

THESE

PRESENTEE A

L'UNIVERSITE BORDEAUX I

ECOLE DOCTORALE DE BIOLOGIE

Par Monsieur **Emmanuel CLEUVENOT**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPECIALITE : ANTHROPOLOGIE

COURBURES SAGITTALES DE LA COLONNE VERTEBRALE
DETERMINEES PAR LA MORPHOLOGIE DES VERTEBRES.
DEVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE METHODOLOGIE ET
APPLICATION CHEZ *HOMO SAPIENS*.

Soutenue le 25 juin 1999

Après avis de

Mme. María Dolores GARRALDA, Professeur, Universidad Complutense de Madrid
M. Winfried HENKE, Professeur, Johannes Gutenberg Universität, Mainz

Devant la Commission d'examen formée de

M. Baruch ARENSBURG, Professeur, Tel Aviv University
M. Jaroslav BRUZEK, Directeur de Recherche, UMR 5809 CNRS, Talence
Mme. M^a Dolores GARRALDA, Professeur, Universidad Complutense de Madrid
M. Winfried HENKE, Professeur, Johannes Gutenberg Universität, Mainz
M. Bernard VANDERMEERSCH, Professeur, Université Bordeaux I

**à ma mère Françoise
a *Pepa*
à Annie et Marie-Thérèse
a *Alonso, Paquita y Raquel***

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été dirigé par Monsieur le Professeur Bernard VANDERMMERSCH. L'exigence de qualité, l'esprit d'initiative, d'ouverture et d'innovation qu'il a su fonder et encourager au sein du Laboratoire d'Anthropologie de l'Université de Bordeaux I, nous ont permis de donner au problème de la colonne vertébrale fossile une direction différente et nouvelle. Son travail pour faire du Laboratoire un lieu d'ouverture, où pouvaient se rencontrer Professeurs et Etudiants de toutes nationalités, et aussi de disciplines autres que celles trop strictement liées à la problématique de l'évolution humaine par le biais, en particulier, de thèses doctorales et de projets de coopération internationaux, ont été d'un grand enrichissement personnel. Pour l'ensemble non exhaustif de ces raisons, qu'il reçoive ici tous nos remerciements.

La Profesora María Dolores GARRALDA, de la Facultad de Biología de la Universidad Complutense de Madrid, ha extendido su acogida mucho más allá de lo estrictamente formal durante nuestra estancia en el Departamento. Por ello, por los medios de trabajo que ha puesto a nuestra disposición y, de una manera general, por toda la confianza que nos ha dado, abriéndonos todas las puertas, deseamos expresarle nuestro más sincero agradecimiento. Le agradecemos también aceptar evaluar este trabajo.

Le Professeur Winfried HENKE, de la Johannes Gutenberg Universität à Mainz, a accepté de juger ce travail, qu'il en soit très sincèrement remercié.

El Profesor ARENSBURG, del departamento de Anatomía de la Universidad de Tel Aviv, nos ha permitido estudiar con toda facilidad la columna vertebral de Kebara. Deseamos expresarle nuestros más sinceros agradecimientos.

Par le soutien qu'il nous a apporté, par sa disponibilité et ses conseils, Le Docteur Jaroslav BRUZEK, Directeur de Recherches au C.N.R.S., a une part non négligeable dans la réalisation de ce travail. Qu'il en trouve ici l'expression de notre reconnaissance.

Nous tenons à remercier Monsieur Henri DUDAY, Directeur de Recherches au CNRS, et actuel Directeur du Laboratoire d'Anthropologie de Bordeaux, pour nous avoir permis d'y réaliser grande partie de ce travail et avoir mis à notre disposition certains outils de traitement statistique.

Madame Theya MOLLESON, du *British Museum of Natural History*, nous a offert toutes les facilités de travail lors de l'étude de la collection de la *Christ Church de Spitalfields*, et a rendu notre séjour le plus agréable et intéressant qui puisse être. Qu'il nous soit permis de lui adresser nos remerciements les plus sincères, et notre reconnaissance pour la sympathie qu'elle nous a témoigné.

Nous remercions le Professeur André LANGANEY, Directeur du Musée de l'Homme de Paris, de nous avoir permis d'étudier les restes vertébraux appartenant aux collections de cette institution. Monsieur Jean-Jacques HUBLIN, Directeur de Recherches au CNRS, et Monsieur Mario CHECH, du Musée de l'Homme, ont grandement facilité ce travail; qu'ils en soient remerciés sincèrement.

Les enseignements de paléopathologie du Professeur Eric CRUBEZY, de Toulouse, nous ont permis une approche plus rigoureuse de la morphologie vertébrale. Les restes vertébraux des inhumations du cimetière Saint Etienne à Toulouse, qu'il a mis à notre disposition, nous ont donné une première approche de la morphologie normale et pathologique des vertèbres. Qu'il reçoive ici tous nos remerciements.

Nous tenons à exprimer tous nos plus sincères remerciements à Francis HOUËT, ingénieur au CNRS (Laboratoire d'Anthropologie de Bordeaux). Grâce à sa disponibilité désintéressée, son attention discrète, ses compétences synergiques en anthropologie, statistiques et informatique, et sa passion échevellée pour le service gratuit, mes nombreuses questions ont toujours trouvé réponse.

Un grand merci, qui ne peut malheureusement s'étendre pour chacun d'eux à l'espace d'un paragraphe mérité, à tous les membres et visiteurs du Laboratoire d'Anthropologie de Bordeaux qui, d'une manière ou d'une autre, ont pris part à ce travail: par un conseil, une piste, un service, un coup de pouce, quelle que soit la forme qu'ils aient pu revêtir: Marielle BESSOU, Valérie BOCQUENTIN, Valérie BOULEFROY, Jacqueline CATHALAA, Patrice COURTAUD, Christine COUTURE, Hélène DAVID, Mustapha ELYAQTINE, Martin FRIESS, Danièle GALLARDO, Dominique GAMBIER, Jean-Gabriel et Chantale GAUTHIER, Monique GEORGIE, Anne HAMBÜCKEN, René LARCHE, Tona MAJO, Bruno MAUREILLE, Pascal MURAIL, Takashi NARA, Hans Christian PETERSEN, Bertrand SAINT SEVIN, Pascal SELIER, Patricia SEMELIER, Maguy SEURIN, Anne-Marie TILLIER, Christine VERNA, Núria VILLENA et Al Mati MAGHRAS, Régine WORTMANN, Valéry ZEYTOUN.

Thanks are due to the team of the Department of Anatomy at Tel Aviv University, for their kindness and their efforts to make my staying easier, with special thanks to Professor Yoël RAK, to Professor Israël HERSCHKOVITZ, and to Avishag GINZBURG. Tohdah!

I am grateful to Robert CRUZINSKY and to Profesor Christopher STRINGER, from the British Museum of Natural History, for their unconditional help in the access to the collections of the Museum.

Por su muy buena acogida en el Departamento, por sus múltiples ayudas, por sus muestras de simpatía que hacen cada día más agradable, y que el tiempo cunda más, quisiéramos expresar nuestro sincero agradecimiento a muchas personas de la sección de Antropología de la Universidad Complutense de Madrid, lamentando no poder dedicar a cada uno una merecida atención personal: Teresa CABELLOS ;-) Lara CALLEJO, Luis FRAILE, Vicente FUSTER, Jose Luis GOMEZ :-) Francisco LUNA, María Dolores MARRODÁN y Norberto CAÑAS, Pedro Manuel GORDÓN, María Soledad MESA, Eduardo MORENO, Arantxa MUÑOZ, Carmen RUIZ.

Gracias a Carolina AUSIN por su repaso de las traducciones al inglés.

Muchas gracias a Soledad LAGE, por su buen humor cotidiano y por hacer nos el lugar de trabajo más agradable.

Agradecimientos reduplicados a Carlos ALONSO RECIO y Felix BARBADO MURGA por su simpatía en el trabajo, y muchas gracias al equipo de abajo: Jose Antonio GIMENEZ GIMENEZ, Angela RODRIGUEZ, Mercedes GONZALEZ GRACIA, Juan Manuel BARROSO MONJAS.

Thank you very much to Yaël MARDOR, for her crazy, blind, and kind efficiency, y muchas gracias a Jesus CABELLO, por la parte española de esta simpatía.

Un grand merci à Issa SARIE, de l'Institute of Islamic Archaeology, qui a fait d'une courte visite à Jérusalem et Ramallah un souvenir chaleureux.

I wish to thank Valery CALESS and CALESS Juniors, for their help, their kindness and their hospitality, et un grand merci à Lucette BIDEAU REY pour son aide.

A tous les amis qui ont eu l'occasion de souffrir cette entreprise ou d'y participer, qu'ils prennent ce travail comme un petit cadeau: Gérard BOUTRUCHE, Rita, Jean-Marc et François-Marie SALOMEZ, Christophe CASTEL, Hélène DAVID, Henry et Louissette DILLEMAN, Mustapha ELYAQTINE, Carina GUNNARSON, Olivier LEFRANÇOIS, Jean-Pierre, Françoise et Xavier HERNANDEZ MARTINEZ, Christian et Marie-Claude SOUCHON, Jacqueline TREVU, avec une note toute spéciale pour Pierre-Marie, Bénédicte, Florentin et Baptiste SALOMEZ, pour leur fidélité à toute épreuve.

Amigos y compañeros, Esmeralda GALINDO, Antonio GARCIA, y Carmenita, Cristina SANTOS, Quique DURAN, y Esperancita, Carmen María SAA, Miguel Angel ATOCHE, Carlos MARCILLA, Julia MARQUEZ, Miguel Angel ESTEBALA, Jaime y Gabriel, Pilar MORENO, Sylvio TESTA, y Marco, por tres razones esenciales os doy las gracias ;-) por vuestra acogida sin la cual todo esto no hubiera llegado a su fin, por vuestro buen humor, y por esos buenos momentos.

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans l'aide de ma famille, sa compréhension, son soutien ...et sa patience. Que ce volume soit l'occasion d'une reconnaissance un peu plus officielle et publique, et une manière de remerciement pour chacun d'entre eux, en particulier pour Annie CLEUVENOT, Marie-Thérèse CLEUVENOT, Marguerite LOBGEAIS, Yvonne LOBGEAIS, Solange ROUGE, Odile et André SEMIOND.

Sin la hospitalidad, la generosidad y el cariño de Alonso CASAS, Francisca FLORES, Raquel CASAS y Jose CAMARA, la parte madrileña de este trabajo no habría visto la luz. Que este párrafo, tan desproporcionadamente pequeño, sea una muestra de todo mi agradecimiento.

A Pepa, alias la Doctora y Profesora María José CASAS, por su constante apoyo moral y logístico, su ánimo, sus sugerencias, revisiones y traducciones, y bueno, por todo, unas "muchísimas gracias" demasiado breves.

A Françoise, ma mère, pour son soutien, sa confiance, son écoute et son travail, des remerciements → ∞, mais qui ne seront jamais assez justes.

CONTRIBUTIONS

Notre première collaboration avec l'équipe de Madame le Professeur María Dolores Garralda, du *Departamento de Biología Animal I, Facultad de Biología de la Universidad Complutense de Madrid*, s'est déroulée dans le cadre du programme d'échange de l'**Union Européenne: HUMAN CAPITAL AND MOBILITY** n°CHRX-CT93-0193.

L'étude du squelette néandertalien de Kébara, conservé au Laboratoire d'Anatomie de l'Université de Tel-Aviv, a été financée grâce à une bourse de la **FONDATION IRENE LEVI SALA CARE**.

Une partie de ce travail a été réalisé dans le cadre d'une bourse *post graduados* du **MINISTERIO DE ASUNTOS EXTERIORES, ESPAÑA**, attribuée par l'intermédiaire du Ministère des Affaires Etrangères Français.

Le programme Statistica v. 5 a été mis à notre disposition par l'**UMR 5809 du CNRS**.

Les programmes Microsoft Excel et Microsoft Word ont été mis à notre disposition par le **Laboratoire d'Anthropologie**, Université Bordeaux I.

La Professeur **María Dolores Garralda**, de l'Universidad Complutense de Madrid, a mis à notre disposition équipement informatique et matériel de mesure: pied à coulisse digital Sylvac 15cm, et connexion par fibre optique.

Nous tenons à étendre certains remerciements personnels déjà formulés aux institutions dont nous avons bénéficié des services:

Université Bordeaux I
Universidad Complutense de Madrid
British Museum of Natural History
Sackler School of Medicine, Tel Aviv University
Musée de l'Homme de Paris

« Suplico a Vuestra Merced reciba el pobre servicio de mano de quien lo hiciera más rico, si su poder y deseo se conformaran. Y pues Vuestra Merced escribe se le escriba y relate el caso por muy extenso, parecióme no tomalle por el medio, sino del principio, [...] porque consideren los que heredaron los nobles estados cuán poco se les debe, pues fortuna fue con ellos parcial, y cuanto más hicieron los que, siendoles contraria, con fuerza y maña remando, salieron a buen puerto. »

LA VIDA DE LAZARILLO DE TORMES

Anonyme, début deuxième moitié XVIème siècle
Edition de M. Bataillon, GF-Flammarion 1994.

RESUME

Une méthodologie originale est développée afin de reconstituer les courbures sagittales (CS) de la colonne vertébrale impliquées par la morphologie des vertèbres isolées. Le corps vertébral (CV) est défini comme un quadrilatère quelconque. Les quatre segments joignant un diamètre parasagittal d'une surface articulaire postérieure, au diamètre sagittal du CV, sont projetés dans le plan médian. L'espace intervertébral (EIV) déterminé par la morphologie de deux vertèbres adjacentes articulées, est déduit en mettant en contiguïté par le calcul leurs surfaces articulaires. Les quadrilatères représentant les CV sont empilés dans un repère cartésien afin d'étudier leur participation dans le dessin des CS. L'empilement alterné des quadrilatères représentant les CV et de ceux représentant les EIV permet d'étudier les CS impliquées par la morphologie des vertèbres. Ces profils sont décrits par les angulations calculées entre les segments dans la pile, et par une régression polynomiale qui leur est ajustée. Elle permet de calculer les localisations et valeurs des sommets, inflexions, maxima de courbure, et courbure en chaque point. Ces paramètres permettent une description statistique.

Le programme est appliqué à un échantillon subactuel. Plusieurs Néandertaliens sont comparés. Un dimorphisme sexuel net existe pour les CV. Les courbures successives sont dépendantes. La morphologie vertébrale contribue partiellement à la détermination des CS physiologiques. La variabilité rencontrée est comparable aux données physiologiques. La morphologie vertébrale n'intervient pas nécessairement dans la détermination des trois courbures. Les courbures des néandertaliens sont décrites. Les profils de Kébara et La Chapelle-aux-Saints ont une configuration nettement masculine et une lordose lombaire forte. Si les néandertaliens étudiés se situent dans la variabilité de l'échantillon actuel, des modalités particulières de la biomécanique de la charnière thoraco-lombaire sont envisageables.

SAGITTAL CURVATURES OF THE VERTEBRAL COLUMN IMPLIED BY THE MORPHOLOGY OF VERTEBRAE. DEVELOPMENT OF A NEW METHODOLOGY AND APPLICATION TO *HOMO SAPIENS*.

SUMMARY

An original methodology was developed in order to reconstruct the sagittal curvatures (SC) of the vertebral column (VC) implied by the morphology of the vertebrae. The shape of the vertebral body (VB) is defined precisely as an irregular quadrilateral. The four segments joining a parasagittal diameter of a posterior articular surface to the sagittal diameter of the vertebral body, are projected in the medial plane. The intervertebral space (IVS) determined by the morphology of two adjacent articulated vertebrae, is deduced when the two articular surfaces contiguity is mathematically restored. Quadrilaterals modelling VB can be stacked in a bivariate space in order to study the participation of these VB in the design of the SC. In the same manner, alternate stack of quadrilaterals modelling VB and of those modelling IVS allow the study of the SC implied only by vertebral morphology. Those profiles are described by the angles, in the stacks, between the segments defining vertebral levels, and by a polynomial regression fitted to the coordinates of the stack.

The methodology was programmed in Excel Macro language and applied to a sample of known sex and age. Neandertal are compared. Behaviour of angles and curvature variables are explained. A clear sexual dimorphism of VB is shown. Successive curvatures are dependent. Vertebral morphology partially contributes to the determination of physiological SC. Variability is in the same order as that of physiological data. Vertebral morphology does not necessarily determine three curvatures. Various curvatures in neandertal are accurately described. A clear male configuration of Kebara and La Chapelle-aux-Saints profiles is shown, as well as a strong lumbar lordosis. Studied neandertals are well within the sample variability, but different biomechanical patterns of the thoracolumbar level can be contemplated.

CURVATURAS SAGITALES DE LA COLUMNA VERTEBRAL IMPLICADAS POR LA MORFOLOGIA DE LAS VERTEBRAS. DESARROLLO DE UNA NUEVA METODOLOGIA Y APLICACION A *HOMO SAPIENS*.

RESUMEN

Hemos desarrollado una metodología original con el fin de reconstruir las curvaturas sagitales (CS) de la columna vertebral implicadas por la morfología de las vértebras aisladas. El cuerpo vertebral (CV) se ha definido como un cuadrilátero cualquiera. Los cuatro segmentos que unen un diámetro parasagital de una superficie articular posterior al diámetro sagital del CV, son proyectados en el plano medio. El espacio intervertebral (EIV) determinado por la morfología de dos vertebras articuladas es calculado poniendo en contigüidad sus superficies articulares. Los cuadriláteros de los cuerpos vertebrales son apilados en un sistema cartesiano para estudiar su participación en el diseño de las CS. El apilamiento alternado de los cuadriláteros que representan los CV y los EIV permite estudiar las CS implicadas por la morfología de las vértebras. Estos perfiles son descritos mediante los ángulos calculados entre segmentos, y mediante una regresión polinomial ajustada a las coordenadas de las pilas de cuadriláteros. La ecuación permite localizar y calcular los valores de los extremos, inflexiones, máximos de curvatura, y valor de la curvatura en cada punto. Asimismo, estos parámetros permiten una descripción estadística.

El programa ha sido aplicado a una muestra subactual. Varios neandertales se compararon. Existe un dimorfismo sexual de los CV. Las curvaturas son dependientes. La morfología vertebral contribuye parcialmente a las CS fisiológicas. La variabilidad es comparable a la deducida de los datos fisiológicos. La morfología vertebral no interviene necesariamente en la determinación de las tres curvaturas. Hemos descrito las curvaturas de los neandertales. Los perfiles de Kebara y La Chapelle-aux-Saints son claramente masculinos, con una lordosis lumbar fuerte. Si bien los neandertales estudiados se sitúan en la variabilidad actual, se puede contemplar la posibilidad de modalidades particulares de la biomecánica toraco-lumbar.

MOTS CLES: colonne vertébrale, courbure sagittale, régression polynomiale, évolution, variabilité, *Homo sapiens*, néandertalien.

KEY WORDS: vertebral column, sagittal curvature, polynomial regression, evolution, variability, *Homo sapiens*, neandertal.

PALABRAS CLAVES: columna vertebral, curvatura sagital, regresión polinomial, evolución, variabilidad, *Homo sapiens*, neandertal.

SOMMAIRE

1. Introduction	18
1.1. Histoire naturelle	18
1.2. Colonne vertébrale et bipédie	19
1.3. Courbures sagittales	22
1.4. Etudes de la colonne vertébrale	25
1.5. Méthodologie proposée	28
1. Introduction (English)	32
1. Introducción (Castellano)	44
2. Méthodologie	57
2.1. Forme du corps vertébral	57
2.2. Espace intervertébral déterminé par la morphologie vertébrale	61
2.3. Empilement des quadrilatères	77
2.4. Angles interceptant les segments rachidiens	82
2.5. Calcul d'un polynôme d'ajustement	87
3. Matériel d'étude	98
3.1. La collection	98
3.2. Sélection de l'échantillon	99
3.3. Composition de l'échantillon	104
3.4. Les néandertaliens	112
4. Résultats	125
4.1. Courbures rachidiennes impliquées par les corps vertébraux dans la collection de Spitalfields	125
4.2. Courbures sagittales déterminées par la forme des corps vertébraux et des espaces intervertébraux impliqués par la morphologie vertébrale	160
4.3. Variabilité générale des profils par sexe	197
5. Discussion	205
5.1. Modalités de participation des corps vertébraux dans la détermination des courbures sagittales	205
5.2. Implication de la morphologie vertébrale dans le déterminisme des courbures physiologiques, et problèmes d'interprétation	222
6. Application de la méthodologie aux profils vertébraux de néandertaliens. Résultats et discussion	240
6.1. Empilements	240
6.2. Comparaison des angulations, entre néandertaliens et par rapport à la variabilité actuelle	261
6.3. Comparaison des valeurs de courbure	269
7. Conclusions	277

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	4
CONTRIBUTIONS.....	6
RÉSUMÉ.....	8
SUMMARY.....	8
RESUMEN	9
MOTS CLÉS	9
SOMMAIRE.....	11
1. Introduction.....	18
1.1. Histoire naturelle.....	18
1.2. Colonne vertébrale et bipédie.....	19
1.2.1. Résistance mécanique.....	19
1.2.2. Mobilité.....	21
1.3. Courbures sagittales.....	22
1.3.1. Bipédie et fonctions de reproduction.....	22
1.3.2. Ontogénie	23
1.4. Etudes de la colonne vertébrale.....	25
1.4.1. Variabilité des segments vertébraux	25
1.4.2. La colonne vertébrale comme un tout	26
1.5. Méthodologie proposée	28
1.5.1. Principe.....	28
A. Forme des corps vertébraux et des espaces intervertébraux	28
B. Dédution et description du profil	29
1.5.2. Application	29
A. Homme actuel	29
B. Néandertaliens	29
1. Introduction (English).....	32
1. Introducción (Castellano).....	44

2.	Méthodologie	57
2.1.	Forme du corps vertébral	57
2.1.1.	Définition du quadrilatère et calcul des angles	59
2.1.2.	Définition des mesures sur les corps vertébraux	60
2.2.	Espace intervertébral déterminé par la morphologie vertébrale	61
2.2.1.	Principe de déduction de l'espace intervertébral	61
2.2.2.	Système des mesures permettant le calcul de l'espace intervertébral	61
2.2.3.	Nomenclature des distances et des angles	62
2.2.4.	Définition et prise des mesures	66
2.2.5.	Projection dans le plan sagittal médian	66
	A. Calcul des mesures en projection	66
	B. Détermination de la distance au plan médian	68
2.2.6.	Obtention du quadrilatère intervertébral	70
	A. Longueur des côtés antérieur et postérieur	70
	B. Localisation de la surface articulaire par rapport au plan des plateaux	71
	C. Calcul de la diagonale	71
	D. Calcul des angles du quadrilatère intervertébral	74
2.2.7.	Insertion d'un espace entre les articulaires postérieurs	74
2.3.	Empilement des quadrilatères	77
2.3.1.	Principe de l'empilement	77
2.3.2.	Méthode trigonométrique de l'empilement	78
	A. Descriptions des variables	79
	B. Calcul de la pile de quadrilatères	79
2.3.3.	Rotation de la pile et alignement sur l'axe des ordonnées	80
2.3.4.	Options d'exécution de l'empilement	80
2.4.	Angles interceptant les segments rachidiens	82
2.4.1.	Description	82
2.4.2.	Calcul	83
2.4.3.	Traitement statistique	83
	A. Angle moyen et valeur de r	84
	B. Signification de l'angle moyen	84
	C. Intervalle de confiance de l'angle moyen	84
	D. Déviation angulaire	85
	E. Comparaison des angles moyens de deux échantillons	85
	F. Représentation graphique	85
2.4.4.	Conclusion	86
2.5.	Calcul d'un polynôme d'ajustement	87
2.5.1.	Applications de l'ajustement polynomial au profil rachidien en Anthropologie	87
2.5.2.	Choix du degré du polynôme pour la description des courbures vertébrales impliquées par la morphologie osseuse	87
2.5.3.	Détermination des coefficients du polynôme	90
	A. Régression linéaire multiple	90
	B. Régression non linéaire	91
	C. Justification de la méthode employée	91

2.5.4.	Description du profil vertébral au moyen du polynôme.....	91
A.	Dimensions des profils	91
1)	Hauteurs	91
2)	Longueurs curvilignes	92
B.	Recherche des extrema	93
C.	Recherche des point d'inflexion	94
D.	Calcul des rayons de courbure	94
E.	Calcul de la courbure	95
2.5.5.	Variabilité des polynômes calculés	96

3. Matériel d'étude..... 98

3.1. La collection..... 98

3.2. Sélection de l'échantillon..... 99

3.2.1.	Maturité rachidienne.....	99
3.2.2.	Dégénérescence rachidienne	100
3.2.3.	Critères de sélection de l'échantillon.....	102

3.3. Composition de l'échantillon..... 104

3.3.1.	Cas de l' individu n°173	104
3.3.2.	Cas de l'individu n°254	106
3.3.3.	Echantillon retenu et quantité d'information	108
3.3.4.	Statistiques descriptives de l'échantillon.....	111

3.4. Les néandertaliens..... 112

3.4.1.	La Chapelle-aux-Saints.....	112
A.	Atlas et axis	112
B.	Série vertébrale continue cervico-thoracique	113
C.	Autres restes thoraciques	114
D.	Vertèbres lombaires	115
E.	Affections dégénératives	116
F.	Calculs possibles	117
3.4.2.	La Ferrassie 1.....	117
A.	Conservation	117
B.	Affections dégénératives	119
C.	Calculs possibles	119
3.4.3.	Le Régourdou.....	119
A.	Conservation	119
B.	Précision	120
C.	Calculs possibles	121
3.4.4.	Shanidar 2	121
3.4.5.	Kébara 2	121
A.	Pathologies	121
B.	Préservation des restes	122
C.	Calculs possibles	124

4.	Résultats	125
4.1.	Courbures rachidiennes impliquées par les corps vertébraux dans la collection de Spitalfields	125
4.1.1.	Traitement des données.....	127
	A. Quadrilatères représentant les corps vertébraux	127
	B. Piles des quadrilatères représentant les corps vertébraux	128
4.1.2.	Mesure des angles interceptant les profils rachidiens.....	130
	A. Angle décrit par les plateaux de chaque segment vertébral	130
	B. Angle interceptant chaque étage de la pile des corps vertébraux	135
4.1.3.	Description des profils au moyen des régressions polynomiales.....	137
	A. Dimensions des profils	137
	1) Calcul de la longueur curviligne	137
	2) Variabilité et différence entre les sexes	137
	B. Situation des extrema et valeurs des flèches aux extrema	138
	C. Points d'inflexion	139
	1) Détermination sur des profils partiels	140
	2) Choix des points d'inflexion significatifs	140
	3) Points d'inflexion au niveau cervico-thoracique	141
	4) Points d'inflexion au niveau thoraco-lombaire	141
	D. Maxima de courbure	142
	1) Isolation des maxima significatifs	142
	2) Description	143
	E. Présence et localisation des différents points remarquables	147
	1) Résultats	147
	2) Discussion	151
	F. Comparaison générale des courbures	152
	1) Lordoses lombaires	152
	2) Cyphoses	152
	3) Discussion	155
	G. Régressions polynomiales sur l'ensemble des points	155
4.2.	Courbures sagittales déterminées par la forme des corps vertébraux et des espaces intervertébraux impliqués par la morphologie vertébrale	160
4.2.1.	Aspect général des courbures.....	160
4.2.2.	Mesures des angles interceptant les segments vertébraux.....	165
	1) Etage cervical	165
	2) Etage thoracique	165
	3) Etage lombaire	165
4.2.3.	Calcul des polynômes	167
4.2.4.	Dimensions des profils.....	168
	A. Dimensions générales de C3 à L5	168
	B. Dimensions selon l'étage vertébral	169
4.2.5.	Etude des extrema	172
	A. Extremum négatif au niveau cervical	173
	B. Sommet de cyphose	173
	1) Description et comparaisons	173
	2) Interprétation	175
	C. Extremum lombaire	176
	D. Valeurs absolues	177
	E. Sommets de courbure impliqués par la morphologie osseuse des corps vertébraux et des espaces intervertébraux, résumé	178
4.2.6.	Points d'inflexion	179
	A. Points d'inflexion significatifs	179
	B. Expression de la position de l'inflexion	179
	C. Schémas observés	180
	D. Points d'inflexion déterminant une lordose lombaire	181
	E. Points d'inflexion déterminant une lordose cervicale	182
	F. Étude des points d'inflexion selon les extrema présents	182
	G. Flèche à l'extremum de la cyphose selon le schéma des extrema et des inflexions	185
	H. Points d'inflexions déterminés par la morphologie vertébrale - synthèse	186

