HAL
open science

THE PELVIS, ARTICULAR INTERFACE BETWEEN VERTEBRAL COLUMN AND LOWER LIMBS. ANALYSIS BY THE SOFTWARE DE-VISU

Christine Tardieu, Jérome Hecquet, Anne Barrau, Philippe Loridon, Christophe Boulay, Jean Legaye, Robert Carlier, Catherine Marty, Geneviève Duval-Beaupière

To cite this version:

Christine Tardieu, Jérome Hecquet, Anne Barrau, Philippe Loridon, Christophe Boulay, et al.. THE PELVIS, ARTICULAR INTERFACE BETWEEN VERTEBRAL COLUMN AND LOWER LIMBS. ANALYSIS BY THE SOFTWARE DE-VISU. 2006. hal-00114997

HAL Id: hal-00114997

https://hal.science/hal-00114997

Preprint submitted on 20 Nov 2006

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

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

LE BASSIN, INTERFACE ARTICULAIRE ENTRE RACHIS ET MEMBRES INFERIEURS : ANALYSE PAR LE LOGICIEL DE-VISU.

THE PELVIS, ARTICULAR INTERFACE BETWEEN VERTEBRAL COLUMN AND LOWER LIMBS. ANALYSIS BY THE SOFTWARE DE-VISU.

Christine Tardieu[1], Jérôme Hecquet[1], Anne Barrau[1] , Philippe Loridon[2], Christophe Boulay[3], Jean Legaye[4], Robert Carlier[5], Catherine Marty[6], Geneviève Duval-Beaupère[7]

[1]FRE 2696 CNRS, « Adaptations et Evolution des Systèmes ostéomusculaires », M.N.H. N., 55 rue Buffon, 75 005 Paris. tardieu@mnhn.fr
[2]Praticien orthopédiste, podologue, Paris.
[3]Laboratoire d'Anatomie, UFR de Médecine Montpellier-Nîmes.
[4]Service d'Orthopédie, Cliniques Universitaires de Mont-Godinne, Louvain, Belgique.
[5]Service de Radiologie, Hôpital Raymond Poincaré, Garches.
[6]Service de Médecine Physique et Réadaptation, CHU Raymond Poincaré, Garches.
[7]Directrice Honoraire de l'Unité INSERM 215, Biomécanique rachidienne, CHU Raymond Poincaré, Garches

Mots clés : bassin, cotyles, rachis.
Key-words : pelvis, acetabula, vertebral column.

Résumé : L'analyse de 51 bassins humains adultes à l'aide du Logiciel DE-VISU conçu par J. Hecquet permet de décrire le bassin comme la pièce maîtresse du système articulaire reliant rachis, bassin et membres inférieurs. « L'angle d'incidence sacrée », paramètre pelvien sagittal, permet de prédire le degré des courbures vertébrales. Découvert radiologiquement, il est décrit dans toutes ses composantes morphologiques. Les paramètres de l'orientation tridimensionnelle des cotyles, qui établissent le lien entre bassin et axes mécaniques des membres inférieurs, sont calculés, révélant leurs fortes variations. Nous proposons un nouveau paramètre interarticulaire « l'angle d'incidence cotyloïde », complétant l'angle d'incidence sacrée.

Abstract : We analyzed 51 adult pelvis (25 women, 26 men) by the software DE-VISU conceived by one of us, J. Hecquet. It allows the description of the pelvis as the keystone of the articular system linking vertebral column, pelvis and lower limbs. The variations of the sagittal pelvic parameter, "angle of incidence" (mean 54°), are mainly responsible of individual variation in sagittal spine curves. The extreme values of incidence (32°-76°) correspond to pathological situations. This angle was discovered by radiological observations. We elucidated the morphological components of this angle : a high angle of incidence, associated with a strong lumbar curvature, is correlated to a strong sacral slope, a curved sacrum, a low position of the sacrum in relation to iliac crests. A low angle of incidence, associated with a weak lumbar curvature, is correlated to a weak sacral slope, a rectilinear sacrum, a high sacral position in relation to iliac crests.

The performances of the software DE-VISU gave results far superior to those we obtained by geometric morphometry. It benefits from previous studies and publications of the authors on rachis, pelvis and lower limb. Ability to represent each pelvic joint, particularly the two coxo-femoral joints, was crucial. Calculation of centers, radii, directional axes and covering arches of the acetabula allowed to quantify the parameters of their three-dimensional orientation. We put in light for the fist time these parameters. The angles of acetabular anteversion, inclination and covering arch revealed their high variations. These parameters establish the relationship between pelvis and mechanical axes of lower limbs through the femoral angles : angle of anteversion of the femoral neck, cervico-diaphyseal angle and bicondylar angle. DE-VISU introduced for the first time a "systemic analysis" of the pelvis : it is no longer considered as an isolated object but as a piece of an integrated articular system.

INTRODUCTION

De nombreuses analyses du bassin ont été pratiquées, plus particulièrement concernant ses fonctions locomotrices et obstétricales chez l'homme [37, 27, 43, 1-4, 8, 10, 11, 32], les hominidés fossiles [38, 31, 43-45, 9-11, 36, 5-7, 40, 22-26] et les primates non humains [30, 27, 43, 1-3, 8, 10, 11]. Ces études et d'autres travaux se sont attachés à reconnaître et décrire les caractères du dimorphisme sexuel affectant le bassin [42, 21, 14, 15, 16, 33]. Si quelques auteurs ont étudié également le rachis et essayé d'aborder les relations entre rachis et bassin [38, 4, 10, 23] aucune recherche anthropologique ou paléontologique n'est parvenue à mettre en évidence des relations entre bassin et courbures rachidiennes.

L'équilibre du tronc sur les membres inférieurs est une fonction essentielle dans le redressement et l'acquisition de la marche bipède. Le rôle du bassin est déterminant dans l'équilibre sagittal du rachis. Cette fonction est difficile à étudier en paléontologie car, pour être comprise, elle requiert des observations *in vivo* de la colonne vertébrale et du bassin que ne procurent ni les collections ostéologiques ni les fossiles. En revanche, ces observations sont familières pour les chirurgiens orthopédistes grâce aux images radiologiques. L'Equipe de G. Duval Beaupère est parvenue à mettre en évidence, dans le plan sagittal, un paramètre pelvien anatomique appelé «angle d' Incidence sacrée» qui est un descripteur clé des variations du degré des différentes courbures vertébrales. Ce paramètre pertinent chez l'homme a été mieux compris grâce à la comparaison de bassins humains et de bassins de singes qui présentent une morphologie très différente pour ce caractère précisément [46, 47].

L'équilibre statique de l'homme en position érigée est défini par l'alignement du corps le long de l'axe de gravité. En vue sagittale, l'ensemble bassin-rachis est organisé de telle sorte qu'il permet à cette ligne de gravité de se positionner en arrière des têtes fémorales et des vertèbres lombaires. Ainsi, le bras de levier de la force de pesanteur s'exerce postérieurement par rapport aux têtes fémorales. Le poids de l'ensemble tête-tronc-membres supérieurs est donc supporté par les deux premières vertèbres sacrées et transite par les lignes innominées pour reposer sur les têtes fémorales. De cette façon, l'équilibre sagittal du tronc en position debout est défini comme « économique », c'est-à-dire qu'il ne nécessite qu'un minimum d'effort musculaire et articulaire à son maintien. C'est un pré requis pour une marche normale et économique ; l'adaptation d'*Homo sapiens* à la bipédie est alors efficiente.

Cette recherche par l'organisme d'une « économie » du maintien postural a été démontrée expérimentalement pour la première fois par G. Duval-Beaupère & al. [19] grâce à la barycentrométrie et à l'électromyographie. Le barycentromètre permet de localiser *in vivo* le centre de la masse corporelle supportée par les têtes fémorales. Par une combinaison de logiciels conçus par J. Hecquet, utilisant un référentiel commun au barycentromètre et à un couple de radiographies frontale et sagittale, le poids du corps supporté par chaque étage du rachis et par les articulations de la hanche, a pu être calculé, ainsi que la situation anatomique de son point d'application [28].

