



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Palevol 3 (2004) 295–304



Paléontologie humaine et préhistoire

## Analyse Procuste de la cavité pelvienne des australopithèques (AL 288, Sts 14), des humains et des chimpanzés : conséquences obstétricales

July Bouhallier <sup>a,\*</sup>, Christine Berge <sup>a</sup>, Xavier Penin <sup>b</sup>

<sup>a</sup> FRE 2696 CNRS, anatomie comparée, Muséum national d'histoire naturelle, 55, rue Buffon, 75005 Paris, France

<sup>b</sup> Département d'orthodontie, faculté de chirurgie dentaire, université René-Descartes (Paris-5),  
1, rue Maurice-Arnoux, 92120 Montrouge, France

Reçu le 30 juin 2003 ; accepté après révision le 22 mars 2004

Rédigé à l'invitation du comité éditorial

### Résumé

La cavité pelvienne de *Australopithecus* (*A. afarensis*, *A. africanus*) a été comparée à celle de 25 *Pan* (*P. troglodytes*, *P. paniscus*) et 45 *Homo sapiens* par l'analyse Procuste tridimensionnelle. La morphologie s'avère plus proche de celle des humains que de celle des chimpanzés. L'accouchement des australopithèques était anté-ischiatique comme celui des humains, indiquant que la mécanique obstétricale propre aux hominidés a une origine ancienne. Comparés aux humains, les fossiles sont plus proches des humains féminins. Cependant, ils présentent des différences notables avec ces derniers indiquant que le fœtus effectuait un mouvement de flexion et de rotation moins accentué, en suivant une trajectoire moins incurvée que chez les humains. **Pour citer cet article : J. Bouhallier et al., C. R. Palevol 3 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Procustes analysis of the pelvic cavity in australopithecines (AL 288, Sts 14), humans and chimpanzees: obstetrical consequences.** The pelvic cavity of *Australopithecus* (*A. afarensis*, *A. africanus*) was compared to that of 25 *Pan* (*P. troglodytes*, *P. paniscus*) and 45 *Homo sapiens* with the use of tridimensional Procustes analysis. The fossil morphology is closer to that of modern humans than that of chimpanzees. The australopithecine birth was ante-ischiatic as in humans, indicating that the obstetrical mechanism specific to hominids has an ancient origin. As compared with modern humans, the fossils are closer to that of the female humans. However, they present noticeable differences with modern female pelvises indicating that the australopithecine fetus realized a less accentuated movement of flexion and rotation, following a less curved trajectory. **To cite this article: J. Bouhallier et al., C. R. Palevol 3 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

\* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : [jbouhal@mnhn.fr](mailto:jbouhal@mnhn.fr) (J. Bouhallier), [berge@mnhn.fr](mailto:berge@mnhn.fr) (C. Berge), [penin@mail.cpod.fr](mailto:penin@mail.cpod.fr) (X. Penin).

*Mots clés* : Obstétrique ; Pelvis ; Homo sapiens ; *Pan troglodytes* ; *Australopithecus africanus* ; *A. afarensis* ; Analyse Procuste

*Keywords*: Obstetrics; Pelvis; Homo sapiens; *Pan troglodytes*; *P. paniscus*; *Australopithecus africanus*; *A. afarensis*; Procrustes analysis

## Abridged English version

### 1. Introduction

Joulin [19] was among the first to note that the main difficulty in human birth is due to the fact that the neonate must cross the pelvic walls simultaneously, and not consecutively (firstly the sacrum, then the pubic symphysis) as in other primates. A neonate rotation and flexion characterizes human delivery. This obstetrical mechanism is inferred from the peculiar shape of the pelvic walls, most specifically inlet proportions [14,33]. Pelvic morphology in australopithecine's is relatively close to that of modern humans [6–10,18,20,22,23,31,34–37,39]. For Berge et al. [12], the australopithecine obstetrical mechanism was human-like (rotation and flexion of the neonate in the pelvic cavity). On the contrary, Tague and Lovejoy [38] describe a transverse delivery (no rotation of the australopithecine neonate). The aim of the study is to use morphometric geometry (Procrustes analysis) to specify shape differences related to the pathway followed by the fetus, in australopithecines, modern humans and common chimpanzees.

### 2. Material

The fossil material comprises the reconstructed pelvises of *Australopithecus afarensis* ('Lucy', AL 288) and *A. africanus* (Sterkfontein, Sts 14) [15,32]. The extant material comprises 70 adult pelvises: 16 *Pan troglodytes* (2 males, 9 females, 5 of unknown sex), 9 *Pan paniscus* (5 males, 4 females), and 45 *Homo sapiens* from European origin (21 males, 24 females).

### 3. Methods

Twenty-two landmarks are defined on the pelvic inlet, midplane and outlet (Fig. 1, Table 1). Eight landmarks belong to the inlet, six to the mid-plane, and eight to the outlet. For digitalization the 3 Draw Space

Digitizer® (Polhemus Inc.), and the 3D Revpro DX Microscribe were used. Three analyses have been carried out: with all the specimens, with humans and australopithecines, and with female humans and australopithecines. Discriminant vectors were calculated to specify shape differences between chimpanzees and hominids, australopithecines and female humans.