4.2.7.	Maxima de courbure	188
A.	Description qualitative des schémas rencontrés dans la disposition des maxima de courbure	188
1)	Maxima de courbure sur la cyphose	188
2)	Lordoses lombaire et cervicale	188
B.	Description quantitative	189
1)	Remarques d'ordre méthodologique	189
2)	Maxima de courbure sur la lordose lombaire.	190
3)	Maxima de courbure sur la cyphose	191
a.	Cyphoses à deux maxima	191
b.	Cyphose présentant un maximum unique	191
4)	Maxima sur la lordose cervicale	194
C.	Maxima de courbure - synthèse	195
4.2.8.	Caractérisation des profils par la présence et la localisation des points remarquables, synthèse	196
4.3.	Variabilité générale des profils par sexe	197
4.3.1.	Représentation conjointe des profils par sexe et par étage en mesures réelles	197
4.3.2.	Comparaison des régressions générales par sexe et par étage, en pourcentage de la hauteur	198
A.	Etage cervico-thoracique	199
B.	Etage thoraco-lombaire	200
C.	Etage thoracique	201
D.	Mesures des courbures, restrictions	201
E.	Synthèse	201
5.	Discussion	205
5.1.	Modalités de participation des corps vertébraux dans la détermination des courbures sagittales	205
5.1.1.	Indice des hauteurs sagittales du corps vertébral	205
5.1.2.	Transition au niveau thoraco-lombaire	206
5.1.3.	Variation de l'indice des hauteurs et des angulations à l'étage cervical	209
5.1.4.	Différences entre les sexes	209
5.1.5.	Constance des modèles de variation selon les segments	210
5.1.6.	Etude des variations déterminées dans d'autres échantillons	211
5.1.7.	Variation de l'indice des hauteurs à l'étage lombaire	214
5.1.8.	Dimorphisme sexuel et contraintes mécaniques au niveau des derniers segments lombaires et du sacrum	217
5.1.9.	Conclusion	220
5.2.	Implication de la morphologie vertébrale dans le déterminisme des courbures physiologiques, et problèmes d'interprétation	222
5.2.1.	Angulations réciproques des vertèbres - données radiographiques détaillées (STAGNARA, 1985)	222
5.2.2.	Problèmes d'interprétation des mesures d'angulation	223
A.	Variation des valeurs d'angulation selon le segment	223
B.	Relation entre angulation et courbure	226
C.	Angulation et courbure, exemple	229
5.2.3.	Angulation et courbure, interprétation des mesures radiographiques	229
5.2.4.	Comparaison des angulations dans les profils déterminés par la seule morphologie vertébrale et dans les profils physiologiques en radiographie	230
A.	Espace intervertébral physiologique mesuré sur radiographies	231
B.	Participation conjointe de chaque type d'élément et des différents segments	234
C.	Dimorphisme sexuel	237
5.2.5.	Implication de la morphologie vertébrale dans la détermination des courbures, résumé	237

6.	Application de la méthodologie aux profils vertébraux de néandertaliens. Résultats et discussion	240
6.1.	Empilements	240
6.1.1.	Kébara 2.....	240
	A. Empilement des corps vertébraux	240
	B. Angles interceptant la pile des corps vertébraux	240
	C. Régression polynomiale et points remarquables	243
	D. Comparaison à l'échantillon de référence	245
	E. Profil impliqué par les corps vertébraux et par les espaces intervertébraux déterminés par la morphologie vertébrale	247
	F. Profil impliqué par les corps vertébraux et par les espaces intervertébraux à l'étage cervical	250
6.1.2.	Régourdou.....	252
	A. Corps vertébraux de l'étage cervical	252
	B. Autres corps vertébraux	253
	C. Empilement alterné	254
6.1.3.	Shanidar 2.....	255
	A. Corps vertébraux	255
	B. Corps vertébral et espace intervertébral de C3	256
6.1.4.	La Chapelle-aux-Saints	256
	A. Corps vertébraux	256
	B. Empilements alternés	257
6.1.5.	La Ferrassie 1	259
	A. Corps vertébraux	259
	B. Empilements alternés	260
6.2.	Comparaison des angulations, entre néandertaliens et par rapport à la variabilité actuelle	261
6.2.1.	Empilements des corps vertébraux	261
	A. Angulations des empilements calculables	261
	B. Angulation des corps vertébraux de Kébara	263
6.2.2.	Empilements alternés.....	266
6.3.	Comparaison des valeurs de courbure	269
6.3.1.	Courbures dans les empilements des corps vertébraux.....	269
6.3.2.	Courbures dans les empilements alternés	273
	A. Etage cervical	273
	B. Etage thoracique supérieur	276
	C. Etages thoracique inférieur et lombaire	276
7.	Conclusions	277
	BIBLIOGRAPHIE	289

1. Introduction

« [...] »

As the progenitors of man became more and more erect, with their hands and arms more and more modified for prehension and other purposes, with their feet and legs at the same time modified for firm support and progression, endless other changes of structures would have been necessary. The Pelvis would have had to be made broader, the spine peculiarly curved and the head fixed in an altered position, and all these changes have been attained by man. [...] »

Charles DARWIN

The Descent of Man, 1871

Publié par John Murray, Londres

1.1. Histoire naturelle

La structure et les fonctions de la colonne vertébrale de l'homme sont le résultat d'un long processus évolutif dont les premières déterminations sont rencontrées très loin dans la phylogénie. Une différenciation fonctionnelle antéro-postérieure de l'organisme est acquise dès les chordés primitifs (KUMMER, 1991). Elle correspond à la centralisation du système nerveux à l'extrémité antérieure, à proximité de la plupart d'organes des sens fondamentaux, et aussi à une différenciation biomécanique de la fonction motrice, assurée par l'extrémité caudale. Ceci implique la mise en place sur cet axe cranio-caudal d'une structure possédant une rigidité suffisante pour assurer la transmission des efforts musculaires, mais assez souple pour développer dans un plan coronal des oscillations générant une force motrice (GRACOVETSKY, 1990): la chorde. Ce plan général d'organisation avec différenciation céphalo-caudale des fonctions respectivement sensorielle et motrice sera conservé par l'ensemble des vertébrés.

Par cette différenciation, le support axial acquerra aussi une fonction de soutien et de protection des organes permettant la transmission et la diffusion, à l'ensemble de l'organisme, des informations traitées à l'extrémité céphalique. Un compromis entre la protection du système nerveux centrale et la préservation de la mobilité est permis par le développement d'unités solides répétées sur sa longueur: les vertèbres. Leur développement implique la division transversale de l'axe, réalisé en intégrant le squelette osseux dans le processus embryologique de métamérisation (KENNETH, 1990).

Cette segmentation en somites réorganisés en vertèbres et disques intervertébraux (O'RAHILLY et MEYER, 1979 ; MÜLLER et O'RAHILLY, 1986 ; CHRIST et WILTING, 1992 ; BARNES, 1994 ; MCLAIN *et al.*, 1995) permet un nouveau compromis entre la mobilité requise par la fonction de locomotion et la résistance nécessaire à une plus grande efficacité mécanique. L'augmentation des contraintes implique d'une part une surface d'insertion plus forte pour les unités motrices. D'autre part, l'efficacité des efforts musculaires et ligamentaires (leurs moments) peut être accrue par des bras de leviers (processus transverses et épineux: SLIJPER, 1946 ; NÄGERL *et al.*, 1990 ; JIANG *et al.*, 1995) qui mettent aussi en jeu la résistance physique du support. Cette segmentation pourra se

mettre en place sur la base du processus ontogénique de la métamérisation par lequel s'effectue en particulier la formation des unités musculaires (myotomes).

Chez les tétrapodes, la localisation postérieure de la fonction motrice sera conservée (KUMMER, 1968, 1991 ; VAN INGEN SCHENAU et BOBBERT, 1993). La ceinture pelvienne assure la continuité physique osseuse et la transmission des contraintes entre le support osseux axial et les membres postérieurs propulseurs (DELMAS, 1970 ; YAMAZAKI *et al.*, 1979). La ceinture scapulaire, plus labile, sans contact osseux direct avec la colonne vertébrale, assume pour les membres antérieurs un rôle semblable, mais essentiellement de soutien statique et dynamique.

Avec l'Homme, la prise en charge exclusive des deux fonctions de propulsion et de soutien par les membres inférieurs (WEIDENREICH, 1947b ; ISHIDA, 1968 ; KUMMER, 1965, 1975, 1968, 1991), à partir d'un remodelage des structures anatomiques quadrupèdes des mammifères, se développe donc sur la base phylogénétiquement plus ancienne encore des premiers chordés.

1.2. Colonne vertébrale et bipédie

Ce ne sont donc pas des fonctions différentes qui sont acquises avec la bipédie, mais les modalités selon lesquelles elles s'exercent sont modifiées. Cette « réutilisation » de structures préexistantes (GOULD, 1997) implique une série de *remaniements* anatomiques qui doivent permettre d'assurer les tâches de soutien et de propulsion dans un nouvel environnement de contraintes biomécaniques. La structure axiale de protection de la moelle épinière, de support et d'attachement des unités motrices musculaires, et de transmission des forces qu'elles exercent, passe de l'orientation horizontale selon laquelle elle a évolué depuis les premiers chordés et qu'elle a conservée avec les vertébrés terrestres - en s'adaptant à la force de gravité appliquée perpendiculairement à elle (SLIJPER, 1946 ; HUROV, 1987 ; PREUSCHOFT, 1990) - à une orientation verticale, dans la même direction que la pesanteur et que les forces de réaction générées par la bipédie (KUMMER, 1975 ; ZIHLMAN et BRUNKER, 1979).

Dans le cadre de ces nouvelles modalités biomécaniques, le problème d'une solution optimale entre résistance et mobilité est donc une nouvelle fois posé (LEMAIRE, 1986 ; PUTZ et MÜLLER-GERBL, 1996).

1.2.1. Résistance mécanique

La position verticale de la colonne vertébrale la confronte à des contraintes axiales plus importantes, impliquées par la prise en charge du poids du corps au dessus de la ceinture pelvienne, croissante par sommation dans le sens cranio-caudal. Le contrôle des oscillations sagittales et latérales générées par le maintien du tronc en position d'équilibre instable (WINTER *et al.*, 1990 ; CRISCO et KESNER et ALLUM, 1990 ; PANJABI, 1990 ; PREUSCHOFT, 1990 ; YAMAZAKI, 1990 ; PREUSCHOFT et RECKNAGEL, 1991) semble impliquer une moindre mobilité de la colonne. Le maintien de la posture érigée et le déplacement antérieur du centre de gravité lors de la flexion du tronc supposent des insertions ligamentaires et tendineuses suffisamment fortes (THOMAS, 1959 ; MORRIS *et al.*, 1961 ; GRACOVETSKY *et al.*, 1981 ; ANDERSSON et WINTERS, 1990 ; MACINTOSH *et al.*, 1993 ; MANDELL *et al.*, 1993 ; ROSS *et al.*, 1993 ; TAN *et al.*, 1993 ; PAQUET *et al.*, 1994 ; KUMAR *et al.*, 1995a, 1995b), avec des moments musculaires importants (KUMMER, 1965 ; SENEGAS, 1990b). Ces trois facteurs vont dans le sens d'une augmentation de rigidité et de résistance de la colonne vertébrale. Celles-ci est assurée principalement par l'augmentation de la taille et de la robustesse des vertèbres dans le sens cranio-caudal (SANDERS, 1998 ; SANDERS et BODENBENDER, 1994).

La modification de la forme et de la robustesse des segments vertébraux de manière à pouvoir supporter et transmettre les contraintes - augmentation cranio-caudale de la surface des plateaux

vertébraux, de celle des surfaces articulaires postérieures, augmentation de la robustesse des pédicules et des processus (DAVIS, 1961 ; PAL et ROTAL, 1986, 1996 ; PAL, 1987, 1989 ; BRIAND et BONNEL, 1994) - ne semble pas impliquer une altération profonde des processus de développement. Elle peut être conçue comme le résultat de processus microévolutifs graduels au long desquels la répartition de la masse osseuse (DELMAS et PINEAU, 1962 ; BALDET, 1993) et la morphologie sont progressivement modifiées (ERLEBACHER *et al.*, 1995). Par ailleurs, l'influence directe des contraintes mécaniques durant l'ontogénèse (BAGNALL *et al.*, 1977b) et même lorsque le développement est achevé (NIKITYUK, 1968 ; LISOWSKI, 1968 ; ERLEBACHER *et al.*, 1995), contribuera à déterminer la quantité de masse osseuse et surtout son organisation dans la vertèbre. Principalement étudiée au niveau des os longs (TSCHANTZ et RUTISHAUSER, 1967 ; LANYON et RUBIN, 1984) et modélisée au niveau des sternèbres (CARTER *et al.*, 1991), le remodelage de l'architecture osseuse par l'influence directe des contraintes mécaniques (ALEXANDRE, 1993 ; LANYON, 1993 ; MARCELLI, 1993) est observable au niveau des segments vertébraux dans l'organisation fine de l'os trabéculaire (GROTE et AMLING, 1995 ; PASSUTI *et al.*, 1995 ; HEGGENESS et DOHERTY, 1997).

La colonne vertébrale est une structure composite alternant éléments rigides et souples. L'étage lombaire, qui forme l'axe de soutien d'un système en équilibre instable, est particulièrement mobile dans le plan sagittal (KIPPERS et PARKER, 1989 ; VAN NAMEREN *et al.*, 1990 ; MACINTOSH *et al.*, 1993 ; WESSEL *et al.*, 1994 ; KUMAR *et al.*, 1995a ; ENSINK *et al.*, 1996 ; SAUR *et al.*, 1996 ; WILKE *et al.*, 1998). Sa longueur relative et le nombre des éléments qui le composent devraient donc être des paramètres essentiels dans le maintien de cet équilibre, et l'on attend, *a priori*, que ces valeurs soient fortement déterminées et donc peu variables. A l'ancienneté du processus de segmentation vertébrale dans la phylogénèse (FIENBERG, 1987 ; DOLLE *et al.*, 1993 ; BURKE *et al.*, 1995 ; ERLEBACHER *et al.*, 1995) semble en effet correspondre son déterminisme embryologique précoce: l'information relative à la position sur l'axe cranio-caudal est acquise par les cellules de la plaque mésodermique avant même la différenciation des somites (CHRIST et WILTING, 1992). A partir de ceux-ci se mettra en place la morphologie vertébrale selon la situation du segment définie sur l'axe cranio-caudal (NOBACK et ROBERTSON, 1951 ; PEACOCK, 1951 ; BAGNALL *et al.*, 1977a, 1977b, 1979 ; O'RAHILLY et MEYER, 1979 ; O'RAHILLY *et al.*, 1980 ; MÜLLER et O'RAHILLY, 1986 ; KESSEL, 1992 ; CHRIST et WILTING, 1992 ; MCLAIN *et al.*, 1995).

Or, bien qu'elle soit fixée tôt dans l'ontogénèse, la formule vertébrale thoraco-lombo-sacrée est cependant très variable chez les Hominoïdes dont l'homme lui-même, et cette variabilité affecte particulièrement la transition lombo-sacrée. La formule modale des cinq vertèbres lombaires est présente chez 90% des individus environ, proportion qui varie selon l'échantillonnage et la population (SCHULTZ, 1961, DELMAS, *s.d.*, 1951, 1956, 1958 ; ABITBOL, 1987b). KEITH (1923b) avançait l'hypothèse d'une tendance à la réduction de l'étage lombaire chez l'Homme, en rapport avec la bipédie, sans toutefois expliciter les modalités de cette réduction. De fait, celle-ci n'est pas confirmée par les mesures de sa longueur, qu'elles soient exprimées en proportion du rachis présacré ou de la longueur du tronc, telles que les rapporte SCHULTZ (1961).

Ce dernier avait par ailleurs souligné les différences rencontrées entre auteurs, dans les critères morphologiques de décompte des vertèbres sacrées et lombaires, en relation avec la fréquence élevée des "anomalies" transitionnelles: "sacralisations" et "lombalisations" (LEDOUBLE, 1912 ; FICK, 1933, 1936 ; FISCHER, 1933 ; DUPARC, 1942). Devant ce même problème, ABITBOL (1987b) définit quatre stades de "sacralisation" selon l'étendue de la synostose du segment avec le corps du sacrum, l'existence de *processus* ayant une morphologie d'aileron sacré, et l'articulation avec l'*Os ilium*. Il conclut à une "tendance" à la sacralisation dans le groupe des *Hominoidea*. Cette tendance est mise en relation avec la biomécanique de la bipédie: augmentation de la stabilité lombaire par la diminution du nombre de diarthroses (KUBEIN-MESSENBURG *et al.*, 1990 ; NÄGERL *et al.*, 1990, 1992), et augmentation de la surface d'insertion musculaire sur le sacrum. L'interprétation est donc

finaliste. Elle est aussi fortement critiquable: les fréquences des quatre stades de sacralisation sont considérées au travers d'un unique groupe incluant les quatre genres d'Hominoïdes non-humains, alors que ceux-ci ont des formules lombo-sacrées différentes et très variables à l'intérieur de chaque espèce. De plus, une supposée "tendance" à la sacralisation reste en contradiction avec la distribution statistique des formules rachidiennes chez les Hominoïdes eux-mêmes et chez les autres primates (SCHULTZ, 1961), et une relation avec le mode de locomotion, même lâche, ne peut être dégagée (FLEAGLE, 1999).

Il existe bien une réduction de la colonne lombaire chez les *Hominoidea* en comparaison avec la Super-famille des *Cercopithecoidea*. La proportionnalité de l'étage lombaire passe d'un ordre de grandeur de 40 % chez ces derniers à 25 à 30 % chez les *Hominoidea*, et le mode statistique du nombre de segments passe de 7 chez les *Cercopithecoidea*, à 3, 4 ou 5 chez les *Hominoidea*. Une représentation longitudinale plus faible de la colonne lombaire dans ce groupe était peut-être, *en soi*, plus favorable à la mise en place de la station érigée. Au niveau d'une division systématique basse et d'une bifurcation phylogénique ancienne, elle constituerait donc en ce sens une *préadaptation*. Cependant, alors que la 24^{ème} vertèbre est incorporée au sacrum chez *Pongo*, *Gorilla* et *Pan*, elle reste libre chez *Homo*, dont l'étage lombaire est aussi, en proportion du rachis présacré, plus long de 10 %. Cela constituerait une tendance inverse de celle observée entre Hominoïdes et Cercopithécoïdes, comme le note KEITH (1923b) lui-même, peut-être liée à la bipédie, mais sans pouvoir établir une relation stricte vis-à-vis du mode de locomotion, puisque *Hylobates* présente les même formule et proportionnalité lombaires que l'Homme...

En définitive, il reste difficile de dégager une tendance adaptative claire, tant pour la longueur relative de la colonne lombaire que pour le nombre de segments qui la composent, bien que ces paramètres semblent fondamentaux pour la stabilité rachidienne. Il paraît assez surprenant que deux paramètres aussi simples, susceptibles d'affecter la biomécanique d'un organe fondamental pour la bipédie, laquelle représente une modification majeure pour l'ensemble de l'organisme, ne trouvent pas d'interprétation univoque en termes d'adaptation. Ce paradoxe trouverait une explication, aussi bien dans les limitations imposées par les contraintes du développement (DEVILLERS, 1989), que dans la nécessité d'une solution optimale entre résistance mécanique et mobilité (PUTZ et MÜLLER-GERBL, 1996). De manière analogue, un autre compromis doit nécessairement exister entre formule vertébrale, lordose lombaire et stabilité rachidienne (BONNEL et MOREL, 1990 ; PRIVAT *et al.*, 1990 ; TROISIER, 1992 ; PANJABI *et al.*, 1995 ; ROY-CAMILLE, 1994 ; SAILLANT *et al.*, 1994 ; HANDAL et SELBY, 1995 ; STOKES, 1995 ; HUSSON *et al.*, 1995 ; LAVASTE et ROBIN, 1995): l'expression d'une courbure moyenne satisfaisante pour répondre aux contraintes mécaniques de l'érection du tronc doit être déterminée par un nombre suffisant d'éléments vertébraux pour que l'angulation réciproque entre segments adjacents reste dans des valeurs qui ne compromettent pas la stabilité rachidienne. Une analyse fine des inflexions sagittales et de l'ampleur des courbures du profil rachidien permettra de mettre en évidence cette relation.

1.2.2. Mobilité

La posture et la locomotion bipèdes impliquent donc une augmentation de la résistance mécanique de la colonne. En contre partie, d'autres contraintes et, paradoxalement, parfois les mêmes, mettent en jeu la mobilité de la colonne vertébrale.

Il s'agit tout d'abord de la mobilité du support des organes sensoriels, qui doit aussi permettre de les maintenir dans une position stable au cours de la locomotion (GRACOVETSKY, 1990 ; VAN NAMEREN *et al.*, 1990 ; WINTERS et PELES, 1990 ; GRAF *et al.*, 1995). La résistance aux contraintes en direction axiale est fortement augmentée si la structure de soutien est élastique et courbe (KAPANDJI, 1974 ; GRACOVETSKY, 1990). L'ensemble constitué par les vertèbres, les

disques intervertébraux, et les systèmes musculaire et ligamentaire a, dans les deux directions, une fonction de dissipation des contraintes et d'amortissement des chocs (EVANS, 1968 ; STAGNARA, 1985 ; WINTERS et PELES, 1990): il supporte le poids de la tête, des membres supérieurs et du tronc lui même, et absorbe les forces de réaction du support lors de la marche.

A la cyphose thoracique « primaire » fortement déterminée par son implication dans la fonction de respiration étant donné son rôle de soutien de la cage thoracique, s'ajoutent donc deux courbures opposées: la lordose cervicale qui assure en outre la mobilité et la stabilité du support des organes de la vue et de l'ouïe - stéréognosie - et du système nerveux central (WINTERS et PELES, 1990 ; KESHNER et ALLUM, 1990) ; et la lordose lombaire qui assumera une grande part de la mobilité sagittale du tronc et d'absorption des contraintes mécaniques (DAVIS, 1961 ; GRACOVETSKY *et al.*, 1981 ; ADAMS et HUTTON, 1983 ; ADAMS *et al.*, 1987 ; STOKES *et al.*, 1987 ; PANJABI *et al.*, 1994).

Ces courbures ont en outre un véritable rôle moteur dans la locomotion bipède (GRACOVETSKY, 1990). Leur présence convertit par « découplage » (PANJABI *et al.*, 1989, 1993, 1994) les effets des forces appliquées sur les os coxaux par le mouvement des membres inférieurs, et sur les processus vertébraux par les muscles du dos - c'est-à-dire des moments de rotation - en mouvements de translation verticale. Ceux-ci contribueront à générer l'oscillation sur un axe vertical du centre de gravité pendant la marche (D'ANGELI-CHEVASSUT et GAVIRA, 1994), oscillation qui permettra l'acquisition d'énergie potentielle convertible en énergie cinétique, donc en mouvement (CAVAGNA *et al.*, 1977).

Les trois courbures de la colonne libre sont complétées par la cyphose sacrée, rigide, mais dont la forme apparaît fortement déterminée par les contraintes mécaniques lors de l'ontogénie même (ABITBOL, 1989). Dans sa détermination interviennent en grande partie les efforts de tension des ligaments stabilisateurs de la nutation du sacrum entre les os coxaux (*Ll. sacrospinale* et *sacro tubérale*), impliqués par son inclinaison; cette dernière - interprétable comme une plésiomorphie (SCHULTZ, 1960) - étant elle même déterminante pour la forme de la lordose lombaire (LEGAYE *et al.*, 1993).

1.3. Courbures sagittales

1.3.1. Bipédie et fonctions de reproduction

La stabilité de la colonne vertébrale, sa résistance mécanique et sa mobilité ne sont pas les seules contraintes, parfois antagonistes, dans le cadre desquelles doivent se mettre en place les remaniements morphologiques liés à la bipédie. Cette dernière modifie aussi certaines modalités anatomiques en relation avec les fonctions de reproduction. Par le biais de la « sélection sexuelle » comme de la « sélection naturelle », la reproduction différentielle est, en dernier lieu, le moyen par lequel agissent les processus évolutifs (MAYR, 1963 ; LLOYD et GOULD, 1993). L'implication topographique de la partie caudale de la colonne vertébrale dans la cavité abdomino-pelvienne a conduit à questionner la signification adaptative des courbures sagittales lombo-sacrées pour la gestation et la parturition. Ce problème revêt un intérêt tout particulier au vu des modalités spécifiques de ces fonctions chez *Homo sapiens*. L'augmentation de la durée de gestation prolonge les contraintes mécaniques impliquées par l'occupation de la cavité abdomino-pelvienne et par le déplacement du centre de gravité qui a lieu en direction antérieure dans la position bipède (BUKOVI... *et al.*, 1993). La position basse du sacrum implique la participation d'une structure osseuse peu déformable dans la constitution du canal pelvi-génital (TAGUE et LOVEJOY, 1986). Les diamètres craniens acquis par le fœtus à terme, élevés relativement à ceux des détroits pelviens (SCHULTZ, 1949), mettent donc fortement en jeu l'intégrité de ces détroits (ABITBOL, 1989). Il existe une pression de sélection vis-à-vis de la morphologie pelvienne (ROSENBERG, 1992), donc de l'orientation et de la courbure du sacrum, et par conséquent de celle de la lordose lombaire à laquelle elle est très fortement corrélée (ABITBOL, 1987a ; LEGAYE *et al.*, 1993). Plusieurs travaux

semblent cependant indiquer la prévalence des contraintes mécaniques liées à la bipédie dans la détermination de la morphologie pelvienne et sacro-lombaire (LEUTENEGGER, 1974 ; ABITBOL, 1987a, 1987b, 1987c, 1988a, 1989).

Il existe donc un certain antagonisme entre les nécessités biomécaniques imposées par la bipédie et celles requises par les fonctions de reproduction. Cet antagonisme se manifeste en particulier par le développement de pathologies lombaires lors de la gestation (BUKOVI... *et al.*, 1993) et par les atteintes à l'intégrité du bassin osseux lors de la parturition (ABITBOL, 1989, ROSENBERG, 1992). Par ailleurs, les données paléontologiques documentent, indirectement, l'antériorité des contraintes liées à la mise en place de la locomotion bipède sur celles correspondant à l'augmentation du volume cranien (WEIDENREICH, 1947b ; LOVEJOY et HEIPLE, 1972 ; LEUTENEGGER, 1972, 1974, 1982, 1987 ; LOVEJOY *et al.*, 1974, 1978, 1975 ; SIGMON, 1975 ; MCHENRY et CORRUCINI, 1976 ; ZIHLMAN, 1978 ; LEAKEY et HAYE, 1979 ; BEHRENSMEYER et LAPORTE, 1981 ; CHARTERIS *et al.*, 1981 ; JUNGERS, 1982 ; STERN et SUSMAN, 1983 ; TAGUE et LOVEJOY, 1986). Le volume céphalique impose donc des contraintes importantes de format à une anatomie des détroits pelviens mise en place dans le cadre d'une bipédie déjà acquise (LEUTENEGGER, 1982 ; ABITBOL, 1987c ; TREVATHAN, 1988 ; ROSENBERG, 1992).

Chez les Mammifères en général, la courbure lombaire bien sûr, mais aussi la courbure sacrée, présentent une relative plasticité. Cette plasticité ne permet qu'une adaptation imparfaite aux conditions de la gestation et de la parturition chez l'Homme (BUKOVI... *et al.*, 1993). Pourtant, elle est suffisante pour que la morphologie de ces deux courbures soit modifiée lorsqu'on impose à des quadrupèdes une posture érigée (NATHAN *et al.*, 1964) ou une locomotion bipède (PREUSCHOFT *et al.*, 1988 ; SLIJPER, 1946). Ces deux principaux arguments - la plasticité des courbures lombosacrées et leur adaptation imparfaite aux fonctions de reproduction - ont conduit à rejeter le rôle obstétrique de la courbure lombaire et de l'inclinaison sacrée (ABITBOL, 1989 ; ROSENBERG, 1992). Les corrélations successives mises en évidence entre la projection du centre de gravité du tronc, l'inclinaison sacrée, la lordose lombaire (ABITBOL, 1987a ; AMONOO-KUOFI, 1992) puis la cyphose thoracique (LEGAYE *et al.*, 1993) ; l'importance fondamentale de la position du centre de masse pour l'équilibre de la bipédie (KUMMER, 1968, 1991 ; TARDIEU, 1991 ; PREUSCHOFT et WITTE, 1991) ; et la valeur fonctionnelle des courbures sagittales dans la biomécanique de celle-ci, appuient donc très fortement la prépondérance de la posture et la locomotion bipèdes comme facteurs essentiels dans le déterminisme évolutif des courbures sagittales de la colonne vertébrale, et donc un relatif antagonisme vis-à-vis des fonctions de reproduction.

Enfin, et de façon plus générale et plus spéculative, les modalités anatomiques de la bipédie pourraient avoir d'autres implications plus profondes, bien que plus indirectes, dans les fonctions de reproduction et pour « les processus de l'homínisation ». En effet, depuis Charles DARWIN (1871) puis Friedrich ENGELS (1876), le rôle moteur de la station érigée dans l'encéphalisation a été avancé sous différentes hypothèses, peut-être par le biais d'un développement des capacités manipulatives, mais certainement accompagné de la modification des relations sociales au sein du groupe, nécessaires à la prolongation de la période d'apprentissage (HEWES, 1961 ; JOLLY, 1970 ; PIVETEAU, 1973 ; ZIHLMAN et TANNER, 1978 ; LOVEJOY, 1981 ; LAZAR, 1986 ; ROSE, 1991 ; JABLONSKY et CHAPLIN, 1993).