G. Duval-Beaupère [19, 20] a montré, sur une série de 54 sujets normaux, que l'équilibre sagittal du tronc au-dessus des articulations des hanches dépend d'une chaîne de paramètres (Figures 1 A et 2).

- <u>paramètres rachidiens positionnels</u> (variables) : lordose lombaire et cyphose dorsale.
- <u>paramètres pelviens positionnels</u> (variables) :
  - pente sacrée (angle α fig. 1) : angle formé par l'horizontale avec le plateau sacré.
  - version pelvienne (angle β fig. 1) : angle entre la verticale et la ligne joignant le centre du plateau sacré, et le centre de l'axe bi-cotyloïdien.
- <u>paramètres pelviens morphologiques</u> (constants) : angle d'incidence et épaisseur, dont dépendent les paramètres positionnels précités

L'angle d'incidence rend compte de la position relative des deux têtes fémorales par rapport au centre du plateau supérieur de la première vertèbre sacrée. Il est formé par la perpendiculaire au plateau sacré en son centre et par l'épaisseur, droite joignant le centre du plateau sacré et le milieu de l'axe bi-cotyloïdien. L'équilibre du rachis ne dépend pas uniquement du degré des différentes

courbures vertébrales. Les variations de ce paramètre pelvien, indépendant de la position du sujet, conditionnent les variations individuelles des paramètres positionnels et des courbures rachidiennes sagittales qui assurent le caractère économique de l'équilibre rachis/pelvis [18, 34, 29].

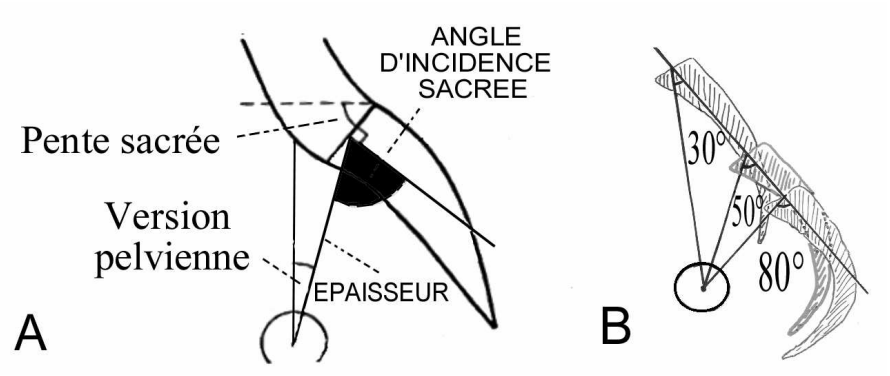

Figure 1 : A Les paramètres pelviens en vue de profil.
A The pelvic parameters in profile view

B : Modèle des relations inverses entre angle d'incidence et épaisseur dans l'évolution : Trois étapes suggérant le passage d'un bassin de type grand singe (incidence 30°) à deux bassins humains (incidence 51° et 80°), en vue de profil. La pente sacrée est présentée constante à dessein pour mieux souligner la diminution de l'épaisseur avec l'augmentation de l'angle d'incidence

B. Model of the opposite relationships between incidence and thickness. Three schematic steps from a great ape pelvis (incidence 30°) to human pelves (incidence 50° and 80°), in profile view. Sacral slope is kept constant to emphasize shortening of thickness with increasing incidence.

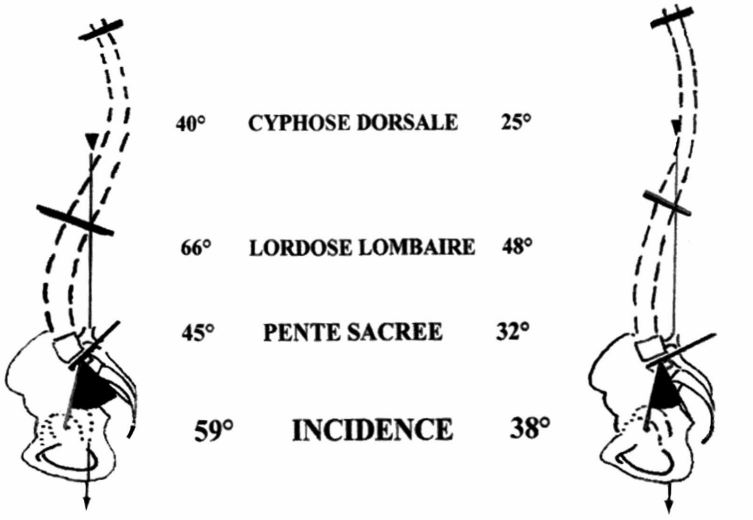

Figure 2 : Variations des paramètres pelviens et rachidiens corrélés avec l'angle d'incidence (angle grisé). A un fort angle d'incidence sont associées une forte cyphose, une forte lordose, une forte pente sacrée et une version pelvienne forte. A un faible angle d'incidence sont associées une faible cyphose, une faible lordose, une faible pente sacrée et une version pelvienne faible.

Variations of the pelvic and spinal parameters correlated with the angle of incidence (shaded angle). An important kyphosis, an important lordosis, an important sacral slope and an important pelvic tilt are correlated with an opened angle of incidence. A weak kyphosis, a weak lordosis, a weak sacral slope and a weak pelvic tilt are correlated with a closed angle of incidence.

Depuis sa découverte, l'utilisation clinique de l'angle d'incidence est capitale dans de nombreuses pathologies du rachis en particulier [17] : le spondylolisthésis (glissement, dans le plan sagittal, de la cinquième vertèbre lombaire sur le plateau sacré, ou de la quatrième vertèbre lombaire sur la cinquième), la spondylolyse (rupture de la base des apophyses transverses d'une vertèbre provoquée par le glissement de la vertèbre sus-jacente) et les myopathies. Il a été observé que les sujets à très faible incidence présentent une grande instabilité sagittale générant des contractions musculaires douloureuses des muscles spinaux. Chez les sujets à très forte incidence, certains développent précocement une spondylolyse, d'autres développent en vieillissant un spondylolisthésis à la jonction entre la 4ème et la 5ème vertèbre lombaire.

Cet angle, découvert par l'observation radiologique, a été validé anatomiquement par un travail antérieur [12]. Si on comprend bien une composante simple de cet angle, la pente du plateau sacré, qui faible diminue l'incidence et inversement (Figure 2), les autres composantes morphologiques de cet angle sont inexplorées à ce jour. Par ailleurs la forte différenciation sexuelle du bassin se répercute-t-elle sur l'angle d'incidence ?

L'angle d'incidence exprime de façon synthétique les rapports entre rachis et bassin. Quels sont les paramètres pelviens qui régissent les rapports entre bassin et axes mécaniques des membres inférieurs ? Ces paramètres ne peuvent être mis en évidence que si l'on parvient à quantifier l'orientation tridimensionnelle des cotyles par la mesure de leurs angles d'antéversion (Figure 4), d'inclinaison (Figure 5) et de couverture (visible sur la figure 5). En effet ces angles doivent se trouver en congruence avec le degré des différents angles fémoraux, angle d'antéversion du col fémoral, angle cervico-diaphysaire et angle d'obliquité du fémur. Ce travail nous a donc amenés à décrypter le fonctionnement du système articulaire pelvien en lien avec rachis et membres inférieurs.

MATERIEL

- 51 bassins humains adultes (26 hommes, 25 femmes) provenant de l'Hôpital Raymond Poincaré de Garches, des Collections d'Anatomie Comparée du Muséum National d'Histoire Naturelle, de la Faculté de Médecine de Paris, du laboratoire d'Anthropologie à Paris VI (Collection G. Olivier).
- 10 bassins simiesques provenant des Collections d'Anatomie Comparée
  - Grands singes : 1 *Pan troglodytes* mâle, 1 *Gorilla gorilla* mâle, 1 *Gorilla gorilla* femelle, 1 *Pongo pygmaeus* mâle, 1 *Hylobates lar* mâle
  - Cercopithécoïdes : 1 *Papio papio* mâle, 1 *Mandrillus sphinx* mâle, 1 *Macaca mulatta* mâle
  - Plathyrhiniens : 1 *Ateles belzebuth*, 1 *Alouatta seniculus*
- 2 bassins d'Hominidés fossiles:
  - *Australopithecus afarensis :* AL 288-1
  - *Australopithecus africanus :* STS 14

METHODES

1. Saisie des données :

- Les bassins simiens ont été radiographiés à l'Hôpital Raymond Poincaré de Garches : 2 vues frontale et sagittale ont permis de mesurer l'angle d'incidence sacrée et l'épaisseur, qui a été rapportée au diamètre des cotyles, pour fournir un paramètre adimensionnel.