### 4. Results

#### 4.1. Modern and fossil hominids as compared with chimpanzees

In the principal component analysis, the australopithecines are close to the humans (PC1: 68.4% of the variance), more specifically to the females (PC2: 6.7% of the variance) (Fig. 2). The discriminant vector between hominids (humans and australopithecines) and chimpanzees is highly significant ( $R^2 = 0.97$ ,  $F = 654$  with 3 and 68 DF,  $p < 10^{-6}$ ). In Fig. 3, the sketch gives the shape differences between chimpanzees and hominids in reference to the consensus. As compared with the chimpanzee pelvis, the hominid pelvis has a wide and low pelvic cavity, with a less inclined inlet and mid-plane, a curved sacrum (landmarks 1–9–15), a long ischiopubic ramus (landmarks 18–19), with a ventrally open outlet.

#### 4.2. Australopithecines as compared with modern humans

In the principal component analysis the australopithecines are close to the female humans (PC1: 25.2%) (Fig. 4). Sterkfontein is further from the humans than Lucy in PC1, and Lucy slightly different from female humans in PC2 (13.2% of the variance).

#### 4.3. Australopithecines as compared with female humans

The discriminant vector between australopithecines and female humans is highly significant ( $R^2 = 0.94$ ,  $F = 50.0$  with 6 and 19 DF,  $p < 10^{-6}$ ). In Fig. 5, the sketch gives the shape differences between the two

australopithecines and the female humans in reference to the consensus. As compared with the female human pelvis, the australopithecine pelvic cavity is broad and low (the inlet, mid-plane and outlet are brought closer together). In lateral view, the human pelvis cavity is dorsally developed, whereas the australopithecine pelvic cavity is ventrally developed.

## 5. Discussion

The shape analysis of the pelvic cavity reveals morphological traits common to australopithecines and humans. This indicates that the hominids share the same ‘obstetrical mechanics’ [14,19,21]. As in humans, australopithecine birth was anteischiatic (the urogenital triangle was ventrally situated, between the ischiopubic rami). The fetus had to execute a rotation and a flexion to follow a curved trajectory. However, the australopithecine pelvic cavity differs from the pelvic cavity of the female humans. The fetal trajectory was less curved and more downward oriented in the pelvic cavity than in humans (the urogenital triangle is more downward and backward situated than in female humans). The flexion of the fetus was probably less marked than in human birth according to Malinas’s hypothesis [21].

## 1. Introduction

La cavité pelvienne constitue un canal d’accouchement au travers duquel s’effectue la descente puis la sortie du fœtus à terme hors des voies maternelles. Joulin [19] fut l’un des premiers à noter que, chez les humains comme chez la plupart des mammifères, les plus grandes dimensions fœtales – celles qui peuvent poser problème – sont les dimensions crâniennes. Chez les grands singes, les contraintes obstétricales sont faibles, car le fœtus franchit d’abord la paroi dorsale formée par le sacrum, puis la paroi ventrale formée par le pubis (la résistance qu’exercent les parois internes du pelvis sur la tête fœtale est « discontinue »). Chez les humains, les contraintes obstétricales sont fortes car le fœtus franchit en même temps la paroi dorsale et

la paroi ventrale du pelvis maternel (la résistance est « continue »). Plus tard, les accoucheurs, Farabeuf et Varnier [14] ont mis l’accent sur le fait que la cavité pelvienne humaine féminine présente dans sa forme des rétrécissements et des agrandissements, qui vont diriger le crâne du fœtus lors de son passage dans le canal d’accouchement. Le fœtus humain, tout en tournant sur lui-même, suit une trajectoire incurvée vers l’avant. Cette mécanique obstétricale est propre à l’espèce humaine. Elle est liée au fait que le crâne du fœtus ne peut se placer dans l’ouverture crâniale du pelvis (détroit supérieur) qu’obliquement [33].

Les premiers hominidés, les australopithèques, ont une morphologie pelvienne proche de celle des humains [6–10,18,20,22,23,31,34–37,39]. Malinas [21] a suggéré que leur accouchement devait être de type humain, bien qu’étant probablement plus simple. Plus tard, Berge et al. [12] ont considéré que la morphologie des parois pelviennes indiquait la mise en place d’une mécanique obstétricale proche de celle des humains. En revanche, pour Tague et Lovejoy [38], la forme aplatie du pelvis de Lucy indiquerait que le crâne fœtal, engagé transversalement dans le détroit supérieur, n’effectuait pas de rotation dans la cavité pelvienne. Cette hypothèse a été reprise par la suite par certains auteurs [1,30,31].

Depuis peu, la morphométrie géométrique s’est avérée un outil particulièrement adapté à l’étude de formes anatomiques complexes [3,5,16,25–27]. Une des bases de la morphométrie géométrique est la mise à l’échelle des spécimens, de manière à pouvoir les comparer indépendamment de leur taille. Le but de notre étude est d’analyser la forme de la cavité pelvienne des australopithèques, par comparaison avec celles des chimpanzés et des humains en utilisant l’analyse Procruste. Pour appréhender cette forme, nous avons défini trois détroits pelviens (supérieur, moyen et inférieur) qui, du point de vue obstétrical, constituent les trois étapes successives de la trajectoire du fœtus. En outre, les études classiques précédentes avaient montré que les bassins d’australopithèques étaient plus proches des bassins humains féminins que des bassins masculins [1,12,15]. L’analyse morphométrique cherchera à affiner la comparaison en précisant notamment les caractères spécifiques qui discriminent les deux australopithèques des humains féminins.