1.3.2. Ontogénie

C'est en effet dans le contexte d'un déterminisme essentiellement fonctionnel que l'ontogénie des courbures sagittales de la colonne vertébrale a le plus souvent été expliquée. Il existe peu de données sur leur mise en place au cours du développement. Il est classiquement considéré que l'embryon et le fœtus ne présentent que la courbure dite "primaire", correspondant à « la cyphose des quadrupèdes » et qui deviendra la cyphose thoracique (PATURET, 1951 ; DELMAS, 1970 ; GRAY,

1977 ; O'RAHILLY, 1980 ; MCLAIN *et al.*, 1995). La lordose cervicale serait la première des courbures secondaires à être acquise, et correspondrait à un développement de la motricité du cou suffisant pour permettre l'extension de la colonne cervicale. La lordose lombaire se formerait seulement à partir de 3 ans environ avec l'acquisition progressive de la marche chez l'enfant (LAZENNEC, 1995). Le déterminisme des courbures sagittales "secondaires" est donc interprété comme étant essentiellement mécanique, en tous les cas secondairement mécanique, puisque la motricité censée les déterminer doit être permise par des fonctions neuromotrices et une maturité du système musculo-squelettique préalables. La description d'une inversion de courbure cervicale chez les quadrupèdes, et d'une lordose lombaire (SLIJPER, 1946 ; SCHULTZ, 1961 ; ABITBOL, 1987a), même si elles sont faiblement développées, relativisent cependant l'idée d'une lordose dont le déterminisme serait trop strictement lié à la posture érigée. En relativisant l'analogie phylogénétique, l'idée *a priori* d'une ontogénie secondaire des lordoses cervicale et lombaire perd un peu de sa pertinence.

Plusieurs travaux décrivent en effet l'existence de lordoses chez le fœtus (BAGNALL *et al.*, 1977 ; O'RAHILLY et MEYER, 1979 ; MED, 1980 ; DELMAS et PINEAU, 1986 ; CHANSIGAUD *et al.*, 1986). DELMAS et PINEAU quantifient les courbures de la colonne vertébrale sur des coupes sagittales de 9 embryons conservées dans le formol. Ces embryons ont des tailles de 8 mm à 30 mm (distance vertex-coccyx), qui correspondent à des âges allant approximativement de moins de 7 semaines de gestation à 9.9 semaines (CARRERA, 1997). Ils notent l'évolution du profil qui présente deux minima de courbure cranial et caudal, la courbure entre ces minima diminuant progressivement avec la croissance de l'embryon. A partir du stade 20 mm (environ 9 semaines), le profil n'est plus caractérisé que par un seul minimum situé dans sa moitié craniale, et les courbures continuent de décroître. Enfin, au stade 30 mm (près de 10 semaines), les courbures des extrémités des profils ont encore diminué et le polynôme qui permet de les quantifier décrit deux points d'inflexion, cranial et caudal. Si la colonne vertébrale est globalement concave antérieurement, elle présenterait donc, vers 10 semaines de gestation environ, deux inversions de courbures, cervicale et lombaire. MED (1980), en complément d'une étude sur le développement prénatal des processus articulaires vertébraux, observe en effet la présence de lordoses cervicales déjà dessinées chez des embryons de 74 mm et 94 mm (environ 13.5 et 15.3 semaines) et d'une lordose lombaire chez un fœtus de 144 mm (plus de 18 semaines). Par ailleurs, CHANSIGAUD et collaborateurs mettent très clairement en évidence, par échotomographie, la présence d'une lordose cervicale chez le fœtus. A la 12^{ème} semaine d'aménorrhée, elle est présente dans tous les cas observés (n=12). La fréquence décroît à partir de la classe 21^{ème}-24^{ème} semaines, où elle est de 90% (n=12), et cette décroissance se poursuit avec la grossesse. Les courbures des lordoses qui continuent d'être observées décroissent aussi avec le temps de gestation (CHANSIGAUD *et al.*, 1986). Des lordoses cervicales "dynamiques" sont aussi observées en fin de grossesse, elles sont déterminées par le relèvement temporaire de la tête par le fœtus. Ces résultats sont concordants avec ceux obtenus par BAGNALL et collaborateurs (1977a) à partir de radiographies de 195 fœtus de 8 à 23 semaines conservés dans le formol, et chez lesquels une lordose cervicale est observée dans 83 % des cas. L'explication la plus probable de la disparition progressive de la lordose cervicale chez le fœtus semble être l'augmentation de sa taille relativement à celle de la cavité abdominale. CHANSIGAUD et collaborateurs (1986) évoquent aussi l'augmentation du poids de la tête. Cette hypothèse n'est pas à exclure¹, mais elle semble plus pertinente pour expliquer la manifestation tardive de la lordose cervicale chez l'enfant. Le principal facteur qui doit permettre son expression est alors l'acquisition d'un système musculaire de la tête et

¹ L'existence d'une corrélation entre des phénomènes ne signifie pas qu'il doit exister entre eux un lien de causalité. CHANSIGAUD et coll. (1986) ont noté une diminution de la proportion des fœtus manifestant une lordose cervicale en fonction du nombre de semaines de gestation. Le volume de la tête augmente lui aussi avec le développement du fœtus (CARRERA *et al.*, 1997). Il y a donc nécessairement une corrélation entre ces deux données, mais avant tout parce qu'elles sont toutes les deux fonction du temps.

cou suffisamment puissant pour compenser l'action de la pesanteur sur la tête, qui depuis la naissance n'est plus équilibrée par la poussée d'Archimède dans le fluide amniotique (BAGNALL *et al.*, 1977a).

Si l'apparition des courbures physiologiques est liée à la mise en place de comportements moteurs comme le relèvement de la tête et la marche (BAGNALL *et al.*, 1977a ; LAZENNEC, 1995), leur déterminisme semble être plus complexe car les courbures sont déjà exprimées chez l'embryon. En particulier, il apparaît difficile d'évoquer un lien de causalité qui unisse de façon univoque l'ontogénie de la bipédie et la lordose lombaire, et par lequel le premier phénomène serait un déterminant direct du second. Si l'acquisition d'un système musculaire suffisamment performant est nécessaire pour que le déterminisme des lordoses puisse s'exprimer, de la même manière, la possibilité de développer caudalement une inversion de la courbure sagittale doit être, très probablement, un prérequis à l'ontogénie de la bipédie.

1.4. Etudes de la colonne vertébrale

Quelle que soit la correspondance qui existe entre leur apparition dans l'ontogénie et leur détermination dans la phylogénie, l'implication évolutive des courbures sagittales de la colonne vertébrale apparaît fondamentale pour la bipédie. Leur existence a donc été recherchée à l'origine de la lignée humaine.

La conservation des restes semble être le premier écueil à l'étude de cette adaptation anatomique fondamentale. Elle est sans doute la principale cause du nombre relativement faible de travaux de Paléanthropologie qui ont porté sur l'évolution de la colonne vertébrale dans la lignée humaine, et plus encore, qui aient approché le problème des courbures vertébrales.

On sait, en définitive, relativement peu de chose sur la variabilité de la colonne vertébrale, dans le genre *Homo* (BOULE, 1911 ; MCCOWN et KEITH, 1939 ; STEWART, 1960 ; PIVETEAU, 1965 ; HEIM, 1976 ; ARENSBURG et NATHAN, 1980 ; TRINKAUS, 1983 ; BROWN *et al.*, 1985 ; ARENSBURG, 1991 ; LATIMER et WARD, 1993 ; MCLARNON, 1993). La conservation incomplète n'est pas la seule difficulté. La variabilité de la colonne vertébrale ne peut se réduire à celle des pièces qui la composent et doit aussi être traitée comme un tout. Mais de cette *entité* anatomique, les processus de la fossilisation n'ont conservé que certains de ses éléments constitutifs: des vertèbres isolées dont les rapports topographiques exacts de contiguïté articulaire ont disparu. Le problème de la variabilité des courbures sagittales dans l'évolution humaine est donc un de ceux dont le "filtre de la fossilisation" compromet particulièrement la résolution.

1.4.1. Variabilité des segments vertébraux

La variabilité des segments vertébraux (FRANCIS, 1955 ; DAVIS, 1959 ; TULSI, 1971 ; AMONOO-KUOFI *et al.*, 1990 ; SCOLES *et al.*, 1988 ; WANG et SHIH, 1992 ; PANJABI, 1991a, 1991b, 1992 ; KOTHE *et al.*, 1996 ; MIYAKE *et al.*, 1996) et celle des courbures sagittales (depuis FICK, 1934 et DELMAS, 1951) a été largement étudiée dans un contexte médical: les seuils statistiques de la variabilité normale marquent aussi les bornes du domaine de la pathologie (bien que la relation contraire ne soit pas nécessairement exacte). La publication d'études morphologiques classiques est ainsi justifiée dans le cadre de publications à orientation clinique. Elles apportent de nouvelles données susceptibles de circonscrire, par exemple, et le plus fréquemment, l'étiologie de la lombalgie, de la spondylolyse ou, de manière plus générale, les mécanismes de l'instabilité vertébrale. La connaissance de la variabilité normale et de ses limites est aussi une nécessité dans le cadre de la pratique chirurgicale (GILAD et NISSAN, 1986 ; PANJABI *et al.*, 1991a, 1991b, 1992 ; DOHERTY, 1995 ; HAWN-MO, 1995 ; RONGMING XU, 1995 ; SCOLES *et al.*, 1988 ; WANG, 1992). L'intérêt est par nécessité porté sur chaque segment isolément quand il s'agit d'études ostéologiques. Lorsque le support est le résultat d'une technique d'imagerie appliquée sur le vivant,

ou simplement celui d'une mesure directe externe, la forme générale de la colonne peut être considérée.

Peu de travaux ont cependant tenté d'établir des relations entre les segments osseux considérés isolément, du point de vue de leur morphologie ou simplement de leur position (BRYANT *et al.*, 1989; SICARD et GAGNON, 1993), et l'ensemble de la colonne vertébrale dans le plan sagittal (MILNE et LAUDER, 1974, 1976 ; STOKES *et al.*, 1987). Les difficultés qui s'opposent au recueil des deux types de données, nécessaires pour étudier la relation entre les courbures vertébrales physiologiques et la morphologie osseuse, sont évidentes. Il semble en effet pratiquement impossible de disposer de données radiographiques ou biométriques complètes (sur un échantillon non-pathologique), et d'effectuer sur le même échantillon des mesures ostéologiques. Si la première approche est réalisable, la seconde doit se contenter de données moins précises et plus difficilement accessibles, basées sur des techniques d'imagerie.

Un des objectifs souvent recherchés par ces travaux réalisés dans un contexte médical est l'établissement d'une norme, applicable à la fabrication d'ostéosynthèses et d'appareillage de fixation postérieure (ZINDRICK *et al.*, 1987 ; EBRAHEIM, *et al.* 1996; AHARINEJAD *et al.*, 1990 ;WILKE *et al.*, 1997). Plutôt qu'une description fine de la variabilité existante, l'approche est d'une certaine manière typologique, puisqu'il s'agit de limiter la fourchette de variation à un petit nombre de classes qui seront considérées pour la production industrielle. De plus, les effectifs analysés sont souvent faibles. L'information documentée est loin d'être négligeable mais le sens de l'étude est inverse à celui qui est recherché.

1.4.2. La colonne vertébrale comme un tout

La colonne vertébrale a par ailleurs été étudiée comme un ensemble fonctionnel avec les structures qui l'entourent, *in vivo* (KUMAR *et al.*, 1995a, 1995b) ou *in vitro* (DEAN *et al.*, 1991 ; PANJABI *et al.*, 1994), et particulièrement les courbures vertébrales (FICK, 1934). Différentes techniques de relevés externes (KNUSSMAN, et FINKE, 1980 ; MILNE et LAUDER, 1976) ou de radiographie (WANGERMEZ, 1968 ; VIGNES, 1982 ; STAGNARA, 1985 ; BERNHARDT et BRIDWELL, 1989 ; POLLY *et al.*, 1996) permettent ainsi d'étudier la variabilité des courbures sagittales, avec des protocoles orientés, soit vers la mise en évidence des comportements dynamiques ou cinématiques (ROY *et al.*, 1994), soit une description de sa variabilité posturale ou statique (FICK, 1934 ; STOKES *et al.*, 1987 ; BLACK *et al.*, 1996). Plusieurs de ces travaux ont fait usage de la régression polynomiale pour quantifier les profils étudiés (PINEAU et MOLLARD, 1983 ; KNUSSMAN, et FINKE, 1980 ; MILLER et SKOGLAND, 1982).

Des développements informatiques élaborés ont été réalisés dans le but de décrire les comportements la colonne vertébrale en tout ou partie, en s'abstrayant du support osseux physique et de ses connexions (DIETRICH *et al.*, 1990 ; LAVASTE *et al.*, 1991 ; PORTIER *et al.*, 1993 ; SHARMA *et al.*, 1995 ; DESCRIMES *et al.*, 1995 ; HARRISON *et al.*, 1996). Il s'agit de travaux de modélisation. Leur direction est proche de celle suivie par ceux qui doivent intéresser l'industrie médicale. L'objectif est d'obtenir une adéquation entre modèle et réalité afin d'effectuer une description des comportements mécaniques de la colonne vertébrale avec un contrôle total des paramètres (SHIRADZI-ADL, 1993). La base est là-encore une réduction de la variabilité vers un type anatomique moyen censé représenter le mieux possible le comportement "normal" de la colonne vertébrale. Les éléments anatomiques osseux ne sont pas tous représentés (ASPDEN, 1989; DESCRIMES *et al.*, 1985) et les relations anatomiques entre ces éléments sont souvent simplifiées. La limite à cette abstraction correspond, de manière récurrente, à celle d'une correspondance acceptable entre le comportement du modèle et celui déjà documenté chez le vivant, censée, en retour, valider le modèle. Dans un même ordre d'idées, des modélisations mécaniques sont aussi tentées où les différents éléments constitutifs du segment vertébral sont substitués par des matériaux de synthèse (PANJABI *et al.*,

1989, 1994 ; PANJABI et AUXLAND, 1994). D'autres études de comportement *in vitro* portent sur les éléments anatomiques réels après dissection (SKALLI *et al.*, 1995).

Ces différents niveaux d'abstraction - isolation d'éléments anatomiques, substitution des matériaux ou modélisation mathématique - n'apportent pratiquement aucune donnée sur la variabilité interindividuelle des courbures vertébrales. De ce fait, les résultats de ces travaux sont souvent négligés par ceux situés dans le champ de l'Anthropologie. Ils permettent pourtant les approches les plus rigoureuses des comportements mécaniques d'ensemble, et des fonctions impliquées par les caractéristiques de forme et de composition des éléments constitutifs de la colonne. Il semble donc difficile d'ignorer les données qu'ils fournissent quand la discussion porte précisément sur le comportement de la colonne vertébrale dans son ensemble sur la base des vertèbres isolées.

C'est en effet ce but, plus ou moins explicitement avoué selon la difficulté de l'entreprise (c'est-à-dire souvent de l'état fragmentaire des restes), qui est poursuivi dans les travaux anthropologiques portant sur les vertèbres fossiles. Face à la complexité du problème semble cependant avoir prévalu le souci de disposer d'une méthode simple, dont la définition précise puisse bénéficier d'un consensus général, dont la reproductibilité soit bonne, et qui autorise l'étude d'échantillons numériquement forts. Les définitions de la hauteur sagittale antérieure (M1) et la hauteur sagittale postérieure (M2) données par R. MARTIN (1928) ont donc été les plus utilisées pour la caractérisation de la morphologie vertébrale dans ce plan. A. DELMAS (1956) fait remonter à D. J. CUNNINGHAM (1886) le calcul très simple de l'indice de la hauteur postérieure du corps vertébral rapportée à sa hauteur antérieure. La non-conservation du disque intervertébral a suffi, semble-t-il (si l'on excepte certains travaux de médecine légale établissant la corrélation de ses dimensions avec celles du corps vertébral), à éluder la question de l'espace intervertébral des travaux anthropologiques. Un contre-exemple est cependant donné par l'étude de la colonne vertébrale de Kébara dont les rapports articulaires de deux vertèbres adjacentes, conservés par les processus taphonomiques, ont permis la fossilisation de l'espace intervertébral physiologique (ARENSBURG, 1991).

Renouvelant les critiques déjà formulées par BOOKSTEIN (1947, 1982, 1983) envers les méthodes quantitatives de la craniologie "classique", KRUKOFF (1978) souligne l'inadéquation du système de mesures à l'objectif recherché, qui est une description univoque de la forme. Les points craniométriques définissent des segments qui ne sont pas contigus, c'est-à-dire dont les extrémités ne sont pas confondues, et qui ne sont pas non plus définis dans un système spatial de référence. Une information sur la forme est apportée par le rapport de deux de ces longueurs. Cette information reste cependant très incomplète puisque les segments peuvent *a priori* être disposés l'un par rapport à l'autre d'une infinité de façons différentes sans que la valeur de l'indice en soit changée. L'auteur utilise l'exemple un peu plus élaboré d'un système de quatre « cordes » définies par quatre points craniométriques et liées entre elles, deux par deux, par un point commun. L'ajout d'un cinquième élément, corde supplémentaire ou angle, est nécessaire et suffisant pour fixer la forme du quadrilatère.

L'indice des hauteurs, antérieure et postérieure, qui est classiquement employé pour la description du corps vertébral (DUPARC, 1942 ; ROSE, 1975 ; JANKAUSKAS, 1993 ; ERICKSEN, 1976, 1978a, 1978b ; MAFART, 1980 ; MILNE et LAUDER, 1974, 1976) est donc soumis à ces mêmes limitations. Son utilisation pour estimer l'angulation réciproque des plateaux vertébraux implique l'hypothèse *a priori* (et toujours implicitement assumée) que la forme du corps vertébral dans le plan sagittal est celle d'un trapèze. Cette approximation n'est pas valable à l'étage cervical, et pour

que la justification soit complète, il doit s'agir de plus, aux étages thoracique et lombaire, d'un trapèze isocèle ; ce qui n'est certainement pas vrai pour les derniers segments lombaires et qui n'est pas démontré pour les autres segments.

Par ailleurs, la constitution d'un système de segments décrivant plus précisément le quadrilatère n'est pas envisageable à partir des mesures de R. MARTIN puisque les points définissant les diamètres sagittaux supérieur et inférieur ne sont pas les mêmes que ceux à partir desquels sont mesurés les hauteurs (BRÄUER, 1988). Un système de mesures basé sur seulement quatre points et qui décrive réellement un quadrilatère doit donc être défini. Un segment en diagonale achèvera de décrire la forme de ce quadrilatère.

1.5. Méthodologie proposée

1.5.1. Principe

Un nombre limité de travaux ont tenté de mettre en relation la morphologie vertébrale ou la position relative des éléments vertébraux et l'allure des courbures sagittales, parfois évaluées par de simples mesures angulaires (STOKES *et al.*, 1987 ; KIPPERS et PARKER, 1989 ; SICARD et GAGNON, 1993), ou de manière plus précise en utilisant des ajustements polynomiaux (courbes de spline: BRYANT *et al.*, 1989).

La méthodologie proposée ici tente d'effectuer ce lien entre la morphologie des vertèbres considérées séparément et les courbures sagittales que cette morphologie implique. Elle est basée simplement sur la détermination de la forme des deux éléments qui vont participer à ces courbures: le corps vertébral et l'espace intervertébral impliqué par la morphologie des vertèbres adjacentes. Les deux éléments seront représentés par des quadrilatères qui pourront être empilés par le calcul. La pile des quadrilatères dessinera donc le profil qui résulte de la participation de la forme de chacun de tous ces éléments. Les coordonnées de la pile dans le plan permettront de faire une analyse quantitative du profil, et donc d'effectuer une analyse statistique des paramètres qui le décrivent. Ceux-ci sont calculés au moyen d'une régression polynomiale.

A. Forme des corps vertébraux et des espaces intervertébraux

Pour prendre en compte la forme exacte du contour du corps vertébral considéré comme un quadrilatère, cinq mesures angulaires et/ou linéaires sont nécessaires. A partir de quatre points dans le plan sagittal, sur les listels vertébraux, sont mesurés les quatre côtés du quadrilatère et une de ses diagonales. Ces mesures permettent de calculer les angles du quadrilatère.

L'espace intervertébral déterminé par la morphologie de deux vertèbres adjacentes est déduit de la manière suivante. Considérons la face supérieure d'une vertèbre. Dans un plan parasagittal est choisi un diamètre de la surface articulaire postérieure. Les quatre distances issues des extrémités de ce segment jusqu'aux points antérieurs et postérieurs du plateau vertébral sont mesurées. Il est fait de même sur la face inférieure de la vertèbre du segment sus-jacent (plateau inférieur et surface articulaire inférieure). Pour chaque vertèbre, le diamètre de la surface articulaire, les quatre mesures prises depuis la surface articulaire jusqu'au plateau, et celle du diamètre du plateau, définissent la position du diamètre de la surface articulaire par rapport à celui du plateau.

La distance au plan sagittal médian est déterminée par approximations successives jusqu'à atteindre la précision souhaitée. Pour chaque vertèbre, le diamètre de la surface articulaire et les quatre segments jusqu'au plateau sont projetés sur le plan médian. Lorsque les diamètres des surfaces articulaires des deux vertèbres adjacentes sont confondus, les huit autres segments permettent de déduire l'espace exact laissé entre les deux diamètres des plateaux. Cet espace est alors, de la même façon que le corps vertébral, traité comme un quadrilatère quelconque dont les côtés antérieurs et postérieurs et une diagonale sont déduits par le calcul. En outre, un espace peut

être inséré entre les deux diamètres représentant les surfaces articulaires postérieures afin de corriger l'absence des éléments de la capsule articulaire interposés entre elles.

B. Dédution et description du profil

Les quadrilatères représentant les corps vertébraux et ceux représentant les espaces intervertébraux peuvent ensuite être empilés par le calcul. Les angles existant entre les quadrilatères dans la pile sont calculables: ceux mesurés entre les limites de chaque étage permettent une première caractérisation du profil. Aux coordonnées des quadrilatères dans le plan, tels qu'ils sont situés dans la pile, est ensuite ajustée une fonction polynomiale. A partir de son équation sont déduits des paramètres intéressants pour décrire d'une manière quantitative le profil: longueur développée, extrema, points d'inflexion, valeur de la courbure en chaque point, et maxima de courbure.

Les paramètres statistiques peuvent ensuite être calculés pour ces données. Ils permettront de définir la variabilité de l'échantillon, d'induire celle de la population, de comparer les sexes, et de situer dans cette variabilité des individus supplémentaires.

1.5.2. Application

A. Homme actuel

Afin d'obtenir une première description de la variabilité des courbures sagittales impliquées par la morphologie vertébrale, la méthode a été appliquée à un échantillon subséquentiel non pathologique (selon des critères d'observation macroscopique) d'âge et sexe connu, d'origine archéologique: il a été sélectionné à partir de la collection de *Spitalfields* conservée au *British Museum of Natural History* à Londres (MOLLESON *et al.*, 1993).

La méthode permet de n'empiler que quelques segments si tous ne sont pas conservés, et de n'empiler que les corps vertébraux, ou alternativement les corps vertébraux et les espaces intervertébraux. Elle est donc utilisable dans les conditions d'une étude Paléoanthropologique sur des restes incomplets et sur les seuls corps vertébraux si les arcs sont absents ou trop fragmentaires. Elle a été appliquée aux restes vertébraux de plusieurs néandertaliens.

B. Néandertaliens

L'idée d'une systématique linéaire du règne animal, manifestant tout au long de la « *scala naturae* » une progression continue (MASON, 1984 ; MAYR, 1989 ; TASSY, 1991), couronnée, selon l'interprétation finaliste correspondante, par l'espèce humaine dans sa forme actuelle, fut d'une certaine manière le cadre heuristique dans lequel s'interprétèrent, bien après sa disparition comme schéma explicatif général de la diversité zoologique, les restes fossiles de l'Homme de Néandertal (WEIDENREICH, 1943, 1947a, 1947b ; CLARK HOWELL, 1957 ; PIVETEAU, 1983). Ceux-ci furent considérés comme les représentants d'une phase intermédiaire, « Paléanthropienne » selon KEITH, de l'hominisation (HRDLIČKA, 1927 cité par SPENCER et SMITH, 1981 ; VALLOIS, 1954 ; ŠKERLJ, 1960 ; HOWELLS, 1974 ; TRINKAUS et SHIPMAN, 1993). Dans ce contexte, les restes vertébraux du squelette de La Chapelle-aux-Saints furent interprétés par M. BOULE en 1911 comme appartenant à un hominidé dont l'attitude ne pouvait être totalement érigée et dont la colonne vertébrale ne pouvait donc montrer de lordoses cervicale et lombaire prononcées. Cette interprétation a depuis été largement contestée et démantelée, les caractères vertébraux cités par Boule ne permettant pas de conclure à une morphologie fondamentalement différente de la morphologie actuelle, quant à son implication dans le déterminisme d'une lordose cervicale (TRINKAUS, 1985). L'argumentation, d'un côté comme de l'autre, a cependant porté sur des caractères morphologiques indirectement liés au

déterminisme de la courbure sagittale, tels que l'inclinaison et la bifidité des processus épineux ou, de manière plus convaincante, l'obliquité des processus articulaires (BOULE, 1911 ; ARAMBOURG, 1955 ; STRAUSS et CAVE, 1957 ; STEWART, 1962).

Les fonctions de soutien et de mobilité du crâne qui sont assumées par la colonne cervicale, et aussi de support des muscles cervicaux, laissent envisager cependant la possibilité de modalités différentes du profil sagittal impliquées par la morphologie vertébrale chez les Néandertaliens (SOLOW et TALGREN, 1976).

Au niveau des rapports avec la partie antérieure du tronc, la morphologie particulière de la région mastoïdienne (WALENSKY, 1964) qui, chez *Homo sapiens sapiens*, est impliquée dans l'équilibre de la tête et la flexion du cou à partir d'une position d'extension par l'action du *M. sternocleidomastoïdeus* (KRANTZ, 1963 ; ELYAQTINE, 1995, 1996, 1997), est un indice supplémentaire de très probables différences dans la statique et la dynamique de la sustentation de la tête chez le Néandertalien. La morphologie crânienne et faciale néandertalienne suppose des contraintes probablement plus élevées dans le maintien en équilibre instable de la tête (WINTERS et PELES, 1990). La projection du massif facial génère en effet des moments plus importants dans le sens de la flexion (VALLOIS, 1926 ; LEROI-GOURHAN, 1955 ; RAK, 1986 ; DEMES, 1987 ; TRINKAUS, 1987 ; NARA, 1994 ; MAUREILLE, 1994), et la morphologie de la région occipitale suggère des modalités différentes de sustentation de la tête (TRINKAUS et LEMAY, 1982 ; ANTON, 1994).

Dans ce contexte biomécanique, la mise en jeu de la colonne cervicale dans le plan sagittal peut être envisagée en particulier par l'implication des attaches postérieures du crâne et des vertèbres du cou faisant intervenir les paquets musculaires insérés sur les vertèbres cervicales et thoraciques hautes, et générant un moment de rotation dans le sens de l'extension (*Mm. longissimus capitis, longissimus cervicis, iliocostalis cervicis, splenius capitis, splenius cervicis, rotatores cervicis, multifidus, semispinalis capitis, semispinalis cervicis, spinalis cervicis, intertransversarii posterior cervicis, interspinales cervicis, rectus capitis*). Dans une moindre mesure, la colonne sera de la même manière impliquée dans la flexion du cou (*Mm. longus capitis, longus colli, rectus capitis anterior, scalenus*). Plus généralement, l'existence de contraintes mécaniques différentes est susceptible d'affecter l'amplitude et la forme de la lordose cervicale, de par le rôle que joue cette dernière, *en soi*, dans les phénomènes de « découplage » assurant la stabilité de la tête (GRACOVETSKY, 1990 ; WINTERS et PELES, 1990 ; PANJABI *et al.*, 1993). Cependant, la complexité de la biomécanique du système tête-cou et les questions que celle-ci continue de soulever chez l'Homme actuel pose déjà les limites d'une interprétation simple et univoque chez le Néandertalien.