- Les bassins fossiles ont été photographiés par M. Haüsler à Zurich en profil sagittal après matérialisation de la pente sacrée, ce qui a permis de mesurer l'angle d'incidence sacrée. La reconstitution du bassin AL 288-1 est celle de P. Schmidt [41].

- Les bassins humains font l'objet d'une analyse plus exhaustive. Ils ont été saisis grâce à un réseau de 47 points repères homologues. La liste des 47 points est présentée en annexe. Les points saisis hors cotyles sont des points anatomiques connus et aisés à identifier. Les 12 points cotyloïdiens ont été localisés de façon concertée afin de pouvoir reconstruire la portion de sphère qu'ils forment, soit pour chaque cotyle 4 points périphériques équidistants, 1 point à mi hauteur de l'arrière fond du cotyle et 1 point au centre de l'arrière fond du cotyle. Les coordonnées tridimensionnelles de chaque point sont mesurées par l'appareil 3 Draw de la société Polhemus. La précision sur la position d'un point est de 0,5mm.

2. Bassins humains : Construction des articulations pelviennes et calcul des paramètres biomécaniques.

Le logiciel DE-VISU construit les centres et les axes directionnels des articulations lombo-sacrées et coxo-fémorales. Cette construction, inaccessible à partir des seuls points saisis, nécessite le calcul des points virtuels nécessaires.

Articulation lombo-sacrée :

- Le plan du plateau sacré est défini comme le plan moyen des quatre points saisis. La normale est calculée à partir du barycentre de ces points et représente l'axe directionnel de l'articulation.
- Les six points saisis sur chaque cotyles permettent de calculer le centre de la sphère passant au mieux par ces six points (méthode des moindres carrés), l'axe bicotyloïdien, l'épaisseur et l'angle d'incidence.

Articulations coxo-fémorales :

Le fonctionnement des deux articulations est objectivé par le calcul du rayon et de l'arc couvrant de chaque cotyle et par la construction de leurs axes directionnels qui permettent de calculer les angles d'antéversion et d'inclinaison des cotyles.

Ensuite DE-VISU calcule les paramètres qui permettront de comparer les bassins :

- Angle d'écartement des poutres : angle formé par les 2 poutres reliant le centre du plateau sacré au centre de chaque cotyle.
- Angle d'évasement des flancs : angle formé par les deux segments droit et gauche reliant la base du V pubien et l'épine iliaque antéro-supérieure droite et gauche (vue frontale).
- Angle de proue : angle formé par l'épaisseur et la proue, segment reliant le milieu de la distance interacétabulaire et le milieu des deux points pubiens supérieurs (vue sagittale).
- Arc couvrant des cotyles : arc capable, proche de 180°, de la calotte sphérique du cotyle.
- Angle d'antéversion des cotyles : angle vu dans le plan horizontal, d'orientation de l'axe cotyloïdien par rapport au plan frontal (antéversion « anatomique » (Murray, 1992)).
- Angle d'inclinaison des cotyles : inclinaison du sourcil cotyloïdien sur la verticale ou de l'axe cotyloïdien sur l'horizontale (vue frontale). ATTENTION, non projeté dans le plan frontal)
- Angle d'incidence cotyloïde : angle formé par l'épaisseur et la bissectrice des deux axes des cotyles (vue sagittale).

Les 3 derniers angles dépendent de la position de référence adoptée pour le bassin.

3. Bassins humains : Traitements des données

Cette recherche s'effectuant dans une perspective clinique impose un référentiel tridimensionnel commun pour les bassins qui soit proche de la position de fonction *in vivo*. Le logiciel « DE VISU » recentre et réoriente tous les bassins qui sont verticalisés en alignant dans le

même plan vertical les deux épines iliaques antéro-supérieures et le milieu des deux points pubiens supérieurs. Cette orientation est proche de la position érigée. De plus si cette position du bassin est basculée postérieurement de 90°, elle devient très proche de la position couchée dite « position de chirurgie».

Le logiciel « DE VISU » permet d'utiliser deux référentiels de taille : taille réelle et taille centroïde. La morphométrie géométrique utilise ce même concept de taille centroïde [38]. Le barycentre géométrique de chaque bassin est calculé à partir des 47 points saisis. Le rayon de la sphère centroïde est égal à la racine carrée de la moyenne des carrés des distances à ce barycentre. Après superposition des barycentres, les points subissent translation et rotation conformément au référentiel de position adopté. Les variations de forme liées à la taille étant ainsi éliminées, les différences observées entre les bassins ne sont désormais que des différences de conformation.

DE-VISU peut faire une synthèse récapitulative de tous les bassins sous forme d'un unique bassin moyen appelé « bassin global ». La disparité entre bassins est prise en compte par la possibilité de faire varier de son minimum à son maximum l'un des paramètres au choix, grâce à une nouvelle technique statistique intégrée appelée « modelage par pilote ». Comme la forme du « bassin global » change à vue lors du modelage par le « pilote » choisi, tous les autres paramètres en sont plus ou moins influencés, et leurs valeurs sont systématiquement réactualisées en temps réel. On peut ainsi visualiser les déformations subies par chaque partie du bassin suivant la variation de chaque paramètre choisi comme « pilote », angulaire ou linéaire.

La technique mathématique d'asservissement de chaque point du « bassin global » au pilote choisi consiste à calculer sur l'échantillon les moyennes et écarts types de tous les paramètres et leurs corrélations avec chacune des 3 coordonnées des 47 points saisis. Les moyennes et écart types des coordonnées de chaque point saisi sur les 51 bassins sont calculés également. Ces corrélations, moyennes et écarts types sont ensuite combinés pour obtenir les équations prédictives des coordonnées de chaque point en fonction du paramètre adopté comme pilote. Une fois obtenues les 3 coordonnées des 47 points prédits, le bassin correspondant est reconstruit comme si on venait de saisir ces points et les valeurs de ses paramètres sont recalculées.

RESULTATS

1. QUANTIFICATION DES PARAMETRES ETUDIES. CORRELATIONS

Le tableau 1 montre que les variations angulaires les plus fortes concernent l'angle sous pubien (55°), l'arc couvrant des cotyles (50°), l'angle d'incidence sacrée (44°) (FIG 3). Les paramètres de l'orientation tridimensionnelles des cotyles révèlent des amplitudes de variation fortes : angle d'antéversion des cotyles (36°) (FIG. 4), angle d'inclinaison des cotyles (20°) (FIG 5°. L'angle d'incidence cotyloïde est un paramètre nouveau consécutif à cette analyse.

PARAMETRES	MOYENNE	ECART-TYPE	AMPLITUDE MAXIMALE
Angle d'incidence sacrée	54, 5°	11,9°	44°
Angle sous-pubien	74,4°	12,1°	55°
Angle d'écartement des poutres	41,2°	2,8°	10°
Arc couvrant	179,5°	13,2°	50°
Angle d'Evasement	24,9°	4,2°	15°
Angle d'antéversion cotyloïde	20°	7,9°	36°
Angle d'inclinaison cotyloïde	33,5°	4,9°	20°
Angle de proue	118,6°	10,6°	33°
Angle d'incidence cotyloïde	14,9°	6,9°	28°

Tableau 1 : Moyenne, écart-type, amplitude maximale des paramètres étudiés chez l'homme.
Table 1 : Mean, standard deviation and maximal amplitude of the studied parameters.