## 2. Matériel et méthode

### 2.1. Matériel

Le matériel fossile comprend deux pelvis d'australopithèques reconstitués d'après les moulages des os coxaux et du sacrum. Le pelvis de Lucy (AL 288) est reconstitué d'après l'os coxal gauche et le sacrum. Il s'agit d'un pelvis d'adulte attribué à l'espèce *Australopithecus afarensis* et daté d'environ 3 Ma [17]. La reconstitution est celle de Schmid [32]. Le pelvis de Sterkfontein (Sts 14) comprend est reconstitué d'après les deux os coxaux et le sacrum. Il s'agit d'un pelvis attribué à l'espèce *A. africanus* et daté d'environ 2,5 Ma [28]. L'étude du sacrum suggère qu'il s'agit d'un sub-adulte [11]. La reconstitution est celle de Häusler et Schmid [15].

Le matériel actuel comprend 70 pelvis adultes, soit 25 pelvis de chimpanzés : 16 *Pan troglodytes* (2 mâles, 9 femelles, 5 de sexe indéterminé), 9 *P. paniscus* (5 mâles, 4 femelles) et 45 pelvis humains, d'origine européenne (21 hommes et 24 femmes).

L'origine du matériel est la suivante : (1) moulages de AL288–1 et Sts 14 : Anthropologisches Institut der Universität, Zürich-Irchel ; (2) pelvis de chimpanzés : Muséum national d'histoire naturelle de Paris (Anatomie comparée, Anthropologie), du Musée royal de l'Afrique centrale à Tervuren, de l'Institut royal des sciences naturelles (Belgique) ; (3) pelvis humains : Muséum national d'histoire naturelle, du laboratoire d'anthropologie biologique de l'université Paris-7, de l'Institut d'anatomie du centre universitaire des Saints-Pères (coll. Orfila), et de l'Institut royal des sciences naturelles (Belgique).

### 2.2. Méthodes

#### 2.2.1. Définition et saisie des points-repères

Vingt-deux points ont été définis sur les parois internes de la cavité pelvienne des spécimens (Tableau 1, Fig. 1). Selon les définitions de Bookstein [13], neuf points sont anatomiquement homologues (homologie de type 1), et 13 sont géométriquement homologues (homologies de types 2 et 3). Rappelons que l'homologie 1 est la rencontre de trois structures (ou deux

Tableau 1

Définition des 22 points dans la cavité pelvienne.  
Definition of the 22 landmarks in the pelvic cavity

Détroits	n°	Définition	Type
Supérieur	1	Point antérieur du promontoire (médi- an)	1
	2	Point de contact sacro-iliaque (coxal gauche)	1
	3	Extrémité du diamètre transverse (coxal gauche)	3
	4	Sommet de la tubérosité pectinée (coxal gauche)	2
	5	Point supérieur de la symphyse pubienne (médi- an)	1
	6	Sommet de la tubérosité pectinée (coxal droite)	2
	7	Extrémité du diamètre transverse (coxal droit)	3
	8	Point de contact sacro-iliaque (coxal droit)	1
Moyen	9	Point de contact S2-S3 (médi- an)	1
	10	Point supérieur de l'échancrure sciatique (coxal gauche)	3
	11	Centre de l'acétabulum côté interne (coxal gauche)	3
	12	Point à mi-hauteur de la symphyse pu- bienne (médi- an)	1
	13	Centre de l'acétabulum côté interne (coxal droit)	3
	14	Point supérieur de l'échancrure sciatique (coxal droit)	3
Inférieur	15	Extrémité du sacrum (médi- an)	1
	16	Extrémité de l'épine sciatique (coxal gauche)	1
	17	Point postérieur de la tubérosité ischiati- que (coxal gauche)	2
	18	Point antérieur de la tubérosité ischiati- que (coxal gauche)	2
	19	Point inférieur de la symphyse pubienne (médi- an)	2
	20	Point antérieur de la tubérosité ischiati- que (coxal droit)	2
	21	Point postérieur de la tubérosité ischiati- que (coxal droit)	2
	22	Extrémité de l'épine sciatique (coxal droit)	1

S2 : Deuxième vertèbre sacrée ; S3 : troisième vertèbre sacrée. Type : homologie dans Bookstein [13] (voir texte).

S2: Second sacral vertebra, S3: third sacral vertebra. Type: homo-  
logy in Bookstein [13]. Détroit supérieur: inlet; détroit moyen:  
midplane; détroit inférieur: outlet.

structures et un élément de référence); l'homologie de type 2 est le maximum d'une courbure ou d'un proces-  
sus osseux ; l'homologie de type 3 résulte d'une cons-  
truction.

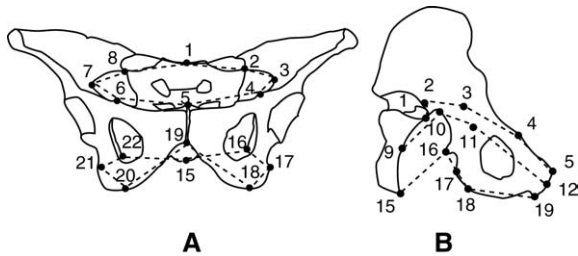


Fig. 1. Le pelvis de *Australopithecus afarensis* ('Lucy', AL 288). L'orientation du pelvis correspond à la position assise. En pointillés, les détroits pelviens. (A) Vue antérieure : détroit supérieur (points 1 à 8), détroit inférieur (points 15 à 22). (B) Vue latérale interne (seul le côté gauche est représenté) : détroit supérieur (points 1 à 5) ; détroit moyen (points 9 à 12), détroit inférieur (points 15 à 19). Voir la définition des points dans le Tableau 1.