Au niveau de la cyphose thoracique, la robustesse des côtes (TRINKAUS, 1983) est une autre donnée morphologique permettant d'attendre *a priori* des valeurs de cyphose qui pourraient différer de celles des populations actuelles (MORRIS *et al.*, 1961). La robustesse de l'ensemble du squelette et les insertions musculaires marquées suggèrent un poids corporel élevé et par conséquent une augmentation des contraintes mécaniques au niveau lombaire, où s'effectue la transmission du poids du tronc vers les membres inférieurs *via* la ceinture pelvienne (TWIESELNAN, 1961 ; LOVEJOY et TRINKAUS, 1980 ; TRINKAUS, 1983 ; SENUT, 1985 ; BEN-ITZHAK *et al.*, 1988 ; TRINKAUS *et al.*, 1991 ; HAMBUECKEN, 1993 ; RUFF *et al.*, 1993 ; VANDERMEERSCH et TRINKAUS, 1995). C'est, de fait, ce que semble indiquer la forte robustesse des vertèbres lombaires elles-mêmes (TRINKAUS, 1983). Là encore, on peut attendre *a priori* des implications différentes de la morphologie vertébrale dans la détermination de la lordose lombaire. Comme pour le système tête-cou, les contraintes mécaniques mises en jeu dans l'ensemble tronc-lombes sont susceptibles d'affecter la morphologie de la lordose par le biais des muscles extenseurs du tronc, en particulier ceux qui ont une insertion sur les vertèbres lombaires et thoraciques, et les côtes (*Mm. iliocostalis lumborum, iliocostalis thoracis, longissimus thoracis, spinalis thoracis, semispinalis thoracis, multifidus, rotatores, interspinales lumborum, intertransversarii lumborum*) ; et aussi par l'action des muscles fléchisseurs du tronc, qu'ils soient en rapport direct avec la colonne vertébrale (*Mm. quadratus*

lumborum, psoas), ou avec la paroi antérieure du tronc (*Mm. externus abdominis, obliquus internus abdominis, transversus abdominis, rectus abdominis*).

Enfin, de manière générale, il existe une corrélation entre les trois courbures sagittales de la colonne libre ainsi qu'une corrélation de celles-ci avec l'inclinaison sacrée (ABITBOL, 1987a ; LEGAYE *et al.*, 1993), ce qui implique la répercussion d'une différence éventuelle, affectant une partie du profil sagittal, à l'ensemble des courbures vertébrales. Par ailleurs, ces corrélations laissent envisager qu'à partir d'une description fine des courbures sagittales de la colonne vertébrale, les modalités de la bipédie et de l'équilibre du tronc puissent être perçues.

La méthodologie développée doit donc permettre d'aborder, d'un point de vue ostéologique, la variabilité des courbures sagittales de la colonne vertébrale chez l'Homme actuel, les implications de la morphologie des segments vertébraux dans leur détermination et, en particulier, d'étudier ces courbures sagittales chez les Néandertaliens.

« La colonne vertébrale des Néandertaliens n'a fait le plus souvent l'objet que d'études partielles. On sait combien les vertèbres sont des os fragiles, se fossilisant difficilement, aussi les paléontologistes ne disposent-ils que de pièces fragmentaires et rares. Peut-être aussi n'ont-ils pas toujours tenu un compte suffisant des travaux consacrés à la colonne vertébrale des hommes actuels. »

Jean PIVETEAU, 1965

1. Introduction (English)

1.1. *Natural History*

Structures and functions of the vertebral column in man are the result of a long evolutionary process whose first determinations are found far in the phylogeny. A functional anteroposterior differentiation of the organism is acquired since primitive chordates (KUMMER, 1991). This differentiation corresponds to the neural centralisation in the anterior end, close to fundamental sense organs, and also to the biomechanical differentiation of the motor function in the caudal end. This implies the development, along the craniocaudal axis, of a structure that is stiff enough to ensure muscular strain transmission. But this structure must also be flexible enough to develop oscillations in a coronal plane, which will generate a motor force (GRACOVETSKY, 1990): the chorde. This general organisation plane, with a cephalocaudal differentiation of the sensorial and motor functions will be conserved by the whole of the vertebrates.

By this differentiation, the axial support will also acquire the functions of carrying and protecting the organs, which will transmit and diffuse, to the whole of the organism, the information processed in the cephalic end. A compromise between protection of the central nervous system and the preservation of mobility is allowed by the development of solid repeated units along the length of the axis: the vertebrae. Their development implies transversal divisions of the axis, achieved by integration of the osseous skeleton in the embryological metamerisation process (KENNETH, 1990).

This segmentation in somites, reorganised in vertebrae and intervertebral discs (O'RAHILLY et MEYER, 1979 ; MÜLLER et O'RAHILLY, 1986 ; CHRIST et WILTING, 1992 ; BARNES, 1994 ; MCLAIN *et al.*, 1995), allows a new compromise between the mobility required by the locomotion function and the resistance which is necessary for a higher mechanical efficiency. The improvement of strains implies stronger insertion surfaces for motor units. Moreover, efficiency of ligaments and muscles - *i.e.* their couples - may be increased by lever arms (transverse and spinous processes: SLIJPER, 1946 ; NÄGERL *et al.*, 1990 ; JIANG *et al.*, 1995), which have also to cope with the physical support resistance. This segmentation will be achieved on the basis of the metamerisation ontogenetic process, already responsible for the formation of many structures like the muscular units (myotomes).

In tetrapods, the posterior localisation of the motor function will be preserved (KUMMER, 1968, 1991 ; VAN INGEN SCHENAU et BOBBERT, 1993). The pelvic girdle ensures physical osseous continuity and strain transmission between the osseous axial support and the propulsive posterior limbs (DELMAS, 1970 ; YAMAZAKI *et al.*, 1979). The weaker thoracic girdle, without direct osseous contact with the vertebral column, ensures a similar role for the anterior limbs, but essentially for static and dynamic carrying.

In the case of man, as both propulsive and carrying functions are assumed by inferior limbs (WEIDENREICH, 1947b ; ISHIDA, 1968 ; KUMMER, 1965, 1975, 1968, 1991) from a remodelling of the mammalian quadrupedal anatomic structures, they develop on the phylogenetically older basis of the first chordates.

1.2. *Vertebral column and bipedal gait*

Hence, different functions are not acquired with bipedal gait, but the patterns by which they are performed are modified. This new use of pre-existing structures (GOULD, 1997) implies various anatomical remodelling which must ensure carrying and propulsive tasks in a new biomechanical strain environment. The axial structure which protects the spinal chord, the support and attachment area of muscular motor units, and which transmits the forces these generate; changes its horizontal orientation (in which it has evolved since the first chordates, and which it has conserved with terrestrial vertebrates, adapting to the perpendicular gravitational force: SLIJPER, 1946 ; HUROV,

1987 ; PREUSCHOFT, 1990) for a vertical orientation, in the same direction than the gravity and than the reaction forces generated by bipedal gait (KUMMER, 1975 ; ZIHLMAN et BRUNKER, 1979).

In the frame of these new biomechanical patterns, the problem of an optimum solution between resistance and mobility is, once more, time formulated (LEMAIRE, 1986 ; PUTZ et MÜLLER-GERBL, 1996).

1.2.1. Mechanical resistance

The vertical position of the vertebral column implies more important axial strains, corresponding to the load of the body, supported above the pelvic girdle, and summed in the craniocaudal direction. Control of the sagittal and lateral oscillations generated by the unstable equilibrium of the trunk (WINTER *et al.*, 1990 ; CRISCO et KESNER et ALLUM, 1990 ; PANJABI, 1990 ; PREUSCHOFT, 1990 ; YAMAZAKI, 1990 ; PREUSCHOFT et RECKNAGEL, 1991) seems to imply a lesser mobility of the vertebral column. The erect posture and the anterior shift of the mass centre during trunk flexion, imply strong ligamentar and tendon insertions (THOMAS, 1959 ; MORRIS *et al.*, 1961 ; GRACOVETSKY *et al.*, 1981 ; ANDERSSON et WINTERS, 1990 ; MACINTOSH *et al.*, 1993 ; MANDELL *et al.*, 1993 ; ROSS *et al.*, 1993 ; TAN *et al.*, 1993 ; PAQUET *et al.*, 1994 ; KUMAR *et al.*, 1995a, 1995b), with important muscular moments (KUMMER, 1965 ; SÉNÉGAS, 1990b). These factors imply an increase of the stiffness and resistance of the vertebral column, assumed mainly by the increase in size and robustness in the craniocaudal direction (SANDERS, 1998 ; SANDERS et BODENBENDER, 1994).

Modification of the shape and robustness of the vertebral segments, in order to bear and transmit strain (craniocaudal increase of the vertebral plate surface, increase of the posterior articular surface, increase of the robustness of the pedicles and processes: DAVIS, 1961 ; PAL et ROTAL, 1986, 1996 ; PAL, 1987, 1989 ; BRIAND et BONNEL, 1994) does not seem to imply deep alterations of the developmental processes. It can be conceived as the result of gradual microevolutive processes through which osseous mass distribution (DELMAS et PINEAU, 1962 ; BALDET, 1993) and morphology are progressively modified (ERLEBACHER *et al.*, 1995). Furthermore, direct influence of mechanical strains during ontogenesis (BAGNALL *et al.*, 1977b), and also when development is achieved (NIKITYUK, 1968 ; LISOWSKI, 1968 ; ERLEBACHER *et al.*, 1995), will contribute to determine the osseous mass, and especially its organisation in the vertebra. Bone architecture remodelling by mechanical strains (ALEXANDRE, 1993 ; LANYOB, 1993 ; MARCELLI, 1993) was mainly studied in the long bones (TSCHANTZ et RUTISHAUSER, 1967 ; LANYON et RUBIN, 1984), and was modelled for sternbrae (CARTER *et al.*, 1991). It can be observed in the vertebral segments, through the fine organisation of trabecular bone (GROTE et AMLING, 1995 ; PASSUTI *et al.*, 1995 ; HEGGENESS et DOHERTY, 1997).

Vertebral column is a composite structure which alternates stiff and flexible elements. The lumbar level, which is the carrying axis of a system in an instable equilibrium, is particularly mobile in the sagittal plane (KIPPERS et PARKER, 1989 ; VAN NAMEREN *et al.*, 1990 ; MACINTOSH *et al.*, 1993 ; WESSEL *et al.*, 1994 ; KUMAR *et al.*, 1995a ; ENSINK *et al.*, 1996 ; SAUR *et al.*, 1996 ; WILKE *et al.*, 1998). Consequently, its relative length and the number of elements it contains should be essential parameters for this equilibrium. A strong determination and a low variability of these values is expected, *a priori*. Indeed, the pattern of vertebral segmentation is defined early in the embryology. In this respect, a relationship could be contemplated between early determination and phylogenetic antiquity (FIENBERG, 1987 ; DOLLE *et al.*, 1993 ; BURKE *et al.*, 1995 ; ERLEBACHER *et al.*, 1995): the craniocaudal position information is acquired by the cells in the mesodermic plate even before somites differentiation (CHRIST et WILTING, 1992). From these somites, vertebral morphology will develop according to the segment situation along the craniocaudal axis (NOBACK et ROBERTSON, 1951 déplace; PEACOCK, 1951 ; BAGNALL *et al.*, 1977a, 1977b, 1979 ; O'RAHILLY et MEYER, 1979 ; O'RAHILLY *et al.*, 1980 ; MÜLLER et O'RAHILLY, 1986 ; KESSEL, 1992 ; CHRIST et WILTING, 1992 ; MCLAIN *et al.*, 1995).

However, although determined early in the ontogeny, thoracolumbosacral vertebral formula is highly variable in Hominoids, including Man. Moreover, this variability especially affects the sacrolumbar transition. The modal formula of five lumbar vertebrae is present in approximately 90% of the individuals, and this proportion varies according to sampling and population (SCHULTZ, 1961, DELMAS, *s.d.*, 1951, 1956, 1958 ; ABITBOL, 1987b). KEITH (1923b) made the hypothesis of a tendency to a reduction of the lumbar level in man with bipedal gait, but he did not clearly explain the modalities of this reduction. Indeed, the reduction is not confirmed by length measurements, expressed as a proportion of the presacral spine as well as of the trunk length, as reported by SCHULTZ (1961).

This later emphasised the differences found by various authors, because of different morphological criteria in counting sacral and lumbar vertebrae, and because of the high frequencies of transitional defects: “sacralisations” and “lumbalisations” (LEDOUBLE, 1912 ; FICK, 1933, 1936 ; FISCHER, 1933 ; DUPARC, 1942). Confronted with this same problem, ABITBOL (1987b) defined four “sacralisation” stages, according to the extent of the synostosis with the sacrum, the presence of processes with sacrum alae morphology, and the articulation with the *Os ilium*. This author concluded that there was a “tendency” toward sacralisation in the *Hominoidea* group. According to ABITBOL, this tendency is explained by biomechanics of bipedal stance and gait: increased lumbar stability through the decrease of the number of diarthrosis (KUBEIN-MESSENBURG *et al.*, 1990 ; NÄGERL *et al.*, 1990, 1992), and increased sacral muscular insertion surface. The interpretation is, therefore, finalistic. It is also very opened to criticism: the author considers the four sacralisation stages through a single group including the four *genera* of non-human Hominoids, when these genera have different lumbosacral formulae and when these formulae are very variable in each species. Moreover, the contradiction is maintained between this supposed tendency to sacralisation, and the distribution of spinal formulae in Hominoids and other Primates (SCHULTZ, 1961); and no kind of weak relation with locomotion behaviour can be deduced (FLEAGLE, 1999).

Indeed, there is a reduction of the lumbar column in *Hominoidea* compared with the *Cercopithecoidea* super-family. In proportion to the presacral spine, the lumbar level length is approximately 40 % in latter, and 25 or 30 % in the former. Segment number mode changes from 7 in *Cercopithecoidea*, to 3, 4 or 5 in *Hominoidea*. A lesser longitudinal representation of the lumbar column in this group was perhaps, *per se*, more favourable to the emergence of the bipedal stance. At the level of an early systematic division and of an old phylogenetic split, this would constitute, in this respect, a *preadaptation*. However, as the 24th vertebra is incorporated in the sacrum in *Pongo*, *Gorilla* and *Pan*, it is still free in *Homo*, which also has a 10 % longer lumbar level, in proportion to the presacral spine. This would constitute an inverse tendency compared with that observed between Hominoids and Cercopithecoids, as KEITH (1923b) himself observed. This tendency is maybe linked to bipedalism, but it seems that no strict relation with locomotion behaviour can be established, as *Hylobates* has the same lumbar formula and proportionality as man...

Eventually, it is quite difficult to bring out a clear adaptative tendency for the relative length of the lumbar column, as well as for its segment number, though both parameters seem fundamental for spinal stability. It is quite surprising that two very simple parameters which can affect the biomechanics of a fundamental organ in bipedalism, which is itself a major modification for the whole of the organism, do not have clear univocal interpretation in terms of adaptation. This paradox could find an explanation in the limitations imposed by developmental constraints (DEVILLERS, 1989), as well as in the necessity to find an optimal solution between mechanical resistance and mobility (PUTZ et MÜLLER-GERBL, 1996). In an analogous way, another compromise must necessarily exist between vertebral formula, lumbar lordosis, and spinal stability (BONNEL et MOREL, 1990 ; PRIVAT *et al.*, 1990 ; TROISIER, 1992 ; PANJABI *et al.*, 1995 ; ROY-CAMILLE, 1994 ; SAILLANT *et al.*, 1994 ; HANDAL et SELBY, 1995 ; STOKES, 1995 ; HUSSON *et al.*, 1995 ; LAVASTE et ROBIN, 1995). Expression of a mean curvature which is able to cope with mechanical strains of trunk erection must be determined by a sufficient number of vertebral elements, in order for the

reciprocal angulation between adjacent segments to stay in a range of values that do not compromise spinal stability. An accurate analysis of sagittal inflexions and curvature magnitudes of spinal profile will show this relation.

1.2.2. Mobility

Bipedal posture and locomotion imply an increase in spinal mechanical resistance. In return, other strains which are sometimes, paradoxically, the same, imply vertebral column mobility.

First, the mobility of the sensorial organ support also has to maintain these in a stable position during locomotion (GRACOVETSKY, 1990 ; VAN NAMEREN *et al.*, 1990 ; WINTERS et PELES, 1990 ; GRAF *et al.*, 1995). Resistance to axial strains is highly increased if carrying structure is elastic and curved (KAPANDJI, 1974 ; GRACOVETSKY, 1990). Vertebrae, intervertebral discs and muscular and ligamentar systems as a whole have in both directions a strain dissipation and shock absorption function (EVANS, 1968 ; STAGNARA, 1985 ; WINTERS et PELES, 1990). they carry the head mass, superior limbs and the trunk itself, and absorb reaction forces from the support during the gait.

To the “primary” thoracic kyphosis, highly determined by its implication in the respiratory function, according to its role in bearing the rib cage, are added two opposite curvatures: the cervical lordosis which assumes also the mobility and stability of the support of sight and hearing senses - stereognosia - and of the central nervous system (WINTERS et PELES, 1990 ; KESHNER et ALLUM, 1990) ; and lumbar lordosis which assumes a great proportion of trunk sagittal mobility and mechanical strain absorption (DAVIS, 1961 ; GRACOVETSKY *et al.*, 1981 ; ADAMS et HUTTON, 1983 ; ADAMS *et al.*, 1987 ; STOKES *et al.*, 1987 ; PANJABI *et al.*, 1994).

Moreover, these curvatures have a real motor role in the bipedal locomotion (GRACOVETSKY, 1990). Their own presence converts, by a “coupling motion” (PANJABI *et al.*, 1989, 1993, 1994), the effects of the forces applied by inferior limbs to the coxal bones, and by back musculature to vertebral processes, *i.e.* rotation couples, in vertical *translation* movements. These movements will contribute to generate the mass centre oscillations along a vertical axis during the gait (D’ANGELI-CHEVASSUT et GAVIRA, 1994). By this oscillation, potential energy will be acquired, which can be converted to kinetic energy and to movement (CAVAGNA *et al.*, 1977).

The three curvatures of the “free” vertebral column are completed by the sacral kyphosis. Although it is a stiff curvature, its shape appears to be highly determined by mechanical strains, even during ontogeny (ABITBOL, 1989). In the determination of its shape mostly tension strains intervene from the ligaments (*Ll. sacrospinale* et *sacro tuberale*) which stabilise its nutation movement between the coxal bones, itself implied by sacral inclination. This sacral inclination, interpretable as a plesiomorphism (SCHULTZ, 1960), is itself fundamental for the shape of the lumbar lordosis (LEGAYE *et al.*, 1993).

1.3. Sagittal curvatures

1.3.1. Bipedalism and reproductive functions

Vertebral column stability, mechanical resistance and mobility, are not the only constraints, sometimes antagonistic, in the framework of which the morphological remodelling of bipedalism has to develop. Bipedalism also modifies certain anatomical patterns related to reproductive functions. Through the bias of “sexual selection” as well as “natural selection”, differential reproduction is, lastly, the way by which evolutive processes act (MAYR, 1963 ; LLOYD et GOULD, 1993). The topographical implication of the caudal part of the vertebral column in the pelvic cavity leads to question the adaptative significance of the sagittal lumbosacral curvatures for gestation and parturition. This problem has a very special interest according to the specific patterns of these functions in *Homo sapiens*. The increased gestation length extends mechanical strains due to the pelvic cavity occupation and the anterior shift of the centre of gravity (BUKOVIC *et al.*, 1993). The

low position of the sacrum means that few plastic osseous structures take part in the constitution of the pelvic birth canal (TAGUE et LOVEJOY, 1986). Foetal cranial diameters at term are large compared to the pelvic straits (SCHULTZ, 1949), and affect the integrity of the outlet (ABITBOL, 1989). There is a selective pressure on the pelvic morphology (ROSENBERG, 1992), then on the sacral orientation and curvature and therefore on the lumbar curvature which is highly correlated (ABITBOL, 1987a ; LEGAYE *et al.*, 1993). However, many works seem to indicate that mechanical strains related to bipedalism prevail in the determination of the pelvic and sacrolumbar morphology (LEUTENEGGER, 1974 ; ABITBOL, 1987a, 1987b, 1987c, 1988a, 1989).

So, biomechanical requirements imposed by bipedalism and by reproductive functions are quite antagonistic. This is clearly shown by the development of lumbar pathologies during pregnancy (BUKOVIC *et al.*, 1993) and by alterations of the osseous basin integrity during parturition (ABITBOL, 1989, ROSENBERG, 1992). Furthermore, palaeontological data indirectly report the anteriority of the constraints related to bipedal locomotion over those corresponding to an increase of the cranial volume (WEIDENREICH, 1947b ; LOVEJOY et HEIPLE, 1972 ; LEUTENEGGER, 1972, 1974, 1982, 1987 ; LOVEJOY *et al.*, 1974, 1978, 1975 ; SIGMON, 1975 ; MCHENRY et CORRUCINI, 1976 ; ZIHLMAN, 1978 ; LEAKEY et HAYE, 1979 ; BEHRENSMEYER et LAPORTE, 1981 ; CHARTERIS *et al.*, 1981 ; JUNGERS, 1982 ; STERN et SUSMAN, 1983 ; TAGUE et LOVEJOY, 1986). Therefore, cephalic volume applied important strains on an anatomy of the pelvic straits which was formed in the frame of an already acquired bipedalism (LEUTENEGGER, 1982 ; ABITBOL, 1987c ; TREVATHAN, 1988 ; ROSENBERG, 1992).

In mammals in general, both lumbar and sacral curvature have a relative plasticity. This plasticity allows only an imperfect adaptation to the conditions of gestation and parturition in man (BUKOVIC *et al.*, 1993). However, it is sufficient to modify the morphology of both curvatures when an erect posture (NATHAN *et al.*, 1964), or a bipedal locomotion (PREUSCHOFT *et al.*, 1988 ; SLIJPER, 1946), is imposed on quadrupeds. These two main arguments - the plasticity of the lumbosacral curvatures and their imperfect adaptation to the reproductive functions - lead to rejection of the hypothesis of an obstetrical role of the lumbar curvature and sacral inclination (ABITBOL, 1989 ; ROSENBERG, 1992). 1/ The projection of the centre of gravity of the trunk, the sacral inclination, the lumbar lordosis (ABITBOL, 1987a ; AMONOO-KUOFI, 1992), and then, the thoracokyphosis (LEGAYE *et al.*, 1993) are successively correlated. 2/ The mass centre position is a major factor for the equilibrium of bipedalism (KUMMER, 1968, 1991 ; TARDIEU, 1991 ; PREUSCHOFT et WITTE, 1991). 3/ Sagittal curvatures are fundamental in the biomechanics of bipedalism. Finally, these three points strongly support that bipedal posture and locomotion play a more important role and are essential factors in the evolutive determinism of the spinal sagittal curvatures. They have a relative antagonism with reproductive functions.

Eventually, and in a more general and speculative way, bipedalism anatomical modalities could have other deeper, though more indirect, implications in the reproductive functions and for the "hominisation processes". Indeed, since Charles DARWIN (1871) and Friedrich ENGELS (1876), the motor role of bipedal stance for hominisation has been proposed in various hypotheses, maybe by means of the development of manipulative abilities, but certainly through the modification of the social relationships within the group, necessary to the prolongation of the learning period (HEWES, 1961 ; JOLLY, 1970 ; PIVETEAU, 1973 ; ZIHLMAN et TANNER, 1978 ; LOVEJOY, 1981 ; LAZAR, 1986 ; ROSE, 1991 ; JABLONSKY et CHAPLIN, 1993).

1.3.2. Ontogeny

It is in that context of an essentially functional determinism, that the ontogeny of the spinal curvatures was mainly explained. It is classically accepted that embryo and foetus have only the curvature known as “primary” curvature, corresponding to the “quadrupedal kyphosis” and which will become the thoracic kyphosis (PATURET, 1951 ; DELMAS, 1970 ; GRAY, 1977 ; O’RAHILLY, 1980 ; MCLAIN *et al.*, 1995). The cervical lordosis would be the first of the secondary curvatures to be acquired, and would be related to a sufficient development of the neck motor capabilities to allow the extension of the cervical column. The lumbar lordosis would form in the child only from approximately 3 years of age, with the progressive acquisition of the gait (LAZENNEC, 1995). So, the determinism of the “secondary” sagittal curvatures is interpreted as being essentially mechanical, or at least secondary mechanical, as the motor capabilities which are supposed to determine them, must be allowed by earlier neuromotor functions and musculoskeletal system maturity. However, the description of an inversion of cervical and lumbar lordosis in quadrupeds (SLIJPER, 1946 ; SCHULTZ, 1961 ; ABITBOL, 1987a), though weakly developed, brings some reservations to the idea of a lordosis whose determinism would be too strictly related to erected stance. These reservations to the phylogenetic analogy decrease the relevance of the *a priori* idea of a secondary ontogeny for cervical and lumbar lordosis.

Various works describe the presence of lordosis in the foetus (BAGNALL *et al.*, 1977 ; O’RAHILLY et MEYER, 1979 ; MED, 1980 ; DELMAS et PINEAU, 1986 ; CHANSIGAUD *et al.*, 1986). DELMAS and PINEAU quantify the curvatures of the vertebral column on sagittal cuts of 9 embryos conserved in formaldehyde. These embryos have coccyx-vertex sizes from 8 mm to 30 mm, corresponding to ages from approximately 7 to 9.9 weeks (CARRERA, 1997). The authors observe the “evolution” of the profiles which show two cranial and caudal curvature minima. Curvature values between them decrease progressively with the growth of the embryo. From stage 20 mm (approximately 9 weeks), the profile is characterised by only one minimum in its cranial half, and curvatures still decrease. Finally, at the stage 30 mm (*ca.* 10 weeks), the curvatures at the ends of the profiles have still decreased. The polynome which quantifies them describes two cranial and caudal inflexion points. The vertebral column as a whole is anteriorly concave, but near 10 weeks, it shows two cervical and lumbar curvature inversions. Indeed, as a complement to a study of the prenatal development of vertebral articular processes, MED (1980) observes cervical lordosis already designed in 74 mm and 94 mm embryos (*ca.* 13.5 and 15.3 weeks), and a lumbar lordosis in a 144 mm foetus (older than 18 weeks). Furthermore, CHANSIGAUD *et al.* clearly show cervical lordosis in the foetus by echotomography. At 12 weeks, it is always observed (n = 12). Frequency decreases from 90 % in the 21-24 weeks class, and this decrease continues. The lordosis curvatures also decrease with pregnancy duration (CHANSIGAUD *et al.*, 1986). Cervical “dynamic” lordosis are also observed at the end of pregnancy and they are determined by the temporary raise of the foetal head. Those results are coherent with those obtained by BAGNALL *et al.* (1977a) from radiographs of 195 foetus aged from 8 to 23 weeks and conserved in formaldehyde. In this sample, a cervical lordosis is observed in 83 % of the cases. The more probable explanation of the progressive disappearance of the cervical lordosis in the foetus seems to be the increase of its size in the abdominal cavity. CHANSIGAUD *et al.* (1986) also propose the increase of the mass of the head. This hypothesis is not to be excluded¹, but it seems more interesting in explaining the late expression of the cervical lordosis in the child. Then, the main factor to allow it is the presence of a muscular system for the neck and head, which is powerful enough to compensate for the action of the gravity on the head, not compensated by Archimede’s force in the amniotic fluid (BAGNALL *et al.* 1977a).

¹ The presence of a correlation between two phenomena does not mean that a relation of causality exists between them. CHANSIGAUD *et al.* (1986) noticed a decreasing proportion of the foetus which show a cervical lordosis, with time. The head volume also increases with the foetus development (CARRERA *et al.*, 1997). So there is necessarily a correlation between these two data, but mainly because both are a function of time.

Appearance of physiological curvatures is related to the development of motor behaviours, such as the raise of the head, and the gait (BAGNALL *et al.*, 1977a ; LAZENNEC, 1995). However, their determinism appears to be more complex since curvatures are already expressed in the embryo. In particular, it seems difficult to make the hypothesis of a causality relationship which would link in an univocal way the ontogeny of the bipedalism and that of the lumbar lordosis, and by which the former phenomenon would be a direct determinant of the latter. Acquiring a muscular system which is sufficiently efficient, is necessary for the expression of the lordosis determinism but, in the same way, the capability to develop a caudal inversion of the sagittal curvature is, very probably, a prerequisite to the bipedalism ontogeny.

1.4. Studies of the vertebral column

Whatever the relation between their appearance in the ontogeny and their determination in the phylogeny, the evolutive implications of the spinal sagittal curvatures appears to be fundamental for bipedalism. Therefore, their presence was researched at the origin of the human lineage.

Conservation of the remains seems to be the first problem when studying this fundamental anatomic adaptation. It is, without doubt, the main cause of the relatively few number of paleoanthropological works which deals with the evolution of the vertebral column in the human lineage, and which approaches the problem of the vertebral curvatures.