Dans le tableau 2, le seuil de signification des corrélation retenues pour les 50 bassins est situé à $r = 0.354$ ($P = 0.01$) et au plus bas à $r = 0.273$ ($P = 0.05$). Une corrélation nouvelle très forte apparaît entre l'angle d'évasement des flancs et l'angle d'inclinaison des cotyles ($r = 0.67$). La corrélation est significative mais plus faible avec l'angle d'antéversion des cotyles ($r = -0.46$). Elle est à la limite du seuil de signification avec l'angle d'incidence sacrée ($r = 0.34$).

CORRELATIONS ENTRE PARAMETRES		*r*	*P*
Angle sous pubien	Angle de proue	0,7	*P* = 0,0001
Angle d'Evasement	Angle d'Inclinaison cot.	0,67	*P* = 0,0001
Angle sous pubien	Angle d'Antéversion cot.	0,64	*P* = 0.0003
Angle d'Antéversion cot.	Angle d'Incidence cot.	0,64	*P* = 0,0001
Angle sous pubien	Angle d'Evasement	-0,56	*P* = 0,0001
Angle d'Ecartement	Angle d'Incidence sacrée	0,5	*P* = 0.0001
Angle d'Evasement	Angle d'Antéversion cot.	-0,46	*P* = 0.0003
Angle d'Inclinaison cot.	Angle d'Incidence cot.	-0,36	*P* = 0.0045
Angle d'Inclinaison cot.	Angle d'Incidence sacrée	0,35	*P* = 0.005
Angle d'Evasement	Angle d'Incidence sacrée	0,34	*P* = 0.008
Angle d'Incidence sacrée	Angle d'Incidence cot.	-0,33	*P* = 0.009
Angle d'Inclinaison cot.	Arc couvrant	0,32	*P* = 0.01
Angle d'Inclinaison cot.	Angle d'Antéversion cot.	-0,29	*P* = 0.02

Tableau 2 : Corrélations simples décroissantes entre les paramètres chez l'homme.

Table 2 : Simple decreasing correlations between parameters in humans.

2. ANALYSE DE L'ANGLE D'INCIDENCE SACREE

2.1 Les composants morphologiques de l'angle d'incidence sacrée chez l'homme

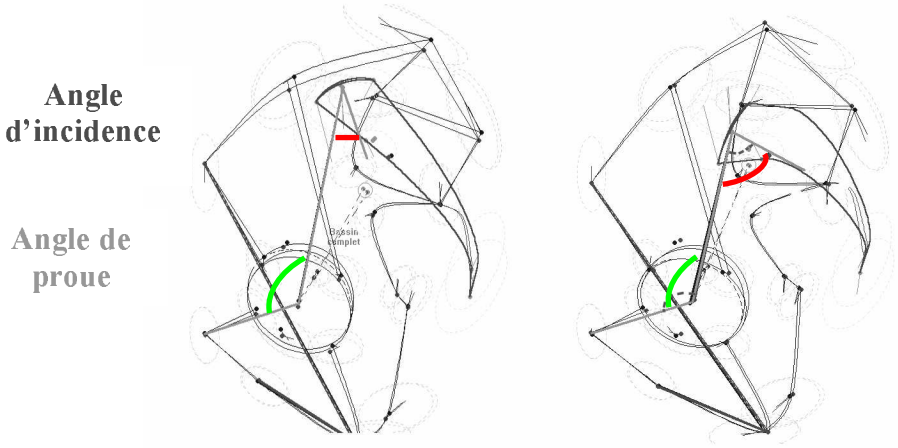

Figure 3 : Paramètre angle d'incidence sacrée (en rouge) choisi comme pilote du modelage du bassin. Il est porté de son minimum à son maximum, en vue sagittale. Les trajectoires suivies par chaque point au cours de ce pilotage sont indiquées.
L'angle de proue (en vert) est matérialisé également.
Minimum and maximum of the angle of sacral incidence (in red colour), selected as "pilot" of pelvis shape change, in sagittal view. The angle of prow (in green colour) is also represented. The trajectories of each "piloted" point are indicated.

2.1.1 Rôle de l'angle d'incidence sacrée :

La visualisation des variations minimale (32°) et maximale (76°) du paramètre « pilote » angle d'incidence sacrée (Figure 3) montre :

a) L'absence de dimorphisme sexuel sur ce paramètre.
b) Le rôle évident de la pente sacrée c'est-à-dire de l'inclinaison du plateau sacré par rapport à l'horizontale : On observe clairement qu'un angle d'incidence élevé est associé à une pente sacrée très forte. A l'inverse, une faible incidence est associée à une pente sacrée presque horizontale.
c) Le rôle prééminent de la position inféro-supérieure du plateau sacré par rapport aux crêtes iliaques : On observe clairement qu'un angle d'incidence élevé est associé à une position très basse du plateau sacré par rapport aux crêtes iliaques. A l'inverse, une faible incidence est associée à une position très haute du plateau sacré par rapport aux crêtes iliaques
d) Le rôle déterminant de la forme coudée ou rectiligne du sacrum : On observe clairement qu'un angle d'incidence élevé est associé à un sacrum très incurvé. A l'inverse, une faible incidence est associée à un sacrum presque rectiligne. La contribution du sacrum dans les variations de l'angle d'incidence sacrée est mieux comprise : l'augmentation de l'angle d'incidence est liée à l'enfoncement du sacrum par rapport aux ailes iliaques et à la coudure du sacrum. A l'inverse sa diminution est liée à l'ascension du sacrum par rapport aux ailes iliaques et à une forme rectiligne du sacrum.

2.1.2 Rôle du paramètre épaisseur. Différences avec le rôle de l'angle d'incidence :

On observe que l'épaisseur est toujours corrélée négativement avec l'angle d'incidence (Figure 3). La diminution de l'épaisseur s'accompagne toujours d'une augmentation de l'angle d'écartement des poutres (Figure 4). Même si les deux paramètres, épaisseur et incidence, exercent sur le bassin une action globalement assez proche, certaines différences sont importantes à souligner. La diminution de l'épaisseur entraîne une forte augmentation de l'angle d'écartement des

poutres (r = -0,92), tandis que l'augmentation de l'incidence n'entraîne qu'une faible augmentation de cet angle (r = 0.5). Enfin l'angle d'incidence fait varier la pente sacrée et coude le sacrum plus que ne le fait l'épaisseur. Ainsi l'angle d'incidence affecte surtout le sacrum, en vue sagittale, à travers la pente sacrée et la forme incurvée ou rectiligne du sacrum tandis que l'épaisseur affecte le reste du bassin, en vue frontale, à travers l'angle d'écartement des poutres.

Les corrélations entre l'angle d'incidence sacrée et l'orientation tridimensionnelle des cotyles sont faibles : angle d'inclinaison des cotyles (r = 0.35), angle d'incidence cotyloïde (r = -0.33).

2.2 Comparaison de l'angle d'incidence sacrée et de l'épaisseur chez l'homme, les singes et les Australopithèques (tableau 3) :

Les valeurs de l'angle d'incidence sacrée obtenues chez les différents singes étudiés (voir matériel), calculées sur clichés radiologiques, peuvent être légitimement comparées aux valeurs humaines puisque la concordance entre valeurs radiologiques et valeurs anatomiques a été établie par un travail antérieur [13]. Elles sont situées dans la variation la plus basse de l'amplitude observée chez l'homme et parfois en dehors de cette variation. A l'inverse les valeurs de l'épaisseur sont beaucoup plus élevées que les valeurs humaines. Pour les caractères que nous venons de décrire chez l'homme, la morphologie simienne présente une polarité très nette par rapport à la morphologie humaine : pente sacrée faible, forme presque rectiligne du sacrum et position haute du plateau sacré par rapport aux ailes iliaques.

Les valeurs de l'angle d'incidence sacrée sur les bassins des premiers australopithèques se situent dans la variation humaine, mais dans les valeurs basses (AL 288-1 *Australopithecus afarensis* : 43° à 48° ; Sts 14 *Australopithecus africanus* : 47° à 54°).