Fig. 1. The pelvis of *Australopithecus afarensis* ('Lucy', AL 288). The pelvic orientation corresponds to the sitting position. Dotted lines: inlet, midplane and outlet. (A) anterior view: inlet (landmarks 1 to 8), outlet (landmarks 15 to 22). (B) Internal lateral view (only the left side is represented): inlet (landmarks 1 to 5); midplane (landmarks 9 to 12), outlet (landmarks 15 to 19).

Les 22 points ont été digitalisés sur les spécimens avec le 3 Draw Space Digitizer<sup>®</sup> (Polhemus Inc.) et le 3D Revpro DX Microscribe (précision 10<sup>-4</sup> mm).

### 2.2.2. Superposition Procruste

La superposition Procruste réalise la mise à l'échelle, la translation et la rotation des spécimens définis par leurs points [29]. Avec la superposition Procruste, on obtient le consensus et les résidus Procrustes qui sont les écarts des spécimens par rapport au consensus. Le consensus est l'individu moyen (il est situé au centre des graphes des analyses en composantes principales).

### 2.2.3. Analyse en composantes principales

Les résidus Procrustes sont les données initiales de l'analyse en composantes principales.

### 2.2.4. Calcul de la fonction discriminante

Le calcul de la fonction discriminante est utilisé pour identifier des groupes taxonomiques. Le logiciel permet de sélectionner le nombre de composantes principales donnant le meilleur résultat significatif.

### 2.2.5. Représentations graphiques

Les analyses donnent d'une part les graphes des coordonnées des spécimens, d'autre part, les sketches représentant les changements de conformation [2–5,25,26].

Les superpositions, graphiques et tests statistiques paramétriques ont été calculés avec le logiciel APS Version 2.30 [24].

## 3. Résultats

### 3.1. Les hominidés actuels et fossiles comparés aux chimpanzés

La Fig. 2 donne les coordonnées des spécimens sur les deux premières composantes de l'analyse des chimpanzés, des humains et des australopithèques. La première composante principale PC1 (68,4% de la variance) sépare clairement les humains des chimpan-

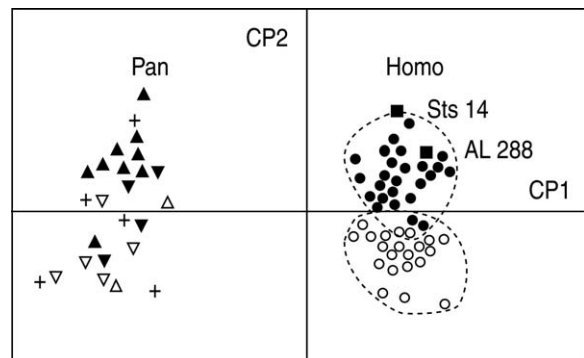


Fig. 2. Les 72 spécimens d'hominoidea projetés dans le plan des deux premières composantes principales (CP1 : 68,4% de la variance, CP2 : 6,7% de la variance). Cercles : *Homo sapiens* (mâles en blanc, femelles en noir) ; triangles pointe en haut : *Pan troglodytes* (mâles en blanc, femelles en noir) ; croix : indéterminés) ; triangles pointe en bas : *Pan paniscus* (mâles en blanc, femelles en noir) ; carrés noirs : *Australopithecus* (AL 288 : *A. afarensis* « Lucy »; Sts 14 : *A. africanus*).

Fig. 2. The 72 hominoid specimens projected onto the plane of the first two principal components (First principal component CP1: 68.4% of variance, second principal component CP2: 6.7% of variance). Circles: *Homo sapiens* (males in white, females in black); triangles pointing upwards: *Pan troglodytes* (males in white, females in black, cross: undetermined sex); triangles pointing downwards : *Pan paniscus* (males in white, females in black); black squares: *Australopithecus* (AL288: *A. afarensis* 'Lucy'; Sts 14: *A. africanus*).

zés. La deuxième composante principale PC2 (6,7% de la variance) sépare les humains masculins des humains féminins, et de façon moindre les chimpanzés mâles et femelles dans les deux espèces considérées. Les deux australopithèques sont du côté humain sur PC1 et du côté féminin sur PC2.

On calcule le vecteur discriminant les hominidés (humains et australopithèques) des chimpanzés à partir des trois premières composantes principales. Le test de discrimination est hautement significatif ( $R^2 = 0,97$ ,  $F = 654$  avec 3 et 68 DDL,  $p < 10^{-6}$ ). La Fig. 3 décrit les changements de forme correspondant au vecteur discriminant. Chaque morphologie (celle des hominidés et celle des chimpanzés) est comparée au consensus (individu moyen de l'analyse). En vue antérieure, la cavité pelvienne des chimpanzés est longue et étroite, tandis que celle des hominidés est courte et large. Le détroit inférieur des hominidés est largement ouvert sous la symphyse pubienne (angle 18–19–20). En vue latérale, la cavité pelvienne des chimpanzés est surtout remarquable par l'obliquité du détroit supérieur (points 1–5), et le sacrum plat (les points 1, 9 et 15 sont alignés). En revanche, la cavité pelvienne des hominidés a un détroit supérieur peu oblique et un sacrum incurvé (les points 1, 9 et 15 sont sur une courbe). La branche pubienne (18–19) est longue. Le détroit supérieur devient nettement plus court que le détroit moyen (diamètre 1–5 comparé au diamètre 9–12). Sur le détroit inférieur, la pointe du sacrum est située en dessous de l'épine sciatique (point 16), tandis qu'elle est située au-dessus chez les chimpanzés.