Indeed, variability of the vertebral column in the genus *Homo* is quite little known (BOULE, 1911 ; MCCOWN *et* KEITH, 1939 ; STEWART, 1960 ; PIVETEAU, 1965 ; HEIM, 1976 ; ARENSBURG *et* NATHAN, 1980 ; TRINKAUS, 1983 ; BROWN *et al.*, 1985 ; ARENSBURG, 1991 ; LATIMER *et* WARD, 1993 ; MCLARNON, 1993). Incomplete conservation is not the only difficulty. The variability of the vertebral column cannot be reduced to that of the pieces of which it is made it up, but must also be considered as a whole. But from this anatomical *entity*, fossilisation processes have conserved only some of its constitutive elements: isolated vertebrae whose exact topographical, articular contiguity relationships, have disappeared. The problem of the variability of the sagittal curvatures in the human evolution is, therefore, one of those for which the “fossilisation filter” particularly compromises the resolution.

1.4.1. Variability of the vertebral segments

The variability of the vertebral segments (FRANCIS, 1955 ; DAVIS, 1959 ; TULSI, 1971 ; AMONOO-KUOFI *et al.*, 1990 ; SCOLES *et al.*, 1988 ; WANG *et* SHIH, 1992 ; PANJABI, 1991a, 1991b, 1992 ; KOTHE *et al.*, 1996 ; MIYAKE *et al.*, 1996) and that of the sagittal curvatures (FICK, 1934 ; DELMAS, 1951), was widely studied in a medical context: statistical levels of variability also define the limits of the pathology (though the inverse relation is not necessarily exact). Then, the publication of classical morphological studies is justified in the frame of clinically oriented publications. They provide new data to circumscribe, for example, the aetiology of back pain, of spondylolysis or in a more general way, the mechanisms of spinal instability. The knowledge of normal variability and of its limits is also necessary for surgical practice (GILAD *et* NISSAN, 1986 ; PANJABI *et al.*, 1991a, 1991b, 1992 ; DOHERTY, 1995 ; HAWN-MO, 1995 ; RONGMING XU, 1995 ; SCOLES *et al.*, 1988 ; WANG, 1992). Interest is reported on each isolated segment in osteological studies. When the study is based on imaging technologies or direct measurements applied *in vivo*, the whole shape of the vertebral column can be considered.

However, few works have tried to relate the isolated osseous segments, considered from a morphological point of view or in respect to their position (BRYANT *et al.*, 1989 ; SICARD *et* GAGNON, 1993), and the whole of the vertebral column in the sagittal plane (MILNE *et* LAUDER, 1974, 1976 ; STOKES *et al.*, 1987). There are obvious difficulties in the recollection of these two kinds of data, which are necessary to study the relationships between physiological vertebral curvatures and osseous morphology. Indeed, it seems nearly impossible to have a complete radiographic or biometric data set (for a non-pathological sample), and to take osteological

measurements on the same sample. In the cases in which the former approach is possible, the data for the latter are less accurate their collection is difficult and based on imaging techniques.

One of the goals of these works, which are realised in a clinical context, is the definition of a norm that could be applied in the design of osteosynthesis and posterior fixation (ZINDRICK *et al.*, 1987 ; EBRAHEIM, *et al.* 1996; AHARINEJAD *et al.*, 1990 ;WILKE *et al.*, 1997). Rather than a fine description of the existing variability, the approach is quite typological. Indeed, the aim is to limit the range of variation to a reduced number of classes which can be used for industrial production. Moreover, sample numbers are often small. Collected information is not to be neglected, but the direction of the study is opposite to what is researched.

1.4.2. The vertebral column as a whole

Vertebral column was also studied as a functional whole, with all the structures of its anatomical environment, *in vivo* (KUMAR *et al.*, 1995a, 1995b) or *in vitro* (DEAN *et al.*, 1991 ; PANJABI *et al.*, 1994), and in particular the vertebral curvatures (FICK, 1934). Different external plotting (KNUSSMAN, et FINKE, 1980 ; MILNE et LAUDER, 1976) or radiographic technics (WANGERMEZ, 1968 ; VIGNES, 1982 ; STAGNARA, 1985 ; BERNHARDT et BRIDWELL, 1989 ; POLLY *et al.*, 1996) enable study of the variability of sagittal curvatures, with protocols oriented to the description of dynamic or kinematic behaviours (ROY *et al.*, 1994), or to a description of postural or static variability (FICK, 1934 ; STOKES *et al.*, 1987 ; BLACK *et al.*, 1996). Various of these works used polynomial regression in order to quantify the studied profiles (PINEAU et MOLLARD, 1983 ; KNUSSMAN, et FINKE, 1980 ; MILLER et SKOGLAND, 1982).

Complex computer developments were performed to describe the behaviour of part or all of the vertebral column, abstracting from osseous physical support and its connections (DIETRICH *et al.*, 1990 ; LAVASTE *et al.*, 1991 ; PORTIER *et al.*, 1993 ; SHARMA *et al.*, 1995 ; DESCRIMES *et al.*, 1995 ; HARRISON *et al.*, 1996). The direction of these modelisation works is close to that interesting medical industry. The aim is to fit model to reality in order to make a description of the mechanical behaviours of the spine, with a total control over all of the parameters (SHIRADZI-ADL, 1993). Here too, the basis of the work is a reduction of the variability towards an anatomical mean type, that is supposed to represent, as best as possible, the “normal” behaviour of the vertebral column. Not all the anatomical osseous elements are represented (ASPDEN, 1989; DESCRIMES *et al.*, 1985) and the anatomical relationships between elements are often very simplified. The limit of this abstraction is, in a feedback, that of an acceptable connection between the behaviour of the model and the behaviour already studied *in vivo*. This is later expected to validate the model. In the same way, mechanical modelisations are also attempted in which the different constitutive elements of the vertebral segment are substituted by synthesis materials (PANJABI *et al.*, 1989, 1994 ; PANJABI et AUXLAND, 1994). Other studies on *in vitro* behaviour are realised on real anatomical elements after dissection (SKALLI *et al.*, 1995).

These different abstraction levels - isolation of anatomical elements, material substitution or mathematical modelisation - give practically no data on individual variability of the vertebral curvatures. Their results are often neglected by works in the field of Anthropology. However, they allow more rigorous approaches to mechanical behaviours as a whole, and to the functions implied by the shape and composition characteristics of the vertebral column elements. Then, it seems difficult to ignore the data they provide when the problem is precisely the behaviour of the vertebral column as a whole, on the basis of the isolated vertebrae.

Indeed it is this goal that is pursued in anthropological works dealing with fossil vertebrae, and that is more or less explicitly confessed according to the difficulty of the enterprise, *i.e.*, according to the fragmentary state of the bone remains. To face the complexity of the problem, priority was given to a methodology which would be easy to use, whose precise definition would have the benefits of a general acceptance, with a good reproducibility, and which would allow the study of big samples. Then, the sagittal anterior (M1) and posterior (M2) height, as defined by R. MARTIN

(1928), was the mostly widely used to characterise vertebral morphology in the sagittal plane. According to A. DELMAS (1956), D. J. CUNNINGHAM (1886) was the first to use the calculation of the very simple posterior to anterior body height index. The absence of conservation of the intervertebral disc seems to have been a sufficient reason to evade the question of the intervertebral space from anthropological works (excepting some works in the field of forensic anthropology, in which correlations with vertebral body height are estimated). However, an exception is given by the study of the Kebara vertebral column, whose articular relationship between two adjacent vertebrae was preserved by taphonomic processes, which fossilised the physiological intervertebral space (ARENSBURG, 1991).

Renewing the criticisms already made by BOOKSTEIN (1947, 1982, 1983) against quantitative methods in “classical” craniology, KRUKOFF (1978) stressed that the measurement system employed is not appropriate for the goal pursued: univocal shape description. Craniometrical landmarks create non-contiguous segments, *i.e.* whose ends are not defined two by two, by common points. Moreover, segments are not defined in a spatial referential. In this system, information on the shape is given by the ratio of two lengths. However, this is not complete information as segments can be arranged in infinite ways without modifying the index value. In this connection, the author uses a rather more complete example in which four strings are defined by four craniometrical points and are connected together by common points. In this case, adding a fifth element, supplementary string or angle, is necessary and sufficient to fix the quadrilateral shape.

The anterior to posterior height index, classically employed to describe the vertebral shape (DUPARC, 1942 ; ROSE, 1975 ; JANKAUSKAS, 1993; ERICKSEN, 1976, 1978a, 1978b ; MAFART, 1980 ; MILNE et LAUDER, 1974, 1976), has therefore the same limitations. When it is used to estimate the reciprocal angulations of the vertebral plates, an *a priori* hypothesis is made (and always implicitly assumed) that the vertebral body shape in the sagittal plane is that of a regular trapezium. This approximation is not valid for the cervical level, and in order to be entirely justified, the trapezium should be an isosceles trapezium at the thoracic and lumbar levels. This is certainly not true for the lower lumbar segments and is not demonstrated for the other ones.

Moreover, the measurements defined by R. MARTIN do not allow the constitution of a system of segments that would enable a more precise description of the quadrilateral. Indeed, the points defining the superior and inferior sagittal diameters are not the same as those used to measure the height (BRÄUER, 1988). Then, a system of measurements based only on four points, and really describing an irregular quadrilateral, has to be defined. A diagonal segment will complete the description of the shape.

1.5. Proposed methodology

1.5.1. Principle

A limited number of works try to relate the vertebral morphology, or the relative position of vertebral elements, and the profile of the sagittal curvatures. This is sometimes estimated by simple angular measurements (STOKES *et al.*, 1987 ; KIPPERS et PARKER, 1989 ; SICARD et GAGNON, 1993), or calculated more accurately using polynomial fits (spline curves: BRYANT *et al.*, 1989).

The methodology proposed in this work is an attempt to link together the vertebral segment morphology and the sagittal curvatures that this morphology implies.

It is based simply on the shape determination of the two elements which will contribute to the curvatures: the vertebral body and the intervertebral space implied by the morphology of adjacent vertebrae. Both elements will be represented as quadrilaterals which can be stacked through calculation. The stack of the quadrilaterals will draw a profile that results from the participation of the shape of each of all of these elements. The stack co-ordinates allow a quantitative analysis of the

profile, and then a statistical analysis of the parameters that describe it. These are later calculated by means of a polynomial regression.

A. *Shape of the vertebral bodies and of the intervertebral spaces*

Five angular and/or linear measurements are necessary to take into account the exact shape of the outline of the vertebral body. The four sides of the quadrilateral and one of its diagonals are measured in the sagittal plane, from four points on the vertebral ring. These measurements enable calculation of the quadrilateral angles.

The intervertebral space determined by the morphology of two adjacent vertebrae is deduced as follows. Let us consider the superior face of a vertebra. A diameter of the posterior articular surface is defined in a parasagittal plane. The four distances from this segment to the anterior and posterior points of the vertebral plate are measured. The same process is repeated on the inferior face of the immediately cranial vertebra (inferior plate and inferior articular surface). For each vertebra, the articular surface diameter, the four measurements taken from the articular surface up to the plate, and that of the diameter of the plate itself, define the position of the articular surface according to that of the plate.

Distance on the median sagittal plane is deduced by successive approximations until reaching the required accuracy. For each vertebra, the diameter of the articular surface and the four segments joining the plate are projected on the median plane. When the diameters of the articular surfaces of two adjacent vertebrae are superimposed, the other height segments are sufficient for deducing the exact space left between the two diameters of the plates. Then, in the same way as for the vertebral body, the space is treated as an irregular quadrilateral whose anterior and posterior sides, and one diagonal, are calculated. Moreover, a space can be inserted between the two diameters representing the posterior articular surfaces, in order to correct the absence of the articular capsule elements.

B. *Deduction and description of the profiles*

The quadrilaterals representing the vertebral bodies, and those representing the intervertebral spaces can be stacked through calculation. The angles between the quadrilaterals in the stack can be deduced: those between the limits of each vertebral level allow a preliminary description of the profile. In the bivariate space, a polynomial function is fitted to the co-ordinates of the quadrilaterals in the stack. Interesting parameters are calculated from the polynomial equation in order to make a quantitative description of the profile: developed length, extrema, inflexion points, curvature value in each point, and curvature maxima.

Statistical parameters can be deduced for these data. They define the variability of the sample, allow to induce that of the population, to compare sexes, and to situate additional individuals amongst this variability.

1.5.2. Application

A. *Modern man*

In order to make a preliminary description of variability of the sagittal curvatures implied by vertebral morphology, the methodology was applied to a non pathological (according to macroscopic criteria) subactual sample, of known age and sex, and from an archaeological origin. The sample comes from Spitalfields collection, conserved in the British Museum of Natural History, in London (MOLLESON *et al.*, 1993).

The methodology allows stacking of only some elements if all are not preserved, stacking only the vertebral bodies, or alternatively vertebral bodies and intervertebral spaces. Then, it can be used in a Paleoanthropological study on incomplete remains, and only on vertebral bodies if neural arches are not present or are too fragmentary. It was applied to vertebral remains of various neandertals.

B. Neandertals

The idea of a linear systematic of the animal kingdom, which would express a continued progression along the “*scala naturae*” (MASON, 1984 ; MAYR, 1989 ; TASSY, 1991), crowned, according to the finalistic interpretation, by the Human species in its modern form, was to a certain extent (long after its disappearance as an explanatory scheme for the zoological diversity) the heuristic framework in which the neandertal vertebral remains were interpreted (WEIDENREICH, 1943, 1947a, 1947b ; CLARK HOWELL, 1957 ; PIVETEAU, 1983). Neandertals were considered as representing an intermediate stage - palaeanthropian, according to KEITH - of hominisation (HRDLICKA, 1927 cité par SPENCER et SMITH, 1981 ; VALLOIS, 1954 ; ŠKERLIJ, 1960 ; HOWELLS, 1974 ; TRINKAUS et SHIPMAN, 1993). In this context, the vertebral remains of the La Chapelle-aux-Saints Neandertal skeleton were interpreted by M. BOULE in 1911 as belonging to an Homonidae whose stance could not be fully erect and whose vertebral column could not show pronounced cervical and lumbar lordosis (TRINKAUS, 1985). Since that time, this interpretation has been largely contested and discarded. Vertebral characters cited by BOULE could not allow to conclude to a fundamentally different morphology, in regards to its implication in the determinism of the cervical lordosis, and compared to the modern patterns (TRINKAUS, 1985). However, on both sides, the argumentation used morphological characters indirectly related to the sagittal curvature determinism, such as inclination and bifidity of spinous processes or, in a more convincing way, obliquity of the articular processes (BOULE, 1911 ; ARAMBOURG, 1955 ; STRAUSS et CAVE, 1957 ; STEWART, 1962).

The carrying and mobility of the cranium, as well as the support of the cervical muscles, are functions that are assumed by the cervical column and which, in Neandertals, enable presumption of different modalities of the sagittal profile implied by vertebral morphology (SOLOW et TALGREN, 1976).

Indeed, considering the relationship with the anterior part of the trunk, morphology of the mastoid region is particular in Neandertals (WALENSKY, 1964). In *Homo sapiens sapiens*, it is implied in the head equilibrium and the neck flexion from extension through the work of the *M. sternocleidomastoideus* (KRANTZ, 1963). Thus, the particular morphology of this region is an indication of very probable differences in the statics and dynamics of the head support in Neandertals (ELYAQTINE, 1995, 1996, 1997). Cranial and facial neandertalian morphology implies probably higher strains in maintaining the unstable equilibrium of the head (WINTERS et PELES, 1990). Indeed, facial projection involves more important couples in the sense of the flexion (VALLOIS, 1926 ; LEROI-GOURHAN, 1955 ; RAK, 1986 ; DEMES, 1987 ; TRINKAUS, 1987 ; MAUREILLE, 1994), and indeed, the morphology of the occipital region suggests different modalities in the bearing of the head (TRINKAUS et LEMAY, 1982 ; ANTÓN, 1994).

In this biomechanical context, the implication of the cervical column in the sagittal plane may be considered according to the action of posterior muscular attachments on cranium and neck vertebrae, related to muscular bellies inserted on cervical and high thoracic vertebrae, which generate rotation extension couples (*Mm. longissimus capitis, longissimus cervicis, iliocostalis cervicis, splenius capitis, splenius cervicis, rotatores cervicis, multifidus, semispinalis capitis, semispinalis cervicis, spinalis cervicis, intertransversarii posterior cervicis, interspinales cervicis, rectus capitis*). To a lesser extent, the cervical column is also involved in muscular work for the neck flexion (*Mm. longus capitis, longus coli, rectus capitis anterior, scalenus*). The role played by the cervical lordosis, *per se*, in the “coupling” phenomena which ensure head stability (GRACOVETSKY, 1990 ; WINTERS et PELES, 1990 ; PANJABI *et al.*, 1993), implies that different mechanical strains are able to affect amplitude and shape of this lordosis. However, the biomechanical complexity of the head-neck system and the still open questions about this in modern man, already fix the limits of a simple and univocal interpretation in Neandertals.

At the level of the thoracic kyphosis, the robustness of the ribs (TRINKAUS, 1983) is another morphological data which allows kyphosis values to be expected which could, *a priori*, differ from

modern populations (MORRIS *et al.*, 1961). The robustness of the whole of the skeleton and the well developed muscular insertions suggest a high body weight and consequently increased mechanical strains at the lumbar level, where weight is transmitted from the trunk to the inferior limbs *via* the pelvic girdle (TWIESSELMAN, 1961 ; LOVEJOY *et* TRINKAUS, 1980 ; TRINKAUS, 1983 ; SENUT, 1985 ; BEN-ITZHAK *et al.*, 1988 ; TRINKAUS *et al.*, 1991 ; HAMBUCKEN, 1993 ; RUFF *et al.*, 1993 ; VANDERMEERSCH *et* TRINKAUS, 1995). Indeed, this is what lumbar vertebral robustness seems to indicate (TRINKAUS, 1983). Once more, different implications of the vertebral morphology in the determination of lumbar lordosis can be expected. As for the head-neck system, mechanical strains in the thoracolumbar region may affect the lordosis morphology *via* trunk extensor muscles, particularly muscles which are inserted on lumbar and thoracic vertebrae and ribs (*m. iliocostalis lumborum, iliocostalis thoracis, longissimus thoracis, spinalis thoracis, semispinalis thoracis, multifidus, rotatores, interspinales lumborum, intertransversarii lumborum*) ; but also muscles acting for trunk flexion, directly related to the vertebral column (*m. quadratus lumborum, psoas*) or related to the trunk anterior wall (*Mm. externus abdominis, obliquus internus abdominis, transversus abdominis, rectus abdominis*).

Eventually, there is a correlation between the three sagittal curvatures of the free vertebral column, and also between them and the sacral inclination (ABITBOL, 1987a ; LEGAYE *et al.*, 1993). This implies that differences affecting part of the sagittal profile should modify all of the vertebral curvatures. Furthermore, these correlations provide the view point that the modalities of bipedalism and trunk equilibrium could be perceived from a detailed description of the spinal sagittal curvatures.

The developed methodology should enable approach to the osteological variability of the spinal sagittal curvatures in modern man, the implications of the vertebral segment morphology in their determination, and, in particular, study of these sagittal curvatures in Neandertals.

1. Introducción (Castellano)

1.1. *Historia natural*

La estructura y las funciones de la columna vertebral del hombre son el resultado de un largo proceso evolutivo cuyas primeras determinaciones se encuentran muy lejos en la filogenia. Los cordados primitivos han adquirido una diferenciación funcional antero-posterior del organismo (KUMMER, 1991). Esta corresponde a la centralización del sistema nervioso en el extremo anterior, cerca de los órganos de los sentidos, y también a una diferenciación biomecánica de la función motora, asegurada por el extremo caudal. Esto implica la situación sobre este eje craneo-caudal de una estructura con suficiente rigidez como para asegurar la transmisión de los esfuerzos musculares, pero lo bastante flexible como para desarrollar en un plano coronal oscilaciones que generen una fuerza motriz (GRACOVETSKY, 1990): la *chorda*. Este plan general de organización con una diferenciación céfalo-caudal de las funciones respectivamente sensorial y motora se ha conservado en el conjunto de los vertebrados.

Debido a esta diferenciación, el soporte axial ha adquirido también una función de sostén y de protección de los órganos que permite transmitir y difundir al conjunto del organismo las informaciones tratadas en el extremo cefálico. Se ha alcanzado una situación de compromiso entre la protección del sistema nervioso central y la conservación de la movilidad gracias al desarrollo de unidades sólidas repetidas a lo largo del soporte axial : las vértebras. Su desarrollo implica la división transversal del eje, que tiene lugar al integrarse el esqueleto óseo en el proceso embriológico de la metamerización (KENNETH, 1990).

Esta segmentación en somitas reorganizados en vértebras y discos intervertebrales (O'RAHILLY y MEYER, 1979 ; MÜLLER y O'RAHILLY, 1986 ; CHRIST y WILTING, 1992 ; BARNES, 1994 ; MCLAIN *et al.*, 1995) permite un nuevo compromiso entre la movilidad requerida para la función de la locomoción y la resistencia necesaria para una mayor eficacia mecánica. El aumento de las tensiones implica, por una parte, una superficie de inserción mayor para las unidades motoras. Por otra, la eficacia de los esfuerzos muscular y ligamentario (sus momentos) puede ser incrementada mediante brazos de palanca (apófisis transversas y espinosas : SLIJPER, 1946 ; NÄGERL *et al.*, 1990 ; JIANG *et al.*, 1995) que hacen intervenir también la resistencia física del soporte. Esta segmentación podrá llevarse a cabo sobre la base del proceso ontogenético de la metamerización por el que se forman las unidades musculares (miotomos).

En los tetrápodos se conserva la localización posterior de la función motora (KUMMER, 1968, 1991 ; VAN INGEN SCHENAU *et* BOBBERT, 1993). La cintura pelviana asegura la continuidad física ósea y la transmisión de los esfuerzos entre el soporte óseo axial y los miembros posteriores propulsores (DELMAS, 1970 ; YAMAZAKI *et al.*, 1979). La cintura escapular, más lábil, sin contacto óseo directo con la columna vertebral, asume para los miembros anteriores un rol semejante, aunque esencialmente de soporte estático y dinámico.

Por lo tanto, con el hombre, la asunción exclusiva de las dos funciones de propulsión y de sostén por parte de los miembros inferiores (WEIDENREICH, 1947b ; ISHIDA, 1968 ; KUMMER, 1965, 1975, 1968, 1991), a partir de una remodelación de las estructuras anatómicas de los cuadrúpedos, ocurre sobre la base filogenéticamente aún más antigua de los primeros cordados.

1.2. *Columna vertebral y bipedismo*

Por lo tanto, no es que se adquieran funciones distintas con el bipedismo, sino que las modalidades según las cuales se ejercen se han modificado. Esta “reutilización” de estructuras preexistentes (GOULD, 1997) implica una serie de *reajustes* anatómicos que han de asegurar las

tareas de sostén y de propulsión en un nuevo ambiente de esfuerzos biomecánicos. La estructura axial de protección de la médula espinal, de sostén y de inserción de las unidades motoras musculares, y de transmisión de las fuerzas que éstas ejercen, pasa de una orientación horizontal según la cual ha evolucionado desde los primeros cordados y que se ha conservado en los vertebrados terrestres - adaptándose a la fuerza de gravedad aplicada perpendicularmente a ella (SLIJPER, 1946 ; HUROV, 1987 ; PREUSCHOFT, 1990) - a una orientación vertical, en la misma dirección que el peso y que las fuerzas de reacción generadas por el bipedismo (KUMMER, 1975 ; ZIHLMAN et BRUNKER, 1979).

En el marco de estas nuevas modalidades biomecánicas, se plantea de nuevo el problema de una solución óptima entre resistencia y movilidad (LEMAIRE, 1986 ; PUTZ et MÜLLER-GERBL, 1996).

1.2.1. Resistencia mecánica

La posición vertical de la columna vertebral la confronta a tensiones axiales más importantes, implicadas por el soporte del peso del cuerpo por encima de la cintura pelviana, que crece en sentido craneo-caudal. El control de las oscilaciones sagitales y laterales generadas por el mantenimiento del tronco en posición de equilibrio inestable (WINTER *et al.*, 1990 ; CRISCO, KESNER y ALLUM, 1990 ; PANJABI, 1990 ; PREUSCHOFT, 1990 ; YAMAZAKI, 1990 ; PREUSCHOFT et RECKNAGEL, 1991) parece implicar una menor movilidad de la columna. El mantenimiento de la postura erguida y el desplazamiento anterior del centro de gravedad durante la flexión del tronco implican inserciones ligamentarias y tendinosas suficientemente fuertes (THOMAS, 1959 ; MORRIS *et al.*, 1961 ; GRACOVETSKY *et al.*, 1981 ; ANDERSSON y WINTERS, 1990 ; MACINTOSH *et al.*, 1993 ; MANDELL *et al.*, 1993 ; ROSS *et al.*, 1993 ; TAN *et al.*, 1993 ; PAQUET *et al.*, 1994 ; KUMAR *et al.*, 1995a, 1995b), con momentos musculares importantes (KUMMER, 1965 ; SÉNÉGAS, 1990b). Estos tres factores permiten un aumento de rigidez y de resistencia de la columna vertebral, las cuales están aseguradas principalmente por el incremento del tamaño y de la robustez de las vértebras en sentido craneo-caudal (SANDERS, 1998 ; SANDERS y BODENBENDER, 1994).

La modificación de la forma y de la robustez de los segmentos vertebrales de modo que se puedan soportar y transmitir las tensiones (aumento craneo-caudal del tamaño de los cuerpos vertebrales, de las carillas articulares posteriores, aumento de la robustez de los pedículos y apófisis : DAVIS, 1961 ; PAL y ROTAL, 1986, 1996 ; PAL, 1987, 1989 ; BRIAND y BONNEL, 1994) no parece implicar una alteración profunda de los procesos de desarrollo. Puede concebirse como el resultado de procesos microevolutivos graduales a lo largo de los cuales la repartición de la masa ósea (DELMAS y PINEAU, 1962 ; BALDET, 1993) y la morfología se modifican progresivamente (ERLEBACHER *et al.*, 1995). Por otra parte, la influencia directa de las tensiones mecánicas durante la ontogenia (BAGNALL *et al.*, 1977b) e incluso cuando el desarrollo ha terminado (NIKITYUK, 1968 ; LISOWSKI, 1968 ; ERLEBACHER *et al.*, 1995), contribuirá a determinar la cantidad de masa ósea y sobre todo su organización en la vértebra. Principalmente estudiada a nivel de los huesos largos (TSCHANTZ y RUTISHAUSER, 1967 ; LANYON y RUBIN, 1984) y modelizada a nivel de los segmentos del esternón (CARTER *et al.*, 1991), la remodelación de la arquitectura ósea por influencia directa de los esfuerzos mecánicos (ALEXANDRE, 1993 ; LANYOB, 1993 ; MARCELLI, 1993) es observable a nivel de los segmentos vertebrales en la organización fina del hueso trabecular (GROTE y AMLING, 1995 ; PASSUTI *et al.*, 1995 ; HEGGENESS y DOHERTY, 1997).

La columna vertebral es una estructura compuesta en la que se alternan elementos rígidos y flexibles. La región lumbar, que forma el eje de sostén de un sistema en equilibrio inestable, es particularmente móvil en el plano sagital (KIPPERS y PARKER, 1989 ; VAN NAMEREN *et al.*, 1990 ; MACINTOSH *et al.*, 1993 ; WESSEL *et al.*, 1994 ; KUMAR *et al.*, 1995a ; ENSINK *et al.*, 1996 ; SAUR *et al.*, 1996 ; WILKE *et al.*, 1998). Por ello su longitud relativa y el número de los elementos que la

componen deberían ser parámetros esenciales en el mantenimiento de este equilibrio, y se esperaría, *a priori*, que estos valores estuvieran fuertemente determinados y fueran por tanto poco variables. Su precoz determinismo genético parece corresponderse en efecto con la antigüedad de la segmentación en la filogénesis (FIENBERG, 1987 ; DOLLE *et al.*, 1993 ; BURKE *et al.*, 1995 ; ERLEBACHER *et al.*, 1995): la información relativa a la posición sobre el eje craneo-caudal es adquirida por las células de la hoja mesodérmica antes incluso de la diferenciación de los somitas (CHRIST et WILTING, 1992). A partir de éstos se organizará la morfología vertebral según la situación del segmento definida sobre el eje craneo-caudal (NOBACK y ROBERTSON, 1951 ; PEACOCK, 1951 ; BAGNALL *et al.*, 1977a, 1977b, 1979 ; O'RAHILLY y MEYER, 1979 ; O'RAHILLY *et al.*, 1980 ; MÜLLER et O'RAHILLY, 1986 ; KESSEL, 1992 ; CHRIST y WILTING, 1992 ; MCLAIN *et al.*, 1995).

Así que, aunque esté fijada pronto en la ontogenia, la fórmula vertebral toraco-lumbo-sacra es sin embargo muy variable en los *Hominoidea*, incluido el hombre, y esta variabilidad afecta particularmente a la transición lumbo-sacra. La fórmula modal de cinco vértebras lumbares se presenta en alrededor del 90% de los individuos, proporción que varía según la muestra y la población (SCHULTZ, 1961, DELMAS, *s.d.*, 1951, 1956, 1958 ; ABITBOL, 1987b). KEITH (1923b) avanzaba la hipótesis de una tendencia a la reducción de la región lumbar en el hombre, en relación con el bipedismo, sin explicitar en ningún caso las modalidades de esta reducción. De hecho, ésta no está confirmada por los valores de su longitud, tanto si se expresan en relación al raquis presacro como si se expresan en relación a la longitud del tronco, tal y como publica SCHULTZ (1961).