	Angle d' Incidence sacrée	Epaisseur/Diamètre cotyle
Chimpanzé	32°	4
Gorille mâle	36°	3,1
Gorille femelle	35°	2,8
Orang-outan	39.5°	3,5
Gibbon	32°	3,4
Papio	38°	3,2
Mandril	32°	3,5
Macaque	23°	
Atèle	29°	3,3
Alouatte	16°	3,9
STS 14	47° => 54°	
AL 288-1	43° => 48°	
Hommes : Moyenne	54,5°	1,7
Extrêmes	32° => 76°	1,3 => 2

Tableau 3 : Angle d'incidence sacrée chez les différents singes et les fossiles hominidés examinés
Epaisseur, ramenée au diamètre des cotyles, chez les différents singes et les hommes.
Table 3 : Angle of sacral incidence in sampled monkeys, great apes and fossil hominids.
Thickness, related to diameter of cotyles, in monkeys, great apes and men.

2. LES NOUVEAUX CARACTERES DU DIMORPHISME SEXUEL PELVIEN:

PARAMETRES	MOYENNE	ECART-TYPE		MOYENNE	ÉCART-TYPE
	26 FEMMES			25 HOMMES	
Angle sous-pubien	82,5°	9,5°	S	66,6°	8,7°
Angle d' Évasement des poutres	23,8°	3,8°	S	26°	4,3°
Angle d' Antéversion cotyloïde	21,9°	9°	S	18,1°	6,2°
Angle d' Inclinaison cotyloïde	33,1°	4,8°	NS	33,9°	5,2°
Angle de proue	122,4°	10,7°	S	115°	9,4°
Angle d' Incidence cotyloïde 3D	15,5°	7,9°	NS	14,4°	5,8°

Tableau 4 : Moyenne et écart-type des paramètres angulaires comparés entre hommes et femmes. La colonne centrale indique si la différence est significative (S) ou non significative (NS) entre les deux sexes.
Table 4 : Mean and standard deviation of the compared angular parameters in men and women. The central column indicates whether the difference is significant (S) or not significant (NS) between the two sexes.

Le tableau 4 montre que le dimorphisme sexuel concerne l'angle sous-pubien, l'angle de proue, l'angle d'antéversion des cotyles et l'angle d'évasement,. Le tableau 2 confirme ces résultats en révélant que l'angle sous pubien est très fortement corrélé avec l'angle de proue (r = 0.7), l'angle d'antéversion des cotyles (r = 0.64) et l'angle d'évasement des flancs (r = - 0.56).

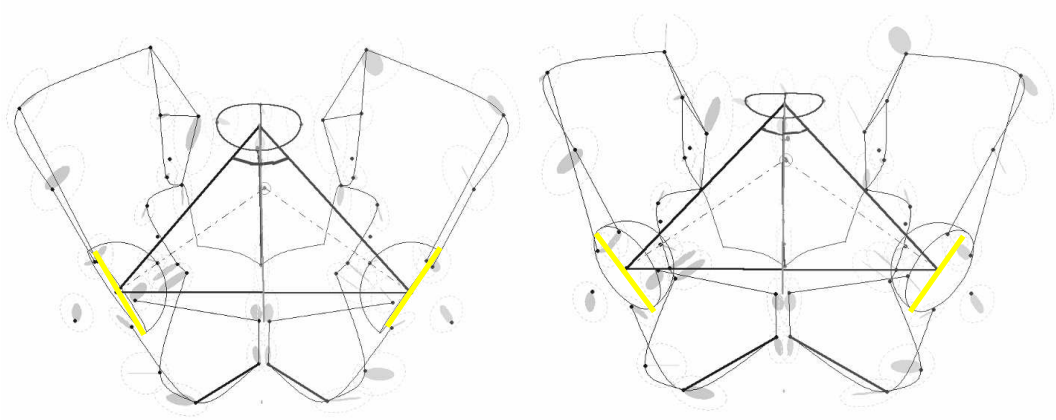

Figure 4 : Paramètre angle d'antéversion des cotyles choisi comme pilote du modelage du bassin. Il est porté de son minimum à son maximum, en vue frontale. Il se reflète dans l'ouverture minimale ou maximale du cotyle vers l'avant, autour de son diamètre matérialisé en jaune. L'angle d'écartement des poutres est matérialisé également en rouge.

Minimum and maximum of the angle of anteversion of the acetabula, selected as "pilot" of pelvis shape change, in frontal view. It is reflected in the minimal or maximal opening of the two cotyles forwards, around their diameters in yellow colour. The angle of divergence of the beams is also represented in red colour.

Dans le plan sagittal, « l'angle de proue » (figure 3), totalement nouveau, est plus ouvert chez la femme et plus fermé chez l'homme. L'angle d'antéversion des cotyles (figure 4) est plus élevé en moyenne chez la femme (21.9°) que chez l'homme (18.1°). L'angle d'évasement des flancs est plus élevé en moyenne chez l'homme (26°) que chez la femme (23.8°).

Aucun dimorphisme sexuel n'est observé ni sur l'angle d'incidence, ni sur la pente sacrée, ni sur le profil du sacrum coudé identiquement.

DISCUSSION

1. INTERET DE L'ANGLE D'INCIDENCE SACREE EN TERMES D'ANATOMIE COMPAREE ET D'EVOLUTION

Un résultat très intéressant est le complexe structural que nous avons pu mettre en évidence montrant l'association obligatoire et opposée des caractères suivants :

1.1. L'association d'un angle d'incidence réduit, d'une pente sacrée faible, d'une grande épaisseur et d'un faible enfoncement du sacrum (Figure 3, bassin gauche), ce qui correspond à une courbure lombaire faible.

L'ensemble liant chez l'homme faible incidence et faible enfoncement du sacrum présente un grand intérêt fonctionnel et clinique. L'instabilité rachidienne liée à une faible incidence est mieux comprise : la dernière vertèbre lombaire ne se trouve plus « couverte » par les crêtes iliaques qui ne se situent plus désormais au niveau normal, légèrement supérieur à la jonction entre quatrième et cinquième vertèbre lombaire. Cette disposition entraîne une orientation non plus oblique mais horizontale des ligaments ilio-lombaires. Ils ne peuvent donc plus jouer efficacement leur rôle de haubans de la base de la colonne lombaire, ce qui contribue à la précarité de l'équilibre rachidien.

Cet ensemble de caractères présente un grand intérêt dans la comparaison fonctionnelle de l'homme et des grands singes. En effet chez ces derniers, on observe cette même association mais portée à un degré beaucoup plus élevé : l'angle d'incidence est très faible, l'épaisseur est très forte (Figure 1 B), l'ancrage du sacrum est élevé par rapport aux ailes iliaques et la courbure lombaire est absente ou faible.

Le caractère « grande épaisseur » conforte la morphologie déjà décrite du bassin des grands singes dit « en tension » [10] dont la caractéristique remarquable est la forte distance séparant articulations sacroiliaques et coxofémorales. Cette distance interarticulaire s'est trouvée raccourcie sur le bassin humain dit « en pression » ce qui minimise les efforts de cisaillement sur cet espace pelvien dans la position redressée et bipède. La conjonction d'une grande épaisseur et d'une petite incidence complète la caractérisation du bassin simien dit « en tension » : le positionnement des articulations coxofémorales, en vue sagittale, est très proche du plateau sacré, i. e. presque aligné sur le plateau sacré, ce qui est possible sans entraîner d'instabilité rachidienne, puisque la position érigée du tronc n'est qu'occasionnelle. C'est la permanence de la position redressée et bipède qui a entraîné, dans la lignée des hominidés, une augmentation de l'incidence, de la lordose lombaire et des autres courbures rachidiennes qui lui sont associées. Le rôle premier ici attribué au comportement bipède, initiateur des changements morphologiques, est fortement suggéré par l'augmentation de l'incidence et de la courbure lombaire chez le jeune enfant au cours de l'apprentissage de la marche [18] et chez des macaques japonais entraînés à la bipédie dès leur plus jeune âge [35].

1.2. A l'inverse l'association d'un angle d'incidence élevé, d'une pente sacrée forte et d'une épaisseur faible correspond à une courbure lombaire forte (Figure 3, bassin droit). Cet ensemble de caractères constitue la morphologie dérivée humaine.