### 3.2. Les australopithèques comparés aux humains masculins et féminins

L'analyse réalisée à partir des pelvis des humains et des australopithèques montrent que les humains féminins sont séparés des humains masculins sur PC1 (25,2% de variance), alors que PC2 (13,2% de variance) correspond à la variabilité individuelle (Fig. 4). Les australopithèques sont proches des humains féminins. Sterkfontein est cependant plus éloigné des humains féminins sur PC1 que Lucy. Lucy est sensiblement éloignée des humains féminins sur PC2.

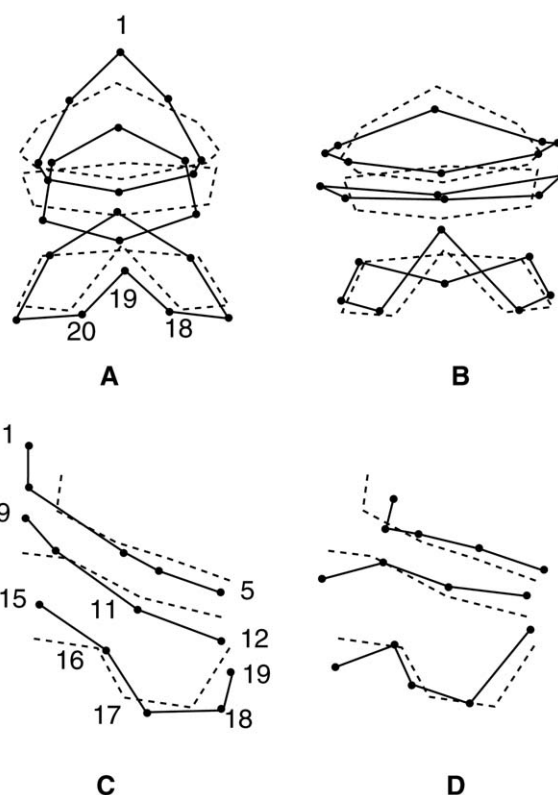


Fig. 3. Schéma des caractères discriminants chez les hominoïdés. L'orientation des pelvis correspond à la position assise. (A, C) *Pan troglodytes*; (B, D) *Homo sapiens* et *Australopithecus*; (A, B) vue antérieure de la cavité pelvienne; (C, D) vue latérale interne gauche. En pointillés : le consensus. Acétabulum (face interne de l'os coxal) : point 11 ; angle sous-pubien : points 18, 19, 20 ; branche ischio-pubienne : points 18–19 ; épine sciatique : point 16 ; sacrum (face interne) : points 1, 9, 15 ; symphyse pubienne (face interne) : points 5, 12, 19 ; tubérosité ischiatique : points 17, 18. Voir la définition des points sur le Tableau 1 et la Fig. 1.

Fig. 3. Sketch of discriminant traits in hominoids. The orientation of pelvis corresponds to the sitting position. (A, C) *Pan troglodytes*; (B, D) *Homo sapiens* and *Australopithecus*; (A, B) anterior view of the pelvic cavity; (C, D) internal left side view. Dotted line: consensus. Acetabulum (internal face of the coxal bone): landmark 11; sub-pubic angle: landmarks 18, 19, 20; ischiopubic ramus: landmarks 18–19; sciatic spine: landmark 16; sacrum (internal face): landmarks 1, 9, 15; pubic symphysis (internal face): landmarks 5, 12, 19; tuberosity of ischium: landmarks 17, 18. See definition of landmarks in Table 1 and Fig. 1.

### 3.3. Les australopithèques comparés aux humains féminins

Pour préciser les caractères spécifiques aux australopithèques, on a calculé une fonction discriminante

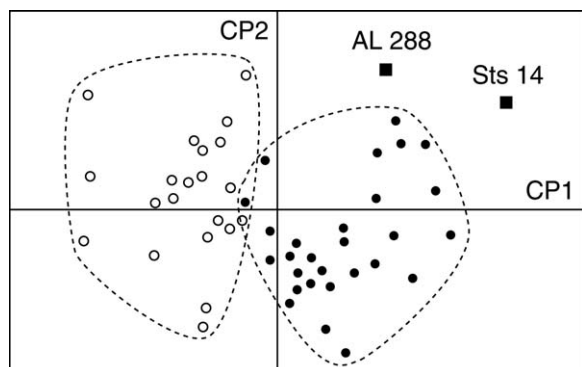


Fig. 4. Les 26 spécimens d'hominidés projetés dans le plan des deux premières composantes principales (CP1 : 25,2% de la variance, CP2 : 13,2% de la variance). Cercles blancs : *Homo sapiens* mâles; cercles noirs : *Homo sapiens* femelles; carrés noirs : *Australopithecus* (AL 288 : *A. afarensis* « Lucy » ; Sts 14 : *A. africanus*).

Fig. 4. The 26 hominid specimens projected onto the plane of the first two principal components (First principal component CP1: 25.2% of variance, second principal component PC2: 13.2% of variance). White circles: male *Homo sapiens*; black circles: female *Homo sapiens*; black squares: *Australopithecus* (AL 288: *A. afarensis* 'Lucy'; Sts 14: *A. africanus*).

entre les humains féminins et les australopithèques à partir d'une troisième analyse. Le vecteur discriminant est calculé avec les six premières composantes principales. Malgré le petit nombre de fossiles, le test de discrimination est hautement significatif ( $R^2 = 0,94$  ;  $F = 50,0$  avec 6 et 19 DDL,  $p < 10^{-6}$ ). Les coordonnées des fossiles sur le vecteur discriminant confirment que Sterkfontein est plus éloigné des humains féminins que Lucy.