Este último, por otra parte, había subrayado las diferencias encontradas entre los autores en los criterios de recuento de las vértebras sacras y lumbares, en relación con la frecuencia elevada de “anomalías” transicionales : “sacralizaciones” y “lumbarizaciones” (LEDOUBLE, 1912 ; FICK, 1933, 1936 ; FISCHER, 1933 ; DUPARC, 1942). Ante este mismo problema, ABITBOL (1987b) definió cuatro estados de “sacralización” según la extensión de la sinostosis del segmento con el cuerpo del sacro, la existencia de *apófisis* con una morfología de ala del sacro, y la articulación con el *Os ilium*. El autor concluye que existe una tendencia a la sacralización en el grupo de los *Hominoidea*, que relaciona con la biomecánica del bipedismo: aumento de la estabilidad lumbar por disminución en el número de diartrosis (KUBEIN-MESSENBURG *et al.*, 1990 ; NÄGERL *et al.*, 1990, 1992), y aumento de la superficie de inserción muscular sobre el sacro. Se trata, pues, de una interpretación finalista. Esta es fuertemente criticable : las frecuencias de los cuatro estados de sacralización son considerados a través de un único grupo que incluye los cuatro géneros de *Hominoidea* no-humanos, cuando éstos tienen fórmulas lumbo-sacras diferentes y muy variables dentro de cada especie. Además, una supuesta “tendencia” a la sacralización se encuentra en contradicción con la distribución de frecuencias de las fórmulas raquídeas dentro de los propios *Hominoidea* y en los otros primates (SCHULTZ, 1961), y no puede deducirse una relación, ni siquiera laxa, con el modo de locomoción (FLEAGLE, 1999).

Sí existe una reducción de la columna lumbar en los *Hominoidea* si se comparan con la superfamilia *Cercopithecoidea*. La proporcionalidad de la región lumbar pasa de un orden de magnitud de 40 % en éstos últimos a 25 a 30 % en los *Hominoidea*, y la moda estadística del número de segmentos pasa de 7 en los *Cercopithecoidea*, a 3, 4 ó 5 en los *Hominoidea*. Una representación longitudinal menor de la columna lumbar en este grupo quizás fuera en sí más favorable para la adquisición de la postura erguida. Por tanto, a nivel de una división sistemática baja y de una bifurcación filogenética antigua, constituiría en este sentido una *preadaptación*. Sin embargo, mientras la vértebra 24 se incorpora al sacro en *Pongo*, *Gorilla* y *Pan*, queda libre en *Homo*, cuya región lumbar es también, en relación con el raquis presacro, un 10 % más larga. Esto constituiría una tendencia inversa a la observada entre *Hominoidea* y *Cercopithecoidea* como el mismo KEITH observa (KEITH, 1923b), quizás ligada al bipedismo, pero sin poder establecer una

relación estricta con el modo de locomoción, dado que *Hylobates* presenta la misma fórmula y proporcionalidad lumbar que el hombre...

En definitiva, resulta difícil deducir una tendencia adaptativa clara, tanto para la longitud relativa de la columna vertebral como para el número de segmentos que la componen, a pesar de que estos parámetros parecen fundamentales para la estabilidad raquídea. Resulta bastante sorprendente que dos parámetros tan simples, susceptibles de afectar a la biomecánica de un órgano fundamental para el bipedismo, el cual representa una modificación mayor para el conjunto del organismo, no tengan una interpretación unívoca en términos de adaptación. Esta paradoja podría encontrar una explicación, tanto en las limitaciones impuestas por el desarrollo (DEVILLERS, 1989), como en la necesidad de una solución óptima entre resistencia mecánica y movilidad (PUTZ et MÜLLER-GERBL, 1996). De manera análoga, otro compromiso debe existir necesariamente entre fórmula vertebral, lordosis lumbar y estabilidad raquídea (BONNEL y MOREL, 1990 ; PRIVAT *et al.*, 1990 ; TROISIER, 1992 ; PANJABI *et al.*, 1995 ; ROY-CAMILLE, 1994 ; SAILLANT *et al.*, 1994 ; HANDAL y SELBY, 1995 ; STOKES, 1995 ; HUSSON *et al.*, 1995 ; LAVASTE y ROBIN, 1995): la expresión de una curvatura media, que satisfaga la necesidad de respuesta a las tensiones mecánicas de la elevación del tronco, debe estar determinada por un número suficiente de elementos vertebrales para que la angulación recíproca entre segmentos adyacentes quede dentro de valores que no comprometan la estabilidad raquídea. Un análisis fino de las inflexiones sagitales y de la amplitud de las curvaturas del perfil raquídeo permitirá poner en evidencia esta relación.

1.2.2. Movilidad

La postura y la locomoción bípeda implican, por tanto, un aumento de la resistencia mecánica de la columna. Como contrapartida, otras limitaciones y, paradójicamente, a veces las mismas, ponen en juego la movilidad de la columna vertebral.

Se trata en principio de la movilidad del soporte de los órganos sensoriales que debe también permitir mantenerlos en una posición estable en el transcurso de la locomoción (GRACOVETSKY, 1990 ; VAN NAMEREN *et al.*, 1990 ; WINTERS et PELES, 1990 ; GRAF *et al.*, 1995). La resistencia a las tensiones axiales está fuertemente incrementada si la estructura de sostén es elástica y curva (KAPANDJI, 1974 ; GRACOVETSKY, 1990). El conjunto constituido por las vértebras, los discos intervertebrales, el sistema muscular y ligamentario, tiene en ambas direcciones una función de disipación de los esfuerzos mecánicos y de amortiguación de los choques (EVANS, 1968 ; STAGNARA, 1985 ; WINTERS y PELES, 1990) : soporta el peso de la cabeza, de los miembros superiores y del mismo tronco, y absorbe las fuerzas de reacción del soporte durante la marcha.

A la cifosis torácica “primaria” fuertemente determinada por su implicación en la función de la respiración, dado su papel de sostén de la caja torácica, se añaden por tanto dos curvaturas opuestas : la lordosis cervical asegura la movilidad y la estabilidad del soporte de los órganos de la vista y del oído - estereognosia - y del sistema nervioso central (WINTERS y PELES, 1990 ; KESHNER y ALLUM, 1990) ; la lordosis lumbar asume una gran parte de la movilidad sagital del tronco y de la absorción de los esfuerzos mecánicos (DAVIS, 1961 ; GRACOVETSKY *et al.*, 1981 ; ADAMS et HUTTON, 1983 ; ADAMS *et al.*, 1987 ; STOKES *et al.*, 1987 ; PANJABI *et al.*, 1994).

Estas curvaturas tienen además un verdadero papel motor en la locomoción bípeda (GRACOVETSKY, 1990). Su presencia convierte por “desacoplamiento” (PANJABI *et al.*, 1989, 1993, 1994) los efectos de las fuerzas aplicadas sobre los huesos coxales por el movimiento de los miembros inferiores, y sobre las apófisis vertebrales por los músculos de la espalda - momentos de rotación - en movimientos de traslación vertical. Estos contribuyen a generar la oscilación del centro de gravedad sobre un eje vertical durante la marcha (D'ANGELI-CHEVASSUT et GAVIRA, 1994), oscilación que permitirá adquirir energía potencial convertible en energía cinética, y por tanto en movimiento (CAVAGNA *et al.*, 1977).

Las tres curvaturas de la columna libre se completan con la cifosis sacra, rígida, pero cuya forma aparece fuertemente determinada por las tensiones mecánicas durante la ontogenia misma (ABITBOL, 1989). En su determinación intervienen en gran medida los esfuerzos de tensión de los ligamentos estabilizadores de la nutación del sacro entre los huesos coxales (*Ll. sacrospinale* y *sacro tuberale*), implicada por su inclinación; siendo esta última - interpretable como una plesiomorfía (SCHULTZ, 1960) - determinante para la forma de la lordosis lumbar (LEGAYE *et al.*, 1993).

1.3. Curvaturas sagitales

1.3.1. Bipedismo y funciones de reproducción

La estabilidad de la columna vertebral, su resistencia mecánica y su movilidad no son los únicos factores limitantes, a veces antagónicos, en el marco de los cuales deben situarse los reajustes morfológicos ligados al bipedismo. Este último modifica también ciertas modalidades anatómicas en relación con las funciones de reproducción. Por medio tanto de la “selección sexual” como de la “selección natural”, la reproducción diferencial es, en última instancia, el medio por el que actúan los procesos evolutivos (MAYR, 1963; LLOYD et GOULD, 1993). La implicación topográfica de la parte caudal de la columna vertebral en la cavidad abdominal ha llevado a cuestionar el significado adaptativo de las curvaturas sagitales lumbo-sacras en la gestación y el parto. Este problema reviste un interés particular a la vista de las modalidades específicas de estas funciones en *Homo sapiens*. El aumento de la duración de la gestación prolonga las tensiones mecánicas implicadas por la ocupación de la cavidad abdominal y por el desplazamiento del centro de gravedad que tiene lugar en dirección anterior en la posición bípeda (BUKOVI... *et al.*, 1993). La posición baja del sacro implica la participación de una estructura ósea poco deformable en la constitución del canal del parto (TAGUE et LOVEJOY, 1986). Los diámetros craneanos adquiridos por el feto a término, elevados con respecto a los diámetros pelvianos (SCHULTZ, 1949), ponen por lo tanto fuertemente en juego la integridad de éstos (ABITBOL, 1989). Existe una presión de selección con respecto a la morfología pelviana (ROSENBERG, 1992), y por tanto a la orientación y la curvatura del sacro, y por consiguiente a la de la lordosis lumbar con la que está fuertemente correlacionada (ABITBOL, 1987a; LEGAYE *et al.*, 1993). Sin embargo, varios trabajos parecen indicar la prevalencia de los esfuerzos mecánicos ligados al bipedismo en la determinación de la morfología pelviana y sacro-lumbar (LEUTENEGGER, 1974; ABITBOL, 1987a, 1987b, 1987c, 1988a, 1989).

Existe, por tanto, un cierto antagonismo entre las necesidades biomecánicas impuestas por el bipedismo y aquéllas requeridas por las funciones de reproducción. Este antagonismo se manifiesta en particular mediante el desarrollo de patologías lumbares durante la gestación (BUKOVI... *et al.*, 1993), y el riesgo de afectar a la integridad de la pelvis durante el parto (ABITBOL, 1989, ROSENBERG, 1992). Por otra parte, los datos paleontológicos documentan, indirectamente, la anterioridad de las limitaciones ligadas a la adquisición de la locomoción bípeda a aquellas correspondientes al aumento de la capacidad craneana (WEIDENREICH, 1947b; LOVEJOY et HEIPLE, 1972; LEUTENEGGER, 1972, 1974, 1982, 1987; LOVEJOY *et al.*, 1974, 1978, 1975; SIGMON, 1975; MCHENRY et CORRUCINI, 1976; ZIHLMAN, 1978; LEAKEY et HAYE, 1979; BEHRENSMEYER et LAPORTE, 1981; CHARTERIS *et al.*, 1981; JUNGERS, 1982; STERN et SUSMAN, 1983; TAGUE et LOVEJOY, 1986). El volumen cefálico impone, por lo tanto, limitaciones de forma importantes a una anatomía de los diámetros pélvicos, en el marco de un bipedismo ya adquirido.

En los mamíferos en general, la curvatura lumbar, pero también la curvatura sacra presentan una relativa plasticidad. Esta plasticidad permite una adaptación sólo imperfecta a las condiciones de la gestación y del parto en el hombre (BUKOVI... *et al.*, 1993). Sin embargo, esta plasticidad es suficiente para conseguir una modificación de estas dos curvaturas cuando se impone a cuadrúpedos

una postura erguida (NATHAN *et al.*, 1964) o una locomoción bípeda (PREUSCHOFT *et al.*, 1988 ; SLIJPER, 1946). Estos dos argumentos principales - la plasticidad de las curvaturas lumbo-sacras y su adaptación imperfecta a las funciones de reproducción - han conducido al rechazo del papel obstétrico de la curvatura lumbar y la inclinación sacra (ABITBOL, 1989 ; ROSENBERG, 1992). Las correlaciones sucesivas puestas en evidencia entre la proyección del centro de gravedad del tronco, la inclinación sacra, la lordosis lumbar (ABITBOL, 1987a ; AMONOO-KUOFI, 1992) y la cifosis torácica (LEGAYE *et al.*, 1993) ; la importancia fundamental de la posición del centro de gravedad para el equilibrio en el bipedismo (KUMMER, 1968, 1991 ; TARDIEU, 1991 ; PREUSCHOFT *et al.*, 1991); y el valor funcional de las curvaturas sagitales en la biomecánica de éste, apoyan por tanto muy fuertemente la preponderancia de la postura y la locomoción bípeda como factores esenciales en el determinismo evolutivo de las curvaturas sagitales de la columna vertebral, y por consiguiente un relativo antagonismo con las funciones de reproducción.

El fin, y de forma más general y especulativa, las modalidades anatómicas del bipedismo podrían tener otras implicaciones más profundas, aunque más indirectas, en las funciones de reproducción y en “los procesos de hominización”. En efecto, desde Charles DARWIN (1871) y después Friedrich ENGELS (1876), el papel motor de la postura erguida en la encefalización ha sido avanzado bajo diferentes hipótesis, quizás por medio de un desarrollo de las capacidades manipulativas, pero ciertamente acompañado de la modificación de las relaciones sociales en el seno del grupo, necesarias para la prolongación del período de aprendizaje (HEWES, 1961 ; JOLLY, 1970 ; PIVETEAU, 1973 ; ZIHLMAN *et al.*, 1978 ; LOVEJOY, 1981 ; LAZAR, 1986 ; ROSE, 1991 ; JABLONSKY *et al.*, 1993).

1.3.2. Ontogenia

La ontogenia de las curvaturas sagitales de la columna vertebral se ha explicado más a menudo en el contexto de un determinismo esencialmente funcional. Existen pocos datos sobre su adquisición en el transcurso del desarrollo. Clásicamente se considera que el embrión y el feto sólo presentan la curvatura llamada “primaria”, correspondiente a “la cifosis de los cuadrúpedos” y que se convertirá en la cifosis torácica (PATURET, 1951 ; DELMAS, 1970 ; GRAY, 1977 ; O’RAHILLY, 1980 ; MCLAIN *et al.*, 1995). La lordosis cervical sería la primera curvatura secundaria que se adquiere, y correspondería a un desarrollo de la motricidad del cuello, suficiente como para permitir la extensión de la columna cervical. La lordosis lumbar se formaría solamente a partir de los tres años aproximadamente, con la adquisición progresiva de la marcha en el niño (LAZENNEC, 1995). Por tanto, el determinismo de las curvaturas sagitales “secundarias” se interpreta como esencialmente de tipo mecánico, en todos los casos secundariamente mecánico, ya que la motricidad que supuestamente las determina debe estar permitida previamente por las funciones neuromotoras y la madurez del sistema músculo-esquelético. La descripción de una inversión de la curvatura cervical en los cuadrúpedos, y de una lordosis lumbar (SLIJPER, 1946 ; SCHULTZ, 1961 ; ABITBOL, 1987a), incluso si están débilmente desarrolladas, relativiza sin embargo la idea de una lordosis con un determinismo muy estrechamente ligado a la postura erguida. Relativizando la analogía filogenética, la idea *a priori* de una ontogenia secundaria de las lordosis cervical y lumbar pierde un poco su pertinencia.

Varios trabajos describen en efecto la existencia de lordosis en el feto (BAGNALL *et al.*, 1977 ; O’RAHILLY *et al.*, 1979 ; MED, 1980 ; DELMAS *et al.*, 1986 ; CHANSIGAUD *et al.*, 1986). DELMAS y PINEAU cuantifican las curvaturas de la columna vertebral sobre cortes sagitales de 9 embriones conservados en formol. Estos embriones tienen longitudes de 8 a 30 mm (distancia vértex-cóccix), correspondientes a las edades comprendidas aproximadamente entre menos de 7 semanas de gestación y 9,9 semanas (CARRERA, 1997). Los autores observan la evolución del perfil, que presenta dos mínimos de curvatura craneal y caudal, disminuyendo progresivamente la curvatura entre estos mínimos con el crecimiento del embrión. A partir del estado de 20 mm

(alrededor de 9 semanas), el perfil se caracteriza por un único mínimo situado en su mitad craneal, y las curvaturas continúan disminuyendo. Al final, en el estado de 30 mm (cerca de 10 semanas), las curvaturas de los extremos de los perfiles han disminuido de nuevo y el polinomio que permite cuantificarlas describe dos puntos de inflexión, craneal y caudal. Por lo tanto, aunque la columna vertebral parece tener sólo una concavidad anterior, presenta sin embargo, hacia las 10 semanas de gestación, dos inversiones de curvatura, cervical y lumbar. MED (1980), complementando un estudio acerca del desarrollo prenatal de las apófisis articulares vertebrales, observa efectivamente la presencia de lordosis cervicales ya delineadas en los embriones de 74 mm y 94 mm (alrededor de 13,5 y 15,3 semanas) y de una lordosis lumbar en un feto de 144 mm (más de 18 semanas). Por otra parte, CHANSIGAUD y colaboradores ponen claramente en evidencia, por ecotomografía, la presencia de una lordosis cervical en el feto que, a la semana 12 de amenorrea, se presenta en todos los casos observados (n=12). La frecuencia disminuye a partir de la clase de edad de 21-24 semanas, y esta disminución continúa a lo largo de la gestación. Las curvaturas de las lordosis que siguen siendo observadas decrecen también con el tiempo de gestación (CHANSIGAUD *et al.*, 1986). También se observan lordosis cervicales “dinámicas” al final de la gestación, que están determinadas por la elevación temporal de la cabeza por parte del feto. Estos resultados son concordantes con los obtenidos por BAGNALL y colaboradores (1977a) a partir de radiografías de 195 fetos de 8 a 23 semanas conservados en formol, en los cuales se observa una lordosis cervical en el 83% de los casos. La explicación más probable de la desaparición progresiva de la lordosis cervical en el feto parece ser el aumento de su tamaño en relación a la cavidad abdominal. CHANSIGAUD y colaboradores (1986) evocan también el aumento del peso de la cabeza. Esta hipótesis no ha de excluirse¹, pero parece más pertinente para explicar la manifestación tardía de la lordosis cervical en el niño. El principal factor que debe permitir su expresión es por tanto la adquisición de un sistema muscular de la cabeza y el cuello suficientemente potente como para compensar la acción del peso sobre la cabeza, que desde el nacimiento ya no está equilibrado por el empuje de Arquímedes en el fluido amniótico (BAGNALL *et al.*, 1977a).

Si la aparición de curvaturas fisiológicas está ligada a la adquisición de comportamientos motores como la elevación de la cabeza y la marcha (BAGNALL *et al.*, 1977a ; LAZENNEC, 1995), su determinismo parece más complejo, ya que las curvaturas se encuentran ya expresadas en el embrión. En particular, parece difícil evocar una relación de causalidad que vincule de forma unívoca la ontogenia del bipedismo y la lordosis lumbar, y por la que el primer fenómeno sería un determinante directo del segundo. Si la adquisición de un sistema muscular suficientemente eficaz es necesaria para que el determinismo de las lordosis se pueda expresar, de la misma forma la posibilidad de desarrollar en el extremo caudal una inversión de la curvatura sagital debe ser, muy probablemente, un prerequisite para la ontogenia del bipedismo.

1.4. Estudios de la columna vertebral

Cualquiera que sea la correspondencia que exista entre su aparición en la ontogenia y su determinación en la filogenia, la implicación evolutiva de las curvaturas sagitales de la columna vertebral parece fundamental para el bipedismo. Su presencia se ha investigado por lo tanto en el origen de la línea humana.

¹ La existencia de una correlación entre fenómenos no significa que deba existir entre ellos un vínculo de causalidad. CHANSIGAUD y col. (1986) han constatado una disminución de la proporción de los fetos que manifiestan una lordosis cervical en función del número de semanas de gestación. El volumen de la cabeza aumenta también con el desarrollo del feto (CARRERA *et al.*, 1997). Por lo tanto, existe necesariamente una correlación entre estas dos variables, pero sobre todo porque ambas son función del tiempo.

La conservación de los restos es el primer requisito para el estudio de esta adaptación anatómica fundamental. Ella es sin duda la principal causa del número relativamente bajo de trabajos en Paleontología que se han desarrollado sobre la evolución de la columna vertebral en la línea humana, y más aún, que han abordado el problema de las curvaturas vertebrales.

Sabemos, en definitiva, relativamente poco sobre la variabilidad de la columna vertebral, en el género *Homo* (BOULE, 1911 ; MCCOWN et KEITH, 1939 ; STEWART, 1960 ; PIVETEAU, 1965 ; HEIM, 1976 ; ARENSBURG et NATHAN, 1980 ; TRINKAUS, 1983 ; BROWN *et al.*, 1985 ; ARENSBURG, 1991 ; LATIMER et WARD, 1993 ; MCLARNON, 1993). La conservación incompleta no es la única dificultad. La variabilidad de la columna vertebral no se puede reducir a la de las partes que la componen y debe también ser tratada en conjunto. Pero de esta *entidad* anatómica, los procesos de fosilización sólo han conservado algunos de los elementos constitutivos: vértebras aisladas cuyas relaciones topográficas exactas de contigüidad articular han desaparecido. Por ello el problema de la variabilidad de las curvaturas sagitales en la evolución humana es uno de esos en los que la solución está particularmente comprometida por el “filtro de la fosilización”.

1.4.1. Variabilidad de los segmentos vertebrales

La variabilidad de los elementos vertebrales (FRANCIS, 1955 ; DAVIS, 1959 ; TULSI, 1971 ; AMONOO-KUOFI *et al.*, 1990 ; SCOLES *et al.*, 1988 ; WANG et SHIH, 1992 ; PANJABI, 1991a, 1991b, 1992 ; KOTHE *et al.*, 1996 ; MIYAKE *et al.*, 1996) y de las curvaturas sagitales (desde FICK, 1934 y DELMAS, 1951) se ha estudiado ampliamente en un contexto médico: las únicas estadísticas acerca de la variabilidad normal delimitan también las fronteras del dominio de la patología (si bien la relación contraria no es necesariamente exacta). La publicación de estudios morfológicos clásicos se encuentra así justificada en el marco de publicaciones de orientación clínica. Estas aportan nuevos datos, susceptibles de circunscribir, por ejemplo, y lo más frecuentemente, la etiología de la lumbalgia, de la espondilolisis o, de manera más general, los mecanismos de inestabilidad vertebral. El conocimiento de la variabilidad normal y de sus límites es también una necesidad en el marco de la práctica quirúrgica (GILAD et NISSAN, 1986 ; PANJABI *et al.*, 1991a, 1991b, 1992 ; DOHERTY, 1995 ; HAWN-MO, 1995 ; RONGMING XU, 1995 ; SCOLES *et al.*, 1988 ; WANG, 1992). El interés reside sobre cada segmento aislado cuando se trata de estudios osteológicos. Cuando la base de estudio es el resultado de una técnica de imaginería aplicada sobre el vivo, o simplemente una medida directa externa, puede considerarse la forma general de la columna.

Sin embargo, pocos trabajos han intentado establecer relaciones entre los segmentos óseos considerados aisladamente, bajo el punto de vista de su morfología o simplemente de su posición (BRYANT *et al.*, 1989 ; SICARD et GAGNON, 1993), y el conjunto de la columna vertebral en el plano sagital (MILNE et LAUDER, 1974, 1976 ; STOKES *et al.*, 1987). Las dificultades que se oponen a la recopilación de los dos tipos de datos, necesarios para estudiar la relación entre las curvaturas vertebrales fisiológicas y la morfología ósea, son evidentes. Efectivamente parece prácticamente imposible disponer de datos radiográficos o biométricos completos (sobre una muestra no patológica), y efectuar sobre la misma muestra medidas osteológicas. Si lo primero es realizable, para lo segundo hay que contentarse con datos menos precisos y más difícilmente accesibles, basados en técnicas de imaginería.

Uno de los objetivos frecuentemente perseguidos por estos trabajos dentro de un contexto médico es el establecimiento de una norma, aplicable a la fabricación de osteosíntesis y de aparatos de fijación posterior (ZINDRICK *et al.*, 1987 ; EBRAHEIM, *et al.* 1996 ; AHARINEJAD *et al.*, 1990 ; WILKE *et al.*, 1997). Más que una descripción fina de la variabilidad existente, el planteamiento es en cierto modo tipológico, puesto que se trata de delimitar la horquilla de variación a un pequeño número de clases que se considerarán para la producción industrial. Además, los efectivos analizados frecuentemente son escasos. La información documentada está lejos de ser despreciable pero la orientación del estudio es inversa a la perseguida.

1.4.2. La columna vertebral como un todo

Por otra parte la columna vertebral ha sido estudiada como un conjunto funcional con las estructuras que la rodean, *in vivo* (KUMAR *et al.*, 1995a, 1995b), y en particular las curvaturas vertebrales (DEAN *et al.*, 1991 ; PANJABI *et al.*, 1994). Distintas técnicas de recogida de datos externos (KNUSSMAN, et FINKE, 1980 ; MILNE et LAUDER, 1976) o de radiografía (WANGERMEZ, 1968 ; VIGNES, 1982 ; STAGNARA, 1985 ; BERNHARDT et BRIDWELL, 1989 ; POLLY *et al.*, 1996) permiten así estudiar la variabilidad de las curvaturas sagitales, con protocolos orientados bien a poner en evidencia comportamientos dinámicos o cinemáticos (ROY *et al.*, 1994), bien a describir su variabilidad postural o estática (FICK, 1934 ; STOKES *et al.*, 1987 ; BLACK *et al.*, 1996). Varios de estos trabajos han hecho uso de la regresión polinomial para cuantificar los perfiles estudiados (PINEAU et MOLLARD, 1983 ; KNUSSMAN, et FINKE, 1980 ; MILLER et SKOGLAND, 1982).

Se han elaborado desarrollos informáticos con el fin de describir los comportamientos de la columna vertebral en su conjunto o por partes, abstrayéndose del soporte óseo físico y de sus conexiones (DIETRICH *et al.*, 1990 ; LAVASTE *et al.*, 1991 ; PORTIER *et al.*, 1993 ; SHARMA *et al.*, 1995 ; DESCRIMES *et al.*, 1995 ; HARRISON *et al.*, 1996). Se trata de trabajos de modelización. Su orientación es cercana a la seguida por aquéllos de interés para la industria médica. El objetivo es obtener una adecuación entre modelo y realidad a fin de efectuar una descripción de los comportamientos mecánicos de la columna vertebral con un control total de los parámetros (SHIRADZI-ADL, 1993). El fundamento es aquí de nuevo una reducción de la variabilidad hacia un tipo anatómico medio que supuestamente represente lo mejor posible el comportamiento “normal” de la columna vertebral. No todos los elementos anatómicos óseos están representados (ASPDEN, 1989; DESCRIMES *et al.*, 1985) y las relaciones anatómicas entre estos elementos a menudo se encuentran simplificadas. El límite de esta abstracción será definido, de manera recurrente, por una correspondencia aceptable entre el modelo y el comportamiento ya documentado en el vivo. En un mismo orden de ideas, se han intentado modelizaciones mecánicas en las que diferentes elementos constitutivos del segmento vertebral son sustituidos por materiales de síntesis (PANJABI *et al.*, 1989, 1994 ; PANJABI et AUXLAND, 1994). Otros estudios de comportamiento *in vitro* se apoyan sobre los elementos anatómicos reales tras la disección (SKALLI *et al.*, 1995).

Estos diferentes niveles de abstracción - aislamiento de elementos anatómicos, sustitución de materiales o modelización matemática - no aportan prácticamente ningún dato acerca de la variabilidad interindividual de las curvaturas vertebrales. Por ello, con frecuencia, los resultados de estos trabajos se toman poco en consideración en el ámbito de la Antropología. Sin embargo permiten enfoques más rigurosos acerca de los comportamientos mecánicos del conjunto y de las funciones implicadas por las características de forma y de composición de los elementos constitutivos de la columna. Resulta difícil por lo tanto ignorar los datos que proporcionan cuando la discusión se encamina precisamente hacia el comportamiento de la columna vertebral en su conjunto, sobre la base de vértebras aisladas.