L'incidence présente ainsi un intérêt évolutif évident. Les valeurs de l'incidence sur les bassins des premiers australopithèques se situent dans les valeurs basses de la variation humaine. La morphologie comparée de ces premiers hominidés et des grands singes suggère qu'au cours de l'évolution cet angle aurait augmenté en même temps que l'épaisseur diminuait, initiant la corrélation négative que l'on observe chez l'homme entre ces deux paramètres. La figure 1B montre comment, à pente sacrée constante, l'angle d'incidence sacrée a progressivement augmenté en même temps que l'épaisseur diminuait par un positionnement de plus en plus reculé du plateau sacré par rapport aux articulations coxo-fémorales.

2. MISE EN EVIDENCE DES PARAMETRES DE L'ORIENTATION TRI-DIMENSIONNELLES DES COTYLES

Les paramètres de l'orientation tridimensionnelle des cotyles sont mesurés ici pour la première fois. Leur forte variation était insoupçonnée. Nous pensons qu'elle est associée aux variations des axes mécaniques des membres inférieurs, à travers l'angle d'antéversion du col fémoral, l'angle cervico-diaphysaire et l'angle bicondylaire du fémur.

L'angle d'antéversion des cotyles (Figure 4), dont l'amplitude est plus forte (36°) que celle de l'inclinaison (20°), est étroitement lié au dimorphisme sexuel pelvien : forte antéversion chez la femme, forte latéroversion chez l'homme. L'arc couvrant, dont la variation de 50° est la plus forte, doit être associé au degré de sphéricité de la tête fémorale. Il est lié à l'inclinaison cotyloïde par une faible corrélation (r = 0.32) : une forte couverture étant associée à une forte inclinaison.

L'angle d'inclinaison des cotyles (Figure 5) n'est que très faiblement corrélé à l'angle d'antéversion (r = -0.29). La corrélation nouvelle très forte entre l'inclinaison et l'angle d'évasement des flancs (r = 0.67) est très instructive : l'inclinaison des cotyles accompagne l'inclinaison des flancs droit et gauche du bassin tandis que leur redressement accompagne le redressement des flancs. Ces deux paramètres permettent d'établir un lien entre orientation tridimensionnelle des cotyles et morphologie globale du bassin puisque l'angle d'évasement des flancs joint des points pubiens et des points iliaques fortement distants.

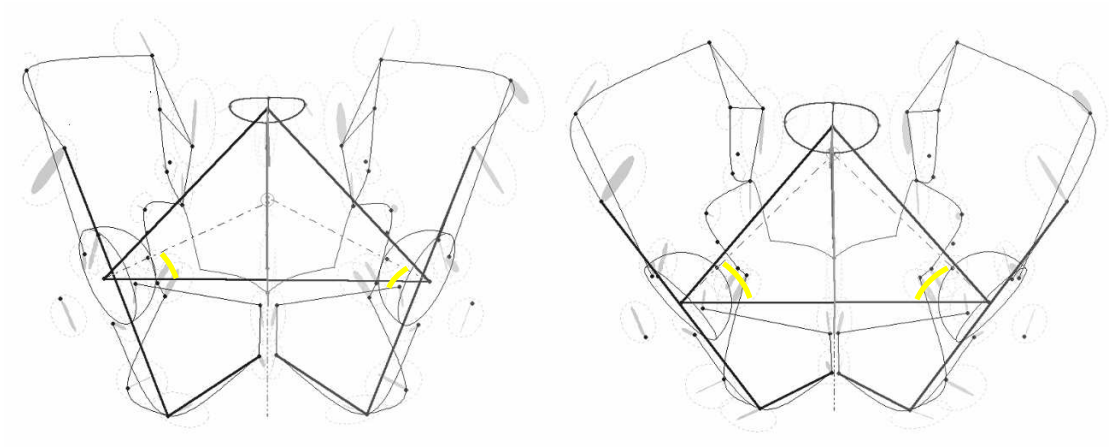

Figure 5 : Paramètre angle d'inclinaison des cotyles (en jaune) choisi comme pilote du modelage du bassin. Il est porté de son minimum à son maximum, en vue frontale. On note que, faible, l'inclinaison est associée à un angle de couverture des cotyles faible. Forte, elle est associée à un angle de couverture forte. L'angle d'évasement des flancs est matérialisé également en traits pleins.

Minimum and maximum of the angle of inclination of the acetabula, selected as "pilot" of pelvis shape change, in frontal view (yellow colour). Notice that minimal inclination is associated with a weak value of the covering arch of the cotyles and maximal inclination with a higher value of covering arch. The angle of flaring is also represented in full lines.

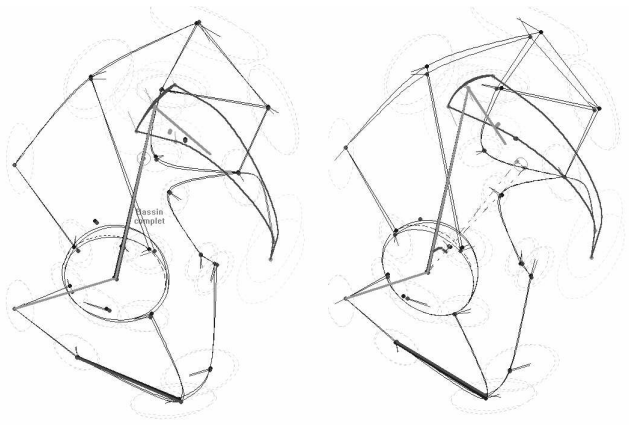

Figure 6 : Paramètre angle d'incidence cotyloïde (en rouge) en vue sagittale, choisi comme pilote du modelage du bassin. Il est formé de l'épaisseur (en vert) et de la bissectrice des 2 axes cotyloïdes (en pointillés). Il est porté de son minimum (angle nul) à son maximum,.

Minimum and maximum of the angle of cotyloïd incidence (in red colour), selected as "pilot" of pelvis shape change, in sagittal view. The two sides of this angle are the thickness (in green colour) and the bisector of cotyloïd axes (dotted lines).

L'angle d'incidence cotyloïde (Figure 6) complète mécaniquement l'angle d'incidence sacrée. Il rend compte simultanément du degré d'antéversion des cotyles (r = 0.64), plus faiblement du degré d'inclinaison des cotyles (r = 0.36) et de la position antéropostérieure du plateau sacré par rapport aux cotyles. Il varie à l'inverse de l'angle d'incidence sacrée (r = -0.33). Ces deux paramètres pelviens forment une synthèse articulaire du bassin dans la mesure où l'incidence sacrée représente le paramètre de liaison entre rachis et bassin et que l'incidence cotyloïde représente le paramètre de liaison entre bassin et membres inférieurs, avec un paramètre segmentaire commun, l'épaisseur.

3. PERTINENCE DES NOUVEAUX PARAMETRES DU DIMORPHISME SEXUEL

Certaines différences sexuelles observées correspondent bien à celles que l'on connaissait déjà : angle sous pubien ouvert chez la femme, fermé chez l'homme, détroit supérieur pelvien large et profond chez la femme, étroit et peu profond chez l'homme. La présence des centres articulaires permet de proposer « l'angle de proue » comme nouveau paramètre sexuel discriminant : cet angle est ouvert chez la femme et fermé chez l'homme. Il permet d'apprécier le dimorphisme sexuel en vue sagittale alors que l'angle sous pubien ne le révèle qu'en vue frontale.

Par ailleurs l'ouverture de l'angle sous-pubien s'accompagne toujours d'une antéversion forte des cotyle. Enfin l'angle d'évasement des flancs, toujours plus ouvert chez l'homme, s'accompagne d'une plus forte inclinaison des cotyles. Le dimorphisme sexuel pelvien prend désormais en compte pour la première fois les paramètres de l'orientation tridimensionnelle des cotyles.

CONCLUSION

Ce travail souligne la corrélation de la morphologie du bassin avec le degré des courbures vertébrales sagittales à travers un paramètre anatomique pelvien, l'angle d'incidence sacrée. Nous avons analysé la variabilité de la forme du bassin en fonction de cet angle, descripteur-clé des relations rachis-bassin. Dans la variation de l'incidence, les résultats confirment la contribution du degré d'inclinaison de la pente sacrée. Ils mettent en évidence la contribution de la forme plus ou

moins incurvée du sacrum en vue sagittale et de son degré d'enfoncement entre les deux ailes iliaques. Cette grande variabilité des relations spatiales entre plateau sacré et crêtes iliaques est une observation nouvelle et cruciale.