La Fig. 5 décrit les différences de forme discriminant les australopithèques des humains féminins. En vue antérieure, la cavité pelvienne des australopithèques est plus large et plus courte en hauteur, car les trois détroits sont rapprochés les uns des autres. Ainsi, au détroit supérieur, le promontoire (point 1) est plus bas, et au détroit inférieur, la tubérosité ischiatique (points 17–18) est plus haute. L'angle sous-pubien est très ouvert comme chez les humains féminins (angle 18–19–20). En vue latérale, le développement de la cavité pelvienne n'est pas le même d'avant en arrière. Si l'on trace une verticale passant par le centre de l'acétabulum (point 11), on note que la cavité pelvienne des humains féminins est plus développée en arrière qu'en avant, alors que c'est l'inverse chez les australopithèques. En effet, la face interne du sacrum des fossiles est nettement moins incurvée (les points 1,

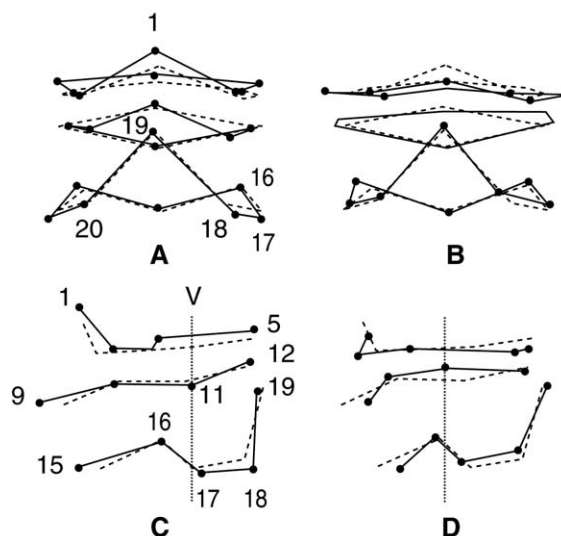


Fig. 5. Schéma des caractères discriminants chez les Hominidés. L'orientation des pelvis correspond à la position assise. (A, C) *Homo sapiens* ; (B, D) *Australopithecus* ; (A, B) vue antérieure de la cavité pelvienne ; (C, D) vue latérale interne (côté gauche). En pointillés : le consensus. Acétabulum (face interne de l'os coxal) : point 11 ; angle sous-pubien : points 18, 19, 20 ; branche ischio-pubienne : points 18–19 ; épine sciatique : point 16 ; sacrum (face interne) : points 1, 9, 15 ; symphyse pubienne (face interne) : points 5, 12, 19 ; tubérosité ischiatique : points 17, 18. V : verticale passant par le centre de l'acétabulum (point 11), voir texte.

Fig. 5. Sketch of discriminant traits in hominids. Pelvis are in sitting position. (A, C) *Homo sapiens*; (B, D) *Australopithecus*; (A, B) anterior view of the pelvic cavity; (C, D) lateral view (left side). Dotted line: consensus. Acetabulum (internal face of the coxal bone): landmark 11; Sub-pubic angle: landmarks 18, 19, 20; ischio-pubic ramus: landmarks 18–19; sciatic spine: landmark 16; sacrum (internal face): landmarks 1, 9, 15; pubic symphysis (internal face): landmarks 5, 12, 19; tuberosity of ischium: landmarks 17, 18. V: vertical line going through the center of acetabulum (landmark 11), see text.

9 et 15 sont sur une légère courbe). Il en résulte que le détroit inférieur des australopithèques est réduit vers l'arrière (points 15–16) et agrandi vers l'avant (points 17–18–19). La branche ischio-pubienne (points 18–19) est oblique en bas et en arrière, car le bord inférieur de la symphyse pubienne est projeté en avant (point 19).

#### 4. Discussion

Comparée aux méthodes morphométriques classiques, l'analyse Procuste permet de chiffrer l'impor-

tance des caractères de ressemblance et de différence sur les pelvis des hominidés et des grands singes et de les visualiser. Ainsi, nous pouvons calculer et représenter graphiquement les traits anatomiques spécifiques de la cavité pelvienne. Les résultats montrent que : (1) les australopithèques présentent des traits communs avec les humains, par comparaison avec les chimpanzés ; (2) les deux fossiles sont plus proches des humains féminins que des humains masculins. Cependant, (3) les australopithèques s'écartent des humains féminins par des caractères morphologiques spécifiques. Enfin, il semble (4) que Sterkfontein soit plus éloigné des humains féminins que Lucy.

#### 4.1. La mécanique obstétricale commune aux hominidés

Les caractères communs aux humains et aux australopithèques les séparent clairement des chimpanzés. Le détroit inférieur des hominidés s'ouvre en avant des tubérosités ischiatiques (la symphyse pubienne est haute et courte). Comme l'avait indiqué Joulin [19], cette morphologie indique que les contraintes obstétricales sont fortes chez les hominidés, car le fœtus doit franchir en même temps la paroi dorsale du canal d'accouchement formée par le sacrum et la paroi ventrale formée par le pubis. L'accouchement des australopithèques se faisait donc, comme celui des humains, en avant des tubérosités ischiatiques, grâce à l'ouverture du détroit inférieur sous la symphyse pubienne (entre les deux branches ischio-pubiennes délimitant le triangle uro-génital).