Este objetivo, más o menos explícitamente confesado según la dificultad de la empresa (con frecuencia el estado fragmentario de los restos), es el a menudo perseguido en los trabajos antropológicos sobre vértebras fósiles. Sin embargo, frente a la complejidad del problema parece haber prevalecido la preocupación de disponer de un método simple, cuya definición precise beneficiarse de un consenso general, cuya reproductibilidad sea buena, y que permita el estudio de muestras numéricamente grandes. Por ello, las definiciones de altura sagital anterior (M1) y altura sagital posterior (M2) propuestas por R. MARTIN (1928) han sido las más utilizadas para la caracterización de la morfología vertebral en este plano. A. DELMAS (1956) hace remontar a D.J. CUNNINGHAM (1886) el muy sencillo cálculo del índice de la altura posterior del cuerpo vertebral en relación a su altura anterior. La no conservación del disco intervertebral ha sido suficiente, parece ser (si exceptuamos ciertos trabajos de medicina legal que establecen la

correlación de sus dimensiones con las del cuerpo vertebral), para eludir la cuestión del espacio intervertebral en los trabajos antropológicos. Un ejemplo de lo contrario es proporcionado, sin embargo, por el estudio de la columna vertebral de Kebara cuyas relaciones articulares entre dos vértebras adyacentes, conservadas por los procesos tafonómicos, han permitido la fosilización del espacio intervertebral fisiológico (ARENSBURG, 1991).

Renovando las críticas ya formuladas por BOOKSTEIN (1947, 1982, 1983) en relación a los métodos cuantitativos de la craneología “clásica”, KRUKOFF (1978) subraya la no adecuación del sistema de medidas al objetivo perseguido, que es la descripción unívoca de la forma. Los puntos craneométricos definen segmentos que no son contiguos, es decir cuyos extremos no se confunden, y que tampoco están definidos en un sistema espacial de referencia. La relación entre dos longitudes proporciona una información sobre la forma. Esta información es sin embargo muy incompleta ya que los segmentos pueden *a priori* disponerse en una infinidad de formas diferentes uno en relación a lo otro, sin que el valor del índice cambie. El autor emplea el ejemplo un poco más elaborado de un sistema de cuatro “cuerdas” definidas por cuatro puntos craneométricos relacionados entre ellos, dos a dos, por un punto común. La consideración de un quinto elemento, cuerda suplementaria o ángulo, es necesaria y suficiente para fijar la forma del cuadrilátero.

El índice de las alturas, anterior y posterior, que se emplea clásicamente para la descripción del cuerpo vertebral (DUPARC, 1942 ; ROSE, 1975 ; JANKAUSKAS, 1993; ERICKSEN, 1976, 1978a, 1978b ; MAFART, 1980 ; MILNE et LAUDER, 1974, 1976) se encuentra sometido por lo tanto a estas mismas limitaciones. Su uso para estimar el ángulo recíproco de las superficies craneal y caudal de las vértebras implica la hipótesis *a priori* (y siempre implícitamente asumida) de que la forma del cuerpo vertebral en el plano sagital es la de un trapecio. Esta aproximación no es válida en la región cervical, y para que la justificación sea completa, debe además tratarse, en las regiones torácica y lumbar, de un trapecio isósceles, lo cual no es ciertamente verdadero para los últimos segmentos lumbares y no se ha demostrado para los otros segmentos.

Por otra parte, la constitución de un sistema de segmentos que describa más precisamente el cuadrilátero no parece posible a partir de las medidas de R. MARTIN ya que los puntos que definen los diámetros sagitales superior e inferior no son los mismos que aquéllos a partir de los cuales se miden las alturas (BRÄUER, 1988). Por tanto ha de definirse un sistema de medidas basado solamente en cuatro puntos y que describa realmente un cuadrilátero. Un segmento en diagonal permitirá describir la forma de este cuadrilátero.

1.5. Metodología propuesta

1.5.1. Principio

Un número limitado de trabajos ha tratado de relacionar la morfología vertebral o la posición relativa de los elementos vertebrales y la forma de las curvaturas sagitales, a veces evaluadas mediante simples medidas angulares (STOKES *et al.*, 1987 ; KIPPERS et PARKER, 1989 ; SICARD et GAGNON, 1993), o de modo más preciso utilizando ajustes polinomiales (curvas de spline: BRYANT *et al.*, 1989).

La metodología propuesta aquí intenta establecer esta relación entre la morfología de las vértebras consideradas separadamente y las curvaturas sagitales que esta morfología implica. Ella se basa simplemente en la determinación de la forma de los dos elementos que participarán en estas curvaturas: el cuerpo vertebral y el espacio intervertebral implicado por la morfología de las vértebras adyacentes. Ambos elementos se representarán como cuadriláteros que podrán ser apilados mediante el cálculo. La pila de cuadriláteros dibujará por lo tanto el perfil que resulta de la participación de la forma de cada uno de todos estos elementos. Las coordenadas de la pila en el

plano permitirán hacer un análisis cuantitativo del perfil, y por tanto efectuar un análisis estadístico de los parámetros que lo describen. Estos son calculados por medio de una regresión polinomial.

A. Forma de los cuerpos vertebrales y de los espacios intervertebrales

Para tener en cuenta la forma exacta del contorno del cuerpo vertebral considerado como un cuadrilátero, se necesitan cinco medidas angulares y/o lineares. A partir de cuatro puntos en el plano sagital, sobre los anillos de las caras superior e inferior de los cuerpos vertebrales, se miden los cuatro lados del cuadrilátero así como una de sus diagonales. Estas medidas permiten calcular los ángulos del cuadrilátero.

El espacio intervertebral determinado por la morfología de dos vértebras adyacentes se deduce del siguiente modo. En un plano parasagital se elige un diámetro de la superficie articular posterior. Se miden las cuatro distancias comprendidas entre los extremos de este segmento y los puntos anteriores y posteriores de la superficie del cuerpo vertebral. Lo mismo se realiza sobre la cara inferior de la vértebra del segmento inmediatamente superior (es decir sobre la superficie inferior del cuerpo y la superficie articular inferior). Para cada vértebra, el diámetro de la superficie articular, las cuatro medidas tomadas a partir de la superficie articular hasta el cuerpo, y el diámetro de la superficie del cuerpo, definen la posición del diámetro de la superficie articular con respecto al de la superficie del cuerpo.

La distancia al plano sagital medio se determina por aproximaciones sucesivas hasta conseguir la precisión deseada. Para cada vértebra, el diámetro de la superficie articular y los cuatro segmentos hasta la superficie del cuerpo son proyectados sobre el plano mediano. Cuando los diámetros de las superficies articulares de dos vértebras adyacentes coinciden, los otros ocho segmentos permiten deducir el espacio exacto dejado entre los dos diámetros de las superficies del cuerpo. Este espacio, del mismo modo que el cuerpo vertebral, se trata como un cuadrilátero cualquiera cuyos lados anteriores y posteriores y una diagonal son calculados. Por otra parte, se puede insertar un espacio entre las carillas articulares posteriores a fin de corregir la ausencia de los elementos de la cápsula articular interpuestos entre ellas.

B. Deducción y descripción del perfil

Los cuadriláteros que representan los cuerpos vertebrales y los que representan los espacios intervertebrales pueden ser apilados mediante cálculos. Los ángulos que existen en la pila son deducibles: los ángulos entre los límites de cada región cervical, torácica y lumbar, permiten una primera caracterización del perfil. A continuación se ajusta una función polinomial a las coordenadas de los cuadriláteros en el plano, tal y como se sitúan en la pila. Se deducen los parámetros interesantes para describir de un modo cuantitativo el perfil: longitud desarrollada, extremos, puntos de inflexión, valor de la curvatura en cada punto, y máximos de curvatura.

Con estos datos se pueden calcular a continuación los parámetros estadísticos. Ellos permitirán definir la variabilidad de la muestra, inducir la de la población, comparar entre sexos, y situar individuos suplementarios dentro de esta variabilidad.

1.5.2. Aplicación

A. Hombre actual

Con el fin de obtener una primera descripción de la variabilidad de las curvaturas sagitales implicadas por la morfología vertebral, se ha aplicado el método a una muestra subactual no patológica (según criterios de observación macroscópica) y de edad y sexo conocidos, de origen arqueológico: se ha seleccionado a partir de la colección de *Spitalfields* conservada en el *British Museum of Natural History* en Londres (MOLLESON *et al.*, 1993).

El método permite apilar sólo algunos segmentos si todos no son conservados, o apilar sólo los cuerpos vertebrales, bien, alternativamente los cuerpos vertebrales y los espacios intervertebrales. Es por lo tanto utilizable en las condiciones de un estudio paleoantropológico sobre restos incompletos y sobre solamente cuerpos vertebrales si los arcos están ausentes o son demasiado fragmentarios. El método se ha aplicado a los restos vertebrales de varios neandertales.

B. *Neandertales*

La idea de una sistemática linear del reino animal, que manifieste una progresión continua a lo largo de la "scala naturae" (MASON, 1984 ; MAYR, 1989 ; TASSY, 1991), coronada, según la interpretación finalista correspondiente, por la especie humana en su forma actual, fue en cierto modo el marco heurístico en el que se interpretaron (bastante después de su desaparición como esquema explicativo general de la diversidad zoológica) los restos fósiles del hombre de Neandertal (WEIDENREICH, 1943, 1947a, 1947b ; CLARK HOWELL, 1957 ; PIVETEAU, 1983). Estos fueron considerados como representantes de una fase intermediaria, "paleoantropiana" según KEITH, de la hominización (HRDLIČKA, 1927 citado por SPENCER y SMITH, 1981 ; VALLOIS, 1954 ; ŠKERLJ, 1960 ; HOWELLS, 1974 ; TRINKAUS y SHIPMAN, 1993). En este contexto, los restos vertebrales del esqueleto de *La Chapelle-aux-Saints* fueron interpretados por M. BOULE en 1911 como pertenecientes a un homínido cuya actitud no podía ser totalmente erguida, y cuya columna vertebral no podía por tanto presentar unas lordosis cervical y lumbar pronunciadas. Esta interpretación ha sido después ampliamente contestada y desmantelada, ya que los caracteres vertebrales citados por BOULE no permiten llegar a la conclusión de una morfología fundamentalmente diferente de la morfología actual, en cuanto a su implicación en el determinismo de una lordosis cervical (TRINKAUS, 1985). Sin embargo, la argumentación, tanto de un lado como del otro, descansa sobre caracteres morfológicos indirectamente ligados al determinismo de la curvatura sagital, tales como la inclinación y la anatomía bífida de las apófisis espinosas o, de manera más convincente, la oblicuidad de las apófisis articulares (BOULE, 1911 ; ARAMBOURG, 1955 ; STRAUSS et CAVE, 1957 ; STEWART, 1962).

Las funciones de sostén y de movilidad del cráneo que son asumidas por la columna cervical, y también de soporte de los músculos cervicales, permiten considerar sin embargo la posibilidad de modalidades diferentes del perfil sagital implicadas por la morfología vertebral en los neandertales (SOLOW et TALGREN, 1976).

A nivel de las relaciones con la parte anterior del tronco, la morfología particular de la región mastoidea (WALENSKY, 1964 ; ELYAQTINE, 1995, 1996, 1997) que, en *Homo sapiens sapiens*, está implicada en el equilibrio en de la cabeza y la flexión del cuello a partir de una posición de extensión, por la acción del *M. sternocleidomastoideus* (KRANTZ, 1963), es un índice suplementario de las diferencias muy probables en la estática y la dinámica de la sustentación de la cabeza en el neandertal. La morfología craneal y facial del neandertal supone esfuerzos mecánicos más elevados en el mantenimiento en equilibrio inestable de la cabeza (WINTERS et PELES, 1990). La proyección del macizo facial supone en efecto momentos más importantes en el sentido de la flexión (VALLOIS, 1926 ; LEROI-GOURHAN, 1955 ; RAK, 1986 ; DEMES, 1987 ; TRINKAUS, 1987 ; MAUREILLE, 1994), y la morfología de la región occipital sugiere modalidades diferentes de la sustentación de la cabeza (TRINKAUS et LEMAY, 1982 ; ANTON, 1994).

En este contexto biomecánico, la implicación de la columna cervical en el plano sagital puede contemplarse, en particular, por las uniones posteriores del cráneo y de las vértebras del cuello que hacen intervenir los paquetes musculares insertados sobre las vértebras cervicales y torácicas altas, y generan un momento de rotación en el sentido de la extensión (*m. longissimus capitis, longissimus cervicis, iliocostalis cervicis, splenius capitis, splenius cervicis, rotatores cervicis, multifidus, semispinalis capitis, semispinalis cervicis, spinalis cervicis, intertransversarii posterior cervicis, interspinales cervicis, rectus capitis*). De la misma manera, la columna estará, en menor medida,

implicada en la flexión del cuello (*Mm. longus capitis, longus coli, rectus capitis anterior, scalenus*). De un punto de vista más general, la existencia de esfuerzos mecánicos diferentes es susceptible de afectar la amplitud y la forma de la lordosis cervical, en cuanto al papel que juega esta última, en sí misma, en los fenómenos de “desacoplamiento” que asegura la estabilidad de la cabeza (GRACOVETSKY, 1990 ; WINTERS et PELES, 1990 ; PANJABI *et al.*, 1993). Sin embargo, la complejidad de la biomecánica del sistema cabeza-cuello, y las cuestiones que esta continua planteando en el hombre actual, marca ya los límites de una interpretación simple y unívoca en el neandertal.

Al nivel de la cifosis torácica, la robustez de las costillas (TRINKAUS, 1983) es otro dato morfológico que permite, *a priori*, esperar valores de cifosis que podrían diferir de aquellos de las poblaciones actuales (MORRIS *et al.*, 1961). La robustez del conjunto del esqueleto y las inserciones musculares marcadas sugieren un peso corporal elevado, y por consiguiente un aumento de los esfuerzos mecánicos a nivel lumbar, donde se efectuará la transmisión del peso del tronco hacia los miembros inferiores por medio de la cintura pélvica (TWIESELNMAN, 1961 ; LOVEJOY et TRINKAUS, 1980 ; TRINKAUS, 1983 ; SENUT, 1985 ; BEN-ITZHAK *et al.*, 1988 ; TRINKAUS *et al.*, 1991 ; HAMBUCKEN, 1993 ; RUFF *et al.*, 1993 ; VANDERMEERSCH et TRINKAUS, 1995). Es, de hecho, lo que parece indicar la fuerte robustez de las vértebras lumbares mismas (TRINKAUS, 1983). Aquí de nuevo, se puede *a priori* esperar implicaciones diferentes de la morfología vertebral en la determinación de la lordosis lumbar. Como para el sistema cabeza-cuello, los esfuerzos mecánicos implicados en el conjunto toraco-lumbar son susceptibles de afectar la morfología de la lordosis por medio de los músculos extensores del tronco, en particular aquellos que tienen una inserción sobre las vértebras lumbares y torácicas, y las costillas (*Mm. iliocostalis lumborum, iliocostalis thoracis, longissimus thoracis, spinalis thoracis, semispinalis thoracis, multifidus, rotatores, interspinales lumborum, intertransversarii lumborum*) ; y también por la acción de los músculos flexores del tronco, tanto los que tienen una relación directa con la columna vertebral (*Mm. quadratus lumborum, psoas*), como los de la pared anterior del tronco (*Mm. externus abdominis, obliquus internus abdominis, transversus abdominis, rectus abdominis*).

En fin, de manera general, existe una correlación entre las tres curvaturas sagitales de la columna libre así como una correlación de éstas con la inclinación sacra (ABITBOL, 1987a ; LEGAYE *et al.*, 1993), lo cual implica la repercusión de una diferencia eventual, afectando a una parte del perfil sagital, en el conjunto de las curvaturas vertebrales. Por otra parte, estas correlaciones permiten intuir que a partir de una descripción fina de las curvaturas sagitales de la columna vertebral, las modalidades del bipedismo y del equilibrio del tronco pueden ser percibidas.

La metodología desarrollada debe por lo tanto permitir abordar, bajo un punto de vista osteológico, la variabilidad de las curvaturas sagitales de la columna vertebral en el hombre actual, las implicaciones de la morfología de los segmentos vertebrales en su determinación y, en particular, estudiar estas curvaturas sagitales en los neandertales.

2. Méthodologie:

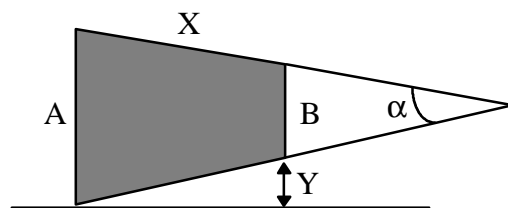
2.1. *Forme du corps vertébral:*

D'après l'édition de 1977 du manuel d'anatomie de H. GRAY, les courbures secondaires lombaire et cervicale qui sont « *développées après la naissance [...] sont dues principalement à la forme des disques intervertébraux* », tandis que les courbures primaires thoracique et sacrée « *sont dues à la forme des corps vertébraux* » (GRAY, 1977). Cette opinion se situe dans une perspective ontologique issue des travaux de CUNNINGHAM (1886). Les résultats obtenus par cet auteur l'ont amené à considérer que les lordoses sagittales étaient déterminées de façon mécanique et *secondairement* : au niveau cervical par le relèvement de la tête chez l'enfant entre le troisième et le cinquième mois ; et au niveau lombaire, à partir d'une période qui débute entre 3 et 5 ans, et en conséquence du "redressement" des membres inférieurs lors de l'acquisition de la marche à partir de l'âge de 2 ans environ. Cette opinion fit autorité et fut ensuite diffusée par les traités d'anatomie (TESTUT et LAJARTJET, 1932). PATURET (1951) en déduit que « *la forme des corps vertébraux et des disques intervertébraux [devaient être dans ce cas] la conséquence des courbures et non leur cause* ». DELMAS (1970) rappelle brièvement ce schéma de courbures primaires et secondaires, et celui d'un déterminisme mécanique de la lordose lombaire qui « *résulte de la contraction des muscles extenseurs de la colonne vertébrale* ». SLIJPER (1946) assimilait aussi la corrélation dans différentes espèces de mammifères et dans l'ontogénie humaine, entre la morphologie des éléments vertébraux et la forme des courbures sagittales, à un lien de causalité - la seconde étant censée déterminer la première. La forme non différenciée des corps vertébraux du fœtus est un argument constamment cité dans ce sens.

Des travaux montrant l'acquisition forcée d'une courbure lombaire chez des macaques entraînés à la bipédie (PREUSCHOFT *et al.*, 1988), ou dont le tronc est maintenu artificiellement érigé (NATHAN *et al.*, 1964), ont révélé que les modifications entraînées étaient principalement le résultat d'une modification de l'angle lombo-sacré et des disques lombaires. Plusieurs travaux ont par ailleurs mis en évidence la présence de lordoses cervicale et lombaire chez l'embryon et le fœtus (MED, 1980 ; DELMAS et PINEAU, 1986 ; CHANSIGAUD *et al.*, 1986), en dépit de l'absence des contraintes mécaniques habituellement évoquées comme déterminantes, et en dépit d'une morphologie non différenciée des corps vertébraux (BIRKNER, 1980 ; EDELSON *et al.*, 1988). La question du déterminisme des courbures sagittales reste donc confuse, et probablement en partie parce que la participation respective des éléments vertébraux, corps vertébraux et espaces intervertébraux, n'est pas considérée. Si le rôle des disques apparaît évident, celui de la morphologie de l'ensemble de la vertèbre, avec ses articulations postérieures, est en fait peu évoqué. Même la question de la participation du corps vertébral, qui est méthodologiquement plus simple à aborder, a été le plus souvent traitée en se basant sur des simplifications *a priori* de leur forme et reste donc problématique.

Les études de PANJABI *et al.* (1991a, 1991b, 1992) permettent d'estimer que les corps vertébraux du segment thoracique pourraient être responsables d'une courbure moyenne de 46°, valeur qui correspond à la somme de toutes les inclinaisons mesurées et est appelée par les auteurs "angle osseux". Pour le segment cervical, un angle moyen total de 30.7° est calculé et correspond à une lordose. En revanche, le sens de l'inclinaison mesurée n'est pas mentionné pour l'étude de l'étage lombaire dont l'angle total serait de 28°. Il semble finalement, au vu de ces données, que la morphologie des corps vertébraux intervienne dans la réalisation des trois courbures rachidiennes. Les anthropologues semblent aussi partir de cette base pour étudier la forme des vertèbres et tenter d'inférer l'aspect général du profil rachidien. La plupart des discussions sur la forme des corps vertébraux sont dans ce contexte étayées sur un indice des hauteurs M1 et M2, antérieure et

postérieure (CUNNINGHAM, 1886; TURNER, 1886; AEBY, 1879; ANDERSON, 1883; MARTIN, 1893, 1959 ; HASEBE, 1913; MENDES, 1918; TROTTER, 1926; COWN et KEITH, 1939; LANIER, 1939 ; DUPARC, 1942 ; ROBINSON, 1972 ; ROSE, 1975 ; MAFART, 1980 ; MULLER *et al.*, 1992 ; JANKAUSKAS, 1994 ; SANDERS, 1994, 1995, 1998). Cet indice correspond toutefois à une réduction conséquente du problème puisqu'il fait abstraction de l'orientation relative des segments définissant ces mesures, abstraction qui ne peut être faite pour l'étage cervical où la morphologie du corps de la vertèbre est caractérisée par une obliquité de la face antérieure, orientée de haut en bas et d'arrière en avant (DELMAS, 1970). Aux étages thoracique et lombaire, cette simplification peut laisser inaperçue une angulation particulière des plateaux qui, même si elle doit être moins prononcée qu'à l'étage cervical, peut modifier conséquemment, par sommation, l'aspect général du profil quand la totalité des éléments rachidiens est impliquée. Dans son étude de la colonne thoraco-lombaire du squelette de l'enfant de Nariokotomé (KNMWT 15000), LATIMER et WARD (1993) prennent en compte les diamètres sagittaux supérieur et inférieur du corps, en plus des hauteurs, pour calculer l'angulation des plateaux (figure 1).



$$\alpha = 2 \cdot \arctan \left(\frac{A - B}{2 \cdot X} \right)$$

Figure 1

Déduction de l'inclinaison du plateau à partir des mesures de trois côtés du corps vertébral selon LATIMER et WARD (1993). La formule implique que la forme du corps vertébral est assimilée à un trapèze isocèle.

L'hypothèse faite *a priori* sur la géométrie du corps vertébral est ici moins lourde, puisque celui-ci est assimilé à un trapèze isocèle, mais par cette méthode, la forme réelle du corps n'est toujours pas décrite. De plus, le choix de la fonction arctangente présuppose que la mesure en projection du diamètre sagittal du plateau est une valeur accessible, autrement dit qu'il est possible de définir l'axe de symétrie horizontal du trapèze. Le cas échéant, il faut assimiler la mesure du diamètre sagittal à sa valeur en projection, ce qui constitue une approximation. La fonction arcsinus permettrait en fait de calculer alpha sans passer par cette dernière approximation, puisqu'elle fait intervenir l'hypoténuse du triangle qui correspond effectivement au diamètre sagittal du plateau.

Pour de ne pas imposer au corps vertébral une géométrie particulière, il faut en fait le considérer comme un quadrilatère quelconque. Les dimensions linéaires qui sont suffisantes pour le définir sont au nombre de cinq, à choisir parmi les mesures des côtés du quadrilatère et de ses deux diagonales. Hauteurs antérieure et postérieure, diamètres sagittaux supérieur et inférieur, et diagonale issue du sommet antéro-supérieur du polygone ainsi défini permettent donc de fixer exactement sa forme (figure 2).

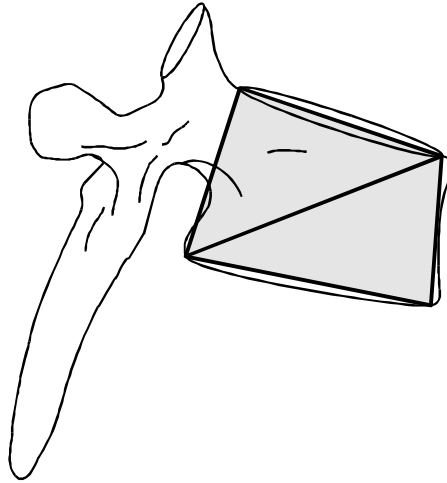


Figure 2

Représentation de la forme du corps vertébral par un quadrilatère quelconque à partir des mesures de ses faces et d'une diagonale dans le plan sagittal. Ces cinq segments suffisent à définir la forme du quadrilatère sans faire hypothèse d'une figure géométrique régulière.

2.1.1. Définition du quadrilatère et calcul des angles:

La mesure des quatre côtés du quadrilatère et d'une de ses diagonales contient toute l'information nécessaire pour définir sa forme, et ses angles sont donc calculables. Si A, B, C et D, sont les côtés du quadrilatère (Figure 3), E la diagonale issue du sommet (A,B), et α , β , γ , et δ les angles, respectivement, des sommets (AB), (BC), (CD) et (DE), la valeur de ces angles s'exprime de la façon suivante:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{A^2 + E^2 - D^2}{2AD}\right) + \arccos\left(\frac{B^2 + E^2 - C^2}{2BE}\right), \quad \beta = \arccos\left(\frac{B^2 + C^2 - E^2}{2BC}\right),$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{D^2 + E^2 - A^2}{2DE}\right) + \arccos\left(\frac{C^2 + E^2 - D^2}{2CE}\right), \quad \text{et } \delta = \arccos\left(\frac{A^2 + D^2 - E^2}{2AD}\right).$$

Chaque élément vertébral - c'est à dire chaque corps vertébral et, dans un second temps, chaque espace intervertébral libéré entre deux vertèbres adjacentes quand celles-ci sont articulées par leurs surfaces articulaires postérieures (Cf. 2.2., p. 61) - peut donc être représenté par un quadrilatère quelconque dont cinq mesures sont suffisantes pour définir la forme et calculer la valeur de ses angles.

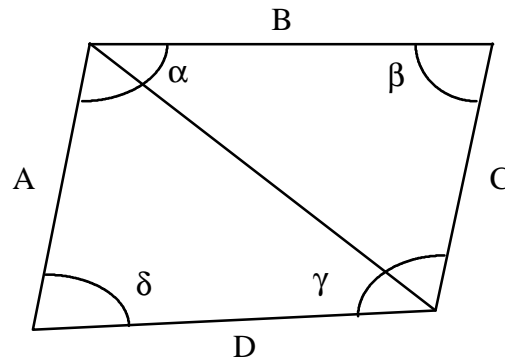


Figure 3
Nomenclature des côtés et des angles du quadrilatère telle qu'elle apparaît dans les équations du calcul des angles α , β , γ , et δ .

2.1.2. Définition des mesures sur les corps vertébraux:

Les cinq mesures nécessaires à la définition de la forme du quadrilatère sont pour le corps vertébral des mesures directes prises dans le plan sagittal médian.

Les mesures définies par R. MARTIN (BRÄUER, 1988) : diamètre sagittal supérieur (M4), diamètre sagittal inférieur (M5), hauteur antérieure (M1) et hauteur postérieure (M2), sont prises entre les limites externes du listel vertébral pour les deux mesures de diamètre, et du listel supérieur au listel inférieur pour les mesures de hauteurs. Les mesures des diamètres ont donc le désavantage d'être limitées par des points se situant dans des zones anatomiques particulièrement affectées par les lésions dégénératives, même lorsqu'elles se manifestent sous une forme mineure – remaniements arthrosiques du listel et des limites du corps vertébral au niveau antérieur, et ossification du ligament commun antérieur (becs de Perroquet) dans l'hyperostose diffuse (RESNICK, 1988a ; RESNICK *et al.*, 1988c, 1988d). Les limites antérieures du listel vertébral sont de même facilement endommagées lors des processus taphonomiques et de fossilisation, elles sont fréquemment effacées même si il n'y a pas nécessairement une perte importante de substance du corps vertébral. Par ailleurs les quatre mesures sagittales de MARTIN ne sont pas définies sur des points qui se correspondent et ne peuvent de ce fait former un quadrilatère susceptible de représenter la forme du corps vertébral. En effet, les limites externes du listel qui définissent les diamètres sagittaux de MARTIN ne se confondent pas avec les points sur lesquels sont mesurées les hauteurs des corps vertébraux, et qui se situent sur la surface même du listel.

Les points définis sur les listels par les hauteurs antérieures et postérieures telles qu'elles sont décrites par R. MARTIN sont en définitive ceux que nous avons choisis, au vu des problèmes de conservation notés précédemment, pour définir les cinq mesures du corps vertébral. Les points antérieurs et postérieurs qui limitent les diamètres sagittaux supérieur et inférieur du corps vertébral se situent donc à proximité du milieu de la largeur du listel, et exactement au point où celui-ci est le plus proéminent, c'est à dire le plus haut par rapport au plan du plateau vertébral. Il est important de noter que l'incertitude plus grande dont est entachée la localisation de ces points, au niveau lombaire particulièrement, où le listel est large et plan, n'affecte pas la forme du quadrilatère quant à l'implication qu'elle peut avoir pour la détermination des courbures vertébrales. Les angles de celui-ci ne seront pas modifiés par une localisation plus antérieure ou plus postérieure des points sur le listel si celui-ci – précisément – est plan, et si les points choisis pour mesurer les diamètres sont bien confondus avec ceux qui délimitent les diagonales.

2.2. Espace intervertébral déterminé par la morphologie vertébrale:

2.2.1. Principe de déduction de l'espace intervertébral:

L'articulation de deux vertèbres adjacentes par leurs facettes postérieures ménage un espace vide entre les plateaux vertébraux. C'est la forme de ces espaces, et celle des corps vertébraux, qui détermineront les courbures générales de la colonne vertébrale considérée d'un point de vue strictement ostéologique. On ne peut assimiler directement les courbures rachidiennes observées sur le vivant aux courbures envisagées comme le seul résultat de la morphologie osseuse des vertèbres. L'abstraction nécessaire pour passer d'un concept à un autre fait intervenir à la fois les propriétés mécaniques des tissus mous et la manière, passive ou dynamique, dont ils sont mis en jeu dans la posture de l'individu. Parmi le grand nombre des facteurs qui interviennent dans le déterminisme des courbures sagittales "physiologiques", il faut relever en particulier: les propriétés mécaniques d'élasticité et de compressibilité du disque intervertébral, l'épaisseur et la forme des cartilages articulaires postérieurs, les contraintes antagonistes de la musculature du dos et de la musculature abdominale, le rôle passif des contentions ligamentaires ainsi que la répartition des masses et la position du centre de gravité suivant la posture du sujet (KEITH, 1923a-f; FICK, 1934; DELMAS, 1951, 1956, 1970; GRECO, 1968; KUMMER, 1968; LISOWSKI, 1968; EVANS, 1968; WHITE et PANJABI, 1982; KAPANDJI, 1982; ASPDEN *et al.*, 1987; GRAKOVETSKY, 1990; KUMMER, 1991; PREUSCHOFT et WITTE, 1991; KUMMER, 1992; PUTZ, 1992; MÜLLER-GERBL, 1992; AMONOO-KUOFI, 1992; WASSILEV et KÜHNEL, 1992; BUKOVIC *et al.*, 1993; ROY-CAMILLE, 1994; SALES de GAUZY *et al.*, 1994; SAILLANT *et al.*, 1994; PANJABI *et al.*, 1995; ASPDEN *et al.*, 1997).

En définitive, l'ensemble des éléments nécessaires à la mobilité physiologique de la colonne vertébrale ne permet pas d'assimiler directement la forme de la colonne vertébrale osseuse, considérée en faisant abstraction des autres tissus, à la colonne vertébrale physiologique *in vivo* telle qu'elle peut être appréhendée par les études biométriques ou les observations radiologiques.

2.2.2. Système des mesures permettant le calcul de l'espace intervertébral:

Afin de décrire cette colonne vertébrale osseuse, il est nécessaire d'apprécier, à partir de la position des surfaces articulaires postérieures par rapport au plateau vertébral, l'implication que peut avoir la morphologie de la vertèbre elle-même sur la détermination de l'espace intervertébral, et donc sa participation aux courbures sagittales. On peut en effet considérer que l'ensemble des deux surfaces articulaires contiguës qui permettent l'articulation postérieure de vertèbres adjacentes (selon leurs positions relatives par rapport aux plateaux, déterminées dans l'espace par les processus et les pédicules qui les supportent), réalisent par cette morphologie un "*espace intervertébral*" uniquement impliqué par la morphologie des vertèbres contiguës. La section de cet espace dans le plan sagittal peut être représentée par un quadrilatère quelconque comme dans le cas des corps vertébraux. Un système de mesures prises indépendamment sur chaque vertèbre, à partir d'une section parasagittale des surfaces articulaires, et jusqu'aux extrémités de l'axe sagittal médian des plateaux vertébraux, doit donc contenir l'information correspondant à leurs positions relatives qui permettent de déduire, quand les segments définissant les surfaces articulaires sont mis en contiguïté, le quadrilatère représentant l'espace intervertébral impliqué uniquement par la morphologie vertébrale (figure 4).

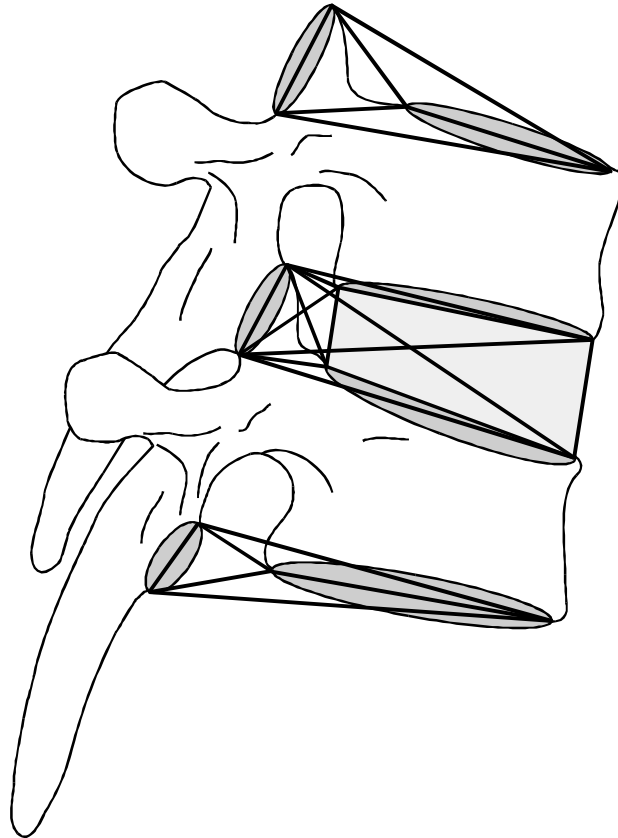


Figure 4

Déduction du quadrilatère représentant l'espace intervertébral. Schéma de principe. La perspective n'a pas été respectée et la hauteur relative de l'espace intervertébral est exagérée pour permettre la représentation des mesures. Les plans parasagittaux des surfaces articulaires et le plan sagittal médian sur lequel se trouve l'espace intervertébral ont été confondus. Les deux plateaux les plus extrêmes montrent les systèmes de mesures relevées sur chaque vertèbre isolée. L'espace intervertébral est représenté par un quadrilatère grisés et associé aux deux systèmes de mesures qui ont été combinés pour déduire ses dimensions. En grisé intense: les surfaces articulaires.

Pour deux vertèbres s'articulant entre elles, la longueur sagittale du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente définira par conséquent la base 'supérieure' de l'espace intervertébral, et la longueur du plateau supérieur de la vertèbre sous-jacente définira la base 'inférieure' de l'espace intervertébral.

2.2.3. Nomenclature des distances et des angles:

Des mesures prises isolément sur chaque vertèbre permettent, quand elles sont combinées pour chaque ensemble de deux vertèbres adjacentes, de calculer les dimensions des quadrilatères quelconques correspondant aux espaces intervertébraux. Pour chaque héli-vertèbre, quatre points définissent un système de six mesures: deux triangles ayant en commun un côté correspondant à la hauteur de la surface articulaire, joignent par leurs sommets respectifs les points antérieur et postérieur du diamètre sagittal médian du plateau (Figure 5 a. & b.). Ces distances sont ensuite projetées sur le plan sagittal médian (Figure 5 c. & 6) pour permettre de déduire l'espace intervertébral.

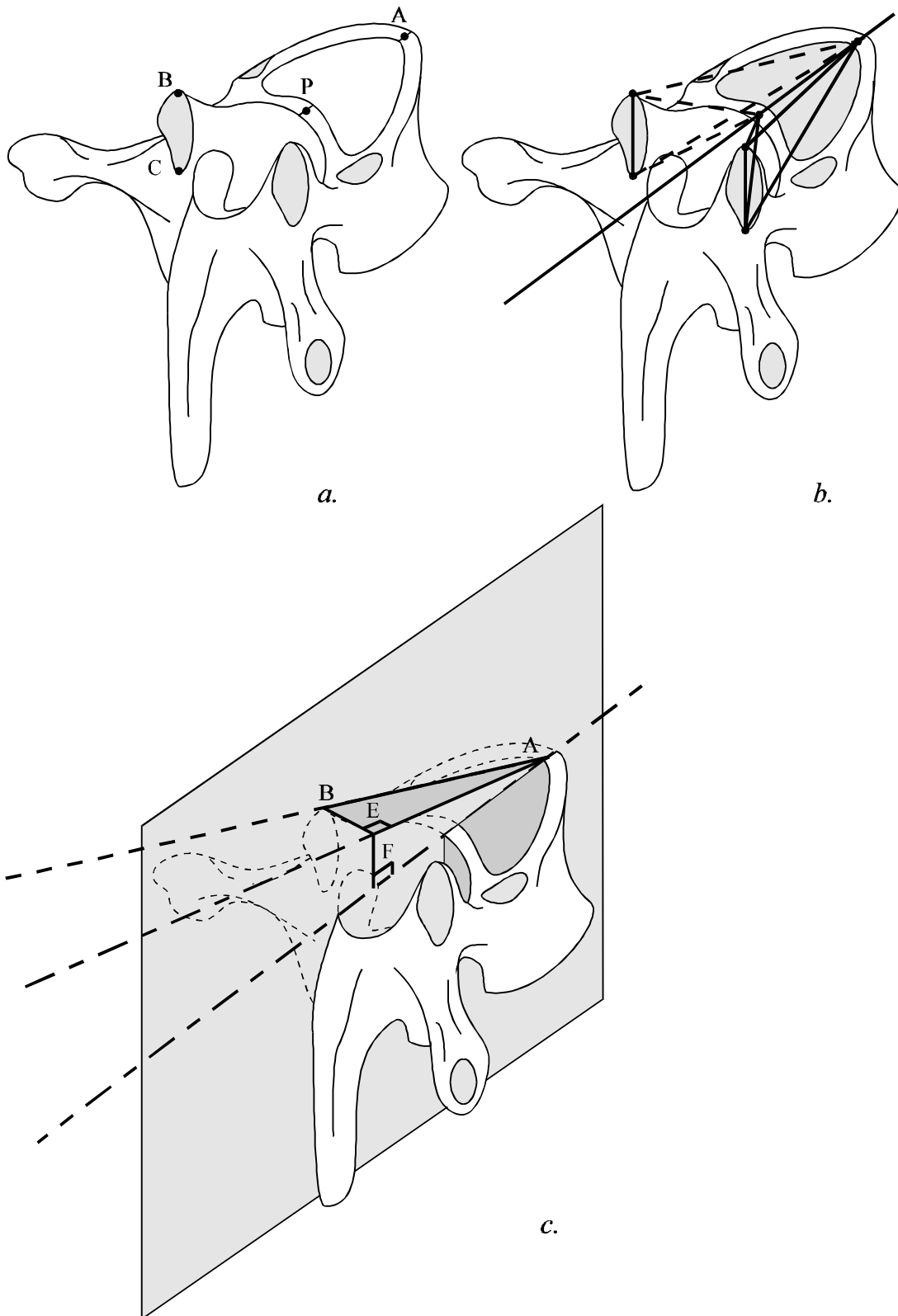


Figure 5
 Système des mesures définies sur la vertèbre pour la déduction de l'espace intervertébral. Exemple pour la face supérieure de la vertèbre. *a.* Points de mesures définis sur l'hémi-vertèbre gauche. *b.* Dimensions relevées. L'axe est l'axe sagittal médian. *c.* Exemple de la projection de la distance (BA) sur le plan sagittal médian.

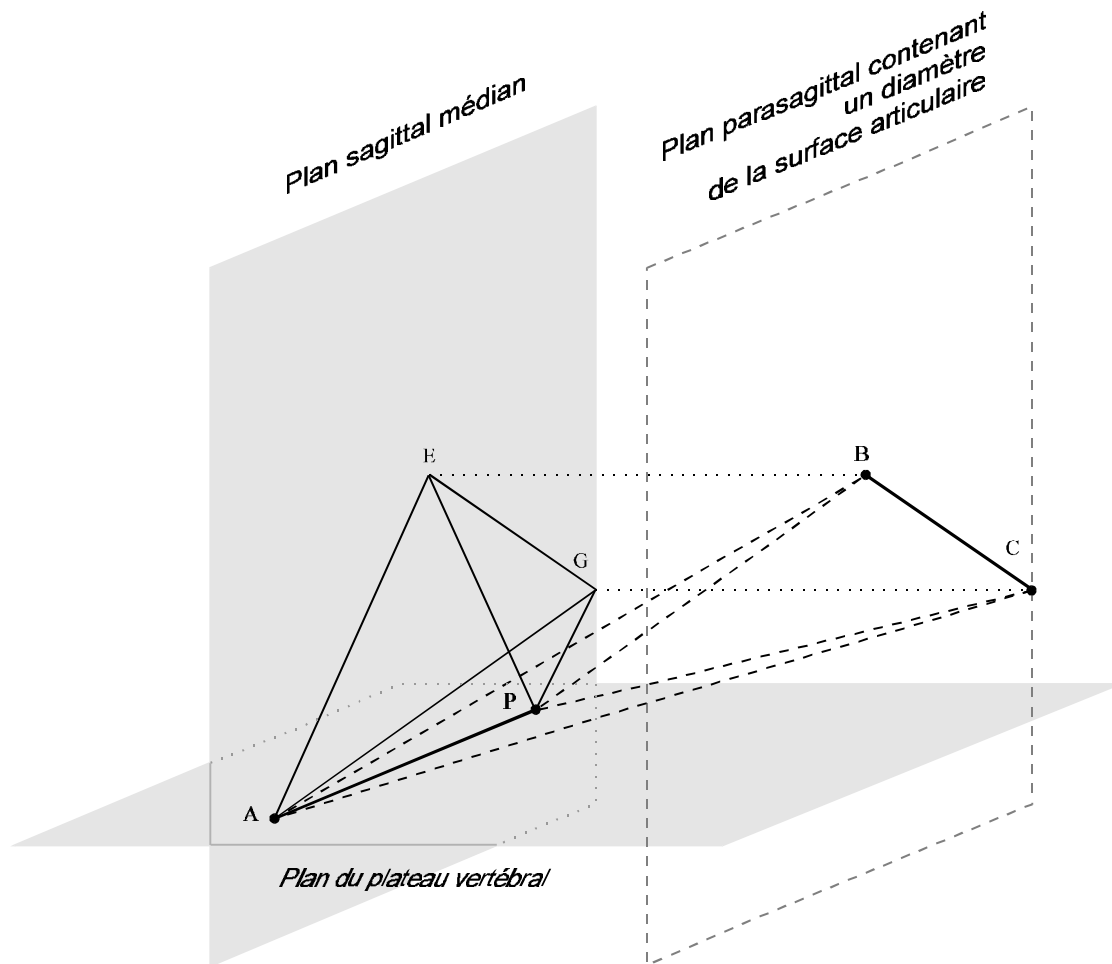


Figure 6

Projection des distances dans le plan sagittal. (BC): Hauteur de la surface articulaire. (EG): Projection de BC. (AP): Diamètre sagittal du plateau vertébral. Les distances projetées sont représentées en traits continus fins.

On obtient donc pour définir chaque espace intervertébral:

- Deux triangles correspondent aux mesures prises du plateau aux surfaces articulaires inférieures de la vertèbre sus-jacente. Ils ont tous deux pour base la hauteur de la surface articulaire inférieure. L'un se dirige vers le sommet antéro-supérieur, et l'autre vers le sommet postéro-supérieur de l'espace intervertébral, qui sont confondus avec les extrémités antérieure et postérieure du diamètre sagittal du plateau vertébral sus-jacent.

- De la même façon, deux triangles qui correspondent aux mesures prises du plateau jusqu'aux surfaces articulaires *supérieures*, pour la vertèbre *sous-jacente*. Ils ont pour base la hauteur de la surface articulaire supérieure. L'un se dirige vers le sommet antéro-inférieur, et l'autre vers le sommet postéro-inférieur de l'espace intervertébral.

Les côtés de ces triangles seront appelés A, B et C; où A représente la hauteur de la surface articulaire; B et C étant, respectivement, les côtés supérieur et inférieur.

Ces variables seront affectées de l'indice « m » si elle désignent la projection des distances sur le plan sagittal *médian* (tableau1).

AB AC AE AG	<i>Bai</i> <i>Cai</i> <i>Baim</i> <i>Caim</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Système de mesures triangulaires : <i>B</i> et <i>C</i> sont les mesures issues respectivement des points supérieur et inférieur des facettes. L'indice <i>ai</i> signifie qu'il s'agit des mesures prises à partir du point <u>antéro-inférieur</u> de l'espace intervertébral, l'indice <i>m</i> qu'il s'agit de la mesure projetée sur le plan sagittal <u>médian</u>.
Bg – Bd —	<i>Fis</i> <i>Fii</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Distance entre les surfaces articulaires droite et gauche. On se réfère aux distances entre les points <u>supérieurs</u>, respectivement <u>inférieurs</u> de la facette articulaire <u>inférieure</u>, c'est à dire sous-jacente à l'espace intervertébral.
	<i>Ea</i> <i>Ep</i> <i>Es</i> <i>Ei</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Longueurs des quatre côtés de l'<u>espace intervertébral</u>. Respectivement et selon les indices : <u>antérieur</u>, <u>postérieur</u>, <u>supérieur</u> et <u>inférieur</u> (figure 8, p. 70).
	<i>Edas</i> <i>Edai</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Diagonale</u> de l'<u>espace intervertébral</u> issue de son sommet <u>antéro-supérieur</u> ou <u>antéro-inférieur</u>.
BE CG	<i>Pis</i> <i>Pii</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Pour les points <u>supérieur</u> et respectivement <u>inférieur</u> de la surface articulaire <u>inférieure</u> (c'est-à-dire sous-jacente à l'espace intervertébral) : Distance de ce point à sa <u>projection</u> sur le plan sagittal médian.
EF GH	<i>His</i> <i>Hii</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Pour les points <u>supérieur</u> et respectivement <u>inférieur</u> de la surface articulaire <u>inférieure</u> en projection : <u>Hauteur</u> du point par rapport à la base du quadrilatère, cette dernière étant située dans le plan du plateau vertébral supérieur de la vertèbre sous-jacente (figure 7, c., p. 69).
EÂF GÂH	<i>eis</i> <i>eii</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Élévation</u> angulaire du point <u>supérieur</u> et respectivement <u>inférieur</u> de la surface articulaire <u>inférieure</u> en projection, par rapport à la base de l'espace intervertébral. Le sommet de l'angle est ici le sommet antéro-inférieur de l'espace intervertébral (figure 7, c. et d., p 69).
BC	<i>Ai</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Longueur de la surface <u>articulaire inférieure</u> (par rapport à l'espace intervertébral), mesure directe.
EG —	<i>Asm</i> <i>Aim</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Longueur de la surface <u>articulaire supérieure</u>, respectivement <u>inférieure</u> (par rapport à l'espace intervertébral) en projection sur le plan <u>médian</u>
EÂG	<i>wi</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Ouverture</u> angulaire de la surface articulaire <u>inférieure</u> en projection: angle, issu du sommet antérieur de l'espace intervertébral, et interceptant la hauteur de la surface articulaire en projection (figure 7, p. 69).

Tableau 1

Nomenclature des distances et des angles. Exemples pour les segments issus du point antéro-inférieur de l'espace intervertébral, et pour ceux qui leur sont directement liés. La plupart des noms de variables sont donc affectés de l'indice *ai* pour antéro-inférieur. L'indice *m* indique qu'il s'agit de la valeur projetée dans le plan médian.

2.2.4. Définition et prise des mesures :

Les mesures ont été effectuées avec un pied à coulisse digital avec connexion directe à l'ordinateur (Sylvac). Ce dispositif a permis non seulement un gain de temps mais surtout de précision. D'une part, les erreurs de lecture disparaissent. D'autre part, la méthodologie étant basée sur la construction d'ensembles de trois mesures définissant un triangle, les segments contigus doivent être réellement contigus, c'est-à-dire que les mesures doivent être prises exactement à partir du même point. La connexion à l'ordinateur permet donc d'enregistrer la donnée, le plus souvent sans lever la branche du pied à coulisse située au niveau du point commun à deux segments du triangle.

Les mesures sont prises, pour chaque côté, en progressant à partir du segment le plus cranial.

La première mesure est l'écart entre les surfaces articulaires. Dans le cas des articulations concaves (étage lombaire), elle est prise avec les branches opposées de l'instrument pour une mesure interne. Elle permet de définir le plan parasagittal du diamètre de la surface articulaire. On vérifie l'égalité de la distance mesurée entre les facettes inférieures d'une vertèbre et celle mesurée entre les facettes supérieures de la vertèbre appartenant au segment sous-jacent ($\Delta < 0.05$ mm). Ceci constitue un premier contrôle pour la définition des diamètres des deux surface contiguës, qui doivent se correspondre.

De plus, les points supérieur et inférieur de la surface articulaire choisis pour mesurer son diamètre sont définis en considérant aussi la surface de la vertèbre adjacente avec laquelle elle s'articule. La forme du contour de la facette est soigneusement examinée pour que les segments choisis sur les deux facettes qui se correspondent soient les mêmes. L'égalité des valeurs est contrôlée ($\Delta < 0.05$ mm) et, si elle n'est pas vérifiée, l'ensemble des mesures est répété sur la vertèbre sus-jacente, sur la face et le côté impliqués.

Après le diamètre de la surface articulaire postérieure, c'est le diamètre sagittal du corps vertébral qui est mesuré, puis, à partir du point antérieur ou postérieur de ce dernier, les distances aux points supérieur et inférieur sur la surface articulaire. La branche qui est sur le plateau n'est, autant que possible, pas levée entre les mesures de ces deux segments.

Ces mesures sont effectuées des deux côtés et leur fiabilité est notée pour chacun d'eux en fonction de l'état de conservation de la surface et de sa morphologie (certaines vertèbres présentent d'un côté une surface très asymétrique ou très petite, qui ne permet pas une bonne mesure). Le côté le plus fiable est utilisé dans les calculs. L'état très fréquemment fragmentaire des pédicules ou des surfaces articulaires au moins d'un côté dans le cas des vertèbres fossiles, et assez fréquent aussi dans les collections de colonnes vertébrales actuelles, nous a conduit à choisir d'ignorer la question de la symétrie.

2.2.5. Projection dans le plan sagittal médian:

A. *Calcul des mesures en projection*

Les mesures prises du plateau vertébral jusqu'aux surfaces articulaires postérieures doivent être projetées dans le plan sagittal médian afin de déduire les valeurs des hauteurs antérieure et postérieure de la diagonale du quadrilatère qui représente l'espace intervertébral. Les équations

développées ici correspondent au cas particulier (choisi à titre d'exemple) des mesures prises du plateau supérieur jusqu'à la surface articulaire postérieure gauche. Les noms de variables sont affectés par conséquent des indices "a" et "i" qui signifient d'une part: "mesures issues du point *antérieur* du plateau"; et d'autre part: "mesures de la vertèbre *inférieure*", c'est-à-dire *sous-jacente par rapport à l'espace intervertébral*. Le côté pris en compte n'est pas spécifié dans le nom de la variable, il est mentionné au moment du calcul avec les résultats numériques. Pour permettre de différencier dans les équations la variable correspondant à la mesure réelle, de celle correspondant à sa valeur en projection, celle-ci est affectée de l'indice "m" pour "plan médian". Les mêmes relations mathématiques que celles explicitées ici se répéteront pour les mesures supérieures par rapport à l'espace intervertébral (c'est à dire celles prises à partir du plateau inférieur de la vertèbre *sus-jacente*).

La distance du point supérieur de la surface articulaire gauche au plan sagittal médian est définie dans un premier temps (Cf. B. Détermination de la distance au plan médian, p. 68) comme égale à la moitié de la distance séparant les surfaces articulaires:

$$P_{is} = F_i \cdot \frac{1}{2}$$

Dans le plan sub-horizontale contenant P_{is} et B_{ai} (Figure 7 a. & b.), on peut déduire la valeur en projection B_{aim} de ce dernier segment suivant l'expression:

$$B_{aim} = \sqrt{B_{ai}^2 - P_{is}^2}$$

On obtient de la même façon la valeur en projection C_{aim} de C_{ai} , mesure issue du point inférieur de la surface articulaire. L'ensemble des segments ainsi calculés permet de déduire tout d'abord l'élévation angulaire \mathcal{E}_{is} du point supérieur de la surface articulaire (en projection) par rapport au plan du plateau vertébral (Figures 7 c.):

$$\mathcal{E}_{is} = \arccos \left(\frac{E_i^2 + B_{aim}^2 - B_{pim}^2}{2 \cdot E_i \cdot B_{aim}} \right)$$

La hauteur H_{is} de ce même point par rapport au plateau est donnée par:

$$H_{is} = B_{aim} \cdot \sin(\mathcal{E}_{is})$$

L'élévation angulaire et la hauteur du point *inférieur* de la surface articulaire en projection sont calculées de la même façon. Les segments ainsi obtenus définissent dans le plan sagittal médian la hauteur de la surface articulaire (Figure 7 d.). Celle-ci est interceptée par l'angle ω_i issu du point antérieur du plateau, et qui a pour valeur:

$$\omega_i = \mathcal{E}_{is} - \mathcal{E}_{ii}$$

On peut dès lors déduire la valeur en projection de la hauteur de la surface articulaire au moyen de la relation générale:

$$\cos \omega = \frac{B^2 + C^2 - A^2}{2 \cdot B \cdot C} \Leftrightarrow A = \sqrt{2 \cdot B \cdot C \cdot \cos \omega - B^2 - C^2} .$$

Dans le cas particulier explicité jusqu'à présent, et qui concerne la surface articulaire inférieure par rapport à l'espace intervertébral, les variables affectées de leurs indices donnent la relation:

$$A_{im} = \sqrt{2 \cdot B_{aim} \cdot C_{aim} \cdot \cos \Omega_i - B_{aim}^2 - C_{aim}^2}$$

Il existe une différence entre la valeur réelle mesurée A_i de la hauteur de la surface articulaire et sa valeur A_{im} en projection dans le plan sagittal médian, si les valeurs P_{is} et P_{ii} des distances des extrémités du sement A_i jusqu'au plan sagittal n'ont pas été bien définies. Cet écart permettra par conséquent de calculer par approximations, et par corrections progressives des valeurs P_{is} et P_{ii} , la distance réelle existant entre le segment définissant la hauteur de la surface articulaire et le plan sagittal médian.

Notons par ailleurs qu'il n'est pas fait d'hypothèse *a priori* quant à la projection des surfaces articulaires, le point supérieur de la surface articulaire gauche et son homologue à droite pouvant ne pas se projeter sur le même point du plan sagittal médian. Une telle hypothèse, qui serait susceptible de simplifier la déduction des valeurs projetées est une hypothèse lourde qui ne correspondrait qu'aux cas très rare ou les deux surfaces articulaires montreraient une symétrie presque parfaite

B. Détermination de la distance au plan médian

Rappelons que dans le cas de la figure 7, c'est le traitement de la face supérieure d'une vertèbre qui est explicité, vertèbre qui se situe donc inférieurement par rapport à l'espace intervertébral considéré (c'est la raison pour laquelle les variables sont affectées de l'indice i). C'est encore ce cas particulier avec ses noms de variables qui servira d'exemple, facilement généralisable.

La déduction de la valeur projetée A_{im} de A_i fait donc intervenir l'ensemble des mesures issues des points antérieur et postérieur du corps vertébral. En effet, les élévations des points E et G limitant la facette articulaire sont calculées en formant les triangles (B_{aim}, E_i, B_{pm}) , et (C_{aim}, E_i, C_{pim}) . La valeur de A_{im} sera donc erronée, différente de celle de A_i , si la distance $P_{is} = P_{ii}$ n'est pas celle qui existe, réellement, entre le segment (B,C) et le plan sagittal contenant le segment (P,A) correspondant au diamètre sagittal du corps vertébral. L'erreur $A_{im} - A_i$ est donc utilisée pour déduire par approximations successives la valeur de P .

La distance au plan sagittal est donc calculée de façon itérative. Une première valeur approximative de P , distance au plan sagittal médian pour la Projection, est calculée en divisant par deux la distance entre facettes articulaires droite et gauche (Figure 7). Cette valeur P_0 est utilisée une première fois pour projeter l'ensemble des mesures et effectuer une première déduction de A_{im} . L'erreur $A_{im} - A_i$ est mise en mémoire. La Valeur de P_0 est corrigée en lui ajoutant une valeur K , on obtient P_1 . A_{im} est déduit à nouveau à partir de P_1 . Si l'erreur est supérieure à celle obtenue précédemment, le signe de K est changé et P_0 est à nouveau corrigé en lui retranchant donc la valeur $|K|$. Ce processus est répété successivement en diminuant progressivement la valeur de K pour affiner la recherche, et en changeant son signe chaque fois que l'augmentation de l'erreur entre deux cycles indique que la valeur recherchée a été dépassée. Le calcul s'achève lorsque l'erreur est inférieure à la précision souhaitée, fixée à 0.5 mm.

Ce processus laborieux qui peut impliquer un grand nombre de calculs est intégré comme sous-programme et s'effectue rapidement.