La morphologie comparée des premiers hominidés et des grands singes suggère qu'au cours de l'évolution cet angle aurait augmenté en même temps que l'épaisseur diminuait, initiant la corrélation négative que l'on observe chez l'homme entre ces deux paramètres. Bien que les variations de ces deux paramètres affectent de façon très proche la forme pelvienne, nous avons pu discriminer leur signification respective. L'angle d'incidence affecte, en vue sagittale surtout, la pente sacrée et la forme incurvée ou rectiligne du sacrum tandis que l'épaisseur affecte, en vue frontale surtout, le reste du bassin à travers les variations de l'angle d'écartement des poutres.

L'angle d'incidence est un paramètre ignoré en paléontologie humaine, il permettra, à l'aide des fossiles vertébraux et pelviens associés, de préciser nos connaissances sur l'équilibre du rachis sur le bassin chez les Australopithèques et de mieux comprendre comment le bassin a contribué à la fonction d'équilibration du tronc sur les membres inférieurs au cours de l'évolution des hominidés.

Le calcul du centre des cotyles du bassin, de leur rayon de leur arc couvrant et de leurs axes directionnels grâce au logiciel DE-VISU est le point de départ d'une cascade de résultats nouveaux. Ces résultats présentent un double intérêt, du point de vue fondamental et appliqué. En effet la détermination des axes des cotyles chez les primates non humains et les hominidés fossiles ouvrira des perspectives nouvelles : l'orientation tridimensionnelle sûrement différente de leurs cotyles permettra de mieux comprendre comment elle est associée à celle des axes des membres inférieurs. D'autre part chez l'homme, les cliniciens orthopédistes, travaillant sur le bassin dans un but thérapeutique, recherchent depuis une dizaine d'années à obtenir *in vivo* l'orientation tridimensionnelle des cotyles. Ces résultats *in vitro* sont un premier pas vers une amélioration des poses de prothèses de hanches, mais aussi de toutes les opérations sur le bassin modifiant inopinément les angles d'antéversion et d'inclinaison des cotyles.

Le diagnostic du dimorphisme sexuel pelvien s'enrichit de nouveaux paramètres : angle de proue plus ouvert chez la femme, antéversion cotyloïde plus féminine et inclinaison cotyloïde et évasement plus masculins.

Si l'angle d'incidence sacrée met en évidence la relation qui lie rachis et bassin, l'angle d'incidence cotyloïde met en évidence une relation ignorée qui lie bassin et membres inférieurs. La conjonction de ces deux paramètres permet d'opérer une synthèse du fonctionnement articulaire du bassin, clé de voûte du système reliant rachis, bassin et membres inférieurs. Cette analyse permet de décrire le bassin non plus comme un objet anatomique isolé mais comme un maillon d'une chaîne articulaire proximo-distale, restaurant son fonctionnement dans une chaîne articulaire complexe, voie de transmission des forces de pesanteur transitant du tronc aux membres inférieurs.

Remerciements

Nous sommes très reconnaissants à M. Haüsler et P. Schmidt de l'Institut de Primatologie de Zürich pour les mesures qu'ils ont bien voulu effectuer sur les bassins fossiles en suivant nos instructions. Nous remercions le Pr. Valleron du Service de Radiologie de l'Hôpital Raymond Poincaré de Garches pour les radiographies des bassins simiens.

ANNEXE :

Description des 47 points sélectionnés

1. Point antéro-supérieur droit de la symphyse pubienne
2. Point le plus antérieur du sourcil cotyloïdien droit
3. Point du sourcil cotyloïdien droit situé en regard de la jonction de la branche horizontale du pubis et de la prolongation antéro-inférieure de la crête iliaque
4. Epine iliaque antéro-supérieure droite
5. Sommet du pilier iliaque droit
6. Point de la concavité postérieure maximale de la crête iliaque droite

7. Epine iliaque postéro-supérieure droite
8. Point le plus postérieur de la branche inférieure de la surface auriculaire droite
   = Point supérieur de l'échancrure sciatique droite
9. Point le plus profond de l'échancrure sciatique droite
10. Limite inférieure de l'échancrure sciatique droite
11. Epine sciatique droite
12. Point le plus postéro-inférieur de la tubérosité ischiatique droite
13. Point le plus bas de la tubérosité ischiatique droite
14. Point inférieur droit de la symphyse pubienne
15. Point inférieur gauche de la symphyse pubienne
16. Point le plus bas de la tubérosité ischiatique gauche
17. Point le plus postéro-inférieur de la tubérosité ischiatique gauche
18. Epine sciatique gauche
19. Limite inférieure de l'échancrure sciatique gauche
20. Point le plus profond de l'échancrure sciatique gauche
21. Point le plus postérieur de la branche inférieure de la surface auriculaire gauche
    = Point supérieur de l'échancrure sciatique gauche
22. Epine iliaque postéro-supérieure gauche
23. Point de la concavité postérieure maximale de la crête iliaque gauche
24. Sommet du pilier iliaque gauche
25. Epine iliaque antéro-supérieure gauche
26. Point du sourcil cotyloïdien gauche situé en regard de la jonction de la branche horizontale du pubis et de la prolongation antéro inférieure de la crête iliaque
27. Point le plus antérieur du sourcil cotyloïdien gauche
28. Point antéro-supérieur gauche de la symphyse pubienne
29. Point le plus postérieur de la branche supérieure de la surface auriculaire droite
30. Scalénion droit
31. Milieu du bord inférieur de la dernière vertèbre sacrée
32. Scalénion gauche
33. Point le plus postérieur de la branche supérieure de la surface auriculaire gauche
34. Milieu du bord latéral gauche du plateau supérieur de S1
35. Milieu du bord postérieur du plateau sup. de S1
36. Milieu du bord latéral droit du plateau supérieur de S1
37. Milieu du promontoire
38. Milieu de la jonction antérieure de S1-S2
39. Milieu du bord supéro-antérieur de la dernière vertèbre sacrée
40. Point le plus postérieur du sourcil cotyloïdien droit
41. Point le plus inférieur du sourcil cotyloïdien droit
42. Point à mi hauteur de l'arrière fond du cotyle droit
43. Centre de l'arrière fond du cotyle droit
44. Point le plus postérieur du sourcil cotyloïdien gauche
45. Point le plus inférieur du sourcil cotyloïdien gauche
46. Point à mi hauteur de l'arrière fond du cotyle gauche
47. Centre de l'arrière fond du cotyle gauche