#### 4.2. Une mécanique obstétricale propre aux australopithèques ?

Les deux fossiles sont plus proches des humains féminins que des humains masculins. C'est d'ailleurs en grande partie cette forme « féminine » qui avait amené les découvreurs à leur attribuer le sexe féminin [18,28]. En réalité, le calcul du vecteur qui discrimine les australopithèques des humains féminins montre que la forme qui paraissait féminine chez les fossiles correspond en grande partie à des caractères propres au genre *Australopithecus*. La cavité pelvienne des australopithèques est particulièrement courte, large, et aplatie d'avant en arrière. Le détroit moyen et le détroit

inférieur sont très courts et développés différemment de ceux des humains. Les deux détroits sont courts en arrière des articulations coxo-fémorales et longs en avant. L'analyse montre aussi que le triangle formé par les branches ischio-pubiennes (triangle uro-génital) est situé plus en arrière et en bas chez les australopithèques que chez les humains féminins. Il résulte de cette morphologie que la trajectoire du fœtus des australopithèques dans la cavité pelvienne pouvait être sensiblement différente de celle des humains. Du fait de la forme et de l'orientation du sacrum, de la position basse du bord supérieur de la symphyse pubienne, de l'orientation du triangle uro-génital, la trajectoire du fœtus était probablement moins incurvée dans la cavité pelvienne que dans l'accouchement humain. La sortie du fœtus se faisait moins vers l'avant du corps. En position debout, le triangle uro-génital devait être situé plus à l'aplomb de la verticale du corps. Le diaphragme rectal qui sépare la cavité pelvienne de part et d'autre des épines sciatiques (muscle ischio-coccygiens et releveur de l'anus), était aussi situé plus en arrière que dans l'espèce humaine relativement à la partie ventrale du périnée, qui entoure le vagin et l'appareil urinaire.

Selon Tague et Lovejoy [38], le fœtus à terme s'engageait transversalement dans le détroit supérieur et conservait cette orientation tout au long de sa trajectoire. A l'inverse, selon Berge et al. [12], le fœtus des australopithèques, engagé transversalement ou obliquement, effectuait une rotation et une flexion sur lui-même, comme dans l'accouchement humain. L'analyse de forme de la cavité pelvienne apporte des données fiables qui vont compléter l'hypothèse de Berge et al. [12]. En effet, la méthode Procuste permet de considérer la cavité pelvienne comme un tout. La compréhension anatomique de la cavité pelvienne est facilitée par l'observation des changements simultanés de la forme des trois détroits obstétricaux. Il apparaît alors clairement que, l'accouchement se faisant vers l'avant du corps, la trajectoire du fœtus des australopithèques est incurvée vers l'avant, comme dans l'espèce humaine. L'analyse montre cependant que la trajectoire du fœtus, qui suit la forme incurvée du sacrum, était moins incurvée et dirigée un peu plus vers le bas que dans l'espèce humaine. Bien que l'accouchement ait déjà été de type humain dans ses grandes lignes, il est probable que le fœtus des australopithèques effectuait un mouvement de rotation et de flexion moins accentué que dans l'espèce humaine. L'idée d'une



flexion du fœtus, plus modérée que dans l'espèce humaine, rejoint l'hypothèse proposée par Malinas [21].

## Remerciements

L'étude a été réalisée dans le cadre de l'équipe et du Groupe de morphométrie du Muséum national d'histoire naturelle. Nous remercions Y. Coppens pour son soutien et ses conseils judicieux pour la réalisation de cet article. Nous tenons à remercier également M. Baylac, responsable du Groupe de morphométrie ainsi que les responsables des collections qui ont bien voulu nous en donner l'accès : F. Demoulin, J. Langaney, G. Langlet, J.-P. Lassau, R. Orban, J. Repérant, W. Van Neer.

## Références

- [1] M.M. Abitbol, Birth and Human Evolution, Anatomical and Obstetrical Mechanics in Primates, Bargin and Garvey, Westport Connecticut, London, 1996.
- [2] A.-M. Bacon, Analyse de la variabilité de taille et forme de l'extrémité distale de l'humérus chez les grands singes africains par la morphométrie géométrique, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. III 329 (1999) 675–681.
- [3] A.M. Bacon, Principal component analysis of distal humeral shape in Pliocene to recent African hominids: the contribution of geometric morphometrics, Am. J. Phys. Anthropol. 111 (2000) 479–487.
- [4] A.M. Bacon, M. Baylac, Landmark analysis of distal femoral epiphysis of modern and fossil primates with particular emphasis on *Australopithecus afarensis* (AL 129-1 and AL 333-4), C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa 321 (1995) 553–560.
- [5] A.-M. Bacon, M. Baylac, Mise en évidence de l'allométrie du fémur distal par une technique de morphométrie géométrique chez les Hominoidea, *Papio* et *Australopithecus afarensis*, Cah. Anthropol. Biométr. Humaine Paris 14 (1996) 497–508.
- [6] C. Berge, Multivariate analysis of the pelvis for hominids and other extant primates: implications for the locomotion and the systematics of the different species of australopithecines, J. Hum. Evol. 13 (1984) 555–562.
- [7] C. Berge, Quelle est la signification fonctionnelle du pelvis très large de *Australopithecus afarensis* (AL 288-1) ? in: Y. Coppens, B. Senut (Eds.), Origine(s) de la bipédie chez les Hominidés. Cah. Paléanthropol., CNRS, Paris, 1991, pp. 113–119.
- [8] C. Berge, L'Evolution de la hanche et du pelvis des hominidés : bipédie, parturition, croissance, allométrie, Cah. Paléanthropol., CNRS, Paris (1993) 1–110.
- [9] C. Berge, Heterochronic processes in human evolution: an ontogenetic analysis of the hominid pelvis, Am. J. Phys. Anthropol. 105 (1998) 441–459.
- [10] C. Berge, E. Daynes, Modeling three-dimensional sculptures of australopithecines (*Australopithecus afarensis*) of the Museum of Natural History of Vienna (Austria): the postcranial hypothesis, Comp. Biochemist. Physiol., Part A 131 (2001) 145–157.
- [11] C. Berge, D. Gommery, Le sacrum de Sterkfontein Sts 14Q (*Australopithecus africanus*): nouvelles données sur la croissance et sur l'âge osseux du spécimen (hommage à R. Broom et J.T. Robinson), C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. III 329 (1999) 227–232.
- [12] C. Berge, R. Segebarth-Orban, P.P. Schmid, Obstetrical interpretation of the australopithecine pelvic cavity, J. Hum. Evol. 13 (1984) 573–587.
- [13] F.L. Bookstein, Morphometric Tools for Landmark Data: Geometry and Biology, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
- [14] L.-H. Farabeuf, H. Varnier, Introduction à l'étude clinique et à la pratique des accouchements, Nouvelles Éditions Steinell, Paris, 1904.
- [15] M. Häusler, P. Schmid, 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.
- [16] R.J. Hennessy, C.B. Stringer, Geometric morphometric study of the regional variation of modern human craniofacial form, Am. J. Phys. Anthropol. 117 (2002) 37–48.
- [17] D.C. Johanson, T.D. White, Y. Coppens, A new species of the genus *Australopithecus* (primate, Hominidae) from the Pliocene of eastern Africa, Kirlandia 28 (1978) 1–14.
- [18] D.C. Johanson, C.O. Lovejoy, W.H. Kimbel, T.D. White, S.C. Ward, M.E. Bush, B.M. Latimer, Y. Coppens, Morphology of the Pleistocene partial hominid skeleton (AL 288-1) from the Hadar formation, Ethiopia, Am. J. Phys. Anthropol. 57 (1982) 403–451.
- [19] Dr. Joulin, Anatomie et physiologie comparée du bassin des Mammifères, Arch. gén. Médecine, Ser. 6 3 (1864) 29–46.
- [20] W.L. Jungers, A pygmy perspective on body size and shape in *Australopithecus afarensis* (A.L. 288-1, 'Lucy'), in: Y. Coppens, B. Senut (Eds.), Origine(s) de la bipédie chez les Hominidés. Cah. Paléanthropol., CNRS, Paris, 1991, pp. 216–223.
- [21] Y. Malinas, La cavité pelvienne de *Australopithecus prometheus* (Dart). Essai de paléo-obstétrique, Bull. Acad. Sci. Lorraine, Sciences 9 (1970) 254–269.
- [22] H.M. McHenry, Biomechanical interpretations of the early hominid hip, J. Hum. Evol. 4 (1975) 343–355.
- [23] H.M. McHenry, Human evolution, 2nd ed, Encyclopedia of Human Biology, 4, Academic Press, 1997, pp. 593–599.
- [24] X. Penin, APS, a Procrustes software, freeware, 2000.

- [25] X. Penin, C. Berge, Étude des hétérochronies par superposition procuste: application aux crânes de primates hominoïdes, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. III 324 (2001) 87–93.
- [26] X. Penin, C. Berge, M. Baylac, Ontogenetic study of the skull in modern humans and the common chimpanzees: neotenic hypothesis reconsidered with a tridimensional procustes analysis, Am. J. Phys. Anthropol. 118 (2002) 50–62.
- [27] M.S. Ponce de León, C.P.E. Zollikofer, Neanderthal cranial ontogeny and its implications for late hominid diversity, Nature 412 (2001) 534–538.
- [28] J.T. Robinson, Early Hominid Posture and Locomotion, University of Chicago Press, Chicago, London, 1972.
- [29] F.J. Rohlf, D.E. Slice, Extensions of the procustes methods for the optimal superimposition of landmarks, Syst. Zool. 39 (1990) 40–59.
- [30] K.R. Rosenberg, The evolution of the modern childbirth, Yearb. Phys. Anthropol. 35 (1992) 85–124.
- [31] C.B. Ruff, Biomechanics of the hip and birth in early *Homo*, Am. J. Phys. Anthropol. 98 (1995) 527–574.
- [32] P. Schmid, Eine Rekonstruktion des Skelettes von A.L.288–1 (Hadar) und deren Konsequenzen, Folia primatol. 40 (1983) 283–306.
- [33] A.H. Schultz, Sex differences in the pelvis of primates, Am. J. Phys. Anthropol. 7 (1949) 401–423.
- [34] B.A. Sigmon, Evolution in the hominid pelvis, Paleont. Afr. 26 (1986) 25–32.
- [35] J.T. Stern, R.L. Susman, The locomotor anatomy of *Australopithecus afarensis*, Am. J. Phys. Anthropol. 60 (1983) 279–317.
- [36] K. Steudel, A multivariate analysis of the pelvis of early hominids, J. Hum. Evol. 7 (1978) 583–595.
- [37] R.L. Susman, J.T. Stern, W.L. Jungers, Arboreality and bipedality in the Hadar hominids, Folia Primatol. 43 (1984) 113–156.
- [38] R.G. Tague, C.O. Lovejoy, The obstetric pelvis of AL 288-1 (Lucy), J. Hum. Evol. 15 (1986) 237–255.
- [39] A.L. Zihlman, W.S. Hunter, A biomechanical interpretation of the pelvis of *Australopithecus*, Folia Primatol. 18 (1972) 1–19.