelditch, 2004). La base de cet outil est la superposition Procruste qui effectue des opérations de translation, de rotation et de mise à l'échelle sur l'échantillon. La taille centroïde de chaque objet est ainsi extraite et quantifiée. Les résidus de la superposition peuvent alors être soumis à diverses analyses. Dans cette étude, nous avons traité les

coordonnées de landmarks coxaux en 3 dimensions avec le logiciel MorphoJ. (Klingenberg, 2011) Après superposition Procruste des individus matrice par matrice, et extraction de la taille centroïde, les groupes féminins et masculins ont été comparés par analyse discriminante. Cette méthode détermine les différences maximales entre des groupes définis a priori en prenant compte les variations intragroupes (Klingenberg, 2005). Pour chaque matrice, la visualisation de ces différences est possible grâce à des schémas de consensus féminins et masculins superposés. L'influence de la taille centroïde sur les différences entre les matrices osseuses sera également analysée.

Nous avons dans un premier temps effectué une Analyse Procrustes Généralisée (APG) couplée à une Analyse en Composantes Principales (ACP) sur l'ensemble de la population d'étude. Dans un second temps, des tests statistiques ont été effectués sur les résidus Procrustes, pour étudier les différences de conformation, puis sur les tailles centroïdes, pour étudier les différences liées à la taille proprement dite.

Nous avons analysé séparément les différences liées à la **taille (taille centroïde)** de celles liées à la **conformation (résidus Procrustes)**. Ainsi nous distinguons ce qui, au cours de la croissance, correspond d'une part au changement de **taille** : la **croissance** proprement dite, et d'autre part ce qui correspond au changement de **forme** : le **développement** (Treil, 2008).

Afin de comprendre l'ontogenèse du dimorphisme du coxal,

- nous étudions les différences de conformation et de taille des matrices osseuses des individus masculins et féminins à des âges différents, c'est à dire le **dimorphisme sexuel**.
- nous étudions les différences de conformation et de taille des matrices osseuses de même sexe à des âges différents, **c'est à dire l'évolution de la forme des matrices osseuses féminines et masculines avec l'âge.**

- nous analysons quelles régions anatomiques ces différences de conformation intéressent,
- nous évaluons et quantifions l'importance de ces changements au cours du temps.

3.2.2.2 Les matrices osseuses

Nous avons défini plusieurs matrices dites « osseuses », formées par des configurations de landmarks. Anatomiquement, l'os coxal adulte résulte de la fusion de trois os: l'ilium, l'ischium, le pubis. Ces trois régions anatomiques unies par le cartilage en Y vont fusionner pendant l'enfance pour former l'os coxal adulte (Scheuer, 2000). Nous avons ainsi défini trois matrices osseuses : le coxal, l'ilium et le pubis. La matrice osseuse de l'ischium n'a pas été étudiée isolément car dans la littérature il n'est pas rapporté de dimorphisme sexuel sur cet os (Faruch Bilfeld, 2012) (**Tableau 3-4**). Chaque matrice osseuse a été analysée de façon indépendante.

Tableau 3-4 Points repères utilisés pour l'analyse de chaque matrice osseuse.

Matrice osseuse	Nombre de landmarks	Landmarks utilisés
Coxal	11	HIC, LIC, ASS, AIS HP, IP, II, IS, GSN, PIS, PSS
Ilium	10	HIC, LIC, ASS, AIS, SA, CA, PA, GSN, PIS, PSS
Pubis	5	HP, AA, CA, FO, IP

3.2.2.3 Superposition Procrustes

L'analyse Procrustes des coordonnées en 3 dimensions de chaque landmark est effectuée pour chaque matrice osseuse séparément à l'aide du Logiciel MorphoJ (Kilngenberg, 2011). Dès la première phase du traitement Procrustes, la composante de

taille individuelle est quantifiée et dissociée : c'est **la taille centroïde** (Gower, 1975). Les analyses générées ultérieurement ne portent que sur **la conformation** des matrices osseuses étudiées, c'est-à-dire la forme sans taille. Cette procédure permet de représenter la conformation de l'objet après extraction des biais liés à la taille, mais aussi à la position et à l'orientation des spécimens. Elle permet de définir la conformation de chaque spécimen en Résidus Procrustes, qui correspond au point de départ de l'analyse statistique (Rohlf, 1990 ; Rohlf, 1996). Cet outil s'avère donc particulièrement adapté à notre recherche concernant les différences et les changements de forme au cours de la croissance.

3.2.2.4 Analyse en composante principale

L'Analyse en Composante Principale (ACP) des Résidus Procrustes permet de visualiser et décrire les changements de conformation pour chaque sexe séparément, dans l'espace des composantes principales (Berge, 2004; Cobb, 2004). Elle a été réalisée à partir des résidus Procrustes. Elle fournit une base de vecteurs propres, les «composantes principales de conformation». L'ACP classe les composantes principales (CP) par ordre de valeur propre décroissante : plus un type de déformation est trouvé fréquemment dans l'échantillon, plus la valeur propre de la CP (exprimée en pourcentage de la variance totale) est importante. L'ACP permet de visualiser les matrices osseuses dans l'espace des CP, et d'analyser leur distribution.

3.2.2.5 Tests de reproductibilité

Dix bassins choisis au hasard au sein de notre population d'étude ont été étudiés 5 fois à une semaine d'intervalle par l'observateur principal (MFB) afin d'évaluer la variabilité intra observateur. Afin de définir la variabilité inter observateur, l'observateur principal (MFB) et second observateur (FD) ont positionné les points repères à une reprise sur 5 spécimens, un mois après la fin du traitement des données

par l'observateur principal. Ainsi, un pourcentage d'erreur de positionnement est calculé pour chacun des 17 points repères. Dans des études précédentes, il a été démontré que les résultats étaient acceptables si le pourcentage de variabilité n'excédait pas 5 % (von Cramon-Taubadel, 2007 ; Braga, 2007).

Les premiers résultats des ACP montrant une importante différence de conformation entre les individus de moins de 1 an et ceux âgés de 1 à 2 ans, il a été réalisé dans un second temps des tests de reproductibilité intra et inter observateur pour 20 individus âgés de moins de 1 an tirés au sort. Pour l'ensemble des 17 landmarks étudiés, nous avons calculé la valeur des déviations standard lorsque les mesures étaient réalisées soit par deux observateurs différents, soit par le même observateur à 1 mois d'intervalle. (Sholts, 2011). Le F tests a été utilisé pour tester la significativité des résultats. Il a été considéré que les variations de mesures avaient une distribution normale si la valeur du F test était proche de 1.

3.2.2.6 *Analyses Multivariées*

Ces analyses multivariées ont pour objectif d'analyser l'influence des paramètres « âge » et « sexe » sur la conformation ou la taille des matrices osseuses étudiées.

3.2.2.6.1 *Analyses multivariées des variables de conformation*

Pour évaluer si la conformation des matrices osseuses étudiées varie avec le sexe et/ou l'âge, nous effectuons **une analyse multivariée de la variance** (MANOVA), dans laquelle l'âge et le sexe sont des variables indépendantes.

Nous étudions par **analyse discriminante** les différences de conformation des consensus des matrices osseuse du coxal, de l'ilium ou du pubis féminin et masculin, extraits de la superposition Procrustes : soit pour évaluer les différences de conformation entre les individus féminins et masculins de même âge, soit pour évaluer les différences de conformations entre deux groupes d'âges adjacents de même sexe. La

qualité de la discrimination des différents groupes est évaluée à l'aide du test statistique F de Goodall (Goodall, 1991; Zelditch, 2004; Otlé, 2005).

Nous calculons les **distances Procrustes** entre les consensus afin de quantifier ces différences. Les distances Procruste sont la somme des carrés des distances entre points repères homologues (Rohlf, 1990). Ces distances sont données avec un intervalle de confiance à 95%.

Les analyses précédentes permettent de quantifier les différences de conformation entre les sexes à un instant t, matérialisé par un groupe d'âge. Afin d'évaluer l'importance de ces changements au cours du temps, nous effectuons une régression linéaire entre les distances Procrustes et l'âge afin d'estimer les taux de variation de la conformation au cours du temps (Zelditch, 2000 et 2003). Pour chaque sexe et pour chaque groupe d'âge, nous calculons la distance Procruste entre la conformation de l'individu le plus petit du groupe et celle de chaque individu du groupe. Les taux de changement sont estimés à partir de l'intervalle de temps entre deux groupes d'âge.

3.2.2.6.2 Analyse multivariée des variables de taille

Pour l'étude du dimorphisme de taille, nous effectuons les mêmes tests statistiques décrits précédemment à partir des tailles centroïdes. La taille centroïde est définie comme la somme des carrés des distances de chaque point repère avec le centroïde. Elle représente la mesure de la taille non corrélée à la conformation (Bookstein, 1991).

3.2.2.7 Représentations graphiques

Les différences de conformations sont mises en évidence à partir de deux modes de représentations graphiques : la projection des matrices osseuses dans l'espace des composantes de conformation (CP1-CP2), et la visualisation des changements de

conformation qui leur sont associés. Pour chaque matrice, la visualisation de ces différences est possible grâce à des schémas de formes consensus masculins et féminins superposées. Les représentations 3D sont obtenues avec le logiciel R®2.2.10. (computing). La forme de référence (consensus) est définie par la superposition moyenne de l'ensemble des coordonnées des points repères des individus pour chaque matrice osseuse. Elle est représentée sous forme de graphique en 3 dimensions avec des segments reliant les points repères entre eux.

4 **Résultats**

4.1 **Les tests de reproductibilité**

Tableau 4-1 Pour chaque Landmark est évalué la reproductibilité intra et inter observateur : le pourcentage de variabilité (von Cramon Taubadel, 2007) et le F test (Scholtz, 2011))

Landmarks	Intra observateur			Inter observateur		
	% de variabilité (von Cramon Taubadel, 2007)	F test (Scholtz 2011)		% de variabilité (von Cramon Taubadel, 2007)	F test (Scholtz 2011)	
		F test	p		F test	P
HIC	1.98	1.001	0.498	2.08	0.961	0.534
ASS	1.94	1.011	0.489	2.27	9.933	0.559
AIS	1.95	1.017	0.484	1.93	0.897	0.592
HP	2.15	1.000	0.499	1.9	0.925	0.566
IP	2.47	1.013	0.488	2.43	0.976	0.520
FO	2.54	0.975	0.521	2.52	0.922	0.569
II	2.81	0.976	0.520	2.85	0.931	0.560
IS	2.60	0.991	0.507	2.95	0.925	0.566
GSN	1.81	1.018	0.483	2.02	0.949	0.544
PIS	2.11	1.005	0.495	2.35	0.939	0.553
PSS	1.12	1.006	0.494	1.59	0.948	0.545
LIC	2.26	1.004	0.496	2.49	0.932	0.559
SA	1.58	0.999	0.500	1.44	0.928	0.563
IA	2.24	0.986	0.512	2.46	0.937	0.555
AA	2.20	0.991	0.507	2.65	0.909	0.581
PA	1.75	0.974	0.522	1.65	0.944	0.549
CA	2.10	0.980	0.517	2.09	0.924	0.566

4.2 La constitution des groupes d'âge

Nous avons réparti notre échantillon en 10 classes d'âge d'effectif semblable.

Tableau 4-2 Répartition de notre effectif en 10 groupes

Ages (année)	Nombres d'individus	
	Féminins	Masculins
Moins de 1 an	16	25
1-2	21	20
3-4	18	20
5-6	19	21
7-8	20	18
9-10	20	21
11-12	21	20
13-14	21	20
15-16	20	20
17-18	20	19
Total	196	204

4.3 Le dimorphisme sexuel de conformation

4.3.1 La conformation selon l'âge et le sexe

Une analyse MANOVA des variables de la conformation, c'est à dire des **résidus Procrustes**, est réalisée pour chaque matrice osseuse avec le sexe et/ ou l'âge comme facteurs.

4.3.1.1 *La conformation de la matrice du coxal selon l'âge et le sexe*

Il apparait des variations de conformation statistiquement significatives **avec le sexe** pour la matrice osseuse du coxal. Il existe un *dimorphisme sexuel de conformation* pour la matrice osseuse du coxal.

Il apparait des variations de conformation statistiquement significatives **avec l'âge** pour la matrice osseuse du coxal. La conformation de la matrice osseuse du coxal évolue avec l'âge. Il existe un changement de conformation de la matrice osseuse du coxal cours du temps. Cette modification de conformation avec l'âge est appelée *développement*.

On note des variations de conformation statistiquement significatives, **selon l'âge et le sexe de manière combinée**, pour la matrice osseuse du coxal. L'existence d'une corrélation liée aux deux variables, âge et sexe, signifie que les changements de conformation dans le temps chez les individus de sexe masculin diffèrent de ceux constatés chez les individus de sexe féminins : c'est à dire que ces changements ne sont pas synchrones.

Tableau 4-3 Analyse MANOVA des variations de conformation du **coxa** en fonction de l'âge et/ou du sexe. En gras sont représentées les valeurs de p statistiquement significatives ($p < 0,05$)

Critère étudié	Test F de Goodall	P
Sexe	60,86	<0,05
Age	131,84	<0,05
Sexe x Age	110,62	<0,05

4.3.1.2 La conformation de la matrice de l'ilium selon l'âge et le sexe

Il apparaît des variations de conformation statistiquement significatives **avec le sexe**. Il existe un *dimorphisme sexuel de conformation* pour la matrice osseuse de l'ilium.

Il apparaît des variations de conformation statistiquement significatives **avec l'âge**. La conformation de la matrice osseuse de l'ilium évolue avec l'âge. Cette modification de conformation avec l'âge est appelée *développement*.

On note des variations de conformation statistiquement significatives, **selon l'âge et le sexe de manière combinée**, pour la matrice osseuse de l'ilium. L'existence d'une corrélation liée aux deux variables, âge et sexe, signifie que les changements de conformation dans le temps chez les individus de sexe masculin diffèrent de ceux constatés chez les individus de sexe féminins : c'est à dire que ces changements ne sont pas synchrones.

Tableau 4-4 Analyse MANOVA des variations de conformation du **ilium** en fonction de l'âge et/ou du sexe. En gras sont représentées les valeur de p statistiquement significatives ($p < 0,05$)

Critère étudié	Test F de Goodall	P
Sexe	80,97	<0,05
Age	143,67	<0,05
Sexe x Age	111,31	<0,05

4.3.1.3 La conformation de la matrice du pubis selon l'âge et le sexe

Il apparait des variations de conformation statistiquement significatives **avec le sexe** pour la matrice osseuse du pubis. Il existe un *dimorphisme sexuel de conformation* pour la matrice osseuse du pubis.

Il apparait des variations de conformation statistiquement significatives **avec l'âge** pour la matrice osseuse du coxal. La conformation de la matrice osseuse du pubis évolue avec l'âge. Il existe un changement de conformation de la matrice osseuse du pubis cours du temps. Cette modification de conformation avec l'âge est appelée *développement*.

On note des variations de conformation statistiquement significatives, **selon l'âge et le sexe de manière combinée**, pour la matrice osseuse du pubis. L'existence d'une corrélation liée aux deux variables, âge et sexe, signifie que les changements de conformation dans le temps chez les individus de sexe masculin diffèrent de ceux constatés chez les individus de sexe féminins : c'est à dire que ces changements ne sont pas synchrones.

Tableau 4-5 Analyse MANOVA des variations de conformation du **pubis** en fonction de l'âge et/ou du sexe. En gras sont représentées les valeur de p statistiquement significatives ($p < 0,05$)

Critère étudié	Test F de Goodall	P
Sexe	115,32	<0,05
Age	184,28	<0,05
Sexe x Age	218,09	<0,05

4.3.2 Le dimorphisme sexuel de conformation : étude par âge

Par une analyse discriminante de type Analyse Variable Canonique (CVA) utilisant le test de Goodall, nous étudions la valeur discriminante des différences de conformation observées des matrices osseuses du coxal, de l'ilium et du pubis, entre les individus de sexe féminin et masculin, pour chaque groupe d'âge. Le calcul des distances Procrustes permet de quantifier ces différences.

4.3.2.1 *Le dimorphisme sexuel de conformation de la matrice du coxal: étude par âge*

Pour la matrice osseuse du coxal, les différences de conformation observées sont statistiquement significatives pour les individus **âgés de plus de 5 ans**. La valeur des distances Procrustes entre les consensus masculins et féminins est maximale après 15 ans. Il existe une augmentation des différences de conformation entre les sexes avec l'âge pour aboutir au dimorphisme de conformation adulte. La diminution des valeurs des distances Procrustes entre 9 et 10 ans peut être expliquée par l'évolution asynchrone des conformations des matrices osseuses.

Tableau 4-6 Etude du dimorphisme sexuel de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du **Coxal**: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)

Groupes	Distance Procrustes	Test F de Goodall (p)
F00-00/ M00-00	0,069	0,971
F01-02/M01-02	0,032	0,644
M03-04/M03-04	0,026	0,525
F05-06/M05-06	0,034	0,019
F07-08/M07-08	0,036	0,009
F09-10/M09-10	0,032	0,029
F11-12/M11-12	0,029	0,009
F13-14/M13-14	0,028	0,019
F15-16/M15-16	0,044	0,009
F17-18/M17-18	0,041	0,009

4.3.2.2 *Le dimorphisme sexuel de conformation de la matrice de l'ilium: étude par âge*

Pour la matrice osseuse de l'ilium, les différences de conformation observées sont statistiquement significatives pour les individus **âgés de plus de 5 ans**. La valeur des distances Procrustes entre les consensus masculins et féminins est maximale après 15 ans. Il existe une augmentation des différences de conformation entre les sexes avec l'âge pour aboutir au dimorphisme de conformation adulte.

Tableau 4-7 Etude du dimorphisme sexuel de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du **Ilium**: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)

Groupes	Distance Procrustes	Test F de Goodall (p)
F00-00/ M00-00	0,021	1
F01-02/M01-02	0,033	0,326
F03-04/M03-04	0,029	0,465
F05-06/M05-06	0,053	0,019
F07-08/M07-08	0,051	0,009
F09-10/M09-10	0,036	0,079
F11-12/M11-12	0,049	0,009
F13-14/M13-14	0,047	0,029
F15-16/M15-16	0,061	0,009
F17-18/M17-18	0,068	0,009

4.3.2.3 *Le dimorphisme sexuel de conformation de la matrice du pubis: étude par âge*

Pour la matrice osseuse du pubis, les différences de conformation observées sont statistiquement significatives pour les individus **âgés de plus de 13 ans**. La valeur des distances Procrustes entre les consensus masculins et féminins est proche après 13 ans.

Tableau 4-8 Etude du dimorphisme sexuel de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du **Pubis**: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)

Groupes	Distance Procrustes	Test F de Goodall (p)
F00-00 / M00-00	0,035	0,792
F01-02 / M01-02	0,045	0,227
F03-04 / M03-04	0,023	0,891
F05-06 / M05-06	0,050	0,712
F07-08 / M07-08	0,044	0,148
F09-10 / M09-10	0,049	0,198
F11-12 / M11-12	0,066	0,207
F13-14 / M13-14	0,087	0,049
F15-16 / M15-16	0,083	0,009
F17-18 / M17-18	0,086	0,009

4.3.3 Evaluation des changements de conformation au cours du temps

Nous effectuons une régression linéaire entre les distances Procrustes et l'âge afin d'évaluer la vitesse des changements de conformation.

4.3.3.1 *Pour la matrice osseuse du coxal*

Pour la matrice osseuse du coxal, la vitesse des changements de conformation des matrices osseuses est différente pour les individus de sexe masculin et pour les individus de sexe féminin. On note une augmentation de la pente de la courbe entre **7 et 8 ans** pour les individus de sexe féminin et entre 11 et 12 ans pour les individus de sexe

masculin. La vitesse des changements de conformation s'accélère plus précocement pour les individus de sexe féminin. Ceci est concordant avec les résultats de l'analyse Manova objectivant que les changements de conformation de la matrice osseuse du coxal n'étaient pas synchrones.

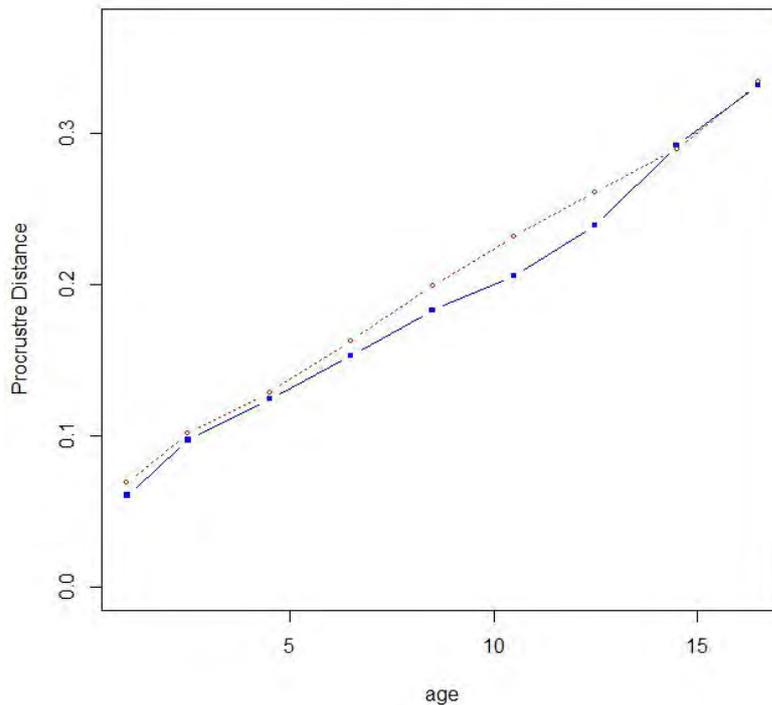


Figure 4-1 Evolution des distances Procrustes des consensus des matrices osseuses du **coxal** des individus masculins (courbe bleue) et des individus féminins (courbe rouge) au cours du temps.

4.3.3.2 Pour la matrice osseuse de l'ilium

Pour la matrice osseuse de l'ilium, la vitesse des changements de conformation des matrices osseuses est différente pour les individus de sexe masculin et pour les individus de sexe féminin. On note une augmentation de la pente de la courbe entre **7 et 8 ans** pour les individus de sexe féminin et entre **11 et 12 ans** pour les individus de sexe masculin. La vitesse des changements de conformation s'accélère plus précocement

pour les individus de sexe féminin. Ceci est concordant avec les résultats de l'analyse Manova objectivant que les changements de conformation de la matrice osseuse du coxal n'étaient pas synchrones.

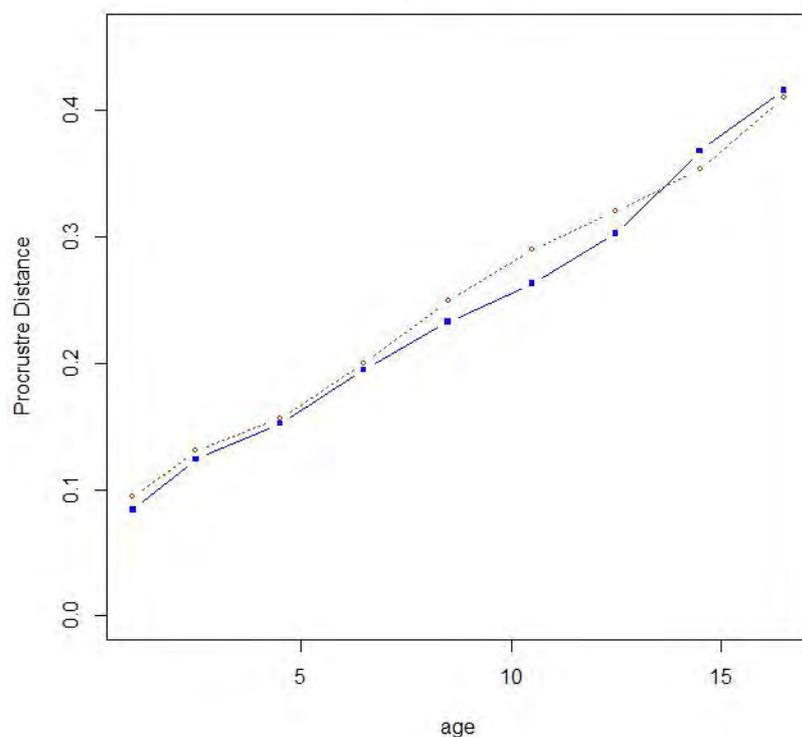


Figure 4-2 Evolution des distances Procrustes des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins (courbe bleue) et des individus féminins (courbe rouge) au cours du temps.

4.3.3.3 Pour la matrice osseuse du pubis

Pour la matrice osseuse du pubis, la vitesse des changements de conformation des matrices osseuses est différente pour les individus de sexe masculin et pour les individus de sexe féminin. On note une augmentation de la pente de la courbe entre **9 et 11 ans** pour les individus de sexe féminin alors qu'elle apparaît constante pour les individus de sexe masculin.

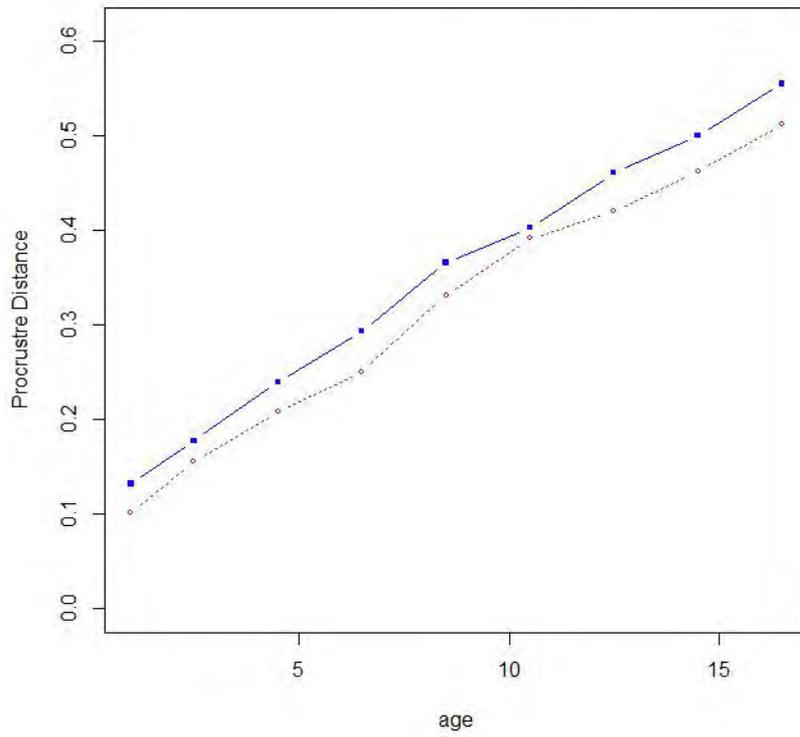


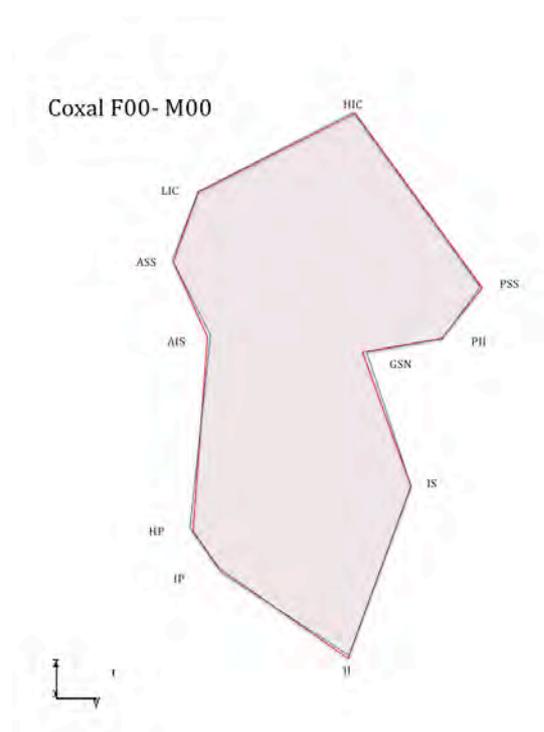
Figure 4-3 Evolution des distances Procrustes des consensus des matrices osseuses du **pubis** des individus masculins (courbe bleue) et des individus féminins (courbe rouge) au cours du temps.

4.4 Localisations anatomiques du dimorphisme

Nous visualisons le dimorphisme sexuel révélé sur les axes des composantes principales en superposant les consensus des matrices osseuses des individus de sexe masculin et féminin de même âge. Les schémas des consensus sont représentés en 3 dimensions.

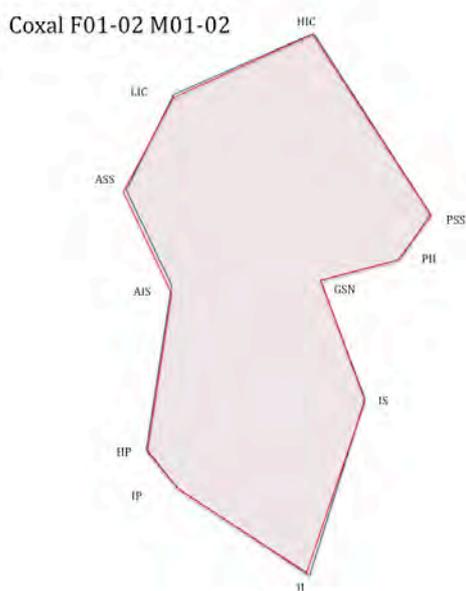
4.4.1.1 Sur la matrice osseuse de l'os coxal

Nous avons choisi de présenter les vues latérales gauches des représentations graphiques en 3 dimensions des consensus des matrices osseuses du coxal de chaque sexe, superposées pour chaque groupe d'âge.



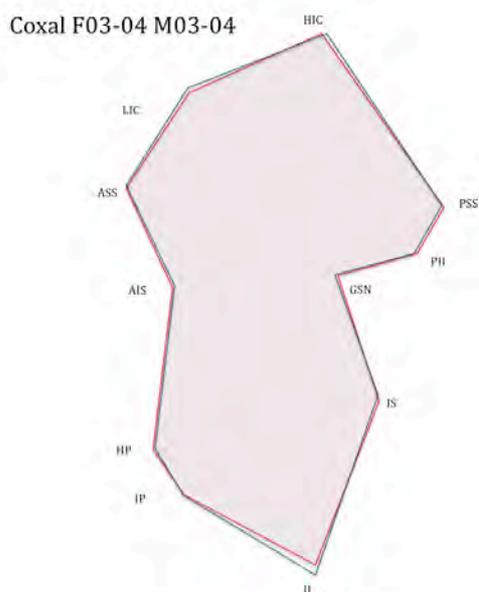
Pour les individus de moins de 1 an, les consensus des matrices osseuses du coxal des individus masculins et féminins sont exactement superposés.

Figure 4-4 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de moins de 1 an (F00 M00)



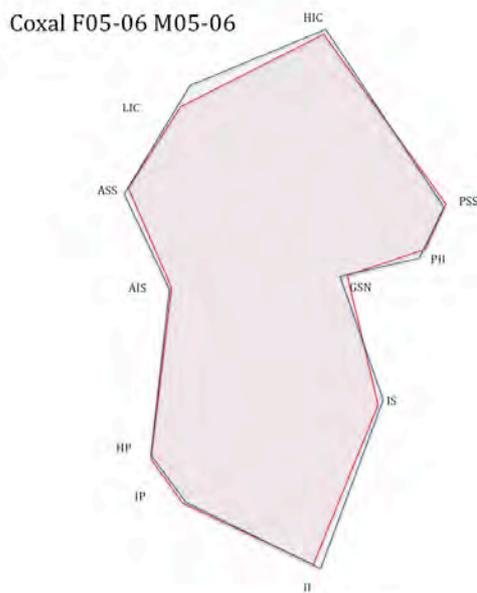
Pour les individus âgés de 1 à 2 ans, les consensus des matrices osseuses du coxal des individus masculins et féminins sont exactement superposés.

Figure 4-5 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 1 et 2 ans (F01-02 M01-02)



Pour les individus âgés de 3 et 4 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses du coxal des individus masculin et féminin âgés permet d'observer que le point II est inférieur sur le consensus des individus masculins. Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe cranio caudal pour les individus de sexe masculin.

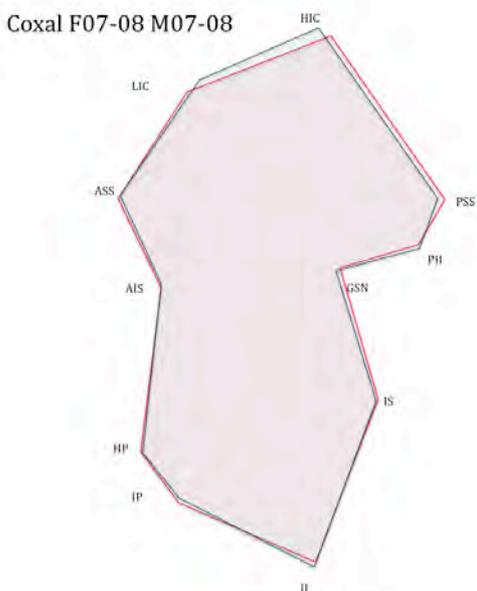
Figure 4-6 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 3 et 4 ans (F03-04 M03-04)



Pour les individus âgés de 5 et 6 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses du coxal des individus masculin et féminin âgés permet d'observer :

- le point II est inférieur sur le consensus des individus masculins. Les points HIC et LIC sont supérieurs sur le consensus des individus masculins. *Le consensus de la matrice osseuse du coxal est plus long dans un axe cranio-caudal pour les individus de sexe masculin.*
- Le point PSS est postérieur sur le consensus des individus féminins. *Le consensus de la matrice osseuse du coxal est plus long dans un axe antéro-postérieur pour les individus de sexe féminin.*

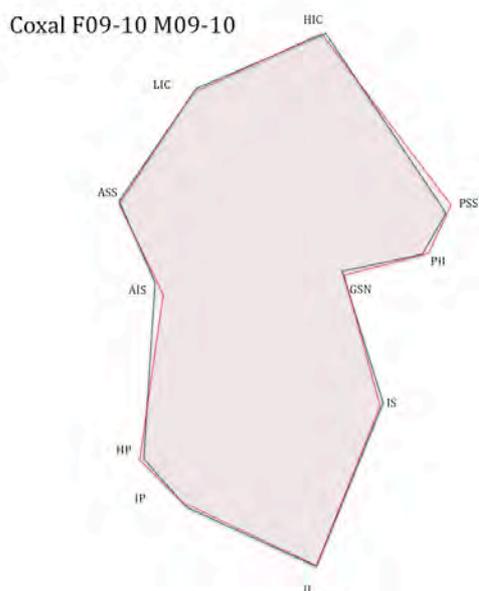
Figure 4-7 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 5 et 6 ans (F05-06 M05-06)



Pour les individus âgés de 7 et 8 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses du coxal des individus masculin et féminin âgés permet d'observer :

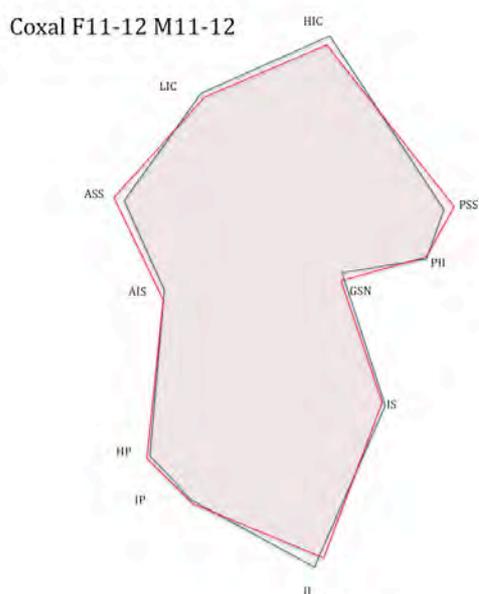
- Les points HIC et LIC sont supérieurs sur le consensus des individus masculins. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe cranio-caudal pour les individus de sexe masculin.*
- Le point PSS est postérieur sur le consensus des individus féminins. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe antéro-postérieur pour les individus de sexe féminin.*

Figure 4-8 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de moins de 7 et 8 ans (F07-08 M07-08)



Pour les individus âgés de 9 et 10 ans, le point PSS est postérieur et supérieur sur le consensus des individus féminins. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe antéro-postérieur pour les individus de sexe féminin.*

Figure 4-9 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de moins de 9 et 10 ans an (F09-10 M09-10)

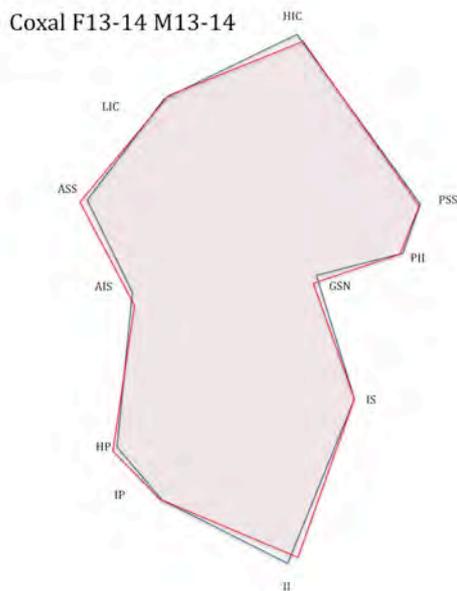


Pour les individus âgés de 11 et 12 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses du coxal des individus masculin et féminin permet d'observer :

- Les points HIC et LIC sont supérieurs sur le consensus des individus masculins. Le point II est inférieur sur les consensus des individus de sexe masculin. *Le consensus de la matrice osseuse du coxal est plus long dans un axe cranio-caudal pour les individus de sexe masculin.*
- Les points PSS et PIS sont postérieurs sur le consensus des individus féminins. Les points ASS et AIS sont antérieurs chez les individus de sexe féminin. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe antéro-postérieur pour les individus de sexe féminin.*
- Le point PIS est supérieur sur le consensus des individus féminins, le point GSN est inférieur sur le consensus des individus masculins. *L'angle IS-GSN-AIS est plus ouvert sur*

le consensus féminin.

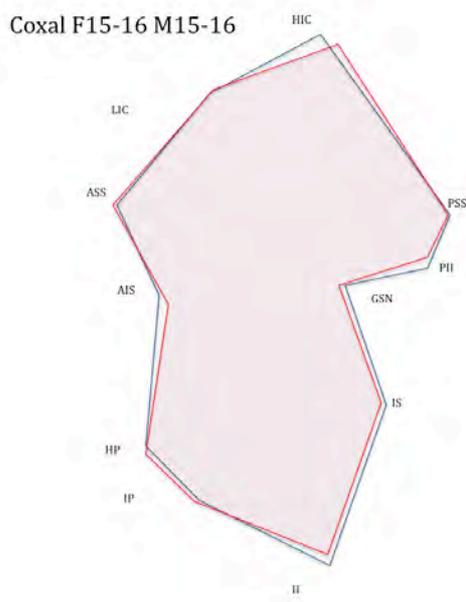
Figure 4-10 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 11 et 12 ans (F11-12 M11-12)



Pour les individus âgés de 13 et 14 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses du coxal des individus masculin et féminin permet d'observer :

- Le point HIC est supérieur sur le consensus des individus masculins. Le point II est inférieur sur les consensus des individus de sexe masculin. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe cranio-caudal pour les individus de sexe masculin.*
- Le point ASS est antérieur chez les individus de sexe féminins. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe antéro-postérieur pour les individus de sexe féminin.*
- Le point GSN est antérieur sur le consensus des individus féminins.

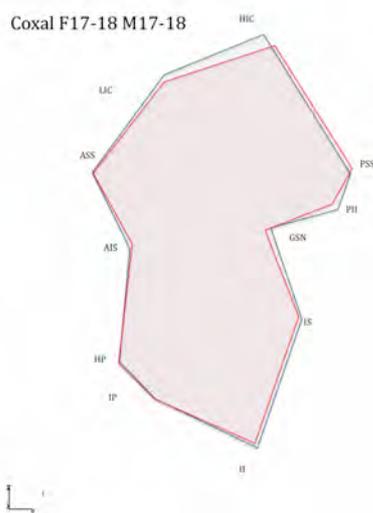
Figure 4-11 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 13 et 14 ans (F13-14 M13-14)



Pour les individus âgés de 15 et 16 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses du coxal des individus masculin et féminin permet d'observer :

- Le point HIC est supérieur sur le consensus des individus masculins. Le point II est inférieur sur les consensus des individus de sexe masculin. *Le consensus de la matrice osseuse du coxal est plus long dans un axe cranio-caudal pour les individus de sexe masculin.*
- Le point ASS est antérieur chez les individus de sexe féminins. *Le point GSN est antérieur sur le consensus des individus féminins.*
- Le point PIS est supérieur sur le consensus des individus féminins. *L'angle IS-GSN-PIS est plus ouvert sur le consensus féminin.*

Figure 4-12 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 15 et 16 ans (F15-16 M15-16)



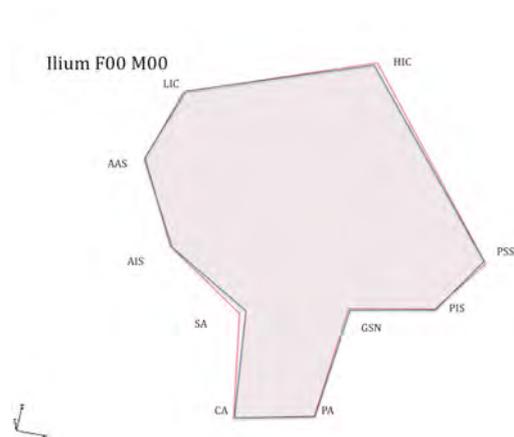
Pour les individus âgés de 17 et 18 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses du coxal des individus masculin et féminin permet d'observer :

- Le point HIC est supérieur sur le consensus des individus masculins. Le point II est inférieur sur les consensus des individus de sexe masculin. *Le consensus de la matrice osseuse du coxal est plus long dans un axe cranio-caudal pour les individus de sexe masculin.*
- Le point ASS est postérieur chez les individus de sexe féminins. *Le consensus de la matrice osseuse du coxal est plus long dans un axe antéro-postérieur pour les individus de sexe féminin.*

Le point PIS est supérieur sur le consensus des individus féminins. *L'angle IS-GSN-PIS est plus ouvert sur le consensus féminin.*

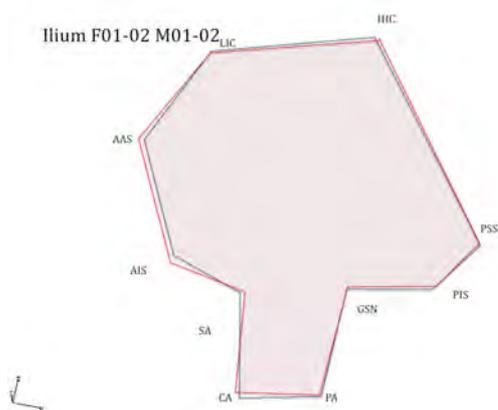
Figure 4-13 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 17 et 18 ans (F17-18 M17-18)

4.4.1.2 Sur la matrice osseuse de l'ilium



Pour les individus de moins de 1 an, la superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculin et féminin ne permet d'observer que des différences ténues. Le point SA est antérieur sur les consensus des individus masculins.

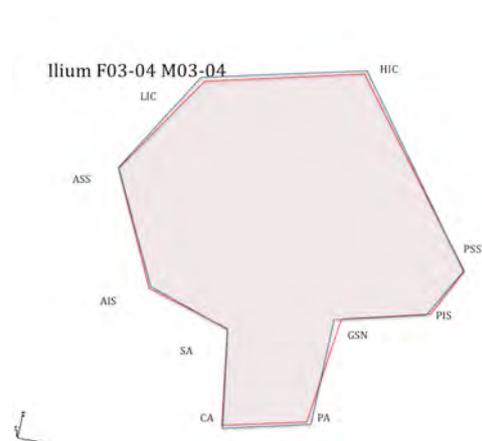
Figure 4-14 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de moins de 1 an (F00 M00)



Pour les individus âgés de 1 à 2 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculin et féminin ne permet d'observer que des différences ténues:

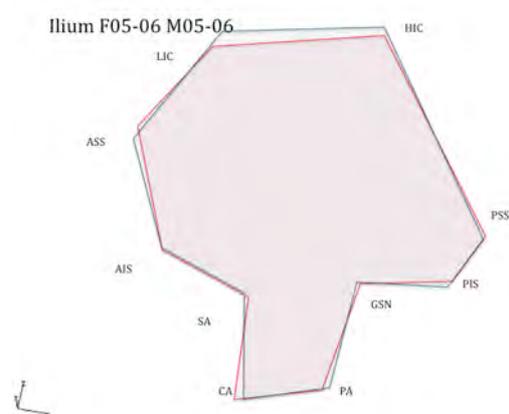
- Les points ASS et AIS sont antérieurs chez les individus de sexe féminins. Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe antéro-postérieur pour les individus de sexe féminin.
- Le point HIC est supérieur chez les individus de sexe masculins et le point CA est inférieur sur le consensus des individus masculins. Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe antéro-postérieur pour les individus de sexe féminin.

Figure 4-15 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 1 et 2 ans (F01-02 M01-02)



Pour les individus âgés de 3 à 4 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculin et féminin ne permet d'observer que des différences ténues: les points HIC et LIC sont supérieurs chez les individus de sexe masculin.

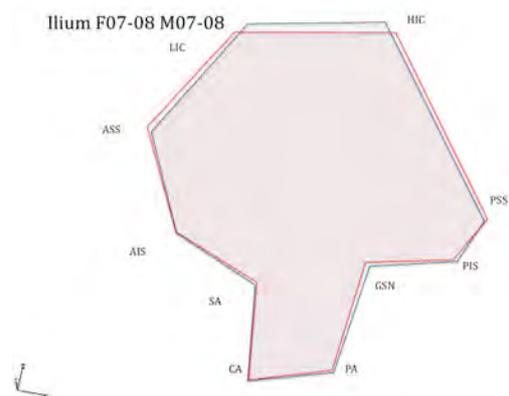
Figure 4-16 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 3 et 4 ans (F03-04 M03-04)



Pour les individus âgés de 5 à 6 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculin et féminin permet d'observer :

- Les points LIC et HIC sont supérieurs sur le consensus masculins. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe cranio caudal pour les individus de sexe masculin.*

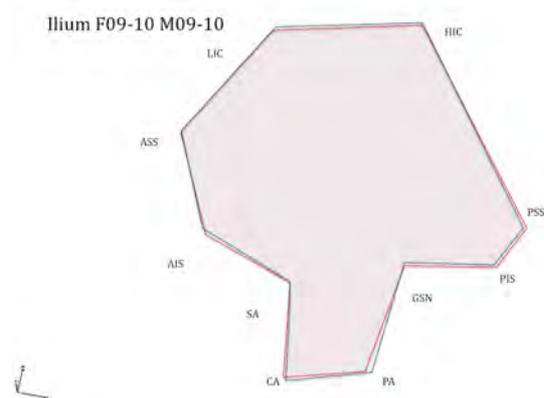
Figure 4-17 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 5 et 6 ans (F05-06 M05-06)



Pour les individus âgés de 7 à 8 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculin et féminin permet d'observer :

- Les points LIC et HIC sont supérieurs sur le consensus masculins. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe cranio caudal pour les individus de sexe masculin.*

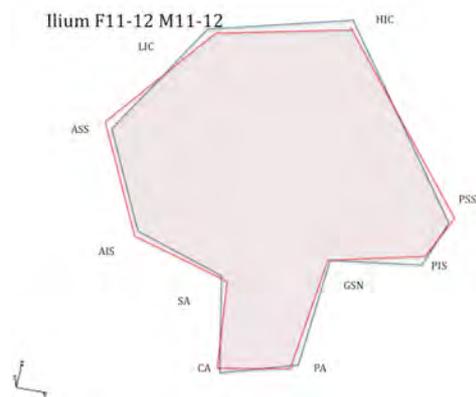
Figure 4-18 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 7 et 8 ans (F07-08 M07-08)



Pour les individus âgés de 9 à 10 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculin et féminin permet d'observer :

- les points CA et PA sont inférieurs sur la matrice des individus masculins

Figure 4-19 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 9 et 10 ans (F09-10 M09-10)



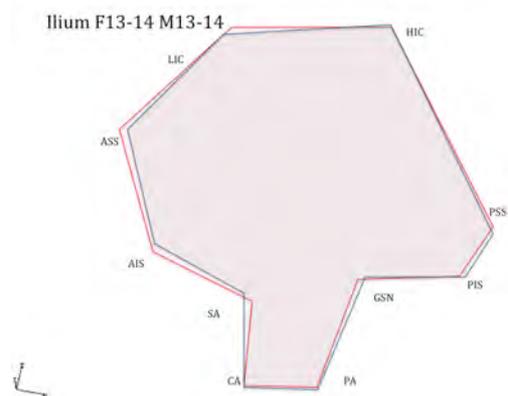
Pour les individus âgés de 11 à 12 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculin et féminin permet d'observer :

- Les points HIC et LIC sont supérieurs sur le consensus des individus masculins. Le point CA est inférieur sur les consensus des individus de sexe masculin. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe cranio-caudal pour les individus de sexe masculin.*

- Le point ASS est antérieur chez les individus de sexe féminins. Le point PSS est postérieur chez les individus de sexe féminin. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe antéro-postérieur pour les individus de sexe féminin.*

- Le point PIS est supérieur sur le consensus des individus féminins. Le point PA est antérieur sur le consensus des individus féminins. *L'angle IS-GSN-PIS est plus ouvert sur le consensus féminin.*

Figure 4-20 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 11 et 12 ans (F11-12 M11-12)



Pour les individus âgés de 13 à 14 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculin et féminin permet d'observer :

- Le point LIC est supérieur sur le consensus des individus masculins. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe cranio-caudal pour les individus de sexe masculin.*

- Les points ASS et AIS sont antérieurs chez les individus de sexe féminins. Le point PSS est postérieur chez les individus de sexe féminin. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe antéro-postérieur pour les individus de sexe féminin.*

Figure 4-21 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 13 et 14 ans (F13-14 M13-14)

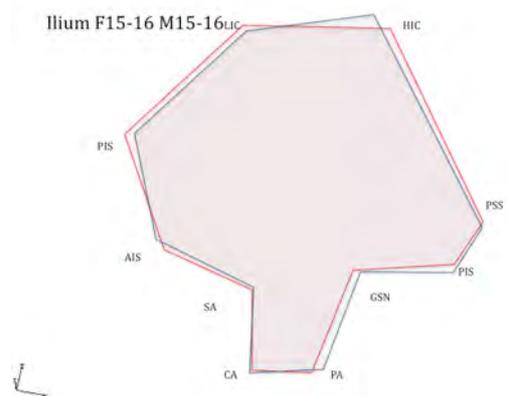


Figure 4-22 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 15 et 16 ans (F15-16 M15-16)

Pour les individus âgés de 15 à 16 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculin et féminin permet d'observer :

- Le points HIC est supérieur sur le consensus des individus masculins. Le point CA est inférieur sur les consensus des individus de sexe masculin. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe cranio-caudal pour les individus de sexe masculin.*

- Le point ASS est antérieur chez les individus de sexe féminins. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe antéro-postérieur pour les individus de sexe féminin.*

- Le point PIS est supérieur sur le consensus des individus féminins. Le point PA est antérieur sur le consensus des individus féminins. *L'angle IS-GSN-PIS est plus ouvert sur le consensus féminin.*

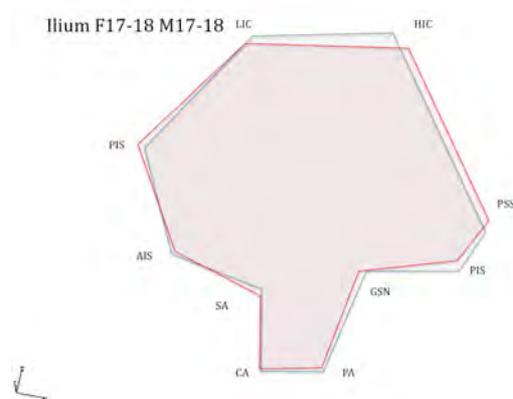


Figure 4-23 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 17 et 18 ans (F17-18 M17-18)

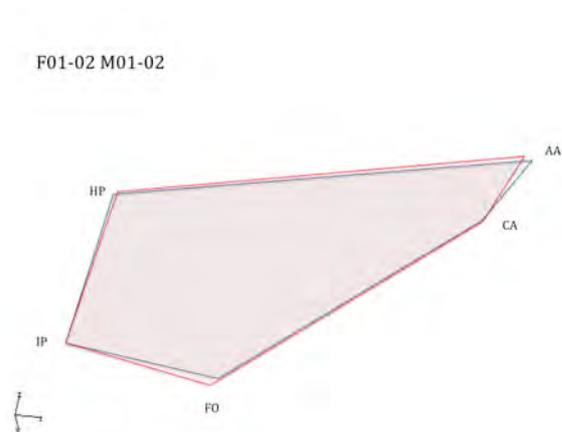
Pour les individus âgés de 17 à 18 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculin et féminin permet d'observer :

- Les points HIC et LIC sont supérieurs sur le consensus des individus masculins. Le point CA est inférieur sur les consensus des individus de sexe masculin. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe cranio-caudal pour les individus de sexe masculin.*

- Le point ASS est antérieur chez les individus de sexe féminins. Le point PSS est postérieur chez les individus de sexe féminin. *Le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe antéro-postérieur pour les individus de sexe féminin.*

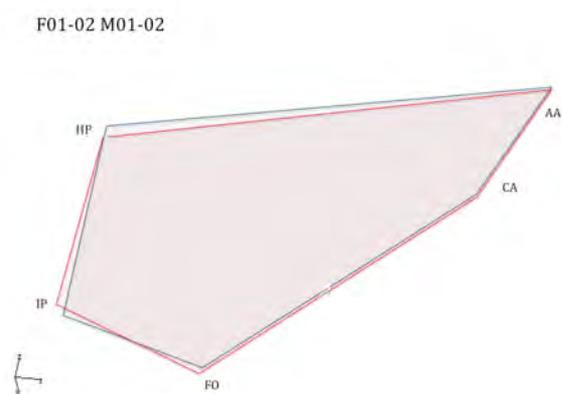
- Le point PIS est supérieur sur le consensus des individus féminins. Le point PA est antérieur sur le consensus des individus féminins. *L'angle IS-GSN-PIS est plus ouvert sur le consensus féminin.*

4.4.1.3 Sur la matrice osseuse du pubis



Pour les individus de moins de 1 an, la superposition des consensus des matrices osseuses des individus masculin et féminin montre une différence ténue de positionnement des points AA et FO.

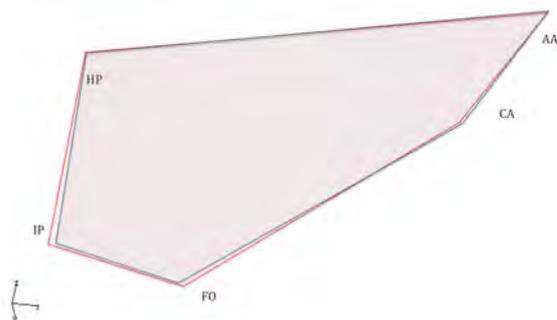
Figure 4-24 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de moins de 1 an (F00 M00)



Pour les individus âgés de 1 à 2 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses des individus masculin et féminin permet d'observer que le point HP est plus cranial et le point IP plus caudal chez les individus de sexe masculin. Le consensus osseux des individus masculins est plus large dans un plan cranio caudal.

Figure 4-25 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 1 et 2 ans (F01-02 M01-02)

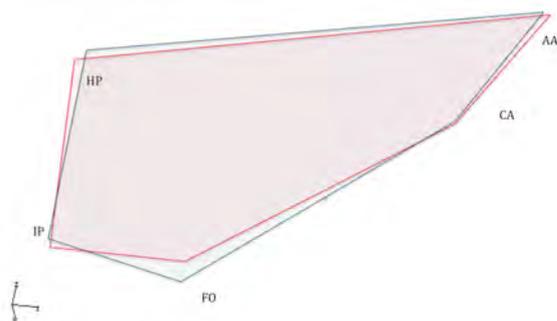
F03-04 M03-04



Pour les individus âgés de 3 à 4 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses des individus masculin et féminin permet d'observer que des différences ténues de positionnement des points IP et FO.

Figure 4-26 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 3 et 4 ans (F03-04 M03-04)

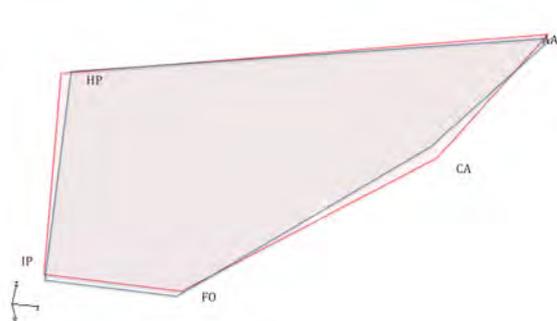
F05-06 M05-06



Pour les individus âgés de 5 à 6 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses des individus masculin et féminin permet d'observer que les points HP et AA sont supérieurs et le point FO inférieur sur le consensus des individus masculins. Le consensus osseux masculin est plus large dans un plan cranio-caudal.

Figure 4-27 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 5 et 6 ans (F05-06 M05-06)

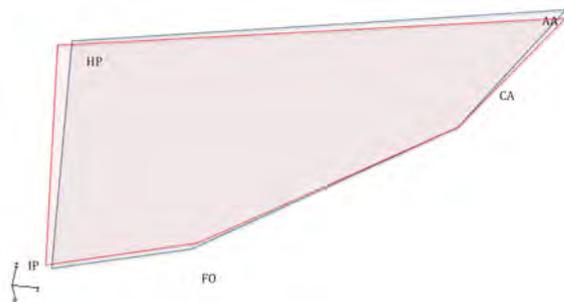
F07-08 M07-08



Pour les individus âgés de 7 à 8 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses des individus masculin et féminin permet d'observer que le point HP est antérieur et le point CA est postérieur sur le consensus des individus féminins. La matrice osseuse des individus féminins est plus large dans un plan antéro postérieur.

Figure 4-28 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 7 et 8 ans (F07-08 M07-08)

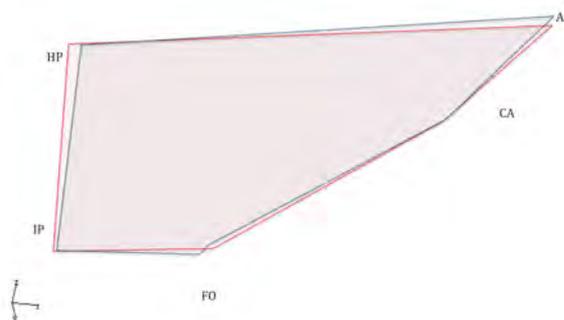
F09-10 M09-10



Pour les individus âgés de 9 à 10 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses des individus masculin et féminin permet d'observer que les points HP et IP sont antérieurs sur le consensus osseux des individus féminins. La matrice osseuse des individus féminins est plus large dans un plan antéro postérieur.

Figure 4-29 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 9 et 10 ans (F09-10 M09-10)

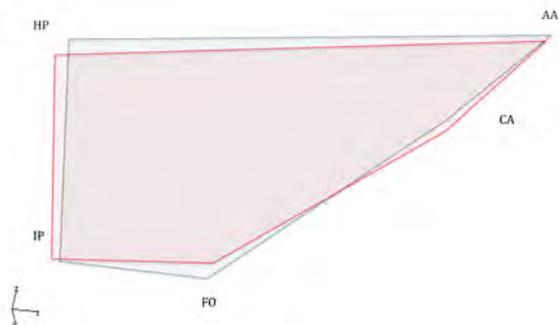
F11-12 M11-12



Pour les individus âgés de 11 à 12 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses des individus masculin et féminin permet d'observer que le point HP est antérieur chez les individus féminins et le point AA est supérieur chez les individus masculins.

Figure 4-30 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 11 et 12 ans (F11-12 M11-12)

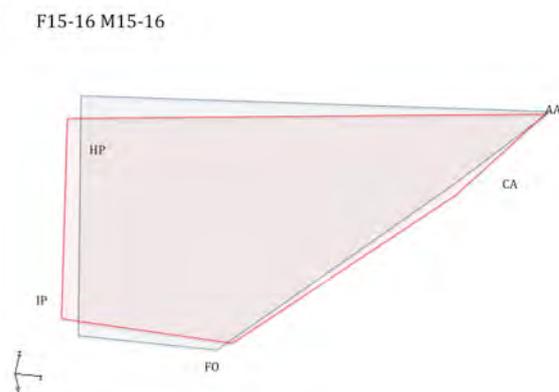
F13-14 M13-14



Pour les individus âgés de 13 à 14 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses des individus masculin et féminin permet d'observer :

- les points HP et AA sont supérieurs sur le consensus des individus masculins, le point FO est inférieur sur le consensus des individus masculins. Le consensus osseux des individus masculins est plus large dans un plan cranio caudal.
- Les points HP et IP sont antérieurs et le point CA et postérieur sur le consensus féminins. Le consensus osseux des individus féminins est plus large dans un plan antéro postérieur.

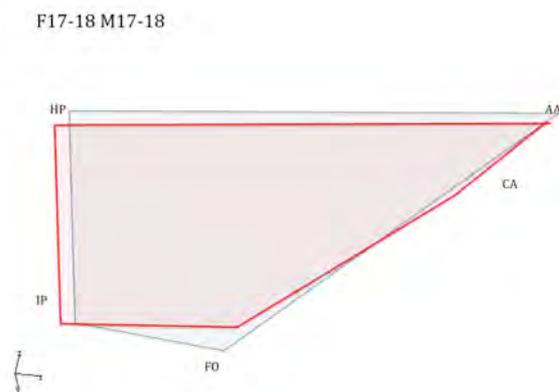
Figure 4-31 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 13 et 14 ans (F13-14 M13-14)



Pour les individus âgés de 15 à 16 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses des individus masculin et féminin :

- les points HP et AA sont supérieurs et les points IP et FO sont inférieurs sur le consensus des individus masculins. La matrice osseuse des individus masculins est plus large dans un plan cranio caudal
- Les points HP et IP sont antérieurs et les points AA et CA sont postérieurs sur le consensus féminin. La matrice osseuse des individus féminins est plus large dans un plan antéropostérieur.

Figure 4-32 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 15 et 16 ans (F15-16 M15-16)



Pour les individus âgés de 17 à 18 ans, la superposition des consensus des matrices osseuses des individus masculin et féminins :

- les points HP et AA sont supérieurs et les points IP et FO sont inférieurs sur le consensus des individus masculins. La matrice osseuse des individus masculins est plus large dans un plan cranio caudal
- Les points HP et IP sont antérieurs et les points AA et CA sont postérieurs sur le consensus féminin. La matrice osseuse des individus féminins est plus large dans un plan antéropostérieur.

Figure 4-33 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis pour les individus masculins (bleu) et féminins (rouge) âgés de 17 et 18 ans (F17-18 M17-18)

4.5 Le dimorphisme sexuel de taille

4.5.1 La taille selon l'âge et le sexe

Une analyse MANOVA des variables de la conformation, c'est à dire des **tailles centroïdes**, est réalisée pour chaque matrice osseuse avec le sexe et/ ou l'âge comme facteurs.

4.5.1.1 *La taille de la matrice osseuse du coxal selon l'âge et le sexe*

On note des différences de **taille** de manière statistiquement significative selon l'**âge** pour la matrice osseuse du **coxal**. La taille de la matrice osseuse du coxal évolue avec l'**âge** : ce résultat illustre la *croissance*.

La matrice osseuse du **coxal** présente des différences de **taille** de manière statistiquement significative selon le **sexe**. Il existe un **dimorphisme sexuel de taille**. Ces différences de taille sont également significatives quand on les étudie, selon **l'âge et le sexe de manière combinée**. Les phénomènes de croissance proprement dite sont différés dans le temps pour les individus de sexe masculin de ceux de sexe féminin ; les phénomènes de croissance ne sont pas synchrones dans les deux sexes.

Tableau 4-9 Analyse MANOVA des variations de taille du **coxal** en fonction de l'âge et/ou du sexe. En gras sont représentées les valeur de p statistiquement significatives ($p < 0,05$)

Critère étudié	Test F de Goodall	P
Sexe	10,9	<0,05
Age	3,42	<0,05
Sexe x Age	2,52	<0,05

4.5.1.2 La taille de la matrice de l'ilium selon l'âge et le sexe

On note des différences de **taille** de manière statistiquement significative selon l'**âge** pour la matrice osseuse du **coxal**. La taille de la matrice osseuse du coxal évolue avec l'**âge** : ce résultat illustre la *croissance*.

La matrice osseuse de **l'ilium** présente des différences de **taille** de manière statistiquement significative selon le **sexe**. Il existe un **dimorphisme sexuel de taille**. Ces différences de taille sont également significatives quand on les étudie, selon **l'âge et le sexe de manière combinée**. Les phénomènes de croissance proprement dite sont différés dans le temps pour les individus de sexe masculin de ceux de sexe féminin ; les phénomènes de croissance ne sont pas synchrones dans les deux sexes.

Tableau 4-10 Analyse MANOVA des variations de taille de **l'ilium** en fonction de l'âge et/ou du sexe. En gras sont représentées les valeur de p statistiquement significatives ($p < 0,05$)

Critère étudié	Test F de Goodall	P
Sexe	57,285	<0,05
Age	8,38	<0,05
Sexe x Age	4,98	<0,05

4.5.1.3 La taille de la matrice du pubis selon l'âge et le sexe

La matrice osseuse du **pubis** présente des différences de **taille** de manière statistiquement significative selon le **sexe**. Il existe un **dimorphisme sexuel de taille**. Ces différences de taille sont également significatives quand on les étudie, selon **l'âge et le sexe de manière combinée**. Les phénomènes de croissance proprement dite sont

différés dans le temps pour les individus de sexe masculin de ceux de sexe féminin ; les phénomènes de croissance ne sont pas synchrones dans les deux sexes.

Tableau 4-11 Analyse MANOVA des variations de taille du **pubis** en fonction de l'âge et/ou du sexe. En gras sont représentées les valeurs de p statistiquement significatives ($p < 0,05$)

Critère étudié	Test F de Goodall	P
Sexe	73,6	<0,05
Age	6,77	<0,05
Sexe x Age	5,82	<0,05

4.5.2 Evaluation des changements de taille au cours du temps

Nous effectuons une régression linéaire entre les tailles centroïdes et l'âge afin d'évaluer la vitesse des changements de taille. La pente des segments de droite entre chaque groupe d'âge représente la vitesse des changements de taille, c'est à dire la croissance.

4.5.2.1 *Pour la matrice osseuse de l'ilium*

Pour la matrice osseuse de l'**ilium**, l'évolution des changements de taille n'est pas superposable pour les individus de sexe féminin et masculin. On note une augmentation de la pente de la courbe à l'**âge de 9 ans** pour les individus de **sexe féminin** et à l'**âge de 11 ans** pour les individus de **sexe masculin**. La vitesse de croissance s'accélère plus précocement pour les individus de sexe féminin.

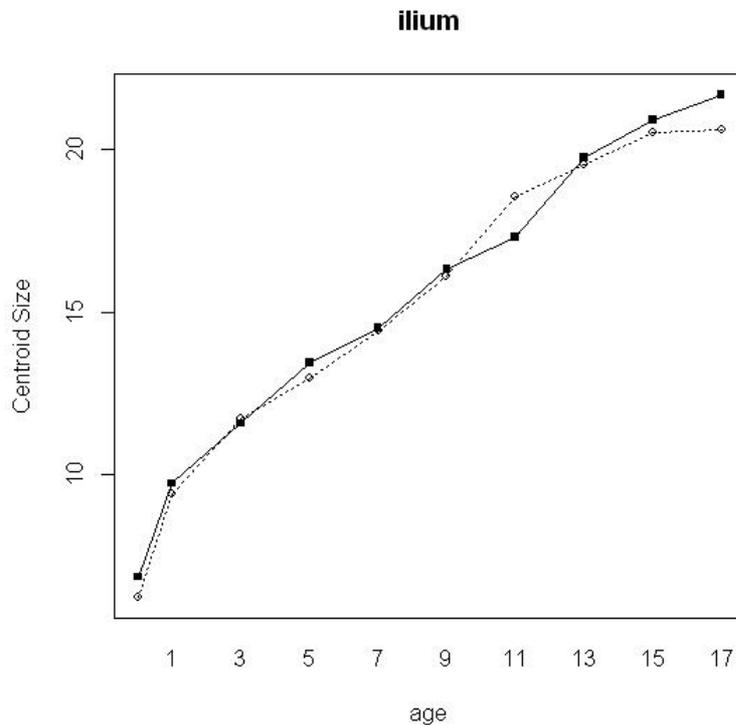


Figure 4-34 Evolution des tailles centroïdes des consensus des matrices osseuses de l'**ilium** des individus masculins (trait plein) et des individus féminins (pointillés) au cours du temps.

4.5.2.2 Pour la matrice osseuse du pubis

Pour la matrice osseuse du **pubis**, on note une augmentation de la pente de la courbe de croissance à **l'âge de 9 ans** pour les individus de **sexe féminin** et à **l'âge de 11 ans** pour les individus de **sexe masculin**. L'accélération des vitesses de croissance est plus précoce pour les individus de sexe féminin : elle apparaît à l'âge de 9 ans pour les individus de sexe féminin et 11 ans pour les individus de sexe masculin.

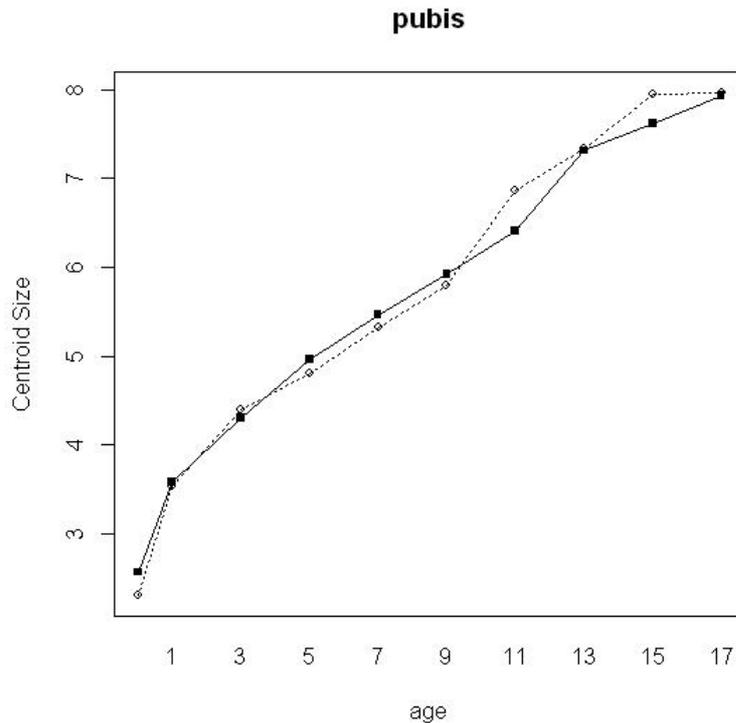


Figure 4-35 Evolution des tailles centroïdes des consensus des matrices osseuses du **pubis** des individus masculins (trait plein) et des individus féminins (pointillés) au cours du temps.

4.6 Ontogénie du coxal

4.6.1 Les variations intra-sexe

4.6.1.1 *Les variations de conformations intra-sexe sur la matrice osseuse **du coxal***

4.6.1.1.1 Analyse discriminante des variations de conformation intra-sexe sur la matrice osseuse du **coxal**

- Pour les individus de sexe féminins

L'analyse des différences de conformation par groupes d'âge adjacent 2 à 2 montre que la conformation de la matrice osseuse du coxal change de manière statistiquement

significative entre les individus âgés de moins de 1 an et ceux âgés de 1 à 2 ans (F00-F00/F01-02), entre ceux âgés de 7 à 8 ans et ceux âgés de 9 à 10 ans (F07-08/F09-10) , et ceux âgés de 15 à 16 ans et ceux âgés de 17 à 18 ans (F15-16/F17-18).

Tableau 4-12 Etude des différences de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du **coxal des individus féminins**: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)

Groupes étudiés	Distances Procrustes	Test F de Goodall (p)
F00-F00/F01-02	0,069	0,009
F01-02 /F03-04	0,032	0,207
F03-04/F05-06	0,026	0,584
F05-06/F07-08	0,034	0,594
F07-08/F09-10	0,036	0,049
F09-10/F11-12	0,032	0,089
F11-12/F13-14	0,029	0,128
F13-14/F15-16	0,028	0,184
F15-16/F17-18	0,044	0,019

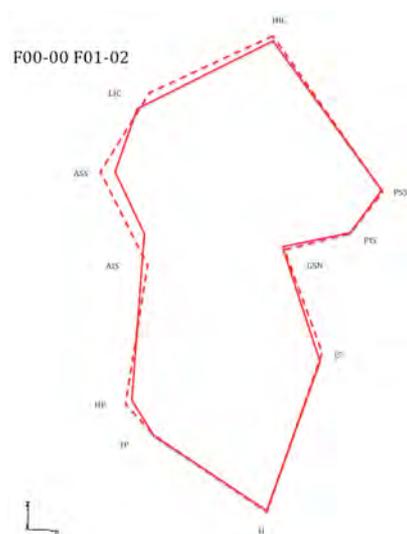
- Pour les individus de sexe masculins

L'analyse des différences de conformation par groupes d'âge adjacent 2 à 2 montre que la conformation de la matrice osseuse du coxal change de conformation de manière statistiquement significative entre les individus âgés de moins de 1 an et ceux âgés de 1 à 2 ans (F00-F00/F01-02), entre ceux âgés de 7 à 8 ans et ceux âgés de 9 à 10 ans (F07-08/F09-10).

Tableau 4-13 Etude des différences de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du **coxal des individus masculins**: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)

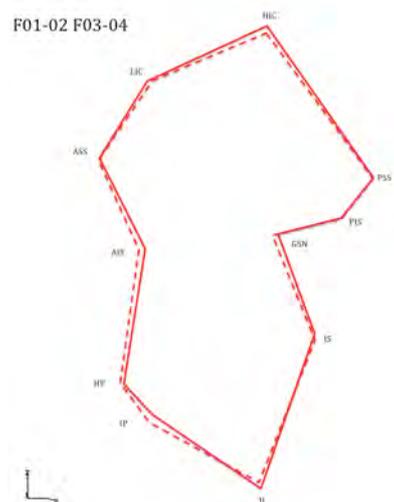
Groupes étudiés	Distances Procrustes	Test F de Goodall (p)
M00-00/M01-02	0,069	0,009
M01-02/M03-04	0,032	0,207
M03-04/M05-06	0,026	0,584
M05-06/M07-08	0,034	0,059
M07-08/M09-10	0,036	0,049
M09-10/M11-12	0,032	0,089
M11-12/M13-14	0,029	0,128
M13-14/M15-16	0,028	0,148
M15-16/M17-18	0,044	0,198

4.6.1.1.2 Les manifestations anatomiques des différences de conformations intra sexe pour la matrice osseuse du **coxal** des individus féminins



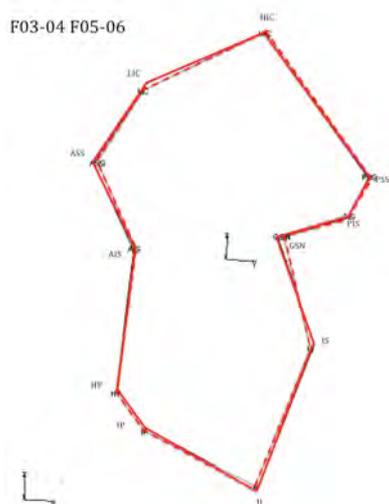
Entre les individus féminins âgés de moins de 1 an et ceux âgés de 1 à 2 ans, (F00-00 F01-02) la superposition des consensus des matrices osseuses permet d'observer que les points LIC et ASS et AIS deviennent postérieurs et supérieurs. La matrice osseuse devient moins large dans un plan antéro postérieur.

Figure 4-36 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins de moins de 1 an F00-00 (pointillés) et des individus féminins âgés de 1 à 2 ans F01-02 (trait plein)



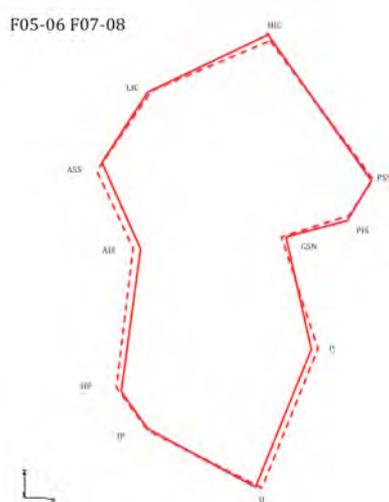
Entre les individus féminins âgés de 1 à 2 ans et ceux âgés de 3 à 4 ans (F01-02 F03-04), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences

Figure 4-37 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 1 à 2 ans F01-02 (pointillés) et des individus féminins âgés de 3 à 4 ans F03-04 (trait plein)



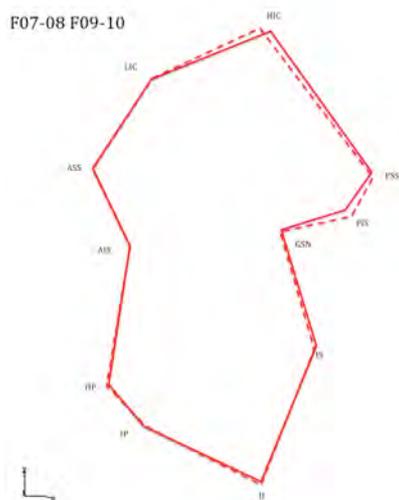
Entre les individus féminins âgés de 3 à 4 ans et ceux âgés de 5 à 6 ans (F03-04 F05-06), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences

Figure 4-38 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 3 à 4 ans F03-04 (pointillés) et des individus féminins âgés de 5 à 6 ans F05-06 (trait plein)



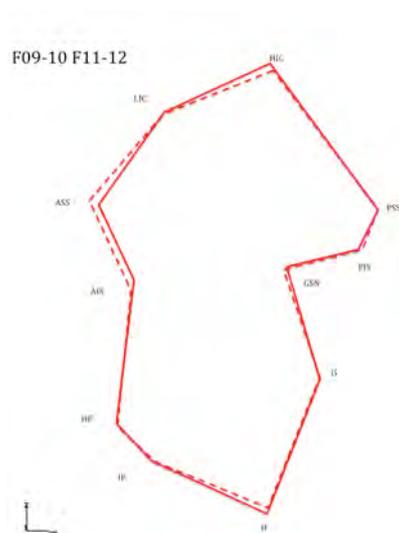
Entre les individus féminins âgés de 5 à 6 ans et ceux âgés de 7 à 8 ans (F05-06 F07-08), la superposition des consensus osseux ne permet d'observer que de petites différences : les points ASS et AIS deviennent postérieurs, le point II devient antérieur.

Figure 4-39 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 5 à 6 ans F05-06 (pointillés) et des individus féminins âgés de 7 à 8 ans F07-08 (trait plein)



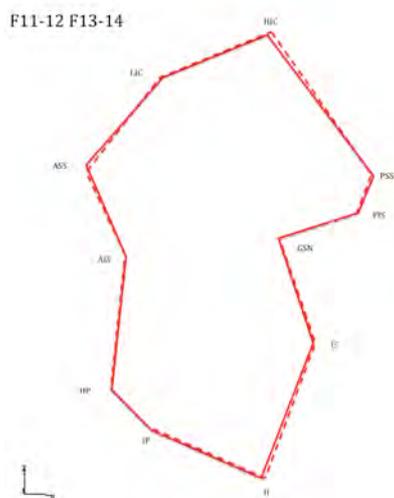
Entre les individus féminins âgés de 7 à 8 ans et ceux âgés de 9 à 10 ans (F07-08 F09-10), la superposition des consensus osseux permet d'observer : les points HIC et PSS deviennent supérieurs, les points PSS et PIS supérieurs. Il existe un étirement postérieur et supérieur.

Figure 4-40 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 7 à 8 ans F07-08 (pointillés) et des individus féminins âgés de 9 à 10 ans F09-10 (trait plein)



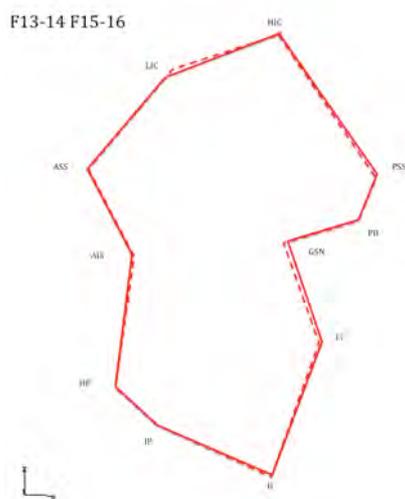
Entre les individus féminins âgés de 9 à 10 ans et ceux âgés de 11 à 12 ans (F09-10 F11-12), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point ASS devient antérieur.

Figure 4-41 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 9 à 10 ans F09-10 (pointillés) et des individus féminins âgés de 11 à 12 ans F11-12 (trait plein)



Entre les individus féminins âgés de 11 à 12 ans et ceux âgés de 13 à 14 ans (F11-12 F13-14), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences.

Figure 4-42 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 11 à 12 ans F11-12 (pointillés) et des individus féminins âgés de 13 à 14 ans F13-14 (trait plein)



Entre les individus féminins âgés de 13 à 14 ans et ceux âgés de 15 à 16 ans (F13-14 F15-16), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences.

Figure 4-43 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 13 à 14 ans F13-14 (pointillés) et des individus féminins âgés de 15 à 16 ans F15-16 (trait plein)

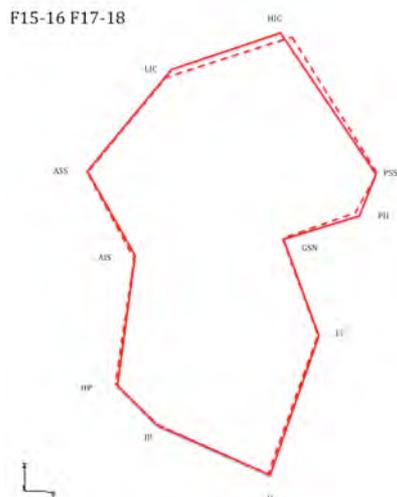


Figure 4-44 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus féminins âgés de 15 à 16 ans F15-16 (pointillés) et des individus féminins âgés de 17 à 18 ans F17-18 (trait plein)

Entre les individus féminins âgés de 15 à 16 ans et ceux âgés de 17 à 18 ans (F15-16 F17-18), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point HIC devient antérieur et supérieur. On observe un allongement dans un plan cranio caudal.

4.6.1.1.3 Les manifestations anatomiques des différences de conformations intra sexe pour **la matrice osseuse du coxal des individus masculins**

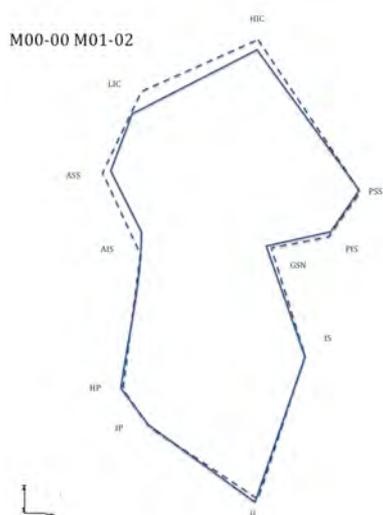
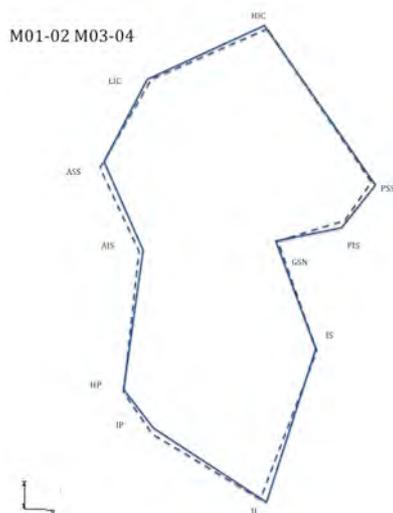


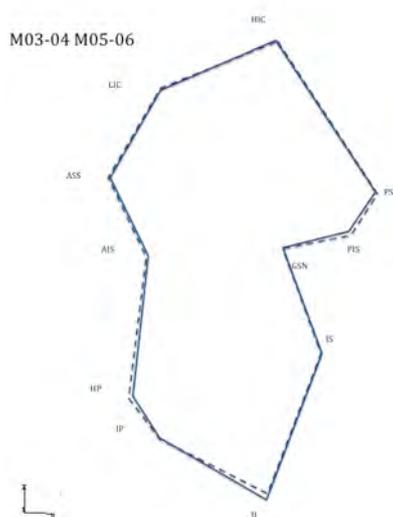
Figure 4-45 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins de moins de 1 an M00-00 (pointillés) et des individus masculins âgés de 1 à 2 ans M01-02 (trait plein)

Entre les individus masculins âgés de moins de 1 an et ceux âgés de 1 à 2 ans, (F00-00 F01-02) la superposition des consensus des matrices osseuses permet d'observer que les points LIC et ASS et AIS deviennent postérieurs et supérieurs. La matrice osseuse devient moins large dans un plan antéro postérieur.



Entre les individus masculins âgés de 1 à 2 ans et ceux âgés de 3 à 4 ans (F01-02 F03-04), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences

Figure 4-46 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 1 à 2 ans M01-02 (pointillés) et des individus masculins âgés de 3 à 4 ans M03-04 (trait plein)



Entre les individus masculins âgés de 3 à 4 ans et ceux âgés de 5 à 6 ans (F03-04 F05-06), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences

Figure 4-47 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 3 à 4 ans M03-04 (pointillés) et des individus masculins âgés de 5 à 6 ans M05-06 (trait plein)

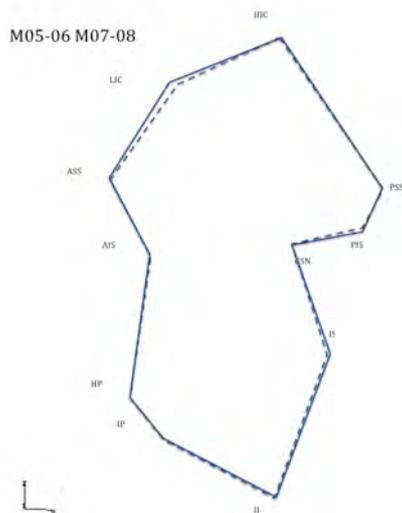


Figure 4-48 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 5 à 6 ans M05-06 (pointillés) et des individus masculins âgés de 7 à 8 ans M07-08 (trait plein)

Entre les individus masculins âgés de 5 à 6 ans et ceux âgés de 7 à 8 ans (F05-06 F07-08), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences

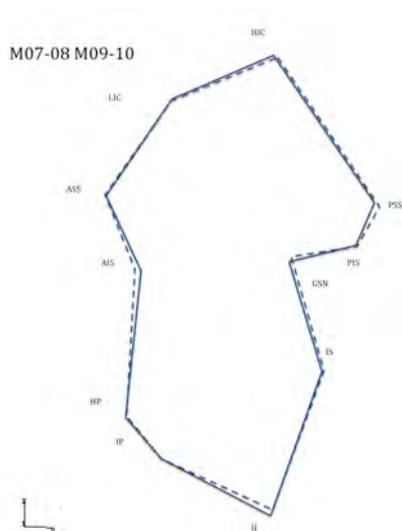
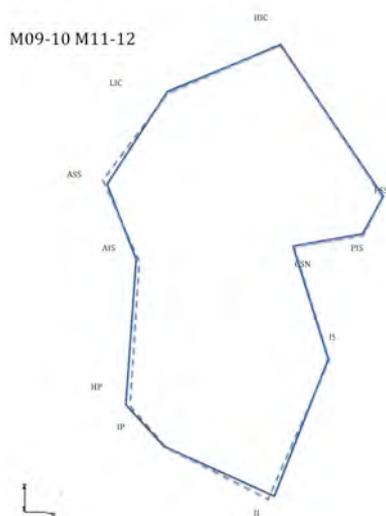


Figure 4-49 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 7 à 8 ans M07-08 (pointillés) et des individus masculins âgés de 9 à 10 ans M09-10 (trait plein)

Entre les individus masculins âgés de 7 à 8 ans et ceux âgés de 9 à 10 ans (F07-08 F09-10), la superposition des consensus osseux permet d'observer que :

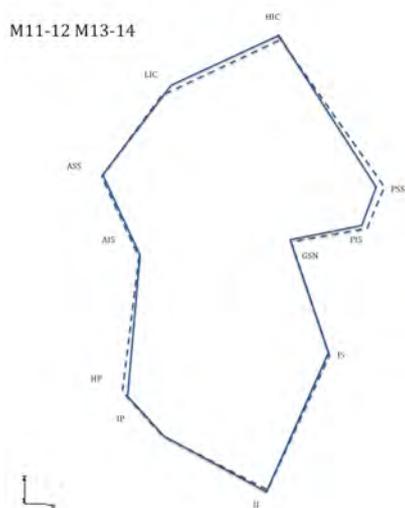
le point ASS est postérieur, le point PIS antérieur. La matrice est moins large dans un plan antéro postérieur

le point HIC est supérieur et le point II est inférieur : la matrice est plus longue dans un plan cranio caudal.



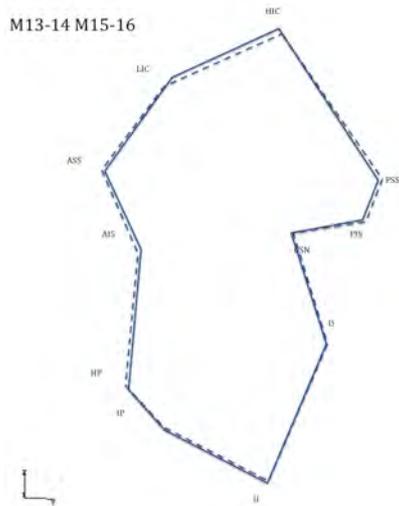
Entre les individus masculins âgés de 9 à 10 ans et ceux âgés de 11 à 12 ans (F09-10 F11-12), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences.

Figure 4-50 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 9 à 10 ans M09-10 (pointillés) et des individus masculins âgés de 11 à 12 ans M11-12 (trait plein)



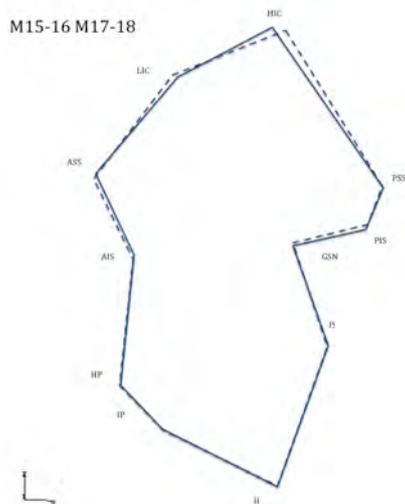
Entre les individus masculins âgés de 11 à 12 ans et ceux âgés de 13 à 14 ans (F11-12 F13-14), la superposition des consensus osseux permet d'observer que les points PSS et PIS deviennent antérieurs.

Figure 4-51 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 11 à 12 ans M11-12 (pointillés) et des individus masculins âgés de 13 à 14 ans M13-14 (trait plein)



Entre les individus masculins âgés de 13 à 14 ans et ceux âgés de 15 à 16 ans (F13-14 F15-16), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences.

Figure 4-52 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 13 à 14 ans M13-14 (pointillés) et des individus masculins âgés de 15 à 16 ans M15-16 (trait plein)



Entre les individus masculins âgés de 15 à 16 ans et ceux âgés de 17 à 18 ans (F15-16 F17-18), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point HIC devient antérieur.

Figure 4-53 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'os coxal des individus masculins âgés de 15 à 16 ans M15-16 (pointillés) et des individus masculins âgés de 17 à 18 ans M17-18 (trait plein)

4.6.1.2 *Les variations de conformations intra-sexe sur la matrice osseuse de l'ilium*

4.6.1.2.1 Analyse discriminante des variations de conformation intra-sexe sur la matrice osseuse de l'ilium

▪ Pour les individus de sexe féminins

L'analyse des différences de conformation par groupes d'âge adjacent 2 à 2 montre que la conformation de la matrice osseuse de l'ilium change de conformation de manière statistiquement significative :

- entre les individus âgés de moins de 1 an et ceux âgés de 1 à 2 ans (F00-F00/F01-02),
- entre ceux âgés de 7 à 8 ans et ceux âgés de 9 à 10 ans (F07-08/F09-10),
- entre ceux âgés de 9-10 ans et ceux âgés de 11-12 ans (F09-10 F11-12)
- et entre ceux âgés de 15 à 16 ans et ceux âgés de 17 à 18 ans (F15-16/F17-18).

Tableau 4-14 Etude des différences de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du **ilium des individus féminins**: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)

Groupes étudiés	Distances Procrustes	Test F de Goodall (p)
F00-F00/F01-02	0,094	0,009
F01-02 /F03-04	0,036	0,267
F03-04/F05-06	0,025	0,891
F05-06/F07-08	0,043	0,059
F07-08/F09-10	0,049	0,009
F09-10/F11-12	0,040	0,019
F11-12/F13-14	0,030	0,336
F13-14/F15-16	0,033	0,237
F15-16/F17-18	0,056	0,009

▪ Pour les individus de sexe masculins

L'analyse des différences de conformation par groupes d'âge adjacent 2 à 2 montre que la conformation de la matrice osseuse de l'ilium change de conformation de manière statistiquement significative :

- entre les individus âgés de moins de 1 an et ceux âgés de 1 à 2 ans (F00-F00/F01-02),
- entre ceux âgés de 5 à 6 ans et ceux âgés de 7 à 8 ans (F05-06/F07-08),
- entre ceux âgés de 13 à 14 ans et ceux âgés de 15 à 16 ans (F13-14/F15-16),
- et entre ceux âgés de 15 à 16 ans et ceux âgés de 17 à 18 ans (F15-16/F17-18)

Tableau 4-15 Etude des différences de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du **ilium des individus masculins**: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)

Groupes étudiés	Distances Procrustes	Test F de Goodall (p)
M00-00/M01-02	0,084	0,009
M01-02/M03-04	0,040	0,059
M03-04/M05-06	0,028	0,326
M05-06/M07-08	0,042	0,049
M07-08/M09-10	0,038	0,128
M09-10/M11-12	0,030	0,445
M11-12/M13-14	0,039	0,118
M13-14/M15-16	0,065	0,009
M15-16/M17-18	0,047	0,009

4.6.1.2.2 Les manifestations anatomiques des différences de conformations intra sexe pour **la matrice osseuse de l'ilium des individus féminins**

Entre les individus féminins âgés de moins de 1 an et ceux âgés de 1 à 2 ans, (F00-00 F01-02) la superposition des consensus des matrices osseuses permet d'observer que le point LIC devient inférieur et antérieur, le point AAS devient postérieur et que le point AIS devient postérieur et supérieur

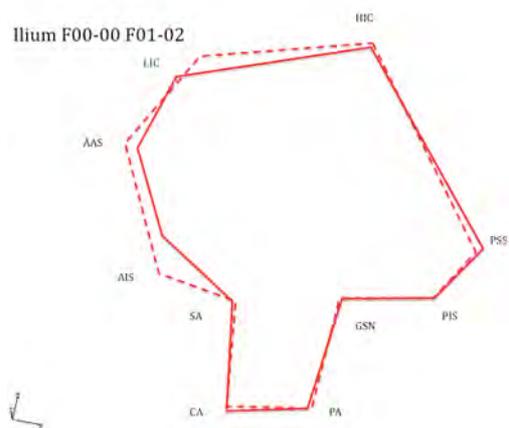


Figure 4-54 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins de moins de 1 an F00-00 (pointillés) et des individus féminins âgés de 1 à 2 ans F01-02 (trait plein)

Entre les individus féminins âgés de 1 à 2 ans et ceux âgés de 3 à 4 ans (F01-02 F03-04), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences

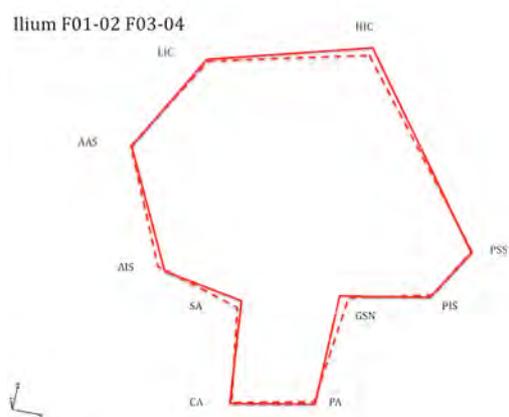
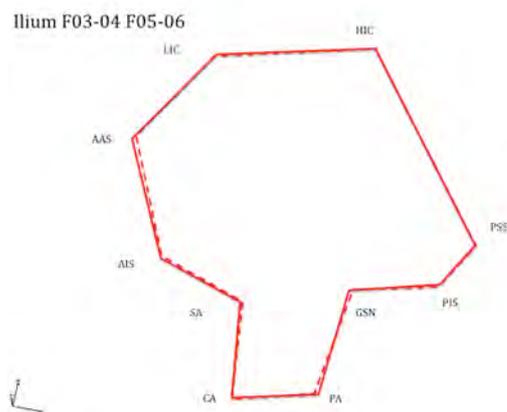
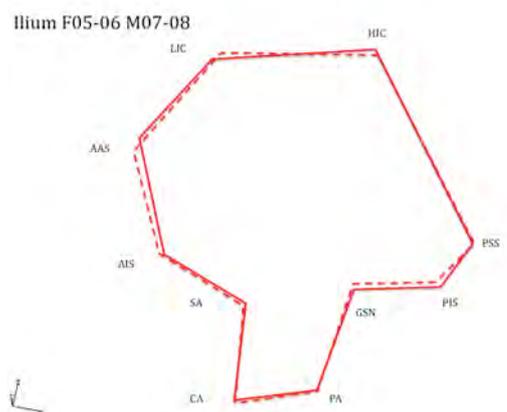


Figure 4-55 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 1 à 2 ans F01-02 (pointillés) et des individus féminins âgés de 3 à 4 ans F03-04 (trait plein)



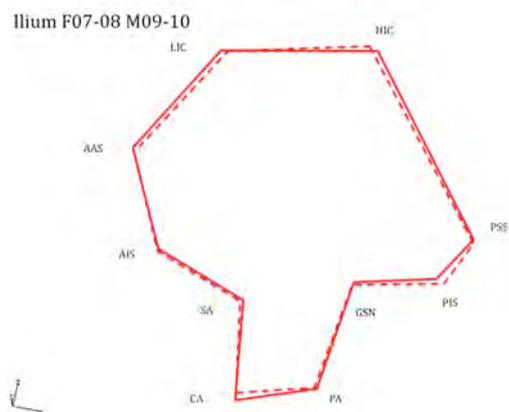
Entre les individus féminins âgés de 3 à 4 ans et ceux âgés de 5 à 6 ans (F03-04 F05-06), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences

Figure 4-56 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 3 à 4 ans F03-04 (pointillés) et des individus féminins âgés de 5 à 6 ans F05-06 (trait plein)



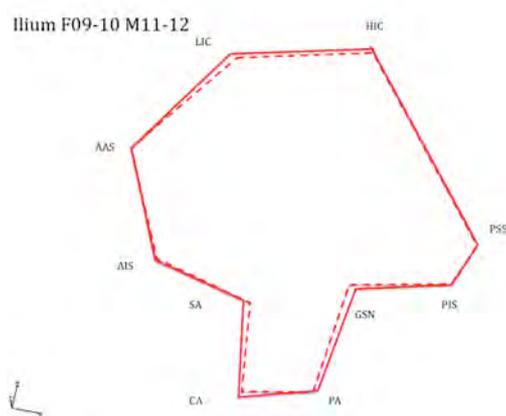
Entre les individus féminins âgés de 5 à 6 ans et ceux âgés de 7 à 8 ans (F05-06 F07-08), la superposition des consensus osseux ne permet d'observer de différences.

Figure 4-57 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 5 à 6 ans F05-06 (pointillés) et des individus féminins âgés de 7 à 8 ans F07-08 (trait plein)



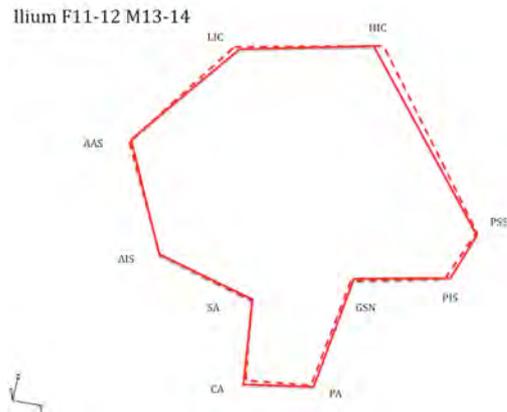
Entre les individus féminins âgés de 7 à 8 ans et ceux âgés de 9 à 10 ans (F07-08 F09-10), la superposition des consensus osseux permet d'observer : le point HIC devient postérieur, le point CA devient inférieur, le point PIS devient antérieur et supérieur. L'angle PIS GSN PA s'ouvre.

Figure 4-58 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 7 à 8 ans F07-08 (pointillés) et des individus féminins âgés de 9 à 10 ans F09-10 (trait plein)



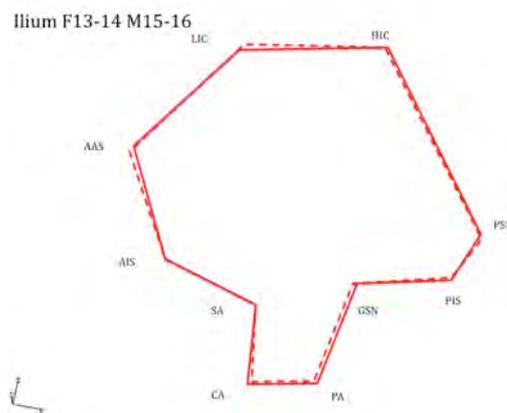
Entre les individus féminins âgés de 9 à 10 ans et ceux âgés de 11 à 12 ans (F09-10 F11-12), la superposition des consensus osseux permet d'observer que les point LIC et HIC deviennent supérieurs. Le point SA devient antérieur, le point GSN devient postérieur. L'angle PIS GSN PA s'ouvre.

Figure 4-59 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 9 à 10 ans F09-10 (pointillés) et des individus féminins âgés de 11 à 12 ans F11-12 (trait plein)



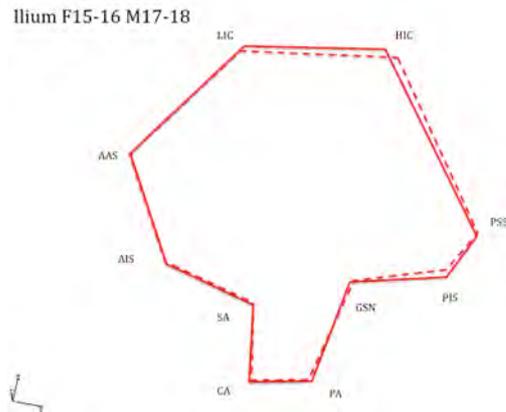
Entre les individus féminins âgés de 11 à 12 ans et ceux âgés de 13 à 14 ans (F11-12 F13-14), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point IIC devient antérieur.

Figure 4-60 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 11 à 12 ans F11-12 (pointillés) et des individus féminins âgés de 13 à 14 ans F13-14 (trait plein)



Entre les individus féminins âgés de 13 à 14 ans et ceux âgés de 15 à 16 ans (F13-14 F15-16), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences.

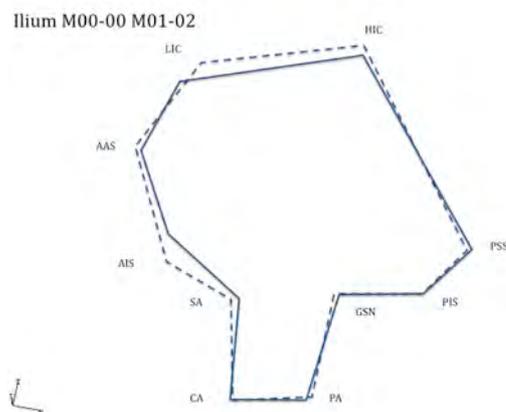
Figure 4-61 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 13 à 14 ans F13-14 (pointillés) et des individus féminins âgés de 15 à 16 ans F15-16 (trait plein)



Entre les individus féminins âgés de 15 à 16 ans et ceux âgés de 17 à 18 ans (F15-16 F17-18), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point HIC devient antérieur et supérieur. On observe un allongement dans un plan cranio caudal.

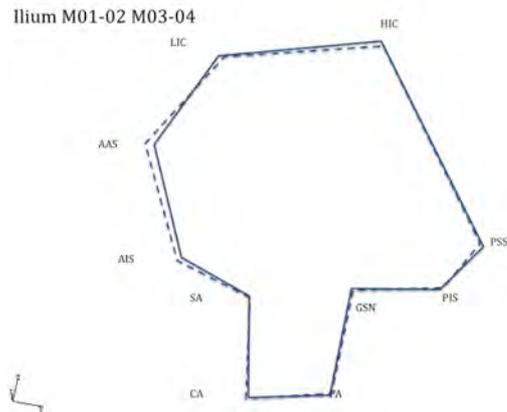
Figure 4-62 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus féminins âgés de 15 à 16 ans F15-16 (pointillés) et des individus féminins âgés de 17 à 18 ans F17-18 (trait plein)

4.6.1.2.3 Les manifestations anatomiques des différences de conformations intra sexe pour la matrice osseuse du coxal des individus masculins



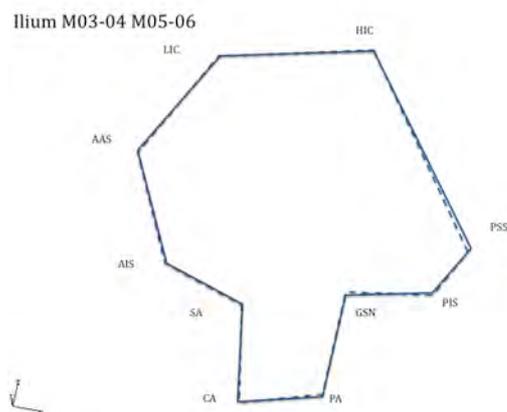
Entre les individus masculins âgés de moins de 1 an et ceux âgés de 1 à 2 ans, (M00-00 M01-02) la superposition des consensus des matrices osseuses permet d'observer que les points ASS et AIS deviennent postérieurs et que le point LIC devient inférieur. La matrice osseuse devient moins large dans un plan antéro postérieur et cranio caudal pour sa partie antérieure.

Figure 4-63 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins de moins de 1 an M00-00 (pointillés) et des individus masculins âgés de 1 à 2 ans M01-02 (trait plein)



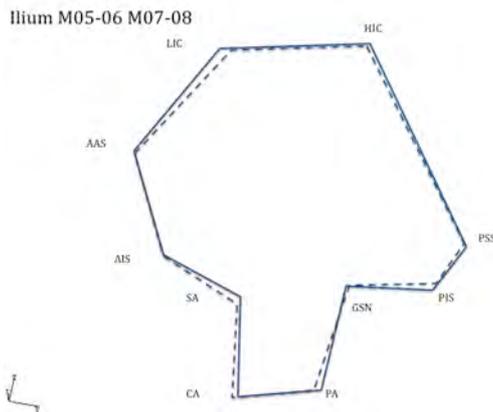
Entre les individus masculins âgés de 1 à 2 ans et ceux âgés de 3 à 4 ans (M01-02 M03-04), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point ASS devient postérieur.

Figure 4-64 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 1 à 2 ans M01-02 (pointillés) et des individus masculins âgés de 3 à 4 ans M03-04 (trait plein)



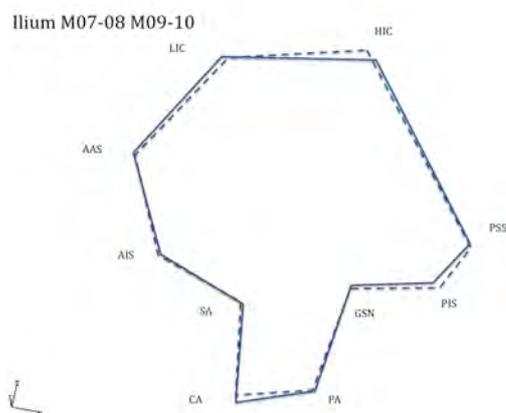
Entre les individus masculins âgés de 3 à 4 ans et ceux âgés de 5 à 6 ans (M03-04 M05-06), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences

Figure 4-65 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 3 à 4 ans M03-04 (pointillés) et des individus masculins âgés de 5 à 6 ans M05-06 (trait plein).



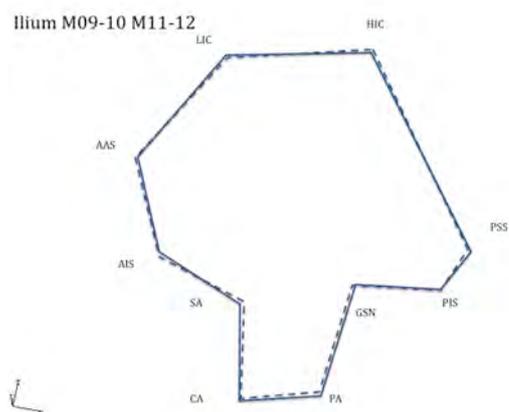
Entre les individus masculins âgés de 5 à 6 ans et ceux âgés de 7 à 8 ans (M05-06 M07-08), la superposition des consensus osseux permet d'observer que les points LIC et SA deviennent supérieurs. Le point PIS devient inférieur et le point PA devient postérieur. L'angle PIS GSN PA se ferme.

Figure 4-66 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 5 à 6 ans M05-06 (pointillés) et des individus masculins âgés de 7 à 8 ans M07-08 (trait plein)



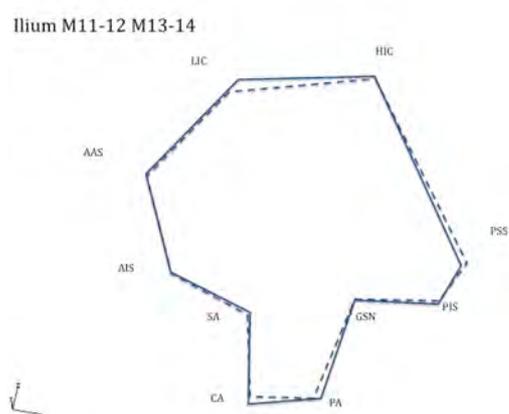
Entre les individus masculins âgés de 7 à 8 ans et ceux âgés de 9 à 10 ans (M07-08 M09-10), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point HIC devient postérieur et inférieur.

Figure 4-67 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 7 à 8 ans M07-08 (pointillés) et des individus masculins âgés de 9 à 10 ans M09-10 (trait plein)



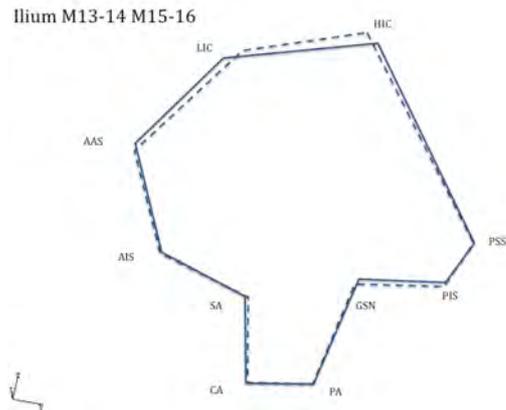
Entre les individus masculins âgés de 9 à 10 ans et ceux âgés de 11 à 12 ans (M09-10 M11-12), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences.

Figure 4-68 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 9 à 10 ans M09-10 (pointillés) et des individus masculins âgés de 11 à 12 ans M11-12 (trait plein)



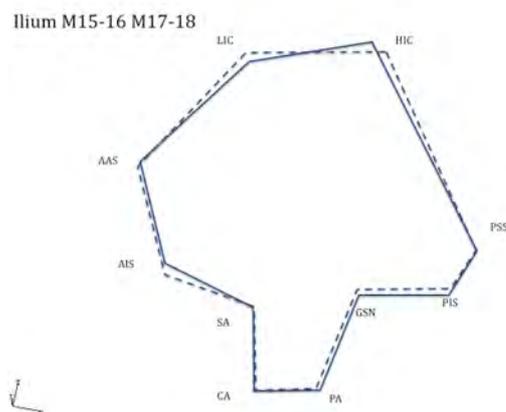
Entre les individus masculins âgés de 11 à 12 ans et ceux âgés de 13 à 14 ans (M11-12 M13-14), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le points LIC devient supérieur.

Figure 4-69 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 11 à 12 ans M11-12 (pointillés) et des individus masculins âgés de 13 à 14 ans M13-14 (trait plein)



Entre les individus masculins âgés de 13 à 14 ans et ceux âgés de 15 à 16 ans (M13-14 M15-16), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point LIC devient antérieur et que le point HIC devient postérieur et inférieur.

Figure 4-70 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 13 à 14 ans M13-14 (pointillés) et des individus masculins âgés de 15 à 16 ans M15-16 (trait plein)



Entre les individus masculins âgés de 15 à 16 ans et ceux âgés de 17 à 18 ans (M15-16 M17-18), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point HIC devient antérieur et supérieur, le point AIS devient supérieur.

Figure 4-71 Superposition des consensus des matrices osseuses de l'ilium des individus masculins âgés de 15 à 16 ans M15-16 (pointillés) et des individus masculins âgés de 17 à 18 ans M17-18 (trait plein)

4.6.1.3 *Les variations de conformations intra-sexe sur la matrice osseuse du **pubis***

4.6.1.3.1 Analyse discriminante des variations de conformation intra-sexe sur la matrice osseuse du pubis

▪ Pour les individus de sexe féminins

L'analyse des différences de conformation par groupes d'âge adjacent 2 à 2 montre que la conformation de la matrice osseuse du pubis change de manière statistiquement significative :

- entre les individus âgés de moins de 1 an et ceux âgés de 1 à 2 ans (F00-F00/F01-02),
- entre ceux âgés de 7 à 8 ans (F07-08/F09-10) et ceux âgés de 9 à 10 ans,
- et entre ceux âgés de 9 à 10 ans et ceux âgés de 11 à 12 ans (F09-10/F11-12).

Tableau 4-16 Etude des différences de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du **pubis des individus féminins**: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)

Groupes étudiés	Distances Procrustes	Test F de Goodall (p)
F00-F00/F01-02	0,101	0,009
F01-02 /F03-04	0,053	0,099
F03-04/F05-06	0,053	0,089
F05-06/F07-08	0,042	0,306
F07-08/F09-10	0,080	0,009
F09-10/F11-12	0,059	0,009
F11-12/F13-14	0,028	0,544
F13-14/F15-16	0,042	0,207
F15-16/F17-18	0,132	0,089

▪ Pour les individus de sexe masculins

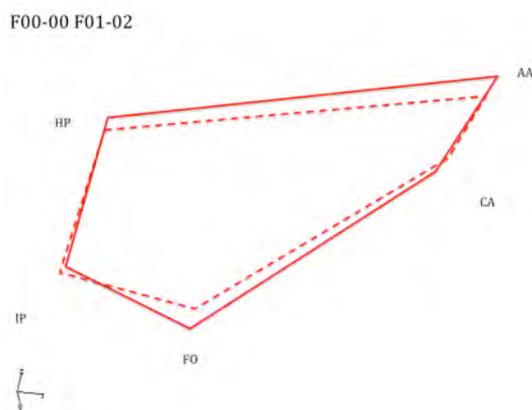
L'analyse des différences de conformation par groupes d'âge adjacent 2 à 2 montre que la conformation de la matrice osseuse du coxal change de manière statistiquement significative :

- entre les individus âgés de moins de 1 an et ceux âgés de 1 à 2 ans (F00-F00/F01-02),
- entre les individus âgés de 3 à 4 ans et ceux âgés de 5 à 6 ans (F03-04 /F05-06)
- et entre les individus âgés de 7 à 8 ans et ceux âgés de 9 à 10 ans (F07-08/F09-10).

Tableau 4-17 Etude des différences de conformation par tranche d'âge pour la matrice osseuse du **pubis des individus masculins**: analyse discriminante par le test de Goodall et calcul des distances Procrustes. Les valeurs statistiquement significatives sont en gras ($p < 0,05$)

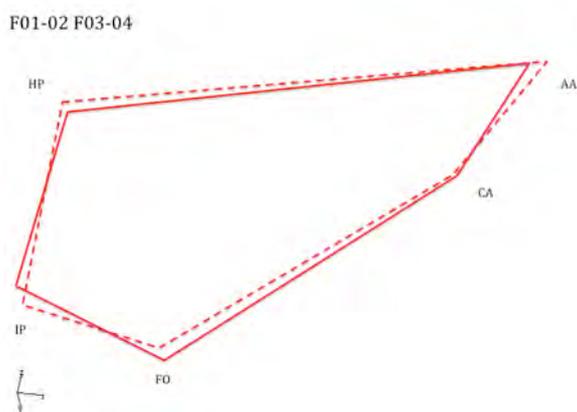
Groupes étudiés	Distances Procrustes	Test F de Goodall (p)
M00-00/M01-02	0,13	0,009
M01-02/M03-04	0,045	0,168
M03-04/M05-06	0,062	0,019
M05-06/M07-08	0,053	0,128
M07-08/M09-10	0,072	0,019
M09-10/M11-12	0,036	0,564
M11-12/M13-14	0,057	0,089
M13-14/M15-16	0,039	0,267
M15-16/M17-18	0,054	0,059

4.6.1.3.1 Les manifestations anatomiques des différences de conformations intra sexe pour la matrice osseuse du **coxal des individus féminins**



Entre les individus féminins âgés de moins de 1 an et ceux âgés de 1 à 2 ans, (F00-00 F01-02) la superposition des consensus des matrices osseuses permet d'observer que les points HP et AA deviennent supérieurs et que le point FO devient inférieur. La matrice osseuse devient plus large dans un plan cranio caudal avec un étirement postéro supérieur

Figure 4-72 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins de moins de 1 an F00-00 (pointillés) et des individus féminins âgés de 1 à 2 ans F01-02 (trait plein)



Entre les individus féminins âgés de 1 à 2 ans et ceux âgés de 3 à 4 ans (F01-02 F03-04), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point FO devient inférieur, le point IP supérieur.

Figure 4-73 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 1 à 2 ans F01-02 (pointillés) et des individus féminins âgés de 3 à 4 ans F03-04 (trait plein)

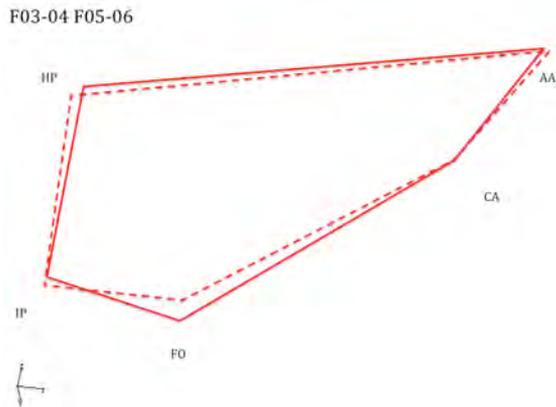


Figure 4-74 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 3 à 4 ans F03-04 (pointillés) et des individus féminins âgés de 5 à 6 ans F05-06 (trait plein)

Entre les individus féminins âgés de 3 à 4 ans et ceux âgés de 5 à 6 ans (F03-04 F05-06), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point FO devient inférieur.

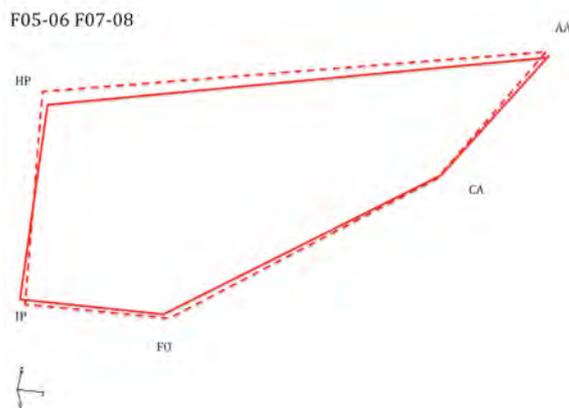


Figure 4-75 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 5 à 6 ans F05-06 (pointillés) et des individus féminins âgés de 7 à 8 ans F07-08 (trait plein)

Entre les individus féminins âgés de 5 à 6 ans et ceux âgés de 7 à 8 ans (F05-06 F07-08), la superposition des consensus osseux ne permet d'observer que de petites différences : le point HP devient supérieur.

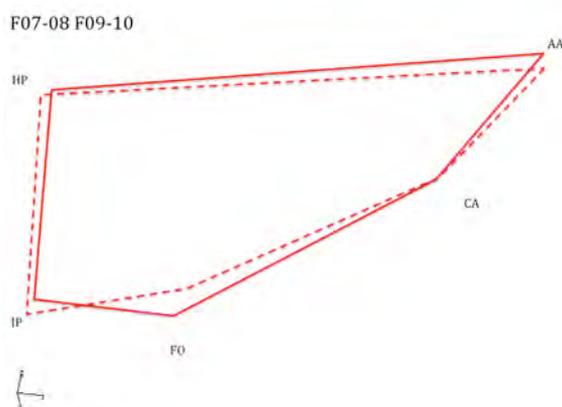


Figure 4-76 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 7 à 8 ans F07-08 (pointillés) et des individus féminins âgés de 9 à 10 ans F09-10 (trait plein)

Entre les individus féminins âgés de 7 à 8 ans et ceux âgés de 9 à 10 ans (F07-08 F09-10), la superposition des consensus osseux permet d'observer : le point AA devient postérieur et supérieur, le point FO devient inférieur.

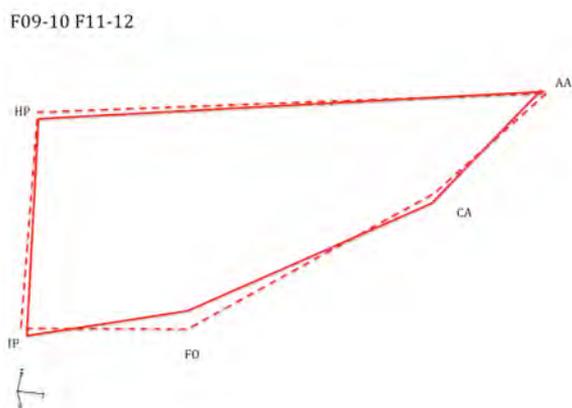


Figure 4-77 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 9 à 10 ans F09-10 (pointillés) et des individus féminins âgés de 11 à 12 ans F11-12 (trait plein)

Entre les individus féminins âgés de 9 à 10 ans et ceux âgés de 11 à 12 ans (F09-10 F11-12), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point FO devient supérieur.

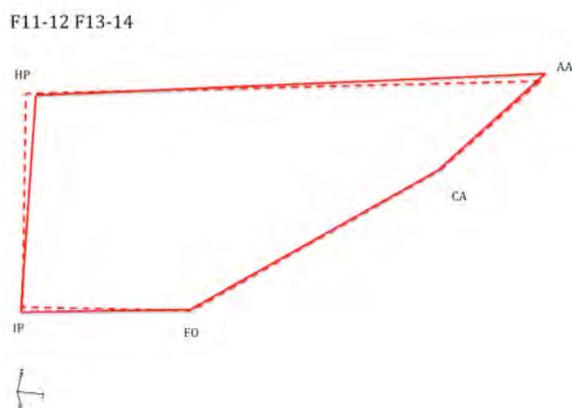


Figure 4-78 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 11 à 12 ans F11-12 (pointillés) et des individus féminins âgés de 13 à 14 ans F13-14 (trait plein)

Entre les individus féminins âgés de 11 à 12 ans et ceux âgés de 13 à 14 ans (F11-12 F13-14), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences.

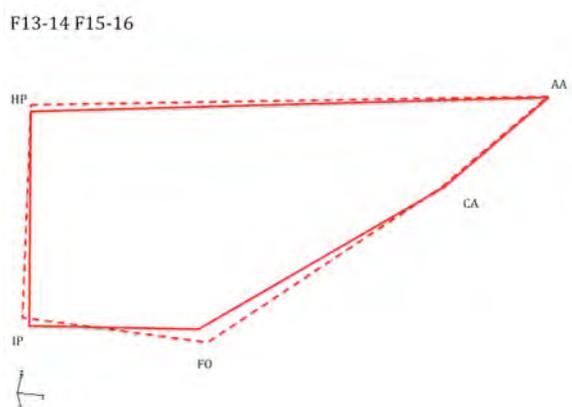
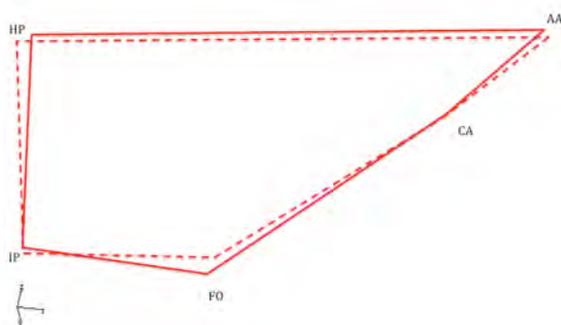


Figure 4-79 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 13 à 14 ans F13-14 (pointillés) et des individus féminins âgés de 15 à 16 ans F15-16 (trait plein)

Entre les individus féminins âgés de 13 à 14 ans et ceux âgés de 15 à 16 ans (F13-14 F15-16), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point FO devient supérieur.

F15-16 F17-18

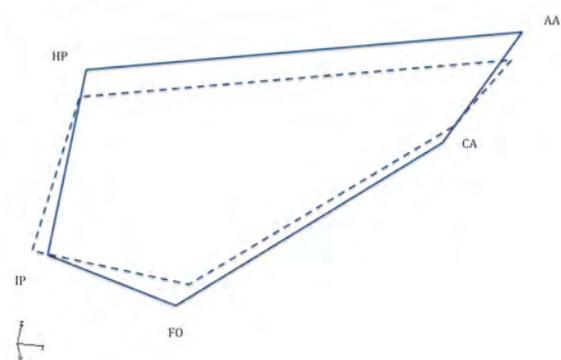


Entre les individus féminins âgés de 15 à 16 ans et ceux âgés de 17 à 18 ans (F15-16 F17-18), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point FO devient inférieur, le point HP antérieur.

Figure 4-80 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus féminins âgés de 15 à 16 ans F15-16 (pointillés) et des individus féminins âgés de 17 à 18 ans F17-18 (trait plein)

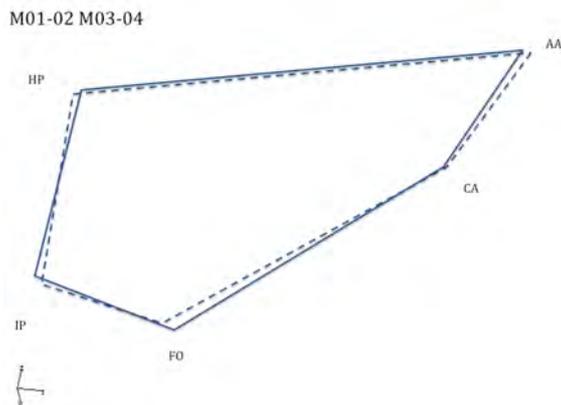
4.6.1.3.1 Les manifestations anatomiques des différences de conformations intra sexe pour **la matrice osseuse du coxal des individus masculins**

M00-00 M01-02



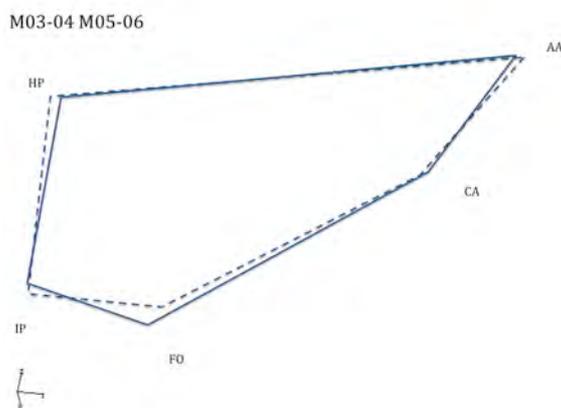
Entre les individus masculins âgés de moins de 1 an et ceux âgés de 1 à 2 ans, (M00-00 M01-02) la superposition des consensus des matrices osseuses permet d'observer que les points HP et AA deviennent supérieurs, le point FO inférieur. La matrice osseuse devient plus large dans un plan cranio caudal.

Figure 4-81 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins de moins de 1 an M00-00 (pointillés) et des individus masculins âgés de 1 à 2 ans M01-02 (trait plein)



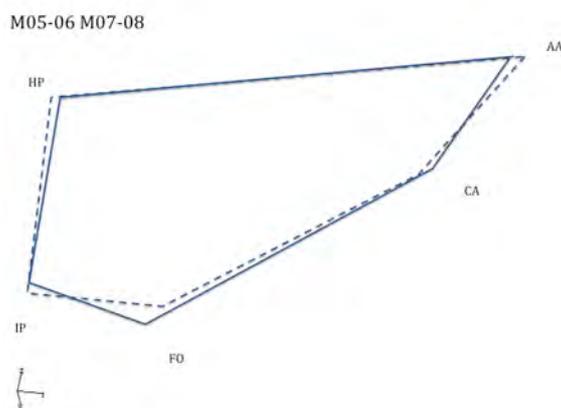
Entre les individus masculins âgés de 1 à 2 ans et ceux âgés de 3 à 4 ans (M01-02 M03-04), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point FO devient inférieur.

Figure 4-82 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 1 à 2 ans M01-02 (pointillés) et des individus masculins âgés de 3 à 4 ans M03-04 (trait plein)



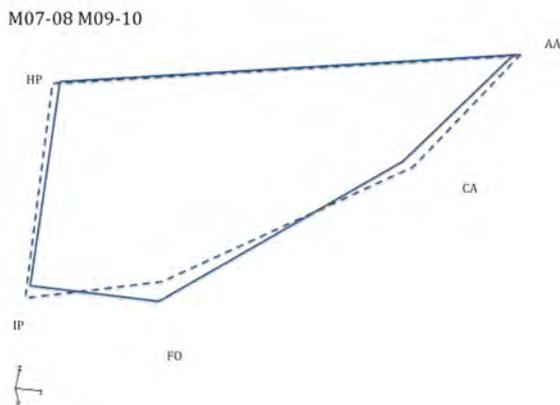
Entre les individus masculins âgés de 3 à 4 ans et ceux âgés de 5 à 6 ans (M03-04 M05-06), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point FO devient inférieur.

Figure 4-83 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 3 à 4 ans M03-04 (pointillés) et des individus masculins âgés de 5 à 6 ans M05-06 (trait plein)



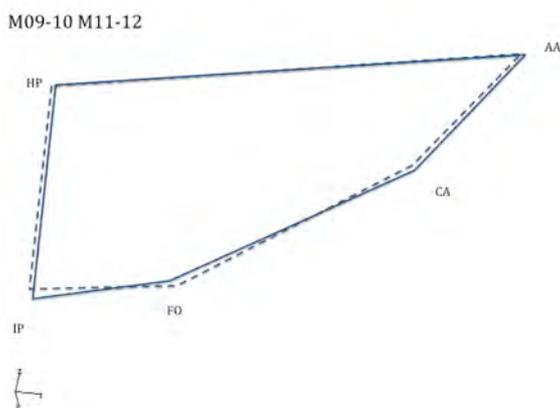
Entre les individus masculins âgés de 5 à 6 ans et ceux âgés de 7 à 8 ans (M05-06 M07-08), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point FO devient inférieur.

Figure 4-84 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 5 à 6 ans M05-06 (pointillés) et des individus masculins âgés de 7 à 8 ans M07-08 (trait plein)



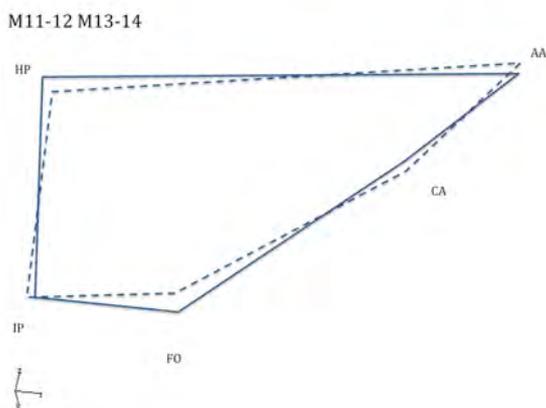
Entre les individus masculins âgés de 7 à 8 ans et ceux âgés de 9 à 10 ans (M07-08 M09-10), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point FO devient inférieur.

Figure 4-85 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 7 à 8 ans M07-08 (pointillés) et des individus masculins âgés de 9 à 10 ans M09-10 (trait plein)



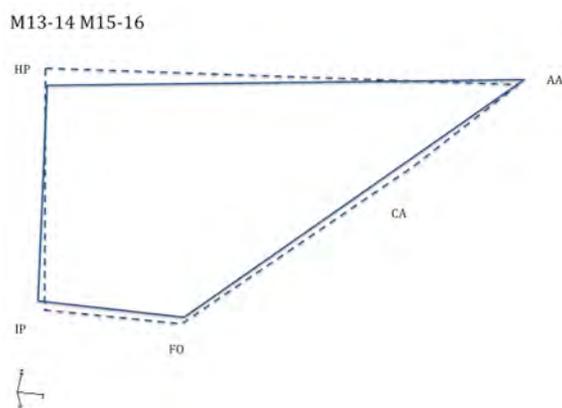
Entre les individus masculins âgés de 9 à 10 ans et ceux âgés de 11 à 12 ans (M09-10 M11-12), la superposition des consensus osseux ne permet pas d'observer de différences.

Figure 4-86 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 9 à 10 ans M09-10 (pointillés) et des individus masculins âgés de 11 à 12 ans M11-12 (trait plein)



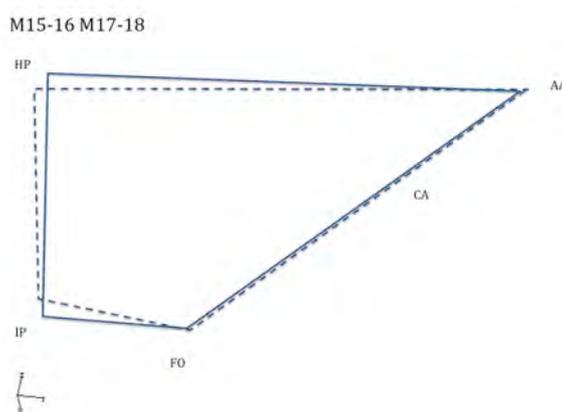
Entre les individus masculins âgés de 11 à 12 ans et ceux âgés de 13 à 14 ans (M11-12 M13-14), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point FO devient inférieur.

Figure 4-87 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 11 à 12 ans M11-12 (pointillés) et des individus masculins âgés de 13 à 14 ans M13-14 (trait plein)



Entre les individus masculins âgés de 13 à 14 ans et ceux âgés de 15 à 16 ans (M13-14 M15-16), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point HP devient inférieur.

Figure 4-88 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 13 à 14 ans M13-14 (pointillés) et des individus masculins âgés de 15 à 16 ans M15-16 (trait plein)



Entre les individus masculins âgés de 15 à 16 ans et ceux âgés de 17 à 18 ans (M15-16 M17-18), la superposition des consensus osseux permet d'observer que le point HP devient supérieur, le point IP inférieur.

Figure 4-89 Superposition des consensus des matrices osseuses du pubis des individus masculins âgés de 15 à 16 ans M15-16 (pointillés) et des individus masculins âgés de 17 à 18 ans M17-18 (trait plein)

4.6.2 Les variations inter sexe

Les Analyses en Composante Principale des trois matrices osseuses étudiées objectivent que les trajectoires des consensus osseux diffèrent pour les individus de sexe masculin et ceux de sexe féminin. Ainsi, pour chaque matrice osseuse étudiée, l'ACP objective que les trajectoires des groupes féminins et masculins ne sont pas parallèles.

(Figure 4-91, Figure 4-92, Figure 4-93) Il est vrai que les trajectoires de formes des matrices osseuses étudiées sont des phénomènes complexes et ne se résument pas aux projections sur les deux premiers axes de l'ACP. Cependant, ces deux premiers axes représentent un pourcentage très élevé de la variance totale.

La régression logarithmique entre la taille centroïde et l'axe PC1 (Figure 4-90) objective une distribution linéaire des individus, pour chaque consensus osseux; ceci signifie que les variations sur l'axe PC1 de l'analyse en composante principale sont liées à la taille de manière prédominante. On remarque aussi que pour chaque matrice osseuse étudiée, il apparaît une distribution le long de l'axe PC1 des groupes d'individus définis par l'âge, par ordre d'âge croissant pour le coxal et le pubis ou décroissant pour l'ilium. De plus, on observe peu de variation de localisation le long du premier axe, entre les consensus de même âge mais de sexe différent, alors que les consensus d'âge différent sont bien différenciés sur l'axe PC1 pour les deux sexes. Cette variation représente l'évolution de la taille liée à la croissance. Les matrices osseuses croissent en **taille** avec l'**âge** : c'est la **croissance** proprement dite.

Les variations sur le deuxième axe de l'ACP (PC2) sont, elles, plutôt corrélées, aux changements de conformation.

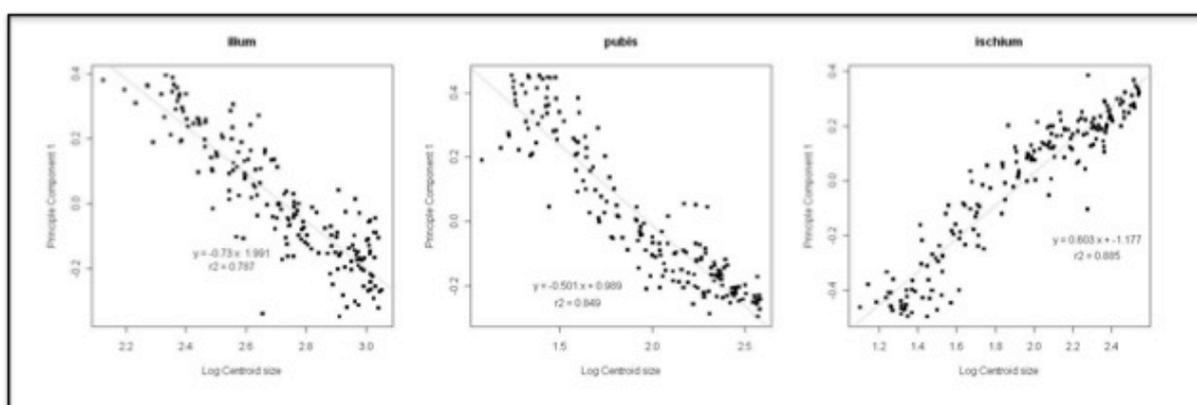


Figure 4-90 Courbes des régressions logarithmiques du premier axe de l'Analyse en Composante Principale (ACP) avec les valeurs des tailles centroïdes pour les matrices osseuses de l'ilium, de l'ischium et du pubis.

4.6.2.1 Trajectoire de la matrice osseuse du coxal

L'analyse de l'ACP de la matrice du coxal montre que les groupes M00 et F00 sont presque superposés : il n'y a pas de différence de taille ou de conformation. Les courbes des individus féminins et masculins n'ont pas la même trajectoire, montrant que les changements de conformation et de taille sont asynchrones selon les sexes. Les groupes de même âge s'éloignent selon l'axe PC2 et PC1 avec l'âge pour être maximal entre les groupes des individus les plus âgés.

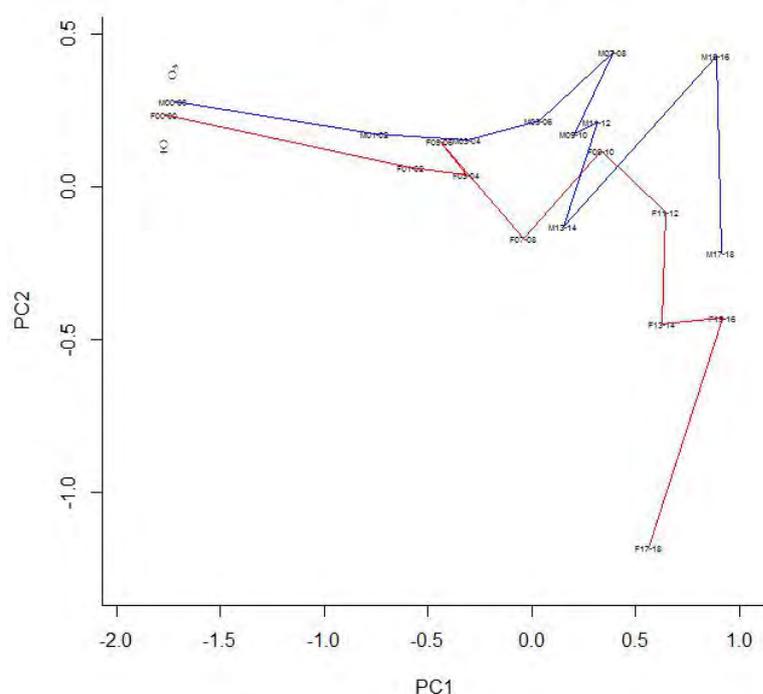


Figure 4-91 Analyse en Composante Principale des résidus Procrustes des matrices osseuses du **coxal**. Les consensus moyens de chaque groupe sont reliés par des segments de droite pour faciliter la visualisation des trajectoires. Les axes 1 et 2 expliquent respectivement **24,91 %** et **13,02 %** de la variation de l'échantillon.

4.6.2.2 Trajectoire de la matrice osseuse de l'ilium

Les groupes masculins et féminins âgés de moins de 1 an sont superposés : il n'y a pas de différences de taille ou de conformation. Les groupes diffèrent selon l'axe PC2 dès l'âge de 1 an (F01-02 /M01-02). Cette différence est maximale pour les individus de plus de 17 ans (F17-18 /M17-18) alors qu'ils diffèrent peu selon l'axe PC1. Il y a plus de différence de conformation que de taille.

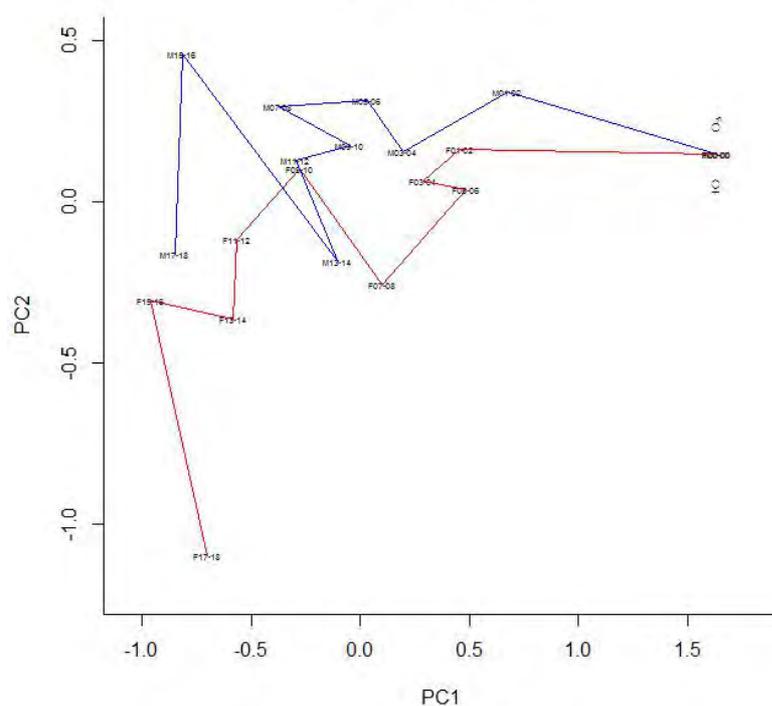


Figure 4-92 Analyse en Composante Principale des résidus Procrustes des matrices osseuses de l' **ilium**. Les consensus moyens de chaque groupe sont reliés par des segments de droite pour faciliter la visualisation des trajectoires. Les axes 1 et 2 expliquent respectivement **28,39 %** et **14,59 %** de la variation de l'échantillon.

4.6.2.3 Trajectoire de la matrice osseuse du pubis

Les groupes masculins et féminins de moins de 1 an (F00 /M00) diffèrent sur l'axe PC1 mais sont alignés sur l'axe PC2. Dès cet âge il existe des différences de taille pour la matrice osseuse du pubis mais pas de conformation. Ces différences de taille deviennent moins importantes entre 5 et 8 ans et sont maximales pour les individus de plus de 17 ans. Les différences selon l'axe PC2

apparaissent dès l'âge de 1 an (F01-02 /M01-02) et varient peu jusqu'à l'âge adulte.

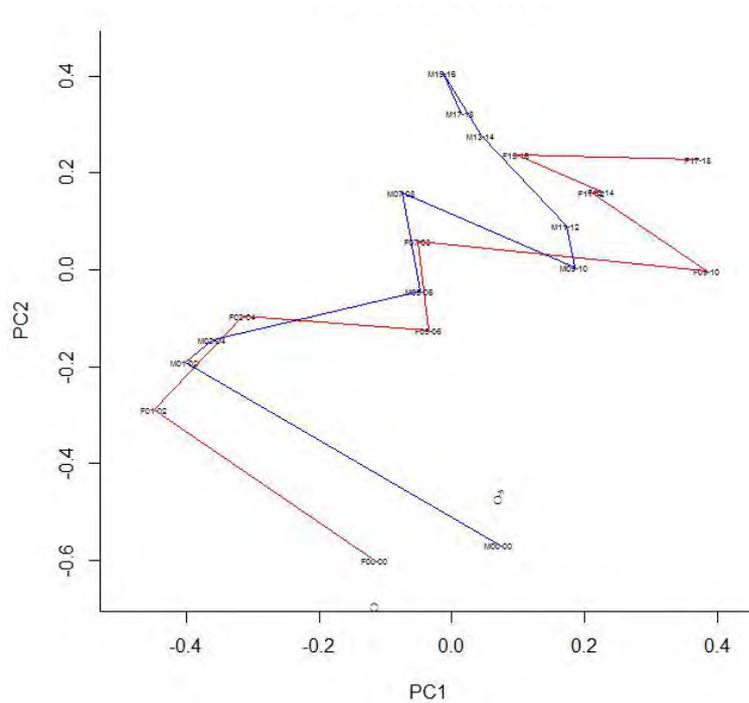


Figure 4-93 Analyse en Composante Principale des résidus Procrustes des matrices osseuses du **pubis**. Les consensus moyens de chaque groupe sont reliés par des segments de droite pour faciliter la visualisation des trajectoires. Les axes 1 et 2 expliquent respectivement **32,52 %** et **18,52 %** de la variation de l'échantillon.

4.7 Synthèse des résultats

4.7.1 Le dimorphisme sexuel de conformation analyse à partir des résidus Procrustes

Par l'analyse Manova des variables de conformation, on observe un dimorphisme sexuel de conformation pour les matrices osseuse de l'ilium du pubis et du coxal.

L'analyse des variables de conformation des matrices osseuses par tranche d'âge permet d'observer que les différences de conformations sont significatives dès l'âge de 5 ans pour les matrices osseuses de l'ilium et du coxal et à partir de 13 ans pour la matrice osseuse du pubis.

Les vitesses de changements de conformations diffèrent entre les sexes pour les trois matrices osseuses étudiées :

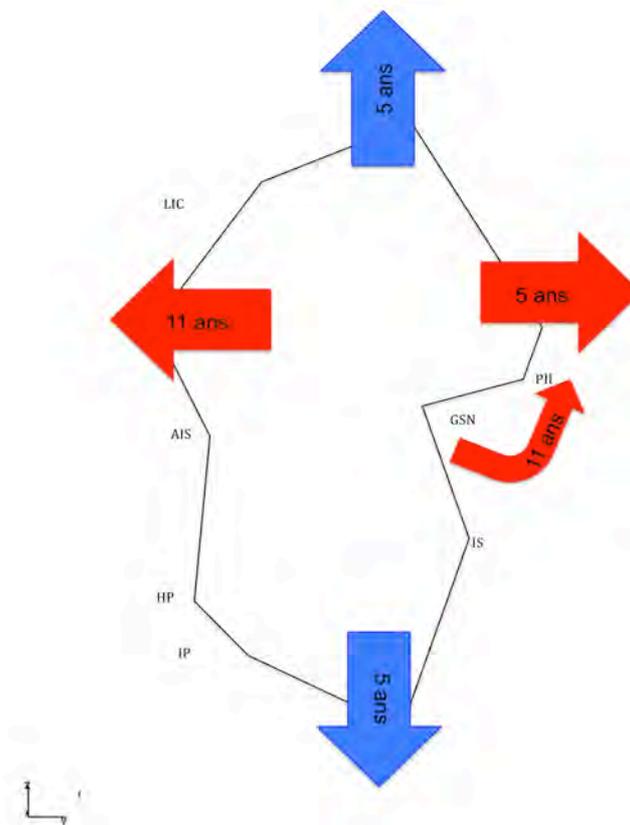
Pour la matrice du coxal, les changements s'accélèrent entre 7 et 8 ans pour les individus féminins et entre 11 et 12 ans pour les individus masculins

Pour la matrice de l'ilium, les changements s'accélèrent entre 7 et 8 ans pour les individus féminins et entre 11 et 12 ans pour les individus masculins

Pour la matrice du pubis, les changements s'accélèrent entre 7 et 11 ans pour les individus féminins alors que la vitesse des changements est constante pour les individus masculins.

Par la superposition des consensus des matrices osseuses des individus masculins et féminins nous étudions les localisations anatomiques du dimorphisme sexuel. Ces manifestations anatomiques du dimorphisme sont résumées sur les schémas suivants :

- Pour la matrice osseuse du coxal :

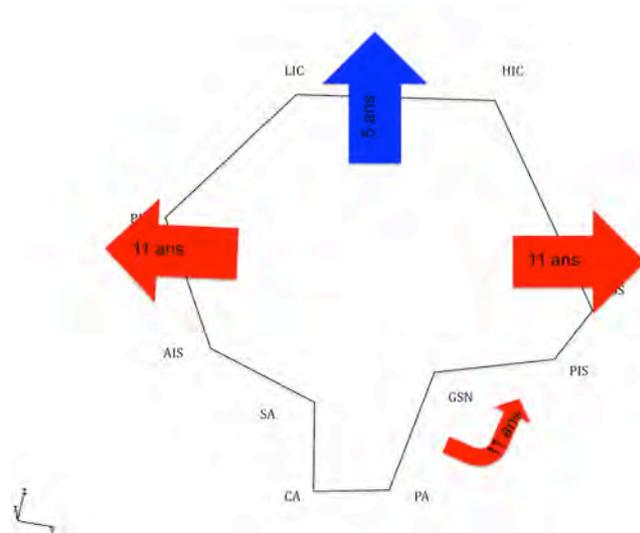


A partir de l'âge de 5 ans, le consensus de la matrice osseuse du coxal est plus long dans un axe cranio-caudal pour les individus de sexe masculin et est plus long dans un axe antéro-postérieur pour les individus de sexe féminin.

A partir de l'âge de 11 ans, l'angle IS-GSN-PIS est plus ouvert sur la matrice osseuse des individus féminins.

Figure 4-94 schéma résumant les manifestations anatomiques du dimorphisme sexuel à partir de l'étude de la matrice osseuse du coxal.

Pour la matrice osseuse de l'ilium :

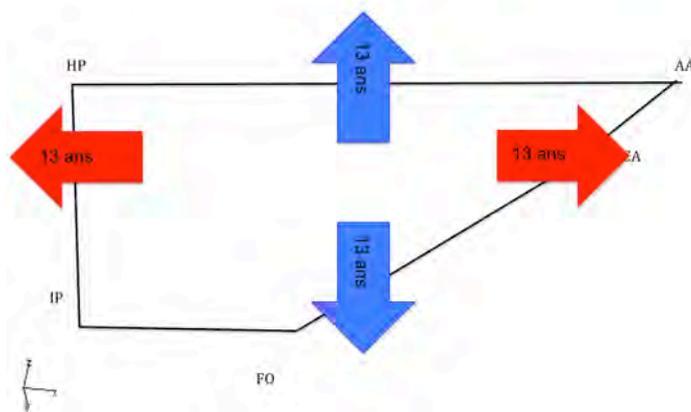


A partir de l'âge de 5 ans, le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe cranio-caudal pour les individus de sexe masculin.

A partir de l'âge de 11 ans, le consensus de la matrice osseuse iliaque est plus long dans un axe antéro-postérieur pour les individus de sexe féminin et l'angle IS-GSN-PIS est plus ouvert sur le consensus féminin.

Figure 4-95 schéma résumant les manifestations anatomiques du dimorphisme sexuel à partir de l'étude de la matrice osseuse de l'ilium.

Pour la matrice osseuse du pubis,



A partir de l'âge de 13 ans, la matrice osseuse des individus masculins est plus large dans un plan cranio caudal et celle des individus féminins plus large dans un plan antéropostérieur.

Figure 4-96 schéma résumant les manifestations anatomiques du dimorphisme sexuel à partir de l'étude de la matrice osseuse du pubis.

4.7.2 Le dimorphisme sexuel de conformation analyse à partir de la taille centroïde

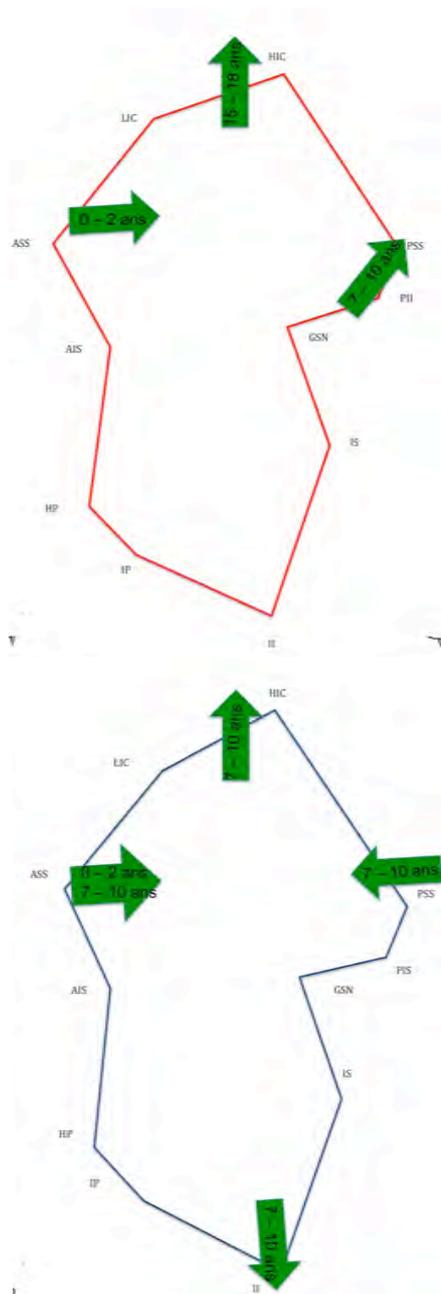
Par l'analyse Manova des variables de conformation, on observe un dimorphisme sexuel de taille pour les matrices osseuses du coxal, de l'ilium et du pubis.

Les vitesses de changements de taille est différent entre les sexes. De manière identique pour chacune des trois matrice osseuse, la vitesse de croissance s'accélère plus précocement pour les individus de sexe féminin : la croissance s'accélère entre 9 et 10 ans pour les individus de **sexe féminin** et entre 11 et 12 ans pour les individus de **sexe masculin**.

4.7.3 L'ontogénie du coxal

Nous analysons l'évolution de la conformation de chaque matrice osseuse pour un même sexe en comparant les résidus Procrustes par groupes d'âge adjacent 2 à 2. La superposition des consensus permet de préciser les localisations anatomiques des différences de conformations.

Pour la matrice osseuse du coxal, l'analyse des différences de conformation par groupes d'âge adjacent 2 à 2 montre que la conformation de la matrice osseuse du coxal des individus féminins change de manière statistiquement significative entre les groupes F00-F00/F01-02, F07-08/F09-10 et F15-16/F17-18 alors que pour les individus masculins, la conformation change de manière statistiquement significative entre les groupes les groupes M00-00/M01-02 et M07-08/M09-10.



Pour les individus féminins, la superposition des consensus des matrices osseuses permet d'observer :

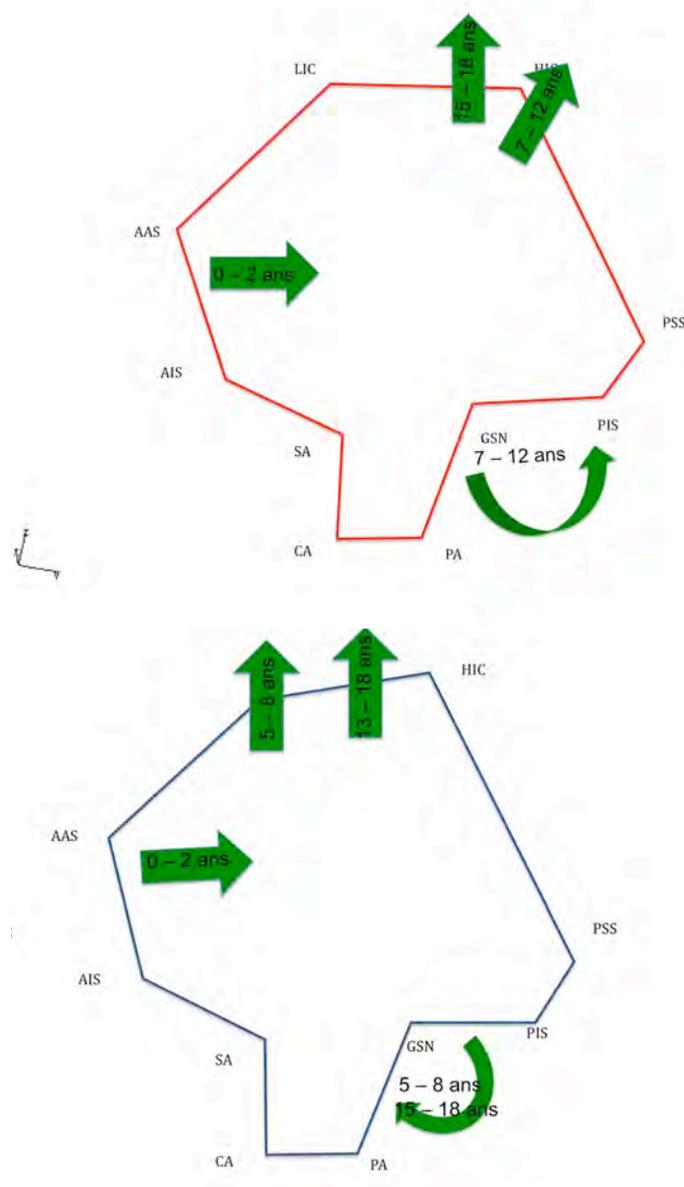
- un raccourcissement de la matrice osseuse dans un plan antéro postérieur entre les groupes F00-00 et F01-02.
- un étirement postérieur et supérieur entre les groupes F07-08 et F09-10, un allongement dans un plan crania caudal entre les groupes F15-16 et F17-18.

Pour les individus masculins, la superposition des consensus des matrices osseuses permet d'observer :

- un raccourcissement de la matrice osseuse dans un plan antéro postérieur entre les groupes M00-00 et M01-02.
- un raccourcissement de la matrice osseuse dans un plan antéro postérieur et un étirement crania caudal entre les groupes M07-08 et M09-10,

Figure 4-97 schéma résumant les manifestations anatomiques des changements de conformation de la matrice osseuse du coxal pour les individus de sexe féminin (rouge) et masculin (bleu).

- Pour la matrice osseuse de l'ilium, l'analyse des différences de conformation par groupes d'âge adjacent 2 à 2 montre que la conformation de la matrice osseuse du coxal des individus féminins change de manière statistiquement significative entre les groupes F00-F00/F01-02, F07-08/F09-10, F09-10 F11-12 et F15-16/F17-18 alors que pour les individus masculins, la conformation change de manière statistiquement significative entre les groupes les groupes M00-M00/M01-02, M05-06/M07-08, M13-14/M15-16, M15-16/M17-18.



Pour les individus féminins, la superposition des consensus des matrices osseuses permet d'observer :

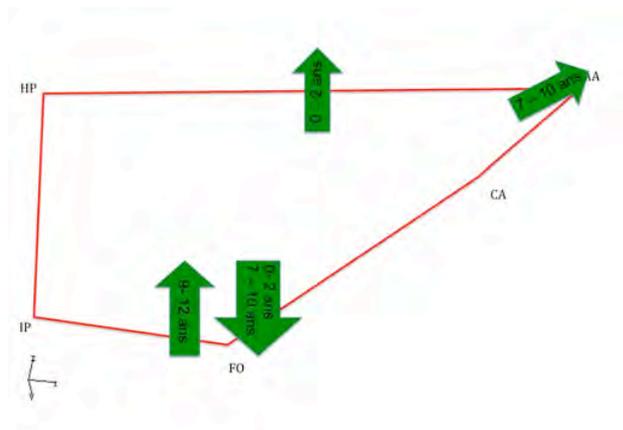
- un raccourcissement de la matrice osseuse dans un plan antéro postérieur entre les groupes F00-00 et F01-02.
- un allongement dans un plan cranio caudal et une ouverture de l'angle PIS GSN PA entre les groupes F07-08 et F09-10 et F09-10 et F11-12, un allongement dans un plan cranio caudal entre les groupes F15-16 et F17-18.

Pour les individus masculins, la superposition des consensus des matrices osseuses permet d'observer :

- un raccourcissement de la matrice osseuse dans un plan antéro postérieur et cranio caudal pour sa partie antérieure entre les groupes M00-00 et M01-02.
- un étirement cranio caudal et une fermeture de l'angle PIS GSN PA entre les groupes M07-08 et M09-10, un étirement cranio caudal entre les groupes M13-14 et M15-16 et M15-16 et M17-18.

Figure 4-98 schéma résumant les manifestations anatomiques des changements de conformation de la matrice osseuse de l'ilium pour les individus de sexe féminin (rouge) et masculin (bleu).

Pour la matrice osseuse du pubis, l'analyse des différences de conformation par groupes d'âge adjacent 2 à 2 montre que la conformation de la matrice osseuse du coxal des individus féminins change de manière statistiquement significative entre les groupes F00-F00/F01-02, F07-08/F09-10 et F09-10/F11-12 alors que pour les individus masculins, la conformation change de manière statistiquement significative entre les groupes les groupes M00-00/M01-02, M03-04/M05-06 et M07-08/M09-10.

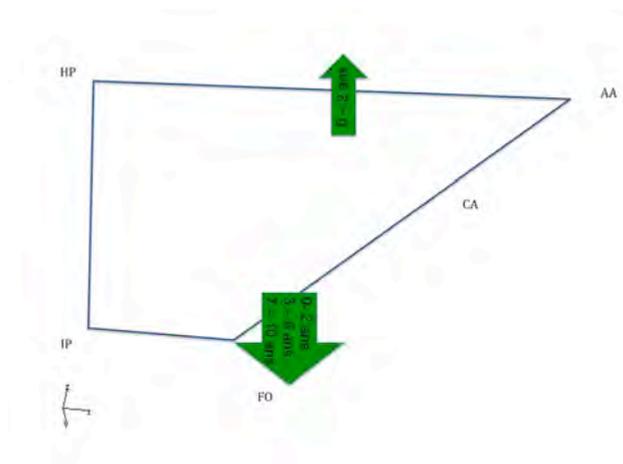


Pour les individus féminins, la superposition des consensus des matrices osseuses permet d'observer :

- un élargissement de la matrice osseuse dans un plan cranio caudal avec un étirement postéro supérieur entre les groupes F00-00 et F01-02.

- un étirement caudal de la matrice osseuse dans un plan cranio caudal avec un étirement postéro supérieur entre les groupes F05-06 et F07-08,

- un raccourcissement dans un plan cranio caudal entre les groupes F09-10 et F11-12.



Pour les individus masculins, la superposition des consensus des matrices osseuses permet d'observer :

- un élargissement dans un plan cranio caudal entre les groupes M00-00 et M01-02.

- un étirement caudal entre les groupes M03-04 et M05-06, un étirement caudal entre les groupes M05-06 et M07-08

Figure 4-99 schéma résumant les manifestations anatomiques des changements de conformation de la matrice osseuse du pubis pour les individus de sexe féminin (rouge) et masculin (bleu).

5 Discussion

5.1 **Choix de la méthode**

5.1.1 Apports de la morphométrie géométrique

5.1.1.1 *Les difficultés rencontrées par les méthodes classiques de détermination du sexe*

En terme de détermination sexuelle, les classiques **méthodes visuelles** autorisent chez l'adulte un taux élevé de classification correcte. En 1969, la méthode développée par Phénice permettait 90% de classification correcte à partir de l'arc ventral du pubis ou, plus récemment, la méthode visuelle de Bruzek obtenait 98% de classification correcte. La critique principale de ces méthodes ostéoscopiques est qu'elles sont **subjectives**, fortement dépendantes de l'**expérience de l'observateur**. L'avantage des **méthodes morphométriques traditionnelles** est leur objectivité. De plus, les fonctions discriminantes calculées sur la base des mensurations de l'os coxal permettent la détermination du sexe avec des taux de classification correcte proches des 100% (Murail, 2005). Néanmoins, ces méthodes morphométriques sont soumises à des **erreurs de classification** évaluées entre 10 et 15% (Mays, 2000; Meindl, 1985). En anthropologie médico-légale, le caractère endommagé du matériel à étudier, rend souvent **inutilisables** nombreuses de ces méthodes.

5.1.1.2 *La morphométrie géométrique et le dimorphisme sexuel*

La **morphométrie géométrique** est une méthode d'acquisition, de traitement et d'analyse d'objet permettant de comprendre l'ensemble des données inhérentes à la

géométrie de l'objet (Slice, 2007). Son avantage principal est l'absence de subjectivité dans l'analyse des formes puisqu'elle propose une **analyse non métrique** de caractères dimorphiques (Franklin, 2007; Pretorius, 2006). L'analyse de la forme à partir du positionnement de points repères **faciles** rend compte de la **précision** de la méthode (Pretorius, 2006). Un autre avantage est le **taux élevé de classification correcte** dans les études utilisant la morphométrie géométrique pour la détermination du sexe (Franklin, 2007; Steyn, 2004). C'est un outil **simple** d'utilisation, peu soumis aux erreurs de mesures intra ou inter observateurs (von Cramon-Taubadel, 2007).

Les différences observées entre les sexes sont doubles : elles sont d'une part l'expression de la taille (robustesse / gracilité) mais aussi des différences de formes (conformation). La morphométrie géométrique est un outil qui permet de séparer la taille de la conformation. Cette dernière est définie comme invariante aux opérations de translation, de rotation et de mise à l'échelle (Bookstein, 1991). Dès la première phase du traitement Procrustes, la composante de taille individuelle est quantifiée et dissociée. Les analyses générées ultérieurement ne portant que sur la conformation des individus de l'échantillon, c'est-à-dire la **forme sans taille**. Cet outil s'avère donc particulièrement adapté aux études sur les différences de forme entre les sexes et les changements de forme au cours de la croissance. La morphométrie géométrique permet ainsi de répondre à plusieurs questions : qu'observe t'on en terme de dimorphisme sexuel après extraction de la taille globale ? Existe t'il un lien entre la taille globale et le dimorphisme sexuel des individus ? La taille et la conformation de l'os coxal sont-elles indépendantes ?

La morphométrie géométrique est un outil simple, précis et reproductible, permettant de décrire et de quantifier la géométrie d'un objet. Cette méthode

nous paraît appropriée à l'étude de bassins immatures, de petite taille et de faible degré de maturation morphologique. Cette approche nous semble moins sujette aux variations inter observateurs que les méthodes d'analyses proposées dans la littérature, soumises à un facteur de subjectivité fortement dépendant de l'expérience de l'observateur.

5.1.2 Avantages de l'exploitation de données tomodensitométriques

Nous avons utilisé des examens tomodensitométriques appartenant au système d'archivage des Hôpitaux de Toulouse. Nous avons ainsi pu constituer une population d'étude comprenant un effectif important, contrairement aux études de la littérature réalisée le plus souvent sur des effectifs plus faibles. Le système d'archivage nous permet de connaître précisément les données civiles des patients, ce qui est plus difficile quand les études sont réalisées sur certaines collections ostéologiques.

L'exploitation de données tomodensitométriques a déjà fait ses preuves que se soit en médecine légale ou en anthropologie (Dedouit, 2007 et 2008 ; Faruch Bilfeld 2012). A notre connaissance, notre étude est la première à proposer une analyse en morphométrie géométrique de l'os coxal immature à partir de données tomodensitométriques. Les études en morphométrie géométrique sur le coxal immature proposent l'utilisation d'un Microscribes® pour l'enregistrement des données soit sur os secs, soit à partir de clichés radiographiques (Marchal, 2003; Steyn, 2004 et Gonzalez, 2009). **L'excellente résolution spatiale** du scanner améliore la précision du positionnement des points repères. L'étude des variations de formes en **3 dimensions** analyse de manière simultanée les différences dans les 3 plans de l'espace. L'analyse en 3 dimensions permet une approche plus juste pour comprendre les phénomènes complexes à l'origine du dimorphisme sexuel et permet la détection de zones

dimorphiques, non mises en évidence avec les méthodes traditionnelles visuelles ou métriques.

5.1.3 Le choix des landmarks

L'étude des squelettes immatures est aujourd'hui problématique, car la plupart des publications ont souvent privilégié les sujets adultes. Ainsi les points repères que nous avons choisis l'ont été à partir des résultats de travaux antérieurs portant sur l'os coxal adulte. A la naissance, l'ilium présentent les principales caractéristiques du futur os adulte, même si certaines régions sont moins développées que chez l'adulte, comme les épines iliaques inférieures antérieures et postérieures (Scheuer, 2000). L'épine sciatique est bien développée à partir de 1 an (Scheuer, 2000). Les caractéristiques de convexité et de concavité de l'os iliaque se développent à partir de la première année de vie également (Scheuer, 2000). Pour ces raisons, nous pensons que les caractéristiques de l'os coxal de l'enfant de moins de 1 an sont plus proches de celle d'un os coxal fœtal.

Les résultats des tests sur la précision des mesures intra et inter observateurs sont excellents, ce qui confirme que les landmarks choisis pour notre étude sont faciles à repérer et reproductibles dans leur positionnement. Les landmarks présentant le plus de variabilité inter et intra observateur sont le point le inférieur de l'ischium, l'épine sciatique et le point antérieur du foramen obturé. Ces trois points sont donc les plus difficiles à placer et les moins reproductibles dans leur positionnement. Le landmark présentant le plus de variabilité interobservateur pour les individus de moins de 1 an est celui de l'épine iliaque antéro inférieur, qui selon Scheuer est moins développé que chez l'adulte (Scheuer, 2000).

Le positionnement des landmarks nécessite une courbe d'apprentissage. Cette courbe d'apprentissage est rapide. Une étudiante en 2^{ème} année de médecine a appris en

une matinée la méthode. Cet apprentissage concerne à la fois l'utilisation du logiciel Amira mais également la reconnaissance des points anatomiques sur un examen tomodensitométrie.

5.2 Analyse des résultats

Il est difficile de comparer nos résultats avec ceux des travaux de la littérature sur le sujet car à notre connaissance, notre étude est la première à proposer une analyse en morphométrie géométrique de l'os coxal en croissance. Les résultats d'une analyse Procrustes diffèrent de ceux obtenus avec des méthodes traditionnelles visuelles ou métriques, car les études classiques ne permettent pas de distinguer les paramètres de taille et de conformation.

La première partie de notre travail consiste en l'analyse de la conformation et de la taille des matrices osseuses de l'ilium, de l'ischium et du coxal, de manière globale sur l'ensemble de notre échantillon. Cette étape est une **analyse statique**.

Pour cette analyse nous utilisons l'analyse Procrustes qui nous permet d'extraire de la géométrie de chaque matrice osseuse deux paramètres : la **taille centroïde** et les **résidus Procrustes**. Ces deux paramètres sont étudiés par analyse discriminante séparément selon l'**âge** ou le **sexe**. Cette analyse statistique permet l'analyse de quatre processus évolutifs :

- l'analyse de la taille centroïde selon l'âge permet d'évaluer les variations de taille avec l'âge, c'est à dire la **croissance**.
- l'analyse de la taille centroïde selon le sexe permet d'évaluer les différences de taille en fonction du sexe, c'est à dire le **dimorphisme sexuel de taille**.
Les termes de robustesse ou gracilité sont utilisés pour les os longs.
- l'analyse des résidus Procrustes selon l'âge permet d'évaluer les variations de conformation avec l'âge, c'est à dire le **développement** ou la **maturation**.

- l'analyse des résidus Procrustes selon le sexe permet d'évaluer les différences de conformation selon le sexe, c'est à dire le **dimorphisme sexuel de conformation**.

Nos résultats démontrent qu'il existe un dimorphisme sexuel de conformation pour les matrices osseuses du coxal, de l'ilium et du pubis. Nos résultats sont en accord avec Marchal, qui démontrent dans une population adulte, que l'ilium et le pubis sont soumis à un dimorphisme de conformation (Marchal, 2003).

Nos résultats démontrent que les matrices osseuses du coxal, de l'ilium et du pubis sont soumises à un dimorphisme sexuel de taille.

On peut donc supposer que les différences entre les sexes observées dans les travaux de la littérature utilisant des méthodes conventionnelles sont mixtes : elles sont le fait de différences de taille et de conformation. En effet, ces résultats sont concordants avec les analyses sur la croissance de Rissech qui observe que la longueur du pubis et celle de l'ilium est plus élevée chez les individus de sexes masculins et ce depuis la naissance. Elle observe cependant que ces différences ne deviennent significatives qu'à partir de 15 ans (Rissech, 2005, 2007). Les études sur matériel radiographique de Coleman et Reynolds identifient une différence de longueur du pubis, significative entre 3, 75 et 5, 7 ans pour Reynolds et à partir de 9 ans pour Coleman (Reynolds, 1945 et 1947; Coleman, 1969).

Dans un second temps, nous avons étudié les différences de taille et de conformation en divisant notre échantillon par groupe d'âge afin de proposer une **analyse dynamique**.

Dans un premier temps, cette méthode nous permet de réaliser une approximation de l'âge pour lequel les différences observées de manière globale sont

significatives. Nos résultats démontrent qu'il existe un dimorphisme sexuel de conformation statistiquement significatif **à partir de 5 ans pour la matrice osseuse de l'ilium et du coxal et de 13 ans pour celle du pubis**. Les différences de conformation observées avant ces âges ne sont pas statistiquement significatives.

Dans un second temps, cette méthode permet d'évaluer les vitesses des modifications. Le biais de cette méthode d'analyse est qu'elle ne permet qu'une évaluation approximative des vitesses par l'analyse des différences observées chez des individus d'âges différents. Il faut se contenter de cette approximation de la réalité car il n'est pas possible de scanner des enfants de la naissance à la fin de la croissance, du fait du caractère irradiant de ces examens dans le cadre d'un suivi longitudinal de notre population. Par ailleurs, est ce que la résolution spatiale de l'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) permettrait le positionnement précis des points repères ? C'est une question intéressante à résoudre pour une analyse plus précise des vitesses de croissance et de maturation, qui pourrait être utilisée comme référence pour l'étude de la croissance, du dimorphisme sexuel et de la détermination de l'âge, mais qui soulève le problème d'un coût de réalisation élevé.

Par l'étude des vitesses de modification de taille et de conformation, il apparaît que les phénomènes de croissance et de maturation sont complexes. **La maturation des trois matrices est asynchrone** : la vitesse des modifications de conformation s'accélère plus précocement chez les individus féminins, dès l'âge de 7 ans pour le pubis, l'ilium et le coxal, alors que les modifications se majorent à partir de 11 ans chez les individus masculins pour l'ilium et le coxal et ne se modifie pas pour le pubis. **Leur croissance est également asynchrone** : l'accélération des vitesses de croissance est plus précoce chez les individus féminins, à l'âge de 9 ans, et à l'âge de 11 ans pour les individus masculins. Ces données sont concordantes avec le résultats des études sur la croissance de Tanner :

le pic de croissance est plus précoce chez les filles (de 10,5-17,5 ans pour les garçons et 9,5-14,5 ans pour les filles) (Tanner, 1976). En 2007, Berdnikovs par un travail en morphométrie géométrique chez le rat démontre que les différences de taille entre les sexes sont le reflet de la robustesse qui apparaît tardivement avec les manifestations hormonales de la puberté, et que la mise en place des différences de conformation est plus complexe (Berdnikovs, 2007). En 1967, Bernstein et Crelin, ont mené des travaux en morphologie conventionnelle sur le rat, et ont démontré que les androgènes testiculaires seraient impliqués dans les différences de conformation entre les sexes (Bernstein, 1967).

Dans un troisième temps, nous avons décrit les **caractéristiques anatomiques** en rapport avec les différences de conformations observées.

Après superposition des consensus des matrices iliaques, il apparaît que :

- L'ilium est plus haut dans un axe cranio-caudal chez les individus de sexe masculin.
- L'ilium est plus large dans un axe antéro-postérieur chez les individus de sexe féminin.

Dans son étude en morphométrie géométrique sur l'os coxal adulte, Marchal note également des différences de conformation de l'ilium avec une aile iliaque féminine allongée antéro-postérieurement (Marchal, 2003). Rissech note une hauteur de l'ilium plus importante chez les individus de sexe masculin qu'elle interprète comme étant le résultat d'une croissance plus prolongée ; elle ne met pas en évidence de différence dans un axe antéro postérieur (Rissech, 2005). Reynolds identifie dès la naissance une hauteur iliaque plus importante chez les individus de sexe masculin. Nous observons

cette différence dès l'âge de 1 an, âge du début de notre population d'étude même si elle est statistiquement significative à partir de 11 ans (Reynolds, 1949).

- L'angle PII-GSN-PA est plus ouvert chez les individus de sexe féminin.

L'échancrure sciatique est reconnue comme étant une source de la diagnose sexuelle de l'adulte. L'échancrure est formée pour partie de l'ilium à sa partie supérieure et d'autre part de l'ischium à sa partie inférieure. Sur l'ilium immature, nous ne pouvons donc observer que la partie supérieure de cette échancrure, mais chez l'adulte « la grande échancrure sciatique et plus particulièrement sa partie supérieure, représente un indice fidèle pour la détermination du sexe sur os isolés » (Jovanovic, 1965).

Selon Schutowski, l'angle formé par l'épine iliaque postéro inférieure, le point le plus profond de l'échancrure ischiatique et point de la jonction avec l'ischium est plus fermé chez les garçons, caractérisé par une valeur d'angle d'environ 90° , sur des enfants âgés de 0 à 5 ans (Schutkowski, 1993). Wilson identifie une grande échancrure plus ouverte chez les individus de sexe féminin (à $126^\circ/132^\circ$) sur une population de 25 iliaques immatures (âgés de 1 à 8 ans) (Wilson, 2008). En 1992, Tona Majó propose également l'étude du profil de la grande échancrure sciatique pour la détermination du sexe chez l'immature combinée à l'étude de la surface auriculaire et de la gouttière post-auriculaire (Majó, 1992).

Nous observons ces différences d'ouverture de l'angle PII-GSN-PA qu'à partir de l'âge de 11 ans. Par rapport à l'os masculin, la partie postérieure de l'aile féminine semble être étirée vers le haut et l'arrière (délimitant une grande échancrure sciatique ouverte). Cet étirement vers le haut et l'arrière a pour conséquence d'éloigner le sacrum de la symphyse pubienne, ce qui agrandit la cavité pelvienne antéro-postérieurement et augmente la circonférence du détroit supérieur. Les différences de conformation de la

grande échancrure sciatique seraient donc le reflet de cette situation différente de la partie postérieure de l'aile iliaque.

Contrairement à Schutowski, nous n'observons pas de différences de profondeur de la grande échancrure et la position du point GSN ne varie pas (Schutkowski, 1993).

Après superposition des consensus des matrices publiennes, il apparaît que :

- le pubis est plus allongé dans un axe antéropostérieur et moins large dans un axe cranio-caudal chez les individus de sexe féminins.
- Le point FO est supérieur sur la matrice osseuse des individus de sexe féminin.

Ces résultats sont en accord avec ceux de Marchal sur l'os coxal adulte, pour qui l'analyse des variables de conformation du pubis indique que l'os féminin est plus allongé que le masculin, même si aucune des variables de taille n'est plus importante pour les pubis féminins (Marchal, 2003). Il note aussi que la branche inférieure de l'os est située plus crânialement sur les os féminins, ce qui a pour effet d'ouvrir l'angle sous-pubien. Chez l'adulte, de nombreuses techniques de détermination du sexe exploitent aussi bien l'élongation acétabulo-symphysaire de la branche supérieure que la migration crâniale de la branche inférieure (Washburn, 1948; Genovés, 1959; Bruzek, 2002). Reynolds et Coleman identifient une longueur pubienne plus longue dans le sexe féminin ; cette différence est significative à partir de 5,7 ans pour Reynolds et à partir de 9 ans pour Coleman (Reynolds, 1945 et 1947; Coleman, 1968). Pour Rissech, la longueur du pubis est plus élevée chez les individus féminins et ce depuis la naissance ; mais cette différence n'est significative qu'à partir de 15 ans (Rissech, 2007).

Après superposition des consensus des matrices coxales, il apparaît que :

- Le coxal est plus haut dans un axe cranio-caudal chez les individus de sexe masculin.
- Le coxal est plus large dans un axe antéro-postérieur chez les individus de sexe féminin.
- L'angle PII-GSN-PA est plus ouvert chez les individus de sexe féminin.

Les manifestations anatomiques du dimorphisme du coxal sont superposables à celles visualisées sur l'ilium. Ce travail n'individualise pas différences sexuelles de conformation de la partie inférieure du coxal, c'est à dire l'ischium. Ces résultats sont concordants avec d'autres travaux en morphométrie géométrique chez l'adulte (Marchal, 2003 ; Bilfeld 20012). Ces résultats sont en désaccord avec ceux de Rissech qui propose la longueur ischiatique pour la détermination sexuelle de l'ischium. (Rissech, 2003). Nous pensons que ces discordances sont expliquées par le fait que les travaux de Rissech évaluent les composantes de taille : le dimorphisme de l'ilium est principalement lié à la taille et non à la conformation.

Dans un quatrième temps, nous avons étudié les variations intrinsèques de conformation avec le temps en étudiant de manière séparée les individus masculins des féminins. Il apparaît deux types d'évolution de la conformation :

- des modifications précoces: elles apparaissent *avant l'âge de 2 ans*. Ces modifications *sont identiques dans les 2 sexes*. Elles sont liées aux modifications posturales de ces 2 premières années de vie : l'évolution de la position couchée à la position assise puis verticale. Les modifications de conformation observées sont :
 - *un raccourcissement dans un plan antéro postérieur de la partie antérieure de l'ilium*. Ces modifications sont en rapport avec un

enrôlement de l'aile iliaque qui passe d'une structure plane à une structure convexe vers l'extérieur. Ces modifications ont été décrites par Scheuer comme concomitante de l'apparition de la position assise (Scheuer, 2000)

- *un élargissement dans un plan cranio caudal du pubis*. Cet élargissement répond aux contraintes mécaniques nécessaires à la mise en place de la locomotion. (Marchal, 1994)
- des modifications plus tardives: elles apparaissent *après 5ans*. Ces modifications *diffèrent selon les sexes*. Elles apparaissent différentes dans les *modifications structurales* observées mais également *aux dates* auxquelles ces modifications apparaissent. Ces modifications sont à l'origine des différences de conformations observées à l'origine du dimorphisme sexuel. Ces modifications sont celles qui aboutissent à l'élargissement de la ceinture pelvienne pour la parturition.
 - *Un étirement postéro supérieur de l'ilium* pour les individus féminins qui aboutit à un élargissement antéro postérieur et une ouverture de la grande échancrure sciatique
 - *Une diminution de la hauteur du pubis* pour les individus féminins.

5.3 La diagnose sexuelle à partir du coxal immature

Si, chez l'adulte, la possibilité de déterminer le sexe à partir de restes osseux ne fait plus l'objet de discussion, il n'existe à ce jour encore aucune méthode fiable pour déterminer le sexe à partir de restes osseux immatures. A la lumière des résultats de ce travail, les méthodes de diagnoses sexuelles à partir de l'os coxal immature doivent tenir compte de l'âge et de la structure anatomique étudiée. La diagnose sexuelle à partir du coxal immature apparaît possible :

- à partir de l'âge de 5 ans, par l'étude de la hauteur et de la largeur de l'aile iliaque sur la hauteur et la largeur de l'aile iliaque. Ces résultats sont concordants avec ceux de Reynolds à partir d'une étude radiographique mais sont différents de ceux de Rissech qui ne met en évidence de différence sur l'aile iliaque qu'après 15 ans
- à partir de l'âge de 11 ans par l'étude de la grande échancrure. Certains auteurs individualisent des différences de conformations sur la grande échancrure à des âges plus précoces, mais nous ne les mettons pas en évidence par ce travail (Holcomb, 1995 ; Schutkowski 1993, Wilson, 2008)
- à partir de 13 ans par l'étude de la hauteur et de la largeur du pubis. Ces résultats sont proches de ceux de Rissech qui individualise ces différences à partir de l'âge de 15 ans.

6 Conclusion

Ce travail, par l'étude en morphométrie géométrique de 400 examens tomодensitométriques d'os coxaux immatures a permis de démontrer :

1. L'utilisation de données tomодensitométriques pour l'analyse en morphométrie géométrique est valide, permettant une bonne reproductibilité et répétabilité.
2. Il existe un dimorphisme sexuel de l'os coxal immature. Ce dimorphisme est double. Il se manifeste d'une part, par une différence de taille : la quantification de la taille centroïde après superposition Procrustes a permis de le confirmer. D'autre part, il se manifeste par une différence de conformation : une fois la taille extraite, l'étude des résidus de la superposition permet de visualiser et d'analyser ces différences.
3. Le dimorphisme sexuel de conformation apparaît au cours du développement : il apparaît plus précocement sur l'ilium que sur le pubis.
4. La détermination correcte du sexe apparaît comme un phénomène dépendant de l'âge.
5. Les changements de conformation de l'os coxal au cours du développement répondent aux implications de cet os dans l'ontogénie.
6. Au cours de deux premières années de vie, les changements de conformation sont superposables dans les deux sexes et reflètent les contraintes mécaniques de la locomotion.
7. Après ces deux premières années de vie, les changements de conformation diffèrent selon les sexes et les modifications sont le reflet de la préparation à la parturition pour le coxal féminin.

Références

Adams DC, Rohlf FJ, Slice DE. Geometric Morphometric: ten years of progress following the « Revolution ». *Ital J Zool* 2002;71 :5–16.

Bass WM. Human osteology: a laboratory and field manual. Columbia: Missouri Archaeological Society, 2005.

Benazzi S, Maestri C, Parisini S, Vecchi F, Gruppioni G. Sex assessment from the acetabular rim by means of image analysis. *Forensic Sci Int* 2008;180:58 e1-3.

Berdnikovs S, Bernstein M, Metzler A, German RZ. Pelvic Growth: Ontogeny of Size and Shape Sexual Dimorphism in Rat Pelves. *J of Morphol* 2007;268:12–22.

Berge C, Penin X. Ontogenetic allometry, heterochrony, and interspecific differences in the skull of African apes, using tridimensional Procrustes analysis. *Am J Phys Anthropol* 2004;124:124–138.

Bernstein P, Crelin ES. Bony sexual dimorphism in the rat. *Anat Rec* 1967;157:517–526.

Bookstein FL. Size and shape: a comment on semantics. *Syst Zool* 1989;38:173–180.

Bookstein FL. Morphometric tools for landmark data: geometry and biology. Cambridge : Cambridge University Press, 1991.

Bookstein FL. Metrics and symmetries of the morphometric synthesis, in Mardia KV, Gill CA (Eds.), *Proceedings in Current Issues in Statistical Shape Analysis*. Leeds: Leeds University Press, 1995.

Boucher BJ. Sex differences in the foetal pelvis. *Am J Phys Anthropol* 1957;15:581–600.

Braga J, Treil J. Estimation of pediatric skeletal age using geometric morphometrics and three-dimensional cranial size changes. *Int J Legal Med* 2007;121:439–443.

Bruzek J. A method for visual determination of sex, using the human hip bone. *Am J Phys Anthropol* 2002;117:157–168.

Byers SN. Introduction to forensic anthropology : a Textbook. Pearson Education, 2005.

Bytheway JA, Ross AH. 2010. A geometric morphometric approach to sex determination of the human adult os coxa. *J Forensic Sci.* 55(4):859-864.

Cattaneo C. Forensic anthropology: developments of a classical discipline in the new millennium. *Forensic Sci Int* 2007;165:185–193.

Cobb SN, O'Higgins P. Hominids do not share a common postnatal facial ontogenetic trajectory. *J Exp Zool* 2004;302B:302–321.

Coleman WH. Sex differences in the growth of the human bony pelvis. *Am J Phys Anthropol* 1969;31:125–152.

Corti M. Geometric morphometrics: an extension of the revolution. *Trends Ecol Evol* 1993; 8:302–303.

Dedouit F, Telmon N, Costagliola R, Otal P, Joffre F, Rouge D. Virtual anthropology and forensic identification: report of one case. *Forensic Sci Int* 2007;173:182–187.

Dedouit F, Telmon N, Costagliola R, Otal P, Florence LL, Joffre F, Rouge D. New identification possibilities with postmortem multislice computed tomography. *Int J Legal Med* 2007;121:507–510.

Dedouit F, Bindel S, Gainza D, Blanc A, Joffre F, Rouge D, Telmon N. Application of the Iscan method to two- and three-dimensional imaging of the sternal end of the right fourth rib. *J Forensic Sci* 2008;53:288–295.

Dedouit F, Guilbeau-Frugier C, Telmon N, Gainza D, Otal P, Joffre F, Rouge D. Virtual autopsy and forensic anthropology of a mummified fetus: a report of one case. *J Forensic Sci* 2008;53:208–212.

Dedouit F, Loubes-Lacroix F, Costagliola R, Guilbeau-Frugier C, Alengrin D, Otal P, Telmon N, Joffre F, Rouge D. Post-mortem changes of the middle ear: multislice computed tomography study. *Forensic Sci Int* 2008;175:149–154.

Faruch Bilfeld M, Dedouit F, Rousseau H, Sans N, Braga J, Rougé D, Telmon N. Human Coxal Bone Sexual Dimorphism and Multislice Computed Tomography: Geometric Morphometric analysis of 65 adults. *J Forensic Sci*. 2012 May;57(3):578-88.

Franklin D, O'Higgins P, Oxnard CE, Dadour I. Sexual dimorphism and population variation in the adult mandible. *Forensic applications of geometric morphometrics. Forensic Sci Med Pathol* 2007a ;3:15–22.

Franklin D, Oxnard CE, O'Higgins P, Dadour I. Sexual dimorphism in the subadult mandible: quantification using geometric morphometrics. *J. Forensic Sci* 2007b;52 :6–10.

Genovés S. Estimation des différences sexuelles dans l'os coxal. Différences métriques et différences morphologiques. *Bull. Mém. Soc. Anthropol. Paris* 1959;10:3–95.

Genovés S. Sexe determination in earlier man. in Brothwell GE, *Science in archeology*. New York: Praeger, 1970.

Gonzalez PN, Bernal V, Perez SI. Geometric morphometric approach to sex estimation of human pelvis. *Forensic Sci Int* 2009;189:68–74.

Goodall C. Procrustes methods in the statistical analysis of shape. *J R Stat Soc B* 1991;53:285–339.

- Gower** JC. Generalized Procrustes analysis, *Psychometrika* 1975;40:33–51.
- Holcomb** SMC, **Konigsberg** LW. Statistical study of sexual dimorphism in the human fetal sciatic notch. *Am J Phys Anthropol* 1995;97:113–125.
- Hotelling** H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *J Educ Psychol* 1933;24: 417–441.
- Janssens** PA, **Perrot** RJL. Précis d'anthropobiologie descriptive et métrique du squelette. anthropologie-et-paleopathologie.univ-lyon1.fr/2006–2007.
- Jolicoeur** P. The generalization of the allometry equation. *Biometrics* 1963;19: 497–499.
- Jovanovic** S, **Zivanovic** S. The establishment of sex by the greater sciatic notch. *Acta Anat* 1965;61:101–107.
- Jungers** WL, **Falsetti** AB, **Wall** CE. Shape, relative size, and size-adjustments in morphometrics. *Yearb Phys. Anthropol* 1995;38:37–161.
- Kendall** DG. The diffusion of shape. *Adv Appl Prob* 1977;9:428–430.
- Kendall** DG. Shape manifolds, Procrustean metrics and complex projective spaces. *Bull Lond Math Soc* 1984;16:81–12.
- Kimmerle** EH, **Ross** A, **Slice** DE. Sexual dimorphism in America: geometric morphometric analysis of the craniofacial region. *J Forensic Sci* 2008; 53:54–57.
- Klingenberg** CP. MorphoJ Program. Faculty of life Sciences, University of Manchester, UK. URL http://www.flyings.org.uk/MorphoJ_page.htm, 2008.
- Krogman** WM, **Iscan** MY. Radiographic Analysis in The human skeleton in forensic medicine. Springfield Illinois: Thomas, 1986.
- Lavelle** M, **Moerman** ML. Natural selection and developmental sexual variation in the human pelvis. *Am J Phys Anthropol* 1995;98:59–72.
- Lazorthes** G ; **Lhès** A. La grande échancrure sciatique : étude de la morphologie et de ses caractères sexuels. *Arch Anat Histol Embryol, Strasbourg* 1939;27:143–170.
- Lovell** NC. Test of Phenice's technique for determining sex from the os pubis. *Am J Phys Athropol* 1989;79:117–120.
- Mahalanobis** PC. On the generalised distance in statistics. *Proceeding of the National Institute Sciences of India* 1936;2:49–55.
- Majò** T. Ontogénèse de l'os coxal et détermination sexuelle : l'importance de l'ilium. *Bull Mém Soc Anthropol Paris* 1992;4:53–65.

Marchal F. Le dimorphisme sexuel de conformation de l'os coxal humain. Bases biologiques et nouvelles applications possibles. Bull Mém Soc Anthropol Paris 2003;15:7-24.

Marchal F Mise en évidence de changements précoces dans l'ontogenèse du bassin humain par une étude morphométrique. Bull Mém Soc Anthropol Paris 1994;6:101-110

Marcus LF. Traditional morphometrics, in: Rohlf FJ, Bookstein FL (Eds.), Proceedings of the Michigan Morphometrics Workshop. University of Michigan Museum of Zoology, Ann Arbor, 1990.

Martin R, Saller K. Lehrbuch der Anthropologie in systematischer Darstellung: mit besonderer Berücksichtigung der anthropologischen Methoden. Stuttgart: Fischer, 1957.

Mays S, Cox M. Sex determination in skeletal remains. In: Cox M, Mays S, Human Osteology in Archaeology and Forensic Science. London : Greenwich Medical Media, 2000.

Meindl RS, Lovejoy CO, Mensford RS, Don Carlos L. Accuracy and direction of error in the sexing of the skeleton: implication for paleodemography. Am J Phys Anthropol 1985;68:79-85.

Murail P, Bruzek J, Houët F, Cunha E. DSP: un outil de diagnose sexuelle probabiliste à partir des données métriques de l'os coxal. Bull Mém Soc Anthropol Paris 2005;17:167-176.

Novotny V. Sex determination of the pelvic bone: a system approach. Anthropologie 1986;24:197-206.

Oettlé AC, Pretorius E, Steyn M. Geometric morphometric analysis of mandibular ramus flexure. Am J Phys Anthropol 2005;128:623-629.

O'Higgins P. The study of morphological variation in the hominid fossil record: biology, landmark and geometry. J of Ana 2000;197:103-120.

Patriquin ML, Steyn M, Loth SR. Metric analysis of sex differences in South African black and white pelvises. Forensic Sci Int 2005;147:119-127.

Penin X. Modélisation tridimensionnelle des variations morphologiques du complexe crânio-facial des hominoidea, thèse, université Paris-6, 1997.

Penin X. Analyse et prévision de croissance crânienne par superposition Procruste. Rev Orthop Dento Faciale 1999;33:275-286.

Penin X. Exploration de la variabilité des formes faciales par les composantes de conformation. J. Edgewise 2000;41:39-53.

- Phenice** TW. A newly developed visual method of sexing the os pubis. *Am J Phys Anthropol* 1969;30:297–301.
- Pretorius** E, Steyn M, Scholtz, Y. Investigation into the usability of geometric morphometric analysis in assessment of sexual dimorphism. *Am J Phys Anthropol* 2006;129:64–70.
- Rao** CR. Covariance adjustment and related problems in multivariate analysis, in: P.R. Krishnaiah. *Multivariate analysis*. New York : Academic Press, 1966.
- Reynolds** EL. The bony pelvic girdle in early infancy. A roentgenometric study. *Am J Phys Anthropol* 1945;3:321–354.
- Reynolds** EL. The bony pelvis in prepuberal childhood. *Am J Phys Anthropol* 1947;5:165–200.
- Rissech** C, Garcia M, Malgosa A. Sex and age diagnosis by ischium morphometric analysis. *For Sci Int* 2003;135:188–196.
- Rissech C, Malgosa A. Ilium growth study: applicability in sexual and age diagnostic. For Sci Int 2007;147:165–174.*
- Rissech C, Malgosa A. Pubis growth study: applicability in sexual and age diagnostic. For Sci Int 2007;73:137–145.*
- Rogers** T, Saunders S. Accuracy of sex determination using morphological traits of the human pelvis. *J Forensic Sci* 1994;39:1047–1056.
- Rohlf** FJ, Slice D. Extensions of the Procrustes methods for the optimal superposition of landmarks. *Syst Zool* 1990;39:40–59.
- Rohlf** FJ. Morphometrics spaces, shape components and the effects of linear transformations. In: Marcus LF, Corti M, Loy A, Naylor GJP, Slice DE, *Advances in Morphometrics*. New York: Plenum Press, 1996.
- Rohlf** FJ. Shape statistics: Procrustes superimpositions and tangent spaces. *J Classif* 1999;16:197–223.
- Scheuer** L, Black SM. *Developmental juvenile osteology*. London: Academic Press, 2000.
- Schulter-Ellis** FP, Hayek LA, Schmidt OJ. Determination of sex with a discriminant analysis of new pelvic bone measurements (I). *J Forensic Sci* 1983;28:169–180.
- Schulter-Ellis** FP, Hayek LA, Schmidt OJ. Determination of sex with a discriminant analysis of new pelvic bone measurements (II). *J Forensic Sci* 1985;30:178–185.
- Schutkowski** H. Sex determination of infant and juvenile skeletons: I. Morphognostic features. *Am J Phys Anthropol* 1993;90:199–205.

Sholts B, Flores P, Walker PL, Warmlander SKT. Comparison of Coordinate Measurement Precision of Different Landmark Types on Human Crania Using a 3D Laser Scanner and a 3D Digitiser: Implications for Applications of Digital Morphometrics *Int J Osteoarchaeol* . 2011, 21: 535–543.

*

Slice D. Geometric morphometrics. *Ann Rev Anthropol* 2007;36:261–281.

Steyn M, Pretorius E, Hutten L. Geometric morphometric analysis of the greater sciatic notch in South Africans. *Homo* 2004;54:197–206.

Steyn M, Iscan MY. Metric sex determination from the pelvis in modern Greeks. *Forensic Sci Int* 2008;179:86 e1-6.

Sundberg P. Shape and size-constrained principal component analysis. *Syst Zool* 1989;38: 166–168.

Sutherland LD, Suchey JM. Use of the ventral arc in pubic sex determination. *J Forensic Sci* 1991;36:501–511.

Tanner JM, Whitehouse RH, Marubini E, Resele, LF. The adolescent growth spurt of boys and girls of the Harpenden Growth Study. *Ann Hum Biol* 1976;3:109–126.

Thompson DW. On growth and form. London : Cambridge University Press, 1917.

Treil J, Braga J, Ait Ameer A. Modélisation 3D du viscéro-crâne. Application en orthodontie et en chirurgie orthognatique. *J Radiol* 2009;90:634–641.

Ubelaker DH. Human skeletal remains: excavation, analysis, interpretation. Chicago: Aldine Publishing, 1978.

von Cramon-Taubadel N, Frazier BC, Lahr MM. The problem of assessing landmark error in geometric morphometrics: theory, methods, and modifications. *Am J Phys Anthropol* 2007;134:24–35.

Washburn SL. Sex differences in the pubic bone. *Am J Phys Anthropol* 1948;6:199–207.

Weaver DS. Sex différences in the ilia of a known sex and age sample of fetal and infant skeletons. *Am J Phys Anthropol* 1980;52:191–195.

Wilson LA, MacLeod N, Humphrey L. Morphometric criteria for sexing juvenile human skeletons using the ilium. *J Forensic Sci* 2008;53:269–278.

Zelditch M, Sheets HD, Fink WL. Spatiotemporal reorganization of growth rates in the evolution of ontogeny. *Evolution* 2000;54:1363–1371.

Zelditch M, Sheets D, Fink W. The ontogenetic dynamics of shape disparity. *Paleobiology* 2003;29:139–156.

Zelditch ML, Swiderski DL, Sheets SD, Fink WL. Geometric Morphometrics for Biologists. San Diego: Elsevier, 2004.

Ce travail a permis la publication de 2 articles.

PAPER**ANTHROPOLOGY**

Marie Faruch Bilfeld,^{1,2,3} M.D.; Fabrice Dedout,^{1,2,4} M.D., Ph.D.; Nicolas Sans,³ M.D., Ph.D.; Hervé Rousseau,⁴ M.D., Ph.D.; Daniel Rougé,^{1,2} M.D., Ph.D.; and Norbert Telmon,^{1,2} M.D., Ph.D.

Ontogeny of Size and Shape Sexual Dimorphism in the Ilium: A Multislice Computed Tomography Study by Geometric Morphometry

ABSTRACT: We studied sexually dimorphic differences in the ilium using geometric morphometric analysis of 10 osteometric landmarks recorded by multislice computed tomography, based on three-dimensional reconstructions of 188 children (95 boys, 93 girls) of mixed origins living in the area of Toulouse, southern France, and ranging in age from 1 to 18 years. We used geometric morphometrics methodology first to test sexual dimorphism in size (centroid size) and shape (Procrustes residuals) and second to examine patterns of shape change with age (development) and size change with age (growth). On the basis of statistical significance testing, the ilium shape became sexually dimorphic at 11 years of age, although visible shape differences were observed as early as 1 year of age. There was no statistically significant difference in size between sexes. Trajectories of shape (development) and size (growth) differed throughout ontogeny and between sexes.

KEYWORDS: forensic science, forensic anthropology, geometric morphometry, sexual dimorphism, ilium, immature, multislice computed tomography

The ilium is an important element for adult sexual determination (1–3). For immature individuals, few studies exist, and the results are often contradictory. Boucher (4) showed that sexual diagnosis was possible with basic metric techniques of the sciatic notch, whereas Weaver (5) found no metric difference. For Merrot et al. (6), some sexual differences in size exist prenatally, and LaVelle (7) showed that these differences persisted through childhood. More recently, Holcomb and Konigsberg (8) used semi-landmarks to explore the shape of the sciatic notch, and Rissech and Malgosa (9) analyzed ilium growth with a metric technique.

Additional difficulties arise in studies that attempt to describe sexual dimorphism in the growth of skeletal elements. During childhood, the pelvis undergoes significant remodeling in both shape and size, presumably caused by the changing hormonal milieu (10). Studies employing conventional morphometrics, based on such shape approximations as angles, linear distances, and ratios, give an incomplete picture of shape, and information is inevitably lost (11). An equally significant problem is the conflation of dimorphism in shape and size (12). The consequence of these methodological drawbacks is that the pelvic shape is not well described.

Our objective was to quantify pelvic morphology during ontogeny, specifically examining size and shape dimorphism independently. To avoid the methodological problems of previous studies, we applied landmark-based geometric morphometrics to longitudinal computed tomodensitometry data. Geometric morphometrics represents a new approach. This term, which was first used by Corti, includes methods based mainly on three-dimensional (3D) coordinates of homologous landmarks that describe the studied object (13). The coordinates thus represent complete geometric information related to the object (14). When analyzing the forms of biological objects, geometric morphometrics can differentiate variability due to both size and shape. Quantification of shape and size using specific statistical geometric morphometrics procedures renders more accurate results than those that have been obtained to date with other methods, thus increasing their reliability (14–16). In forensic anthropology, geometric morphometrics is most frequently applied to determination of age at death and to sex determination (12,17–22). Geometric morphometric methods are not intended to replace current methods of sex assessment. Their main aims are to characterize shape quantification and shape variability and also to evaluate differences in shape objectively and to compare them with other variables (15).

Materials and Methods

Sample

We carried out a retrospective study of coxal bones from children undergoing clinical multislice computed tomography

¹Laboratoire d'Anthropobiologie AMIS, UMR 5288 CNRS, Université Paul Sabatier, 37 allées Jules Guesde, 31000 Toulouse, France.

²Service de Médecine Légale, CHU Toulouse-Rangueil, 1 avenue Professeur Jean Poulhès, 31059 Toulouse Cedex 9, France.

³Service de Radiologie, CHU Toulouse-Purpan, place du docteur Baylac, 31059 Toulouse Cedex 9, France.

⁴Service de Radiologie, CHU Toulouse-Rangueil, 1 avenue Professeur Jean Poulhès, 31059 Toulouse Cedex 9, France.

Received 18 Oct. 2011; and in revised form 19 Jan. 2012; accepted 2 Feb. 2012.

(MSCT) between April 2005 and November 2011 in our institution in Toulouse, southwestern France. The MSCT examinations were mainly requested in a clinical context of abdominal diseases. Patients with a known history of bone disease were excluded. The patients were of various ethnic origins and were globally representative of the present-day population of southwestern France. A total of 188 MSCT examinations were included of patients aged 1–18 years, consisting of 95 boys and 93 girls (Table 1). The data and images were recorded anonymously.

Data Collection

MSCT—Examinations were performed on a Sensation 16 scanner (Siemens, Erlangen, Germany) with 16×1.5 mm collimation. The image matrix was 512×512 pixels. A bone filter and a soft tissue filter were used. Depending on the purpose of the examination, axial 3 mm (or 2 mm) reconstructions were performed every 2 mm (or 1 mm).

Postprocessing—Scans were saved as DICOM files (Digital Imaging and Communications in Medicine), and postprocessing was performed with Amira 4.1.1[®] (Mercury Computer System, Inc., Chelmsford, MA).

Morphological 3D Analysis—Based on standard anthropometric techniques and on the literature, 10 osteometric landmarks were selected by convention on the left ilium (23,24) (Fig. 1 and Table 2). These landmarks were chosen as an adequate summary of those used in classic osteometric methods for sexing the ilium, to allow comparisons with previously published results. The landmarks were all type I landmarks, except the center of the acetabulum (CA), which is type II (14). CA is the orthogonal projection of SA–IA (SA: the superior point on the acetabular margin; IA: the inferior point of the acetabular margin) and the AA–PA intersection (AA: the anterior point of the acetabular margin; PA: the posterior point of the acetabular margin).

The landmarks were positioned on the MSCT reconstructions using Amira[®] with the volume rendering technique mode and the multiplanar reconstruction mode. The corresponding 3D coordinates (x, y, z) for each landmark were subsequently recorded.

Data Analysis

Precision of Measurements—Data used in this study were collected by two observers working under a common data collection protocol. To examine the effects of intra-observer error, the principal observer (MFB) carried out five observations of five randomized specimens from the sample of 188 pelvises

1 month after the first examination. To assess inter-observer error, the second observer (FD) carried out one observation of five randomized specimens. For each observer, landmark deviations were calculated relative to the landmark mean. As previously described, percent errors were calculated for the 10

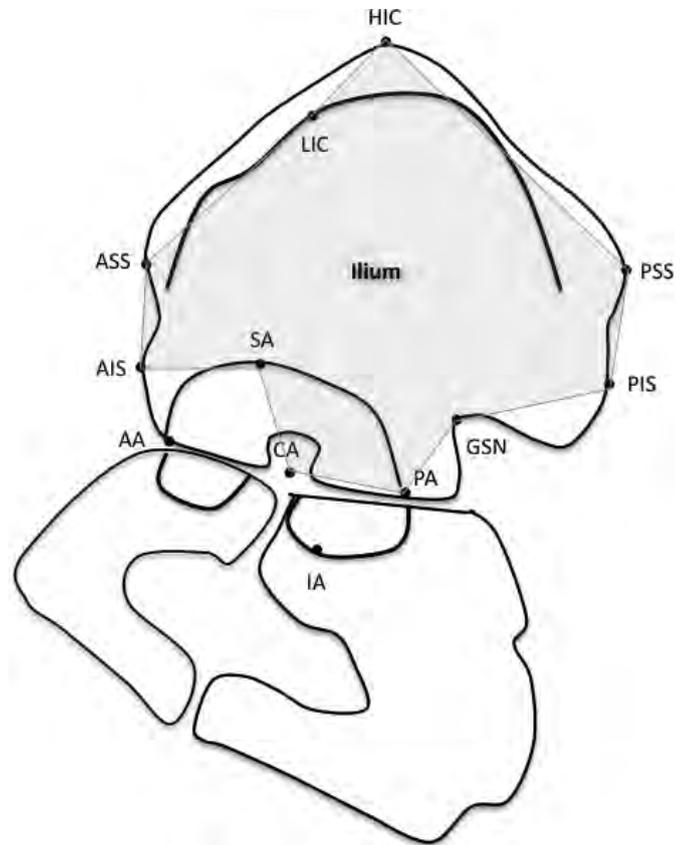


FIG. 1—Drawing of the left coxal bone: position of the landmarks used to delimit the ilium.

TABLE 2—Anatomical description and intra- and inter-observer variabilities of the 10 landmarks positioned on the MSCT pelvic reconstructions. The results are expressed in percent errors.

Landmark Abbreviations	Localization on the Coxal Bone	Intra-Observer Variability (%)	Inter-Observer Variability (%)
HIC	Superior point of the iliac crest	1.98	2.08
LIC	Most lateral point of the iliac crest	2.26	2.49
ASS	Anterior superior iliac spine	1.94	2.27
AIS	Anterior inferior iliac spine	1.95	1.93
PSS	Posterior superior iliac spine	1.12	1.59
PIS	Posterior inferior iliac spine	2.11	2.35
AA	Most anterior point of the acetabulum	2.20	2.65
PA	Most posterior point of the acetabulum	1.75	1.65
CA	Center of the acetabulum	2.10	2.09
GSN	Widest point of the Greater Sciatic Notch	1.81	2.02

TABLE 1—Sample size by age range and group. The group is designated by the age of the youngest individual of the group. M male, F female.

Age Group	Age Range (Years)	Sample Size	
		Male	Female
M1-F1	1–4	21	21
M5-F5	5–8	21	19
M9-F9	9–10	11	10
M11-F11	11–12	12	11
M13-F13	13–18	30	32
Total		95	93

landmarks (Table 1) (25–27). Previous authors have suggested that the results are acceptable when the percent errors do not exceed 5% (12,25–27).

Statistical Analysis—A combination of landmark-based geometric morphometric analyses was used to address questions concerning the ontogeny of pelvic shape and size dimorphism: testing differences between age groups and testing for differences in rates of change over time. Briefly, principal component analysis (PCA) was used as an exploratory step, and two-way multivariate analysis of variance (MANOVA) and Goodall's *F*-test were used to test for differences between sexes and among age groups, while linear regressions compared rates of shape change. All morphometric geometric analyses and statistical analyses were carried out with MorphoJ and R 2.2.0 software (28,29).

First, we carried out generalized least-squares (GLS) Procrustes superimposition of digitized landmark coordinates using MorphoJ software (28). This procedure quantifies shape by removing such nuisance parameters as initial differences in centroid size (CS), position, and orientation of the specimens, and it defines the shape of each specimen in terms of Procrustes residuals, which serve as the starting point of the statistical analysis of shape (16,30). With GPA, size effects related to isometry were removed, but allometric size differences were retained and visible (31).

As an exploratory tool, we used PCA on Procrustes residuals to visualize and describe the ontogenetic shape trajectories of each sex in multivariate shape space (32–34). PCA was carried out using MorphoJ software (28). PCA is an ordination technique that summarizes the variation among individuals on different axes calculated in multivariate space (15,35). To determine groups, we used the hierarchical clustering method with R° . The matrix of Procrustes distances among mean shapes was analyzed by hierarchical clustering using complete linkage (36). Clustering makes it possible to infer a grouping structure between observations in morphometric data sets. Hierarchical clustering returns a dendrogram that is a representation of similarity and dissimilarity between individuals. This algorithm is recommended for data that are anticipated to show a cline of poorly separated clusters (37). We used a graphic method, the elbow criterion, to select the best number of clusters. We analyzed change in the ratio of within-group variances by the total variance. The best number of clusters appraised when adding a group does not improve the explained variance more than expected.

Means of each group (each sex in a given age group in this case) in the multivariate shape space were connected by vectors to provide better visualization and comprehension of the direction and magnitude of shape change.

To examine whether shapes differed between sexes and age groups, we used a two-way MANOVA with components of shape change as dependent variables. The statistical significance of differences was tested by Goodall's *F*-test (38). Age group and sex were the independent variables. We also studied the interaction terms between sex and age. An interaction in this case meant that shape change in males through time differed from shape change in females through time, implying that the direction of shape change was not concordant.

Following these analyses, we performed pairwise tests of shape differences between the sexes in a range of age groups to determine which groups specifically exhibited differences in shape (35,39). The statistical significance of pairwise shape differences was tested by Goodall's *F*-test performed with the R° system (29,38). In addition, Procrustes distances were calculated between mean shapes of the sexes in particular age groups to

assess the magnitude of sexual dimorphism. Procrustes distances are the sums of squared distances between corresponding homologous landmarks of superimposed configurations (30). Ninety-five percent confidence intervals were placed to test for significant differences in Procrustes distances between age groups.

To estimate the magnitude of shape change, we calculated for each sex the Procrustes distances between the shape of the smallest individual and each individual shape in the ontogenetic data set. Each set of Procrustes distances was then regressed against the individual's age to estimate the change rate of shape during individual aging (40,41). Rates of shape change were estimated within time intervals spanning just two age groups at a time (i.e., between age groups 1 and 2, 2 and 3, 3 and 4, and 4 and 5). This design, based on short time intervals, was developed to satisfy the assumption of a linear relationship between shape change and age.

Two analyses were performed to evaluate pelvic size dimorphism: testing sexual differences in size and testing sexual differences in the rate of change of pelvic size. Pelvic size was represented by CS, the sum of squared distances of each landmark from the centroid (the average position of all landmarks in the configuration). CS is the only size measure that is not correlated with shape and is therefore appropriate in geometric morphometric analyses (where shape is the property of a figure invariant to the scale, position, and rotation) (14,42). CS was used in this study as a biologically meaningful expression of the overall scale of the landmark configuration, and thus of the bones studied, and made it possible to examine allometry (43). Allometry is the shape variation that correlates with size (31). In this study, static allometry was studied, corresponding to the shape variation that correlates with size (31,43).

It has already been demonstrated that principal component 1 provides a good representation of ontogenetic shape changes (21,36). The relationship between the size and the shape of the bones studied was investigated by looking for evidence of a significant correlation between the scores of individuals on principal component 1 and log CS with determination of the r^2 and p -values.

A consensus configuration, or mean shape configuration, was produced for males and females for each age group, so that differences between male and female configurations could be compared. These superimposed mean male and female landmark configurations (consensus configuration shape) were represented graphically as wireframes, for example, lines between landmarks with a 3D representation, individually for males and females.

Results

Precision of Measurement

Table 2 presents the percent errors of the intra- and inter-observer variabilities. None of the percent errors exceeded 3%.

Group Determination

Cluster analysis of distances between the mean shape of each sample supported the five-group structure highlighted by PCA (Table 1 and Fig. 2).

Ontogenetic Shape Trajectories

On the basis of PCA summarizing variation in multivariate shape space, the ontogenetic trajectories of shape change were

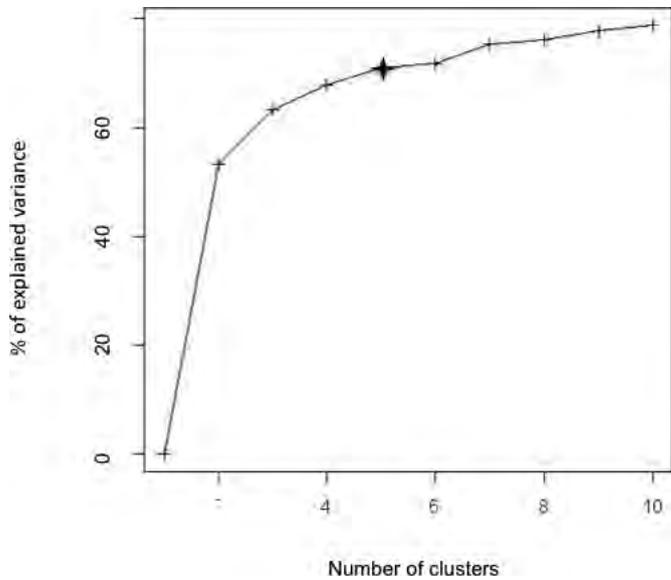


FIG. 2—The elbow method for selecting the number of clusters. By examining the plot, the optimal number of clusters is five. By moving on the graph from left to right and successively removing dots from the curve, the last point giving a convex elbow corresponds to the optimal number of clusters: in this case five (asterisk).

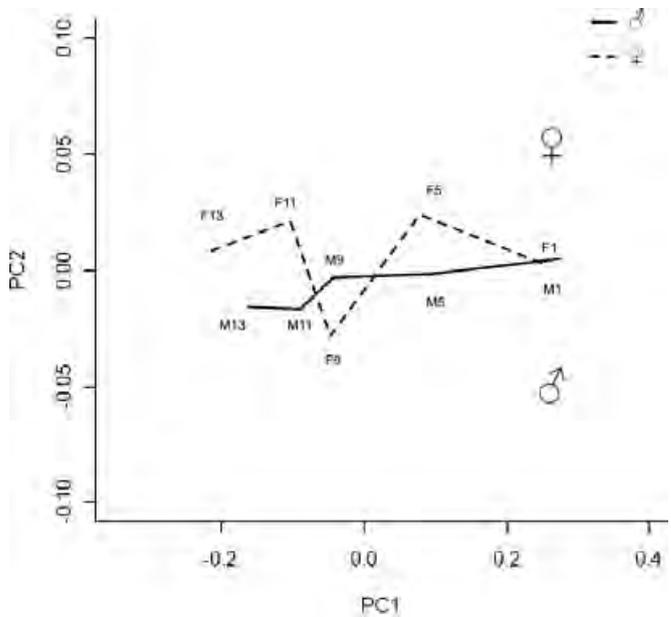


FIG. 3—PCA on Procrustes residuals, following Procrustes superimposition representing multivariate shape space, within which shape trajectories are located. Means of groups are connected by vectors for clear visualization of ontogenetic shape trajectories for each sex (solid lines for males and dashed lines for females). Principal component axis 1 and axis 2 explain 83.1% and 10.6%, respectively, of the variation in the data. Age groups are labeled on the graph.

not the same for males and females (Fig. 3). Clearly, complete shape trajectories of sexes should not be described as single vectors because the patterns of shape change are complex. Variation along the first principal axis, which was closely correlated with time scale, represented ontogenetic variation of size for data that quantify growth. This is shown in Fig. 4 as a linear correlation between variations on the first principal component and CS.

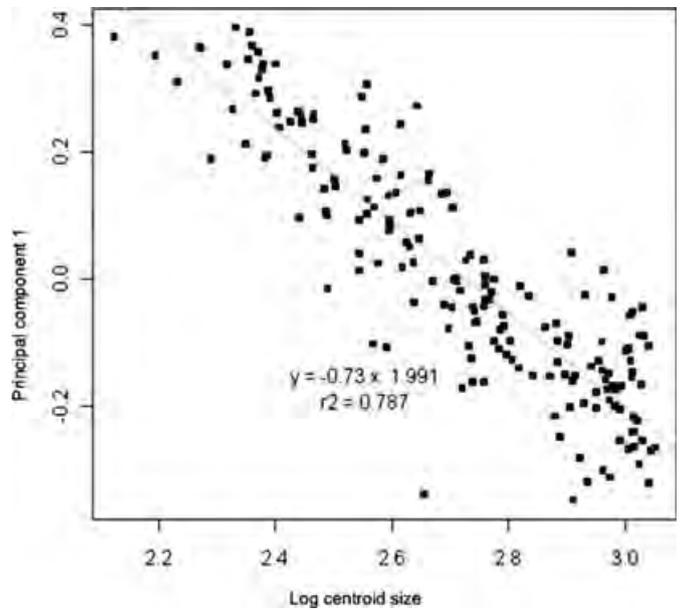


FIG. 4—Effects of allometry. Graphic representation of regression of principal component 1 (PC1) on log CS. A strong linear relationship between PC1 and CS was visible, attesting that PC1 largely summarized size-correlated bone changes.

TABLE 3—Two-way MANOVA exploring shape and size effect on age and sex.

	Shape		Size	
	Procrustes Residual		Centroid Size	
	Goodall's F-test			
	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>
Sex	<0.001*	3.36	0.16	1.9
Age	<0.001*	114.8	<0.001*	1735.8
Sex × Age	<0.001*	2.26	0.44	0.59

*Indicate significant differences ($p < 0.001$).

Trajectories appeared to have the same starting point with overlapping groups of males and females aged 1–4 years: ilium shape was the same in both sexes (Fig. 3). Trajectories spanning age groups 5, 9, 11, and 13 appeared to be different and not parallel: ilium shape differed between sexes. In age group 9 (9–10 years), the female trajectory showed a break, apparently following a sex-specific pattern of shape change, whereas at the same age, the male trajectory remained the same (Fig. 3).

Sexual Shape Dimorphism

Shape Differences Due to Sex and Age—Two-way MANOVAs of shape variables, with sex and age as factors, revealed statistically significant differences ($p < 0.001$) between the sexes and between age groups (Table 3). In all groups, significant differences were found between sexes and between age groups. The interaction between sex and age was also significant, implying that the trajectories of male and female shape change differ considerably. These results were consistent with our interpretation of the principal component plot visualizing shape trajectories (Fig. 3).

TABLE 4—Pairwise shape comparisons between sexes for each age group. Pairwise Goodall's *F*-test showed significant differences in shape for age groups 11 and 13 ($p < 0.001$). Procrustes distance values increase with age.

Pairwise Comparisons Age Group	(<i>p</i>) Goodall's <i>F</i> -test	Procrustes Distances
M1-F1	0.96	0.037
M5-F5	0.42	0.043
M9-F9	0.56	0.045
M11-F13	<0.001	0.050
M13-F13	<0.001	0.050

Pairwise tests performed with Goodall's *F*-test ($p < 0.001$), used for significance testing, indicated a lack of sexual dimorphism in shape in age groups 1, 5, and 9 (aged 1–10 years) (Table 4). However, significant shape differences between sexes existed for groups 11 and 13, that is, for individuals aged more than 11 years.

Procrustes distances between mean male and female shapes in particular age groups indicated that the amount of difference between the sexes increased over time to generate adult shape dimorphism (Table 4). The correlation between age and sexual dimorphism in shape was significant (Table 3). We acknowledge that this test was not an explanation of how the dimorphism arises, but it showed that sexual dimorphism, estimated as a Procrustes distance, was a function of age.

Anatomical Manifestations of Shape Differences—In each age group, we visualized the sexual dimorphism implied by the principal component axes as wireframe displacements of the mean pelvic shape for males and females (Fig. 5). In age group 1 (children aged 1–4 years), male and female mean shape superimposition showed that the HIC landmark was higher in the male mean shape, so that iliac height was greater in males (Fig. 5a). In age group 5 (children aged 5–8 years), male and female mean shapes were similar (Fig. 5b). In age group 9 (children aged 9–10 years), male and female mean shape superimposition showed a general increase in iliac crest–acetabular region distance in males and narrowing of the ilium in females. The differences were more pronounced at the anterior (LIC, ASS, and AIS landmarks) and inferior (CA and PA landmarks) part of the bone (Fig. 5c). In age group 11 (children aged 11–12 years), male and female mean shape superimposition showed that the male mean shape was higher and the female mean shape was larger, but the differences were more pronounced at the superior (HIC) and posterior (PSS and GSN) part of the bone (Fig. 5d). In age group 13 (children aged 13–18 years), male and female mean shape superimposition showed a general increase in iliac crest–acetabular distance in males and narrowing of the ilium length in females (Fig. 5e). However, the differences were more pronounced at the inferior and posterior part of the bone: the PA–GSN–PIS angle was more open in females. This angle represented the superior part of the greater sciatic notch. 3D localization of the three landmarks defining the greater sciatic notch also showed further differences between males and females, with external displacement of the GSN and internal displacement of the PIS landmarks.

Rates of Shape Change—We evaluated rates of shape change based on calculations of Procrustes distances between adjacent age groups. The slope of the curve represented the rate of shape change, allowing development evaluation (Fig. 6).

Males appeared to have a greater rate of shape change than females for the first time interval (between groups 1 and 5).

Shape increase occurred earlier in females, at 5 years of age for females compared with 9 for males. Between groups 9 and 11, and 11 and 13, rates of shape change were similar for both sexes.

Sexual Size Dimorphism

Size Differences Due to Sex and Age—Two-way MANOVAs of shape variables, with sex and age as factors, revealed statistically significant differences ($p < 0.001$) between age groups, which represented growth (Table 3). We found no significant differences between the sexes and no sexual size dimorphism. These results were consistent with our interpretation of the principal component plot visualizing shape trajectories (Fig. 3). For three age groups (M1-F1, M5-F5, M9-F9), males and females had the same value for the first principal component. For age groups 11 and 13, the principal component value

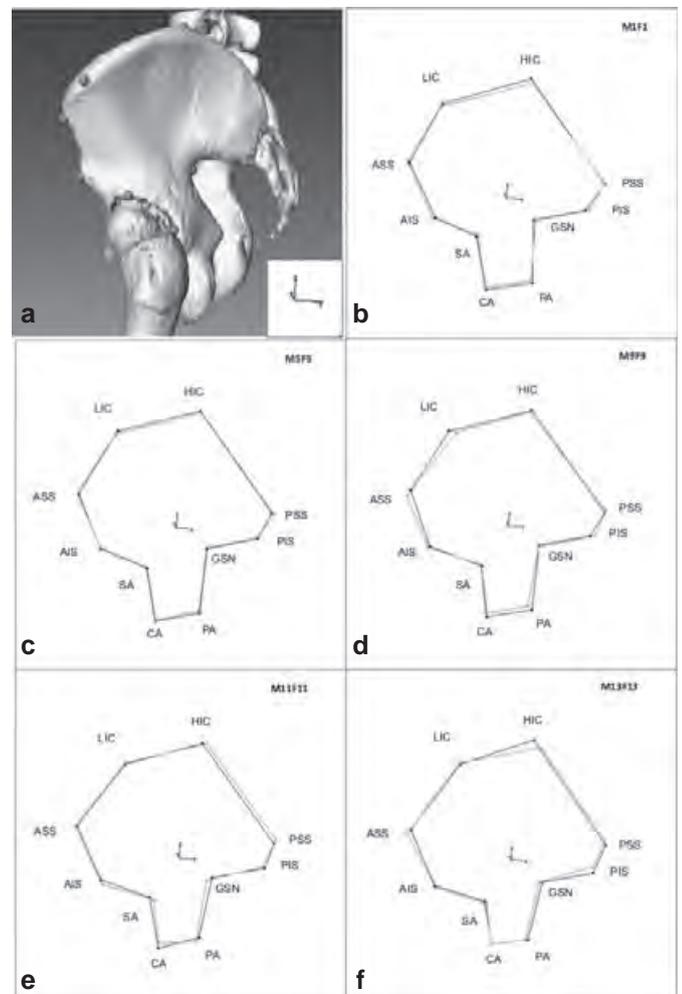


FIG. 5—(a) Visualizing the anatomical manifestation of shape dimorphism. Variations of ilium shape in 3D secondary to sexual differences (males: black lines; females: gray lines). For greater clarity, a 3D volume rendering technique reconstruction of the left coxal bone is also presented. See Table 1 for definitions of landmark abbreviations. (b) Male and female mean shape superimposition for age group 1 (aged 1–4 years old). (c) Male and female mean shape superimposition for age group 5 (aged 5–8 years old). (d) Male and female mean shape superimposition for age group 9 (aged 9–10 years old). (e) Male and female mean shape superimposition for age group 11 (aged 11–12 years old). (f) Male and female mean shape superimposition for age group 13 (aged 13–18 years old).

showed little difference. These differences were explained by an earlier acceleration of growth in females (Fig. 7).

Rates of Size Change—We evaluated rates of size change based on calculations of CS adjacent age groups. The slope of the curve represented the rate of size change, making it possible to evaluate growth (Fig. 7).

Regression of CS on age and comparison of regression slopes of incremental age intervals showed that both sexes grew at the same rate from 1 to 9 years of age (between age group 1–5 and 5–9). At 9 years of age, an acceleration of growth rate for females was visible, occurring at 11 for males. After 11 years of age (in age groups 11 and 13), males had consistently higher faster rates of growth than females.

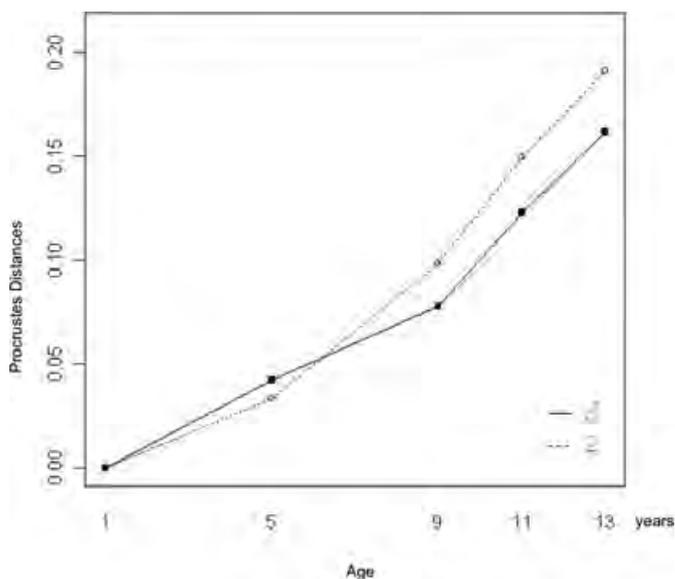


FIG. 6—Development evaluation studying Procrustes distance with age (solid lines: males; dashed lines: females).

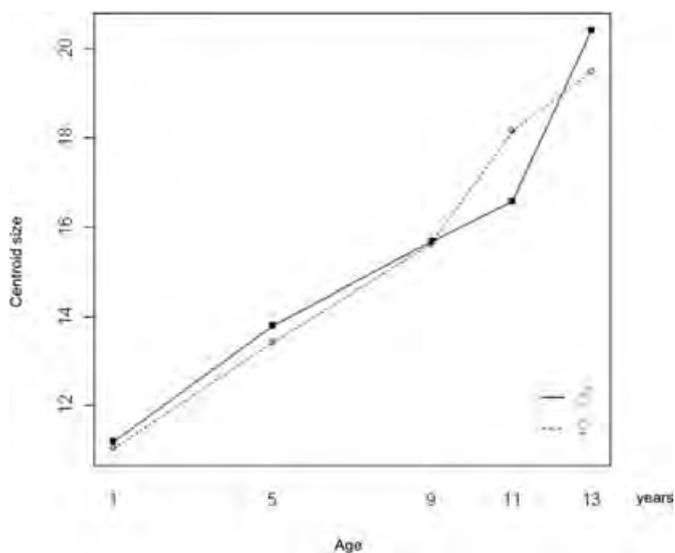


FIG. 7—Growth evaluation studying centroid size value with age (solid lines: males; dashed lines: females).

Discussion

Few works in the literature have dealt with sex assignment in immature individuals. Anatomically, the adult innominate is formed by the fusion of three separate bones: the ilium, the ischium, and the pubis. These three bone parts meet in the AC and fuse during puberty to form the single adult bone (44). Consequently, we chose landmarks that exist on the fused or the nonfused ilium. At birth, the anterior inferior spine and the posterior inferior spine were present, but were more clearly visible at 1 year of age (44). We excluded children younger than 1 year of age. Our results showed that intra- and inter-observer variabilities were less than 3%, attesting to the accuracy and reproducibility of the technique, which are acceptable (25–27).

We analyzed the ontogeny of size dimorphism and shape dimorphism independently, and our results suggested that the development of shape differences was, to some extent, decoupled from the ontogenetic development of size differences. Comparisons of our results with those of earlier work based on conventional morphometric study of sexual dimorphism in immature individuals are confounded by differences in methodology (9,45,46).

The first part of our work analyzed the relationship between size (CS) and shape (Procrustes residual), with age or sex for all groups together.

By analysis of sexual dimorphism of ilium shape, we examined the relationship between sex and the Procrustes residual. Our results showed a significant correlation ($p < 0.001$) between sex and shape.

By analysis of sexual dimorphism of ilium size, we examined the relationship between sex and CS. We found no significant correlation ($p = 0.16$) between sex and size. In immature individuals, there were differences in shape but not in size. These results contradicted those of previous studies. For Rissech and Malgosa, sexual dimorphism in ilium length starts at 15–16 years of age (9). However, some studies on radiographic material have observed that the female ilium was longer at birth than the male (46). This difference was found until the age of 8 years, when males had larger measurements. Our results are in agreement with geometric morphometric studies in adults (47). For Marchal, ilium differences between sexes were shape differences and not size differences (47).

Based on the analysis of iliac development (changes in shape), we examined the relationship between age and the Procrustes residual. Our results showed a significant correlation ($p < 0.001$) between age and shape. Male and female development differed.

Based on the analysis of ilial growth (changes in size), we examined the relationship between age and CS. We found a significant correlation ($p < 0.001$) between age and size. For both males and females, ilium size increased with age. We did not find a significant correlation studying the interaction between age and sex with age, but we found male and female growth differed, as studying the rate of growth. In radiographic material, Coleman conversely found no significant differences between the ages of 9 and 18 (45). For Rissech and Malgosa, there are sexual differences due to completion of growth in females (9).

In the second part of this study, we analyzed shape differences between sexes for each age group. We found a statistically significant difference between males and females in the 11-year-old age group. This does not contradict earlier results, as 11 years was found to be the age when secondary sex characteristics started to develop in females (48). But it is important to note that there were differences in shape as early as age group of

1 year; notably, ilium length (HIC-SA) was smaller in females than in males. Furthermore, Procrustes distances between mean male and female shapes in particular age groups indicated that the amount of difference between the sexes increased over time to generate adult shape dimorphism (Table 4).

Mean shape superimpositions between sexes for each age group showed that shape differences between sexes occurred gradually with age. Between 2 and 4 years of age, differences were located at the superior part of the ilium (HIC): consequently, male ilium length (HIC-SA) was greater than in females. Between 9 and 11 years of age, differences were located at the anterior and superior part of the ilium: consequently, anterior elongation of female mean shape was visible. Ilium width (ASS-PSS) was greater in females. Between 11 and 13 years of age, differences were located at the posterior and superior part of the ilium; consequently, posterosuperior elongation of female mean shape and opening of the PIS-GSN-PA angle, which is the superior part of the greater sciatic notch, were visible. In ilium ontogeny, early shape differences were length differences. It was interesting to note that the late differences were those related to childbearing: ilium width and opening of the greater sciatic notch. Our results do not contradict earlier results (49–51). Wilson studied a population aged 1–8 years of age and Schutkowski a population aged from birth to 5 years of age (50,51). They both showed that the greater sciatic notch was deeper and narrower in males than females. Weaver found that ilium height was greater in females for both newborn and 6-month-old children (5). Reynolds found that ilium length was greater in males from birth (46).

Analysis of the pattern of growth and development (Figs 5 and 6) showed that the changes in shape and size with age were asynchronous. Acceleration of shape change (development) occurred at 5 years of age. It was earlier than acceleration of size, which occurred at 9 years of age. Acceleration of change in size (growth spurt) and in shape (sexual maturation) was earlier in females. The growth spurt begins at 9 years of age for females and 11 years of age for males. The ages of the growth spurt for the ilium in our study agree with previous studies of ilium growth and correspond to the standard intervals of age for pubertal growth spurt in the general population: 10.5–17.5 years of age in males and 9.5–14.5 in females (9,48). To the best of our knowledge, no such study has previously been conducted in children. In a geometric morphometric study on rat pelvis, Berdnikovs et al. found that the appearance of dimorphism was a reflection of the combination of initial sex differences followed by dissimilarities in size and shape change between sexes (52).

All our findings were in accordance with those of previous studies, but in addition, they provide new data on sexual dimorphism on immature populations aged 1–18 years. The immature ilium presents sexual shape dimorphism but not sexual size dimorphism. In ontogeny, ilium growth and ilium development are separate phenomena.

Acknowledgment

Sincere appreciation is expressed to Nina Crowte for her assistance in the preparation of this manuscript.

References

1. Schulter-Ellis FP, Hayek LC, Schmidt DJ. Determination of sex with a discriminant analysis of new pelvic bone measurements: part II. *J Forensic Sci* 1985;30(1):178–85.

2. Schulter-Ellis FP, Schmidt DJ, Hayek LA, Craig J. Determination of sex with a discriminant analysis of new pelvic bone measurements: part I. *J Forensic Sci* 1983;28(1):169–80.
3. Patriquin ML, Steyn M, Loth SR. Metric analysis of sex differences in South African black and white pelvis. *Forensic Sci Int* 2005;147(2-3):119–27.
4. Boucher BJ. Sex differences in the foetal pelvis. *Am J Phys Anthropol* 1957;15(4):581–600.
5. Weaver DS. Sex differences in the ilia of a known sex and age sample of fetal and infant skeletons. *Am J Phys Anthropol* 1980;52(2):191–5.
6. Merrot T, Panuel M, Bourliere B, Kathia C, Philip N, Dutour O. Expression of sexual dimorphism in the fetal pelvic girdle. *C R Acad Sci III* 2001;324(2):137–41.
7. LaVelle M. Natural selection and developmental sexual variation in the human pelvis. *Am J Phys Anthropol* 1995;98(1):59–72.
8. Holcomb SM, Konigsberg LW. Statistical study of sexual dimorphism in the human fetal sciatic notch. *Am J Phys Anthropol* 1995;97(2):113–25.
9. Rissech C, Malgosa A. Ilium growth study: applicability in sex and age diagnosis. *Forensic Sci Int* 2005;147(2–3):165–74.
10. Tague RG. Variation in pelvic size between males and females in nonhuman anthropoids. *Am J Phys Anthropol* 1995;97(3):213–33.
11. Bigoni L, Velemínská J, Bruzek J. Three-dimensional geometric morphometric analysis of cranio-facial sexual dimorphism in a Central European sample of known sex. *Homo* 2010;61(1):16–32.
12. Braga J, Treil J. Estimation of pediatric skeletal age using geometric morphometrics and three-dimensional cranial size changes. *Int J Legal Med* 2007;121(6):439–43.
13. Corti M. Geometric morphometrics: an extension of the revolution. *Trends Ecol Evol (Amst)* 1993;8(8):302–3.
14. Bookstein F. *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*. Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press, 1991.
15. Slice D. *Modern morphometrics in physical anthropology*. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2005.
16. Rohlf J. Morphometric spaces, shape components and the effects of linear transformations. In: Marcus LF, editor. *Advances in morphometrics*. New York, NY: Plenum, 1996;117–29.
17. Steyn M, İşcan MY. Metric sex determination from the pelvis in modern Greeks. *Forensic Sci Int* 2008;179(1):86.
18. Franklin D, Oxnard CE, O'Higgins P, Dadour I. Sexual dimorphism in the subadult mandible: quantification using geometric morphometrics. *J Forensic Sci* 2007;52(1):6–10.
19. Kimmerle EH, Ross A, Slice D. Sexual dimorphism in America: geometric morphometric analysis of the craniofacial region. *J Forensic Sci* 2008;53(1):54–7.
20. Oettlé AC, Pretorius E, Steyn M. Geometric morphometric analysis of mandibular ramus flexure. *Am J Phys Anthropol* 2005;128(3):623–9.
21. Oettlé AC, Pretorius E, Steyn M. Geometric morphometric analysis of the use of mandibular gonial eversion in sex determination. *Homo* 2009;60(1):29–43.
22. Pretorius E, Steyn M, Scholtz Y. Investigation into the usability of geometric morphometric analysis in assessment of sexual dimorphism. *Am J Phys Anthropol* 2006;129(1):64–70.
23. Genoves S. *Estimation des différences sexuelles dans l'os coxal Différences métriques et différences morphologiques*. Bull Mém Soc Anthropol Paris 1959;10(1):3–95.
24. Martin R, Saller K. *Lehrbuch der anthropologie in systematischer darstellung: mit besonderer berücksichtigung der anthropologischen methoden*. Stuttgart, Germany: Fisher, 1957.
25. Corner B, Subhash L, Richtsmeier J. Measuring precision of three-dimensional landmark data. *J Quantitative Anthropol* 1992;3(4):347–59.
26. Singleton M. Patterns of cranial shape variation in the Papiunini (Primates: Cercopithecinae). *J Hum Evol* 2002;42(5):547–78.
27. vonCramon-Taubadel N, Frazier BC, Lahr MM. The problem of assessing landmark error in geometric morphometrics: theory, methods, and modifications. *Am J Phys Anthropol* 2007;134(1):24–35.
28. Klingenberg C. MorphoJ program. Faculty of Life Sciences, University of Manchester, UK, 2011. http://www.flyings.org.uk/MorphoJ_page.htm (accessed September 13, 2011).
29. R Foundation for Statistical Computing. R Development Core Team, 2011, Klingenberg CP. Morpho J: an integrated software package for geometric morphometrics. *Mol Ecol Resour* 2011;11(2):353–7. <http://www.R-project.org> (accessed September 13, 2011).
30. Rohlf J, Slice D. Extensions of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks. *Syst Zool* 1990;39(1):40–59.
31. Elewa A. *Morphometrics for nonmorphometricians*. Berlin, London: Springer, 2010.

32. Berge C, Penin X. Ontogenetic allometry, heterochrony, and interspecific differences in the skull of African apes, using tridimensional Procrustes analysis. *Am J Phys Anthropol* 2004;124(2):124–38.
33. Cobb SN, O'Higgins P. Hominins do not share a common postnatal facial ontogenetic shape trajectory. *J Exp Zool B Mol Dev Evol* 2004;302(3):302–21.
34. Mitteroecker P, Gunz P, Weber GW, Bookstein FL. Regional dissociated heterochrony in multivariate analysis. *Ann Anat* 2004;186(5-6):463–70.
35. Zelditch M, Swiderski D, Sheets D. Geometric morphometrics for biologists. New York, NY: Elsevier/Academic Press, 2004.
36. Johnson R, Wichern D. Applied multivariate statistics. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.
37. Kaufman L, Rousseeuw P. Finding groups in data. An introduction to cluster analysis. New York, NY: John Wiley, 1990.
38. Goodall C. Procrustes methods in the statistical analysis of shape. *J R Stat Soc B* 1991;53(2):285–339.
39. Adams D, Funk D. Morphometric inferences on sibling species and sexual dimorphism in *Neochlamisus bebbianae* leaf beetle: multivariate applications of the thin-plate spline. *Syst Biol* 1997;46(1):180–94.
40. Zelditch M, Sheets D, Fink W. The ontogenetic dynamics of shape disparity. *Paleobiology* 2003;29:139–56.
41. Zelditch ML, Sheets HD, Fink WL. Spatiotemporal reorganization of growth rates in the evolution of ontogeny. *Evolution* 2000;54(4):1363–71.
42. Bookstein FL. Biometrics, biomathematics and the morphometric synthesis. *Bull Math Biol* 1996;58(2):313–65.
43. O'Higgins P, Jones N. Facial growth in *Cercocebus torquatus*: an application of three-dimensional geometric morphometric techniques to the study of morphological variation. *J Anat* 1998;193(Pt 2):251–72.
44. Scheuer L, Black S. Developmental juvenile osteology. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier/Academic Press, 2000.
45. Coleman WH. Sex differences in the growth of the human bony pelvis. *Am J Phys Anthropol* 1969;31(2):125–51.
46. Reynolds E. The bony pelvic girdle in early infancy A roentgenometric study. *Am J Phys Anthropol* 1945;3:321–54.
47. Marchal F. *Le dimorphisme sexuel de conformation de l'os coxal humain Bases biologiques et nouvelles applications possibles*. Bull Mém Soc Anthropol Paris 2003;15:7–24.
48. Tanner JM, Whitehouse RH, Marubini E, Resele LF. The adolescent growth spurt of boys and girls of the Harpenden growth study. *Ann Hum Biol* 1976;3(2):109–26.
49. Majo T. *Ontogénèse de l'os coxal et détermination sexuelle: l'importance de l'ilium*. Bull Mém Soc Anthropol Paris 1992;2:53–65.
50. Wilson LA, MacLeod N, Humphrey LT. Morphometric criteria for sexing juvenile human skeletons using the ilium. *J Forensic Sci* 2008;53(2):269–78.
51. Schutkowski H. Sex determination of infant and juvenile skeletons: I. Morphognostic features. *Am J Phys Anthropol* 1993;90(2):199–205.
52. Berdnikovs S, Bernstein M, Metzler A, German RZ. Pelvic growth: ontogeny of size and shape sexual dimorphism in rat pelvis. *J Morphol* 2007;268(1):12–22.

Additional information and reprint requests:

Marie Faruch Bilfeld, M.D.
 Service de Médecine Légale
 CHU Toulouse-Rangueil
 1 avenue Professeur Jean Poulhès
 31059 Toulouse Cedex 9
 France
 E-mail: mariefaruch@hotmail.com

ANTHROPOLOGY

Marie Faruch Bilfeld,^{1,2,3} M.D., Ph.D.; Fabrice Dedouit,^{1,2,4} M.D., Ph.D.; Nicolas Sans,³ M.D., Ph.D.; Hervé Rousseau,⁴ M.D., Ph.D.; Daniel Rougé,^{1,2} M.D., Ph.D.; and Norbert Telmon,^{1,2} M.D., Ph.D.

Ontogeny of Size and Shape Sexual Dimorphism in the Pubis: A Multislice Computed Tomography Study by Geometric Morphometry

ABSTRACT: Few studies have been conducted to determine sex differences in the immature coxal bone and the results were often contradictory. The authors studied sexual dimorphic differences of the pubis using geometric morphometric analysis of five osteometric landmarks recorded by multislice computed tomography (MSCT), based on three-dimensional reconstructions of 188 children (95 boys, 93 girls) living in the region of Toulouse, southwestern France, ranging in age from 1 to 18 years old. They used geometric morphometric methodology first to test sexual dimorphism in size (centroid size) and shape (Procrustes residuals) and second to examine patterns of shape change with age (development) and size change with age (growth). Based on statistical significance test results, the pubic shape became sexually dimorphic at 13 years old, although visible shape differences were observed as early as 9 years old. This work showed that the trajectories of pubis shape (development) and size (growth) differed throughout ontogeny and between sexes.

KEYWORDS: forensic science, forensic anthropology, geometric morphometry, sexual dimorphism, pubis, immature, multislice computed tomography

Estimation of age and sex from the skeleton is the first objective in the research protocol in anthropological and forensic studies. The pubis is an important element for adult sexual determination (1–3). There have been few studies of the immature pubic bone and the results are often contradictory. Coleman found sex differences in the growth of the pubis from the age of 9 years and Reynolds from the ages of 5 and 7 years, whereas Boucher found no sex differences (4–6). In a study of growth, Rissech showed sexual differences from birth, but these were statistically significant only after the age of 15 years (7).

Describing sexual dimorphism in the growth of skeletal elements is difficult because during childhood, the pelvis undergoes significant remodeling in both shape and size, presumably caused by changes in the hormonal environment (8). To develop reliable methods of sexual determination of immature individuals, a comprehensive knowledge of ontogeny is necessary. Previous work has shown that landmark-based geometric morphometric analysis is a pertinent approach (9). This technique examines shape and differentiates the variability of both

size and shape that occurs during bone growth, whereas conventional morphometric studies that analyze shape by means of angles, linear distances, and ratios give an incomplete picture of shape and conflate dimorphism in shape and size (10,11).

To develop ontogenetic study of the innominate, we previously examined the immature ilium (12). The purpose of the present study was to provide new data on ontogeny of the immature pubic bone. The objective was to quantify pubis morphology during ontogeny, specifically examining size and shape dimorphism independently, and applying landmark-based geometric morphometrics to longitudinal computed tomodensitometry data.

Material and Methods

Sample

We carried out a retrospective study of coxal bones from children undergoing clinical multislice computed tomography (MSCT) between April 2005 and November 2011 in the University Hospital of Toulouse, southwestern France. The MSCT examinations were mainly requested in a clinical context of abdominal diseases. Patients with a known history of bone disease were excluded. A total of 188 MSCT examinations were included, obtained in patients aged from 1 to 18 years old, consisting of 95 males and 93 females (Table 1). The data and images were recorded anonymously. According to French law, the results of medical imaging examinations may be used retrospectively without the patient's consent when these examinations

¹Laboratoire d'Anthropobiologie AMIS, UMR 5288 CNRS, Université Paul Sabatier, 37 Allées Jules Guesde, 31000 Toulouse, France.

²Service de Médecine Légale, CHU Toulouse-Rangueil, 1 Avenue Professeur Jean Poulhès, 31059 Toulouse Cedex 9, France.

³Service de Radiologie, CHU Toulouse-Purpan, Place du Docteur Baylac, 31059 Toulouse Cedex 9, France.

⁴Service de Radiologie, CHU Toulouse-Rangueil, 1 Avenue Professeur Jean Poulhès, 31059 Toulouse Cedex 9, France.

Received 26 Aug. 2013; and in revised form 7 July 2014; accepted 10 July 2014.

TABLE 1—Sample size by age range and group. The group is labeled by the age of the youngest individual of the group.

Age group	Age range (years)	Sample size	
		Male	Female
M1, F1	1–4	21	21
M5, F5	5–8	21	19
M9, F9	9–10	11	10
M11, F11	11–12	12	11
M13, F13	13–18	30	32
Total		95	93

M male, F female.

have been carried out for clinical purposes and when they have been recorded anonymously (article 40-1, law 94-548 of 1 July 1994).

The sample was divided into four groups based on age, labeled according to the youngest age in the group: group 1 (children aged 1–4), group 5 (aged 5–8), group 9 (aged 9–10), group 11 (aged 11–12), and group 13 (aged 13–18). These 5 groups were determined using the statistical methods detailed in the statistical analysis section.

Data Collection

MscT—Examinations were performed on a Sensation 16 Scanner (Siemens, Erlangen, Germany) with 16×1.5 mm collimation. The image matrix was 512×512 pixels. A bone filter and a soft tissue filter were used. Depending on the purpose of the examination, axial 3 mm (or 2 mm) reconstructions were performed every 2 mm (or 1 mm).

Postprocessing—Scans were saved as DICOM files (Digital Imaging and Communications in Medicine), and postprocessing was performed with Amira 4.1.1[®] (Mercury Computer System, Inc., Chelmsford, MA).

Morphological 3D Analysis—Based on standard anthropometric techniques and on the literature, five osteometric landmarks were selected by convention on the left pubis (Fig. 1, Table 2) (13,14). These landmarks were chosen as an adequate summary of those used in classic osteometric methods for sexing the pubis, to allow comparisons with previously published results. The landmarks were all type I landmarks, except the center of the acetabulum (CA) which is type II (2). CA is the orthogonal projection of SA-IA (SA: the superior point of the acetabular margin; IA: the inferior point of the acetabular margin) and the AA-PA intersection (AA: the anterior point of the acetabular margin; PA: the posterior point of the acetabular margin). The FO landmark is defined as the most anterior point of the obturator foramen which is positioned at the junction of the ischiopubic ramus and the pubic body. The landmarks were positioned on the MSCT reconstructions using Amira[®] with the volume rendering technique mode (VRT) and the multiplanar reconstruction mode (MPR). The corresponding 3D coordinates (x, y, and z) for each landmark were subsequently recorded.

Data Analysis

Precision of Measurements—The data were collected by two observers working under a common data collection protocol. To assess intra-observer error, the principal observer (M.F.B.) carried out five observations of five randomized specimens from the sample of 188 pelvis 1 month after the first examination. To assess interobserver error, the second observer (F.D.) carried out

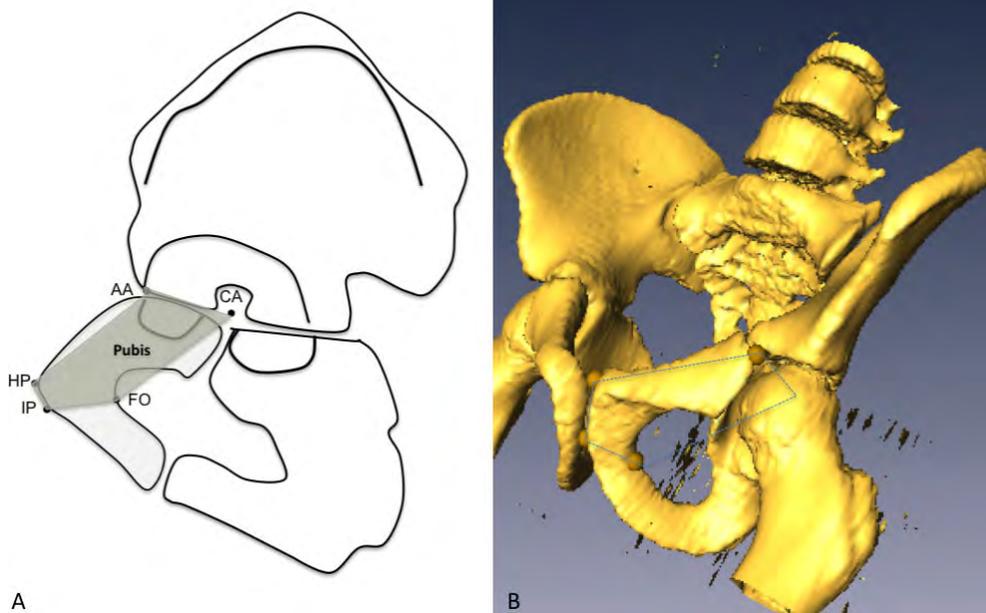


FIG. 1—Drawing of the left coxal bone: position of the landmarks used to delineate the pubis. (A) Landmarks positioned with Amira[®] on 3D-MSCT with 3D reconstruction with the volume rendering technique mode. (B) Note that the CA landmark is not visualized because it is behind the head. This landmark is positioned on VRT multiplanar reconstruction mode.

TABLE 2—Anatomical description and intra- and interobserver variabilities of the five landmarks positioned on the MSCT pelvic reconstructions. The results are expressed in percentage errors.

Landmark abbreviations	Localization on the coxal bone	Intra-observer variability (%)	Interobserver variability (%)
CA	Center of the acetabulum	2.10	2.09
FO	Most anterior point of the obturator foramen	2.54	2.52
IP	Inferior point of the pubis symphysis	2.47	2.43
HP	Superior point of the pubis symphysis	2.15	1.9
AA	Most anterior point of the acetabulum	2.20	2.65

one observation of five randomized specimens. For each observer, landmark deviations were calculated relative to the landmark mean. As previously described, percentage errors were calculated for the five landmarks (Table 1) (15–17). Previous authors have suggested that the results are acceptable when the percentage errors do not exceed 5% (15–18).

Statistical Analysis

A combination of landmark-based geometric morphometric analyses was used to address questions concerning the ontogeny of pubic shape and size dimorphism: testing differences between age groups and testing for differences in rates of change over time. Briefly, principal component analysis (PCA) was used as an exploratory step, and two-way multivariate analysis of variance (MANOVA) and Goodall's F-test were used to test for differences between sexes and between age groups, while linear regressions compared rates of shape change. All morphometric geometric analyses and statistical analyses were carried out with MorphoJ and R 2.2.0 software (19,20).

First, we carried out generalized least-squares Procrustes superimposition (GLS) of digitized landmark coordinates using MorphoJ software (19). This procedure quantifies shape by removing such nuisance parameters as initial differences in centroid size, position, and orientation of the specimens, and it defines the shape of each specimen in terms of Procrustes residuals, which serve as the starting point of the statistical analysis of shape (11,21). With generalized Procrustes analyses (GPA), size effects related to isometry were removed, but allometric size differences were retained and visible (22).

As an exploratory tool, we used PCA on Procrustes residuals to visualize and describe the ontogenetic shape trajectories of each sex in multivariate shape space (23–25). PCA was carried out using MorphoJ software (19). PCA is an ordination technique that summarizes the variation among individuals on different axes calculated in multivariate space (26,27). To determine groups, we used the hierarchical clustering method with R° (20). The matrix of Procrustes distances among mean shapes was analyzed by hierarchical clustering using complete linkage (28). Clustering makes it possible to infer a grouping structure between observations in morphometric data sets. Hierarchical clustering returns a dendrogram that is a representation of similarity and dissimilarity between individuals. This algorithm is recommended for data that are anticipated to show a cline of poorly separated clusters (29). We used a graphic method, the elbow criterion, to select the best number of clusters. We analyzed change of the ratio of within-group variances by the total variance. The best number of clusters appraised when adding a group did not improve the explained variance more than expected. Means of each group (each sex in a given age group in this case) in the multivariate shape space were connected by vectors to provide better visualization and comprehension of the direction and magnitude of shape change.

To examine whether shapes differed between sexes and age groups, we used a two-way MANOVA with components of shape change as dependent variables. The statistical significance of differences was tested by Goodall's F-test (30). Age group and sex were the independent variables. We also studied the interaction terms between sex and age. An interaction in this case meant that shape changes in males through time differed from shape changes in females through time, implying that the direction of shape change was not concordant. Following these analyses, we performed pairwise tests of shape differences between the sexes in a range of age groups to determine which groups specifically exhibited differences in shape (27,31). The statistical significance of pairwise shape differences was tested by Goodall's F-test performed with the R° system (20,30). In addition, Procrustes distances were calculated between mean shapes of the sexes in particular age groups to assess the magnitude of sexual dimorphism. Procrustes distances are the sums of squared distances between corresponding homologous landmarks of superimposed configurations (11). Ninety-five percent confidence intervals were placed to test for significant differences in Procrustes distances between age groups.

To estimate the magnitude of shape change, we calculated for each sex the Procrustes distances between the shape of the smallest individual and each individual shape in the ontogenetic data set. Each set of Procrustes distances was then regressed against the individual's age to estimate the change rate of shape during individual aging (32,33). Rates of shape change were estimated within time intervals spanning just two age groups at a time (i.e., between age groups 1 and 2, 2 and 3, 3 and 4, 4 and 5). This design, based on short time intervals, was developed to satisfy the assumption of a linear relationship between shape change and age.

Two analyses were performed to evaluate pelvic size dimorphism: testing sexual differences in size and testing sexual differences in the rate of change of pelvic size. Pelvic size was represented by centroid size, the sum of squared distances of each landmark from the centroid (the average position of all landmarks in the configuration). Centroid size (CS) is the only size measure that is not correlated with shape and is therefore appropriate in geometric morphometric analyses (where shape is the property of a figure invariant to the scale, position, and rotation) (10,34). CS was used in this study as a biologically meaningful expression of the overall scale of the landmark configuration, and thus of the bones studied, and made it possible to examine allometry (35). We studied static allometry, the shape variation that correlates with size (22,35).

It has already been demonstrated that the first axis of the principal component (PC1) provides an adequate representation of ontogenetic shape changes (28,36). The relationship between the size and the shape of the bones studied was investigated by looking for evidence of a significant correlation between the scores of individuals on PC1 and log CS with determination of the r^2 and p values.

A consensus configuration, or mean shape configuration, was produced for males and females for each age group, so that differences between male and female configurations could be compared. These superimposed mean male and female landmark configurations (consensus configuration shape) were represented graphically as wireframes, for example, lines between landmarks with a 3D representation, individually for males and females.

Results

Precision of Measurement

Table 2 presents the percentage errors of the intra- and interobserver variabilities. None of the percentage errors exceeded 3%.

Group Determination

Cluster analysis of distances between the mean shape of each sample supported the 5-group structure highlighted by principal component analysis (Table 1, Fig. 2). These groups represented ages where shapes were the most similar.

Ontogenetic Shape Trajectories

On the basis of PCA summarizing variation in multivariate shape space, the ontogenetic trajectories of shape change were not the same for males and females (Fig. 3). Clearly, complete shape trajectories of sexes should not be described as single vectors because the patterns of shape change are complex. Variation along the first principal axis, which was closely correlated with time scale, represented ontogenetic variation of size for data that quantify growth. This is shown as a linear correlation between variations on the first principal component and centroid size (Fig. 4). Trajectories appeared to have the same starting point with overlapping groups of males and females aged 1–4 years:

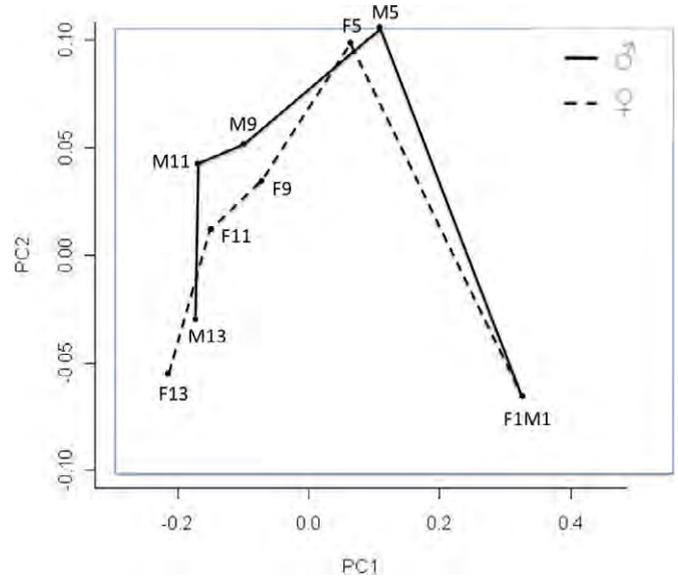


FIG. 3—Principal component analysis on Procrustes residuals, following Procrustes superimposition representing multivariate shape space, within which shape trajectories are located. Means of groups are connected by vectors for clear visualization of ontogenetic shape trajectories for each sex (solid lines: males; dashed lines: females). Principal component axis 1 and axis 2 explain 68.3% and 18.3%, respectively, of the variation in the data. Age groups are labeled on the graph.

Pubis shape was the same in both sexes (Fig. 3). Trajectories spanning age groups 5, 9, 11, and 13 appeared to be parallel but were not superimposed: Pubis shape differed between sexes. The male trajectory presented higher scores on the first principal component, and females appeared to have a longer trajectory (Fig. 3).

Sexual Shape Dimorphism

Shape Differences Due to Sex and Age—Two-way MANOVAs of shape variables, with sex and age as factors, revealed statistically significant differences ($p < 0.001$) between the sexes and between age groups (Table 3). The interaction between sex and age was not significant, implying that the trajectories of male and female shape change did not differ considerably. These results were consistent with our interpretation of the principal component plot visualizing shape trajectories (Fig. 3).

Pairwise tests performed with Goodall's F-test ($p < 0.001$), used for significance testing, indicated an absence of sexual dimorphism in shape in age groups 1, 5, 9, and 11 (aged 1–12 years) (Table 4). However, significant shape differences between sexes existed for group 13, consisting of individuals aged more than 13 years.

Procrustes distances between mean male and female shapes in particular age groups indicated that the amount of difference between the sexes increased over time to generate adult shape dimorphism, except in age group 11 where the values were lower than in age group 9 (Table 4). The correlation between age and Procrustes residuals was significant (Table 3). We acknowledge that this test was not an explanation of how the dimorphism arises, but it showed that sexual dimorphism, estimated as a Procrustes distance, was a function of age.

Anatomical Manifestations of Shape Differences—In each age group, we visualized the sexual dimorphism implied by the

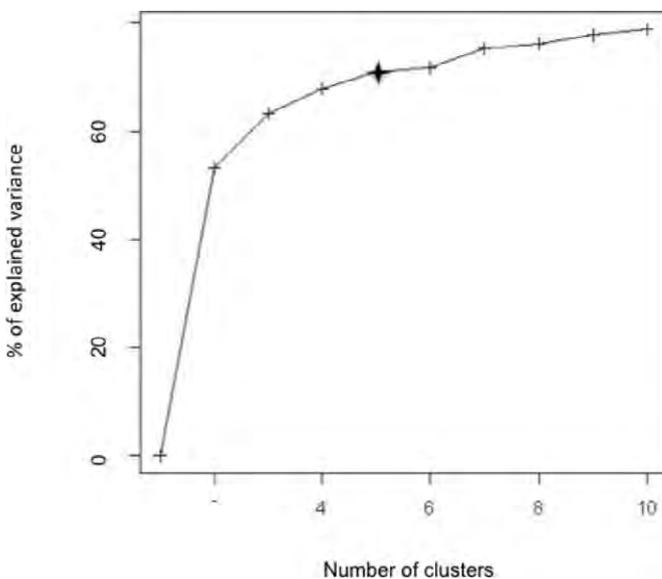


FIG. 2—The elbow method for selecting the number of clusters. Examination of the plot shows that the optimal number of clusters is five. Following the graph from left to right and successively removing dots from the curve, the last point giving a convex elbow corresponds to the optimal number of clusters: in this case five (asterisk).

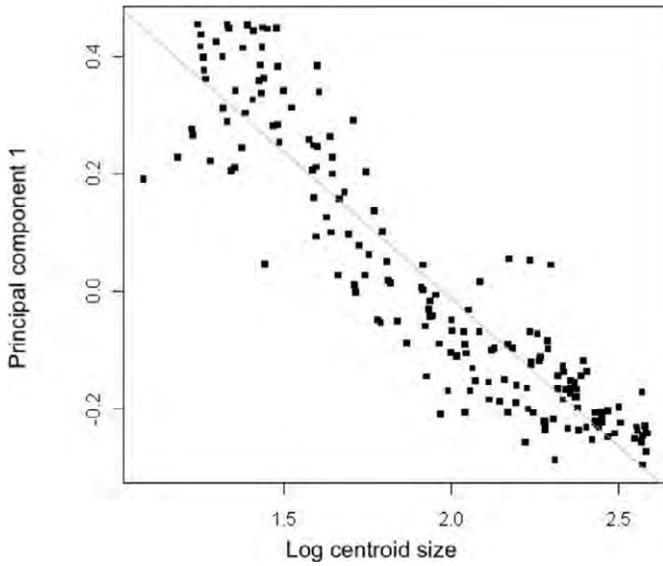


FIG. 4—Effects of allometry. Graphic representation of regression of principal component 1 (PC1) on log centroid size. A strong linear relationship between PC1 and centroid size was visible, attesting that PC1 largely summarized size-correlated bone changes.

TABLE 3—Two-way MANOVA exploring shape and size effect on age and sex.

	Shape Procrustes residual		Size Centroid size	
	Goodall's F-test			
	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>
Sex	<0.001*	2.987	<0.001*	8.63
Age	<0.001*	164.831	<0.001*	3319.19
Sex x Age	0.073	1.041	<0.001*	7.85

*Indicate significant differences (*p* < 0.001).

TABLE 4—Pairwise shape comparisons between sexes for each age group. Pairwise Goodall's F-test showed significant differences in shape for age groups 13 (*p* < 0.001). Procrustes distance values increase with age.

Pairwise comparisons by age group	(<i>p</i>) Goodall's F-test	Procrustes distances
M1-F1	0.99	0.028
M5-F5	0.76	0.028
M9-F9	0.31	0.069
M11-F11	0.34	0.050
M13-F13	<0.001	0.077

principal component axes as wireframe displacements of the mean pubis shape for males and females (Fig. 5). We analyzed in 3 dimensions two views in the anatomical position on the pubis *in vivo*: The anteromedial view is an anterior view on dry bone and the posterolateral view is a lateral view on dry bone. In age groups 1 and 5 (children aged 1–8 years), male and female mean shape superimposition showed that mean shape was similar in both sexes (Fig. 5A–D). In age group 9 (children aged 9–10 years), male and female mean shape superimposition showed the HP landmark was anterior and the AA landmark was posterior and inferior in the female mean shape: The antero-posterior distance (HP-AA) was therefore greater in the female mean shape (Fig. 5E, F). The FO landmark was anterior, infe-

rior, and lateral in the female. In the craniocaudal axis, the IP and CA landmarks were located at the same level and the FO landmark was higher in female mean shapes. This higher position of the FO landmark in female mean shapes was responsible for a decrease of pubis height in the female pubis mean shape (Fig. 5F). The lateral position of the FO landmark in the female is responsible for a larger pelvis diameter in females than in males, represented by the FO-FO' diameter (FO' is the FO landmark positioned in the contralateral pubic bone). In age group 11 (children aged 11–12 years), male and female mean shape superimposition showed the same differences in HP and AA landmarks as in age group 9, but less pronounced (Fig. 5G, H). There were major changes in the FO landmark which became higher, anterior, and medial in the male mean shape (Fig. 5H). In age group 13 (children aged 13–18 years), male and female mean shape superimposition showed that the male mean shape was higher (HP-HI and CA-AA distances) and the female mean shape was larger (HP-AA and IP-CA) (Fig. 5I, J). The FO landmark was higher, posterior, and lateral in the female mean shape, and the CA-FO-IP angle was more open in the female. The inner surface of the bone was more open in the female pubis mean shape (Fig. 5J).

Rates of Shape Change—We evaluated rates of shape change based on calculations of Procrustes distances between adjacent age groups. The slope of the curve represented the rate of shape change, allowing development evaluation (Fig. 6).

Males had a greater rate of shape change than females between 1 and 5 years old and after 13 years old. Between 5 and 11 years old, the rate of shape change was greater in females, as shown by a slope of the curve that was higher in the female curve than in the male curve. The evolution of rates of shape changes was quite similar in both sexes. Shape increase occurred between 9 and 11 years old for both sexes. After 11 years old, the female rate decreased, whereas the male rate continued to increase.

Sexual Size Dimorphism

Size Differences Due to Sex and Age—Two-way MANOVAs of size variables (centroid size), with sex and age as factors, revealed statistically significant differences (*p* < 0.001) between the sexes, which represented sexual size dimorphism, and between age groups, which represented growth (Table 3). The interaction between sex and age was also significant, implying that the trajectories of male and female size change differ considerably. These results were consistent with our interpretation of the principal component plot visualizing shape trajectories (Fig. 3). For four age groups (M5-F5, M9-F9, M11-F11, and M13-F13), the values of the first principal component and the second principal component differed between males and females.

Rates of Size Change—We evaluated rates of size change based on calculations of CS between adjacent age groups. The slope of the curve represented the rate of size change, making it possible to evaluate growth (Fig. 7).

Regression of centroid size on age and comparison of regression slopes of incremental age intervals showed that both sexes grew at the same rate from 1 to 9 years (between age groups 1–5 and 5–9). At 9 years, the growth rate accelerated in females, whereas acceleration occurred at 11 for males. After 11 years (in age groups 11 and 13), rates of growth were similar in both sexes.

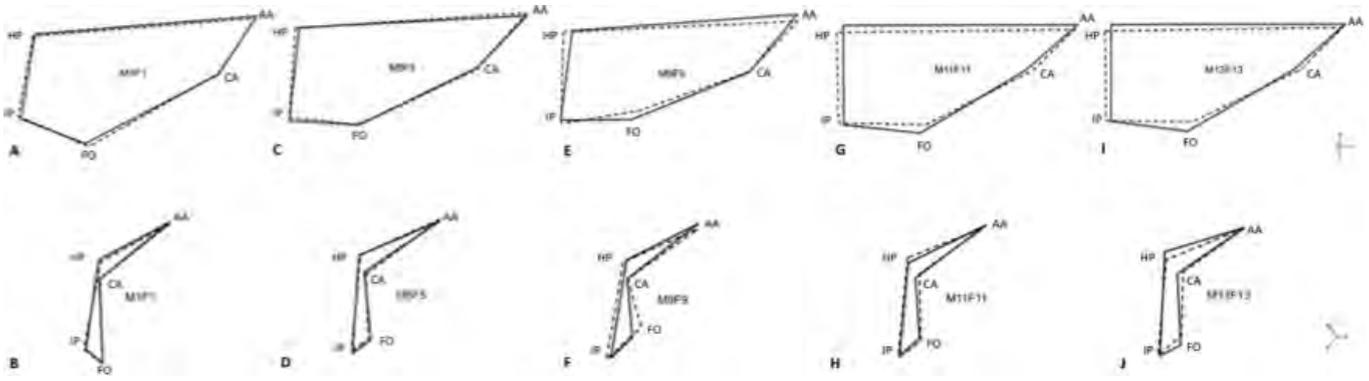


FIG. 5—Visualization of anatomical manifestation of shape dimorphism. Variations of pubic shape in 3D secondary to sexual differences (males: solid lines; females: dashed lines). See Table 1 for definitions of landmark abbreviations. The top row shows the posterolateral view for groups 1 (A), 5 (C), 9 (E), 11 (G), and 13 (I), while the bottom row shows the anteromedial view for groups 1 (B), 5 (D), 9 (F), 11 (H), and 13 (J).

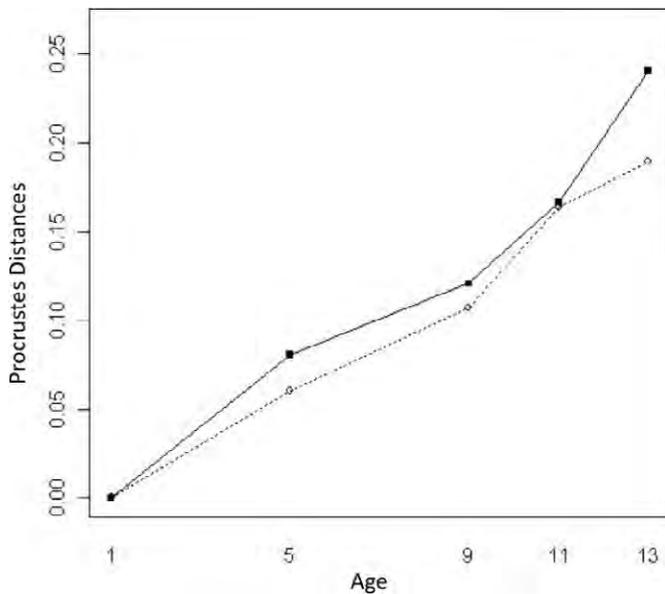


FIG. 6—Development evaluation studying Procrustes distance with age (solid lines: males; dashed lines: females).

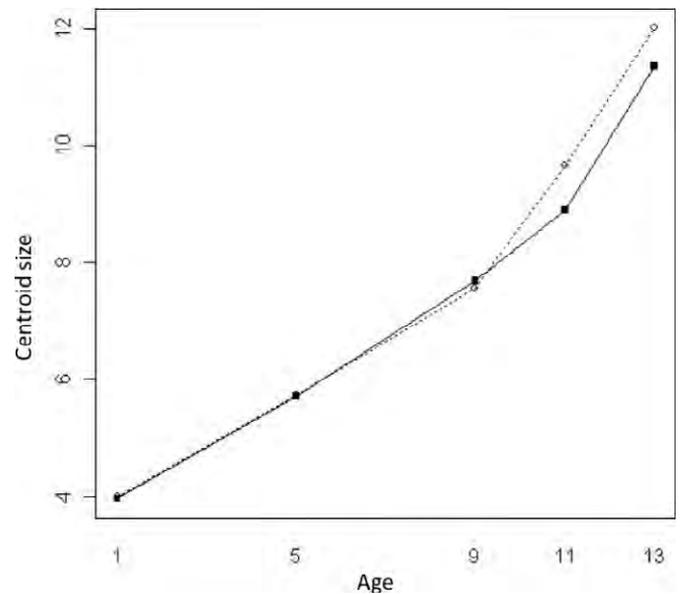


FIG. 7—Growth evaluation studying centroid size value with age (solid lines: males; dashed lines: females).

Discussion

Anatomically, the adult innominate is formed by the fusion of three separate bones: the ilium, the ischium, and the pubis. These three bone parts meet in the acetabulum and fuse during puberty to form the single adult bone (37). As in our previous study of the ilium, we chose landmarks that exist on both the fused and the nonfused pubis (12). Our results showed that intra- and interobserver variabilities were <3%, attesting to the acceptable accuracy and reproducibility of the technique (15–17).

We analyzed the ontogeny of size dimorphism and shape dimorphism independently, and our results suggested that the ontogenetic development of shape differences was, to some extent, decoupled from the development of size differences. Comparisons of our results with those of earlier works based on conventional morphometric study of sexual dimorphism in immature individuals are confounded by differences in methodology (4,5,38).

The first part of our work analyzed the relationship between shape (Procrustes residual) and size (centroid size) with age or sex for all groups together.

By analysis of *sexual dimorphism of pubis shape*, we examined the relationship between sex and the Procrustes residual. Our results showed a significant correlation ($p < 0.001$) between sex and shape. Previous studies of pubis sexual dimorphism in children employing conventional morphometrics, based on angles, linear distances, and ratios, gave an approximation of shape and conflated shape and size (4,5,7). These results are in agreement with geometric morphometric studies in adults, in which Marchal considered that pubis differences between sexes could be explained by shape differences (39).

By analysis of *sexual dimorphism of pubis size*, we examined the relationship between sex and centroid size. Our results showed a significant correlation ($p < 0.001$) between sex and size. In immature individuals, there were differences in both shape and size. These results are in agreement with those of previous studies. For Rissech and Malgosa, women have a longer pubis than males from birth; however, differences are significant after 15 years old (7). Studies on radiographic material have also observed that female pubis length was larger than of males at all ages, but the differences were significant between 3.75 and

5.75 years old for Reynolds (8) and between 9 and 18 years old for Coleman (9). Our results are in agreement with geometric morphometric studies in adults (39). These differences of shape and size according to sex were not the same for the ilium: Our previous study demonstrated that this bone showed sexual dimorphism in shape but not in size (12). We found no significant correlation when studying the interaction of age and sex with shape, but we found that the rate of male and female development differed.

Based on analysis of *pubis development* (changes in shape), we examined the relationship between age and the Procrustes residual. Our results showed a significant correlation ($p < 0.001$) between age and shape. Male and female development differed.

Based on analysis of *pubis growth* (changes in size), we examined the relationship between age and centroid size. We found a significant correlation ($p < 0.001$) between age and size. For both males and females, pubis size increased with age. We found no significant correlation when studying the interaction between age and sex with shape. For Rissech and Malgosa, there are sexual differences due to completion of growth in females (7).

In the second part of this study, we analyzed shape differences between sexes for each age group. We found a statistically significant difference between males and females in the 13-year-old age group. This does not contradict earlier results, as 13 years was found to be the age when secondary sex characteristics started to develop in females (41). But it is important to note that there were differences in shape as early as age group 1 year (mainly in the position of the obturator foramen point (FO)). Furthermore, Procrustes distances between mean male and female shapes in particular age groups indicated that the amount of difference between the sexes increased over time to generate adult shape dimorphism (Table 4). Procrustes values were greater in age group 9 than in age group 11, as study of the rate of development showed that female development accelerated at 9 years (Fig. 6).

Mean shape superimpositions between sexes for each age group showed that shape differences between sexes occurred gradually with age. Between 2 and 8 years, pubis shape was the same in both sexes. After 9 years, differences in shape principally appeared in three parts of the bone. First, differences were located at the anterior and posterior part of the pubis: Consequently, anterior and posterior elongation of female mean shape was visible. Second, differences were located at the superior part of the pubis: Consequently, pubis height (HP-IP) was greater in males. Finally, there were differences in the FO landmark which was more lateral and higher in females: Consequently, one pelvic diameter (FO-FO') was larger in females. It was interesting to note that this difference was related to childbearing. These shape differences increased gradually between 11 and 12 years and after 13 years. Our results do not contradict earlier results. On radiographic studies, both Coleman and Reynolds have stated that female pubis length was greater than that of males at all ages, while Rissech and Malgosa found that pubis length was definitive from 15 years (4,5,7). These differences are usually used in adult sex determination with classic morphometric methods (13).

Analysis of the pattern of growth and development (Figs 6 and 7) showed that the changes in shape and size with age were synchronous. Acceleration of shape change (development) and size change (growth) occurred at 9 years of age. Acceleration of change in size (growth spurt) and in shape (sexual maturation) was earlier in females. The ages of the growth spurt for the

pubis in our study agree with previous studies and correspond to the standard age intervals for pubertal growth spurt in the general population: 9.5–14.5 years of age in females and 10.5–17.5 in males (7,40).

Comparing these results with those of ontogenetic study of the ilium, we observed that ilium ontogeny differs from pubis ontogeny (12). The immature ilium does not present sexual size dimorphism. Sexual shape differences in the ilium are observed earlier than in the immature pubis, from the age of 1 year. These two bones, that merge to form the adult coxal bone, have different trajectories of shape and size. This work could not explain these differences: Is there hormonal influence?

In any event, the forensic scientist is faced with determining the sex of individual specimens and our results indicate that sex determination from the subadult pubis bone may be possible only after 13 years old. The precise age at which it could be performed is difficult to determine from this study; further investigation is necessary using a large sample. Determining age at death and identifying sex from skeletal remains are two major objectives in forensic identification. It is clear that our data show a correlation between the shape of the pubis bone and age. With further testing, this finding could lead to development of a practical means of forensic age estimation based on pubis morphology.

All our findings were in accordance with those of previous studies, but in addition, they provide new data on sexual dimorphism in immature populations aged 1–18 years. The immature pubis presents both sexual shape dimorphism and sexual size dimorphism. In ontogeny, pubis growth and pubis development are separate phenomena.

Acknowledgment

Sincere appreciation is expressed to Nina Crowte for her assistance in the preparation of this manuscript.

References

- Schulter-Ellis FP, Schmidt DJ, Hayek LA, Craig J. Determination of sex with a discriminant analysis of new pelvic bone measurements: Part I. *J Forensic Sci* 1983;28(1):169–80.
- Patriquin ML, Steyn M, Loth SR. Metric analysis of sex differences in South African black and white pelvis. *Forensic Sci Int* 2000;147(2–3):119–27.
- Novotny V. Sex determination of the pelvic bone: a system approach. *Anthropologie* 1986;24:197–206.
- Coleman WH. Sex differences in the growth of the human bony pelvis. *Am J Phys Anthropol* 1969;31(2):125–51.
- Reynolds E. The bony pelvic girdle in early infancy. A roentgenometric study. *Am J Phys Anthropol* 1945;3:321–54.
- Boucher BJ. Sex differences in the foetal pelvis. *Am J Phys Anthropol* 1957;15(4):581–600.
- Rissech C, Malgosa A. Pubis growth study: applicability in sexual and age diagnostic. *Forensic Sci Int* 2007;173(2–3):137–45.
- Tague RG. Variation in pelvic size between males and females in nonhuman anthropoids. *Am J Phys Anthropol* 1995;97(3):213–33.
- Bilfeld MF, Dedouit F, Rousseau H, Sans N, Braga J, Rougé D, et al. Human coxal bone sexual dimorphism and multislice computed tomography: geometric morphometric analysis of 65 adults. *J Forensic Sci* 2012;57(3):578–88.
- Bookstein F. *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 1991.
- Rohlf J, Slice D. Extensions of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks. *Syst Zool* 1990;39:40–59.
- Bilfeld MF, Dedouit F, Sans N, Rousseau H, Rougé D, Telmon N. Ontogeny of size and shape sexual dimorphism in the ilium: a multislice computed tomography study by geometric morphometry. *J Forensic Sci* 2013;58(2):303–8.

13. Genoves S. Estimation des différences sexuelles dans l'os coxal. Différences métriques et différences morphologiques. *Bull Mém Soc Anthropol Paris* 1959;10(1):3–95.
14. Martin R, Saller K. *Lehrbuch der Anthropologie in systematischer Darstellung: mit besonderer Berücksichtigung der anthropologischen Methoden*. Stuttgart: Fischer, 1957.
15. Corner B, Subhash L, Richtsmeier J. Measuring precision of three-dimensional landmark data. *J Quantitative Anthropol* 1992;3(4):347–59.
16. Singleton M. Patterns of cranial shape variation in the Papionini (Primates: Cercopitheciinae). *J Hum Evol* 2002;42(5):547–78.
17. von Cramon-Taubadel N, Frazier BC, Lahr MM. The problem of assessing landmark error in geometric morphometrics: theory, methods, and modifications. *Am J Phys Anthropol* 2007;134(1):24–35.
18. Braga J, Treil J. Estimation of pediatric skeletal age using geometric morphometrics and three-dimensional cranial size changes. *Int J Legal Med* 2007;121(6):439–43.
19. Klingenberg C. MorphoJ program [Internet]. Faculty of Life Sciences, University of Manchester, UK; http://www.flyings.org.uk/MorphoJ_page.htm (accessed April 20, 2014).
20. R Foundation for Statistical Computing. R Development Core Team. R: a language and environment for statistical computing. [Internet]. Vienna, Austria: ISBN 3-900051-07-0; 2008; <http://www.R-project.org> (accessed April 20, 2014).
21. Rohlf J. Morphometric spaces, shape components and the effects of linear transformations. *Advances in morphometrics*. Plenum, NY: Marcus LF, 1996;117–29.
22. Elewa A. *Morphometrics for nonmorphometricians*. Berlin, London: Springer, 2010.
23. Berge C, Penin X. Ontogenetic allometry, heterochrony, and interspecific differences in the skull of African apes, using tridimensional Procrustes analysis. *Am J Phys Anthropol* 2004;124(2):124–38.
24. Cobb SN, O'Higgins P. Hominins do not share a common postnatal facial ontogenetic shape trajectory. *J Exp Zool B Mol Dev Evol* 2004;15:302–21.
25. Mitteroecker P, Gunz P, Weber GW, Bookstein FL. Regional dissociated heterochrony in multivariate analysis. *Ann Anat* 2004;186(5–6):463–70.
26. Slice D. *Modern morphometrics in physical anthropology*. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2005.
27. Zelditch M, Swiderski D, Sheets D. *Geometric morphometrics for biologists*. New York, NY: Elsevier/Academic Press, 2004.
28. Johnson R, Wichern D. *Applied multivariate statistics*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.
29. Kaufman L, Rousseeuw P. *Finding groups in data. An introduction to cluster analysis*. New York, NY: John Wiley, 1990.
30. Goodall C. Procrustes methods in the statistical analysis of shape. *J R Stat Soc B* 1991;53(2):285–339.
31. Adams D, Funk D. Morphometric inferences on sibling species and sexual dimorphism in *Neochlamisus bebbianae* leaf beetle: multivariate applications of the thin-plate spline. *Syst Biol* 1997;46(1):180–94.
32. Zelditch M, Sheets D, Fink W. The ontogenetic dynamics of shape disparity. *Paleobiology* 2003;29:139–56.
33. Zelditch ML, Sheets HD, Fink WL. Spatiotemporal reorganization of growth rates in the evolution of ontogeny. *Evolution* 2000;54(4):1363–71.
34. Bookstein FL. Biometrics, biomathematics and the morphometric synthesis. *Bull Math Biol* 1996;58(2):313–65.
35. O'Higgins P, Jones N. Facial growth in *Cercocebus torquatus*: an application of three-dimensional geometric morphometric techniques to the study of morphological variation. *J Anat* 1998;193(Pt 2):251–72.
36. Oetlé AC, Pretorius E, Steyn M. Geometric morphometric analysis of the use of mandibular gonial eversion in sex determination. *Homo* 2009;60(1):29–43.
37. Scheuer L, Black S. *Developmental juvenile osteology*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier/Academic Press, 2000.
38. LaVelle M. Natural selection and developmental sexual variation in the human pelvis. *Am J Phys Anthropol* 1995;98(1):59–72.
39. Marchal F. Le dimorphisme sexuel de conformation de l'os coxal humain. Bases biologiques et nouvelles applications possibles. *Bull Mém Soc Anthropol Paris* 2003;15:7–24.
40. Tanner JM, Whitehouse RH, Marubini E, Resele LF. The adolescent growth spurt of boys and girls of the Harpenden growth study. *Ann Hum Biol* 1976;3(2):109–26.

Additional information and reprint requests:
 Marie Faruch Bilfeld, M.D., Ph.D.
 Service de Médecine Légale
 CHU Toulouse-Rangueil
 1 Avenue Professeur Jean Poulhès
 31059 Toulouse Cedex 9
 France
 E-mail: mariefaruch@hotmail.com

Title : Sexual dimorphism of immature coxal bone : a Multislice Computed Tomography study by geometric morphometrics

Abstract:

Recent developments in geometric morphometrics open new research ways in biological anthropology. Sex estimation is one of the most frequently encountered issues in forensic medicine. While in the case of adults, there are fewer studies conducted to determine immature coxal bone sex differences and the results are often contradictory. This study evaluates the degree of sexual dimorphism of immature coxal bone using geometric morphometrics. We studied sexually dimorphic differences in the coxal using geometric morphometric analysis of 17 osteometric landmarks recorded by multislice computed tomography (MSCT), based on 3D reconstructions of 400 children of mixed origins living in the area of Toulouse, southern France, and aged from birth to 18 years. We used geometric morphometrics methodology firstly to test sexual dimorphism in size (centroid size) and shape (Procrustes residuals), and secondly to examine patterns of shape change with age (development) and size change with age (growth). Trajectories of shape (development) and size (growth) differed throughout ontogeny and between sexes. Immature coxal bone sexual dimorphism is an age-dependent phenomenon both manifesting by size and/or shape differences.

Keywords : Coxal bone, Immature, Sexual Dimorphism, Geometric Morphometrics, Computed Tomography, Biological Anthropology.

Nom : **FARUCH BILFELD**

Prénom : **Marie**

Titre : **Etude du dimorphisme sexuel de l'os coxal immature en morphométrie géométrique par une analyse de 400 examens tomодensitométriques**

Toulouse, le 7 juillet 2015

Résumé :

Les récents développements de la morphométrie géométrique ouvrent de nouvelles voies de recherche en anthropologie, notamment dans le cadre de l'étude du dimorphisme sexuel. Les données de la littérature concernant le dimorphisme de l'os coxal immature sont moins nombreuses que chez les individus matures, et présentent surtout des conclusions discordantes. Cette étude évalue le dimorphisme sexuel de l'os coxal immature par géométrie morphométrique à partir d'une série de 400 examens tomодensitométriques, d'enfants de la naissance à l'âge de 18 ans. Cette méthode par l'extraction de la taille centroïde permet l'étude du dimorphisme sexuel de taille et par l'étude des résidus Procrustes l'étude du dimorphisme sexuel de conformation. Les variations de taille et de conformation ainsi identifiées, sont quantifiées, visualisées et discutées. Le dimorphisme sexuel de l'os coxal immature est un phénomène dépendant de l'âge, se manifestant à la fois par des différences de taille et/ou de conformation. .

Mots clés : Os Coxal, Immature, Dimorphisme Sexuel, Géométrie Morphométrique, Tomодensitométrie, Anthropologie.

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

ED BSB: Anthropologie

Laboratoire d'Anthropologie AMIS UMR 5288 CNRS

Directeur de thèses : Monsieur le Professeur Norbert TELMON
Monsieur le Docteur Fabrice DEDOUIT