BIBLIOGRAPHIE

[1] M.M. Abitbol, Evolution of the Lumbosacral Angle, Am. J. Phys. Anthrop. 72 (1987) 361-372.
[2] M.M.Abitbol, Evolution of the Sacrum In Hominoids, Am. J. Phys. Anthrop. 74 (1987). 65-81.
[3] M.M. Abitbol, Evolution of the ischial spines and pelvic floor in the Hominoïdea, Am. J. Phys. Anthrop. 75-1 (1988) 53-67.
[4] M.M. Abitbol, Sacral curvature and supine posture, Am. J. Phys. Anthrop. 80-3 (1989) 379-389.
[5] M.M. Abitbol, Ontogeny and evolution of pelvic diameters in anthropoids primates and in *Australopithecus afarensis* (AL 288-1), Am. J. Phys. Anthrop.85-2 (1991) 135-148.
[6] M.M. Abitbol, How did the Australopithecines walk ? A biomechanical study of the hip and thigh of *Australopithecus afarensis*, J. Hum. Evol. 26 (1994) 259-273.
[7] M.M. Abitbol, Reconstruction of the Sts 14 (Australopithecus africanus) pelvis, Am. J. Phys. Anthrop. 96-2 (1995) 143-158.
[8] M.M. Abitbol, Birth and human evolution. Anatomical and obstetrical mechanics in Primates, Bargin and Garvey, Westport, CT and London., 1996.
[9] C. Berge, Obstetrical Interpretation of the Australopithecine Pelvic Cavity, J. Hum. Evol., 13, (1984) 575-587.
[10] C. Berge, L'Evolution de la Hanche et du Pelvis des Hominidés. Bipédie, Parturition, Croissance, Evolution, Cahiers de Paléoanthropologie, CNRS, Paris, 1993.
[11] C. Berge, The Evolution and Growth of the Hominid Pelvis, in : F. Marcus et al. (Ed.), Advances in Morphometrics, Plenum Press, New-York, 1996, pp. 441-448.
[12] C. Boulay, Morphométrie Comparative Anatomo-Radiologique du Bassin Humain, Mémoire D.E.A., Laboratoire de Biomécanique, E.N.S.A.M., Paris, 1998.
[13] C. Boulay, C. Tardieu, J. Hecquet, C. Marty, J. Legay, G. Duval-Beaupère, Anatomical reliability of two Fundamental Pelvic Parameters : Pelvic Incidence and Thickness, Europ. J. Orthop. Surg. 15 (2005) 197-204.
[14] J. Bruzek, Fiabilité des Fonctions Discriminantes dans la Détermination sexuelle de l'os coxal. Critiques et Propositions, Bull. et Mém. Sté Anthrop. de Paris, N. S., T. 4, 1-2 (1992) 67-104.
[15] J. Bruzek, Degree of Pelvic Sexual Dimorphism in Human Population, A Creen-T-Test Application, Human Evolution, Vol 11, 2 (1996) 183-189.
[16] J. Bruzek, A method for visual determination of sex, using the human hip bone, Am J Phys. Anthrop. 117(2) (2002) 157-168
[17] MC. Commare, H. Descamps, C. Marty, G. Duval-Beaupere. Etude du Sacrum chez le Myopathe, ses Relations avec l'incidence, Rachis, Vol. 9, 1 (1997) 19-24.
[18] H. Descamps, MC Commare, C. Marty, G. Duval-Beaupère Le Paramètre Pelvien « Incidence » chez le petit enfant, Rachis, Vol. 8, 4 (1996) 177-180.
[19] G. Duval-Beaupère, C. Schmidt, P. Cosson, A Barycentremetric Study of the Sagittal Shape of Spine and Pelvis, Ann. Biomed. Engineer, Vol. 20, 4, (1992) 451-462.
[20] G. Duval Beaupère, C. Marty, C. Tardieu, Sagittal Profile of the Spine, prominent part of the Pelvis, Acts of 5th Congress of the I.R.S.D. (Intern. Research Sty of Scoliosis Deformities), Clermont Ferrand, Mai 2000, (2001) 20-38.
[21] S. Genoves, L'estimation des Différences Sexuelles dans l'os coxal : Différences Métriques et Différences Morphologiques, Bull. Mém. Soc. Anthrop. Paris, S. X, 10 (1959) 3-95.
[22] M. Haüsler, Lucy oder Lucifer ? Ein vergleish der Australopithecus-Becken Sts 14 und AL 288-1, Bul. Soc. Suisse Anthrop. 1, (1995) 3-14.
[23] M. Haüsler, New insights to the locomotion of Australopithecus africanus based on the pelvis, Evol. Anthrop. 11, Suppl. 1, (2002) 53-57.
[24] M. Haüsler, P. Schmidt, Comparison of the pelves of Sts 14 and AL 288-1 : implications for birth and sexual dimorphism in australopithecines, J. Hum. Evol. 29, (1995) 363-383.
[25] M. Haüsler, P. Schmidt, Assessing the pelvis of AL 288-1 : a reply to Wood and Quinney, J. Hum. Evol. 32, (1997) 99-102.

[26] M. Haüsler, L. R. Berger, Stw 441/465 : A new fragmentary ilium of a small bodied Australopithecus africanus from Sterkfontein, South Africa, J. Hum. Evol. 40 (2001) 411-417.
[27] B. K. F Kummer, Functional Adaptations to Posture in the Pelvis of Man and others Primates, in : R. Tuttle (Ed) Primate Functional Morphology and Evolution, Mouton, The Hague, 1975, pp.281-291.
[28] J. Legaye, J. Hecquet, C. Marty, G. Duval-Beaupère, Equilibre Sagittal du Rachis. Relations entre bassin et courbures rachidiennes sagittales en position debout, Rachis, Vol. 5, 5 (1993) 215-226.
[29] J. Legaye, G. Duval-Beaupere, J. Hecquet , C. Marty, The Incidence, fundamental pelvic parameter for the tridimensionnal regulation of the spinal sagittal curves, Eur. Spine J., 7 (1998) 99-103.
[30] W. Leutenegger, Functional Aspects of Pelvis Morphology in Simian Primates, J. Hum. Evol., 3 (1974) 207-222.
[31] H.M. Mc Henry, Biomechanical interpretation of the early hominid hip, J. Hum. Evol. 4 (1975) 343-355.
[32] F. Marchal, Mise en Evidence des Changements Précoces dans l'ontogenése du Bassin humain par une Etude Morphométrique, Bull. Mém. Soc. Anthrop. Paris, Ns. T. 6, 1-2 (1994) 101-110.
[33] F. Marchal, Le dimorphisme sexuel de conformation de l'os coxal humain. Bases biologiques et nouvelles applicationss possibles, Bull Mem Sté Anthrop Paris 15, (2003) 7-24.
[34] C. Marty, M.C. Commare-Nordmann, H. Descamps, J. Legaye, J. Hecquet, G. Duval-Beaupère, Sacrum et Incidence : Quelles Relations ? Rachis Vol. 9, 3 (1997) 109-114.
D. W. Murray, The definition and measurement of acetabular orientation, J Bone Joint Surg. 75, 2, (1993) 228-232.
[35] H. Preuschoft, S. Hayama, M. M. Günther, Curvature of lumbar spine as a consequence of mechanical necessities in Japanese macaques trained for bipedalim, Folia Primatol. 50 (1988) 42-58.
[36] Y. Rak Lucy pelvic anatomy : its role in bipedal gait, J. Hum. Evol. 20, (1991) 283-290.
[37] E. Reynolds, The Evolution of the human pelvis in relation to the mechanism of erect posture, Pap. Peabody Mus., Am. Archeol. Ethnol. X (1931) 255-334.
[38] J.T. Robinson, Early Hominid Posture and Locomotion, Univ. of Chicago Press, Chicago, London, 1972.
[39] F.J. Rohlf, D.E. Slice, Extension of the procustes method for the optimal superimposition of landmarks, Syst. Zool. Vol. 39, 1 (1990) 40-59.
[40] C.B. Ruff, Biomechanics of the hip and birth in Early *Homo*, Am. J. Phys. Anthrop. 98 (1995) 527-574.
[41] P. Schmidt, Eine rekonstruktion des squelettes von A.L.288-1 (Hadar) und deren konsequenzen, Folia Primatol. 40 (1983) 283-306.
[42] A. H. Schultz, Sex differences in the pelves of Primates, Am. J. Phys. Anthrop. 7 (1949) 401-423.
[43] B. A. Sigmon, Evolution in the hominid pelvis, Paleont. Afr. 26 (1986) 25-32.
[44] J. T. Stern, R.L. Susman,. The locomotor anatomy of *Australopithecus Afarensis*, Am. J. Phys. Anthrop. 60 (1983) 279-317.
[45] R. G. Tague, C. O. Lovejoy, The obstetric pelvis of Al 288 –1 (Lucy), J. of Hum. Evol. 15 (1986) 237-255.
[46] C. Tardieu,. Anatomie Comparée de la « Vertèbre Pelvienne ». Son Evolution chez les Hominidés, Actes du Congrès du G.E.S. (Groupe d'Etude de la Scoliose), New York, Mars 2000, 2001 (URL : http://www.orthopedie.com/ges).
[47] C. Tardieu, A. Barrau, M. Baylac, C. Boulay, G. Duval-Beaupère, Balance of the spine : key role of a new pelvic sagittal parameter, the "Angle of Incidence". Comparison with Great Apes, Folia Primatol. 90 (2002). Abstract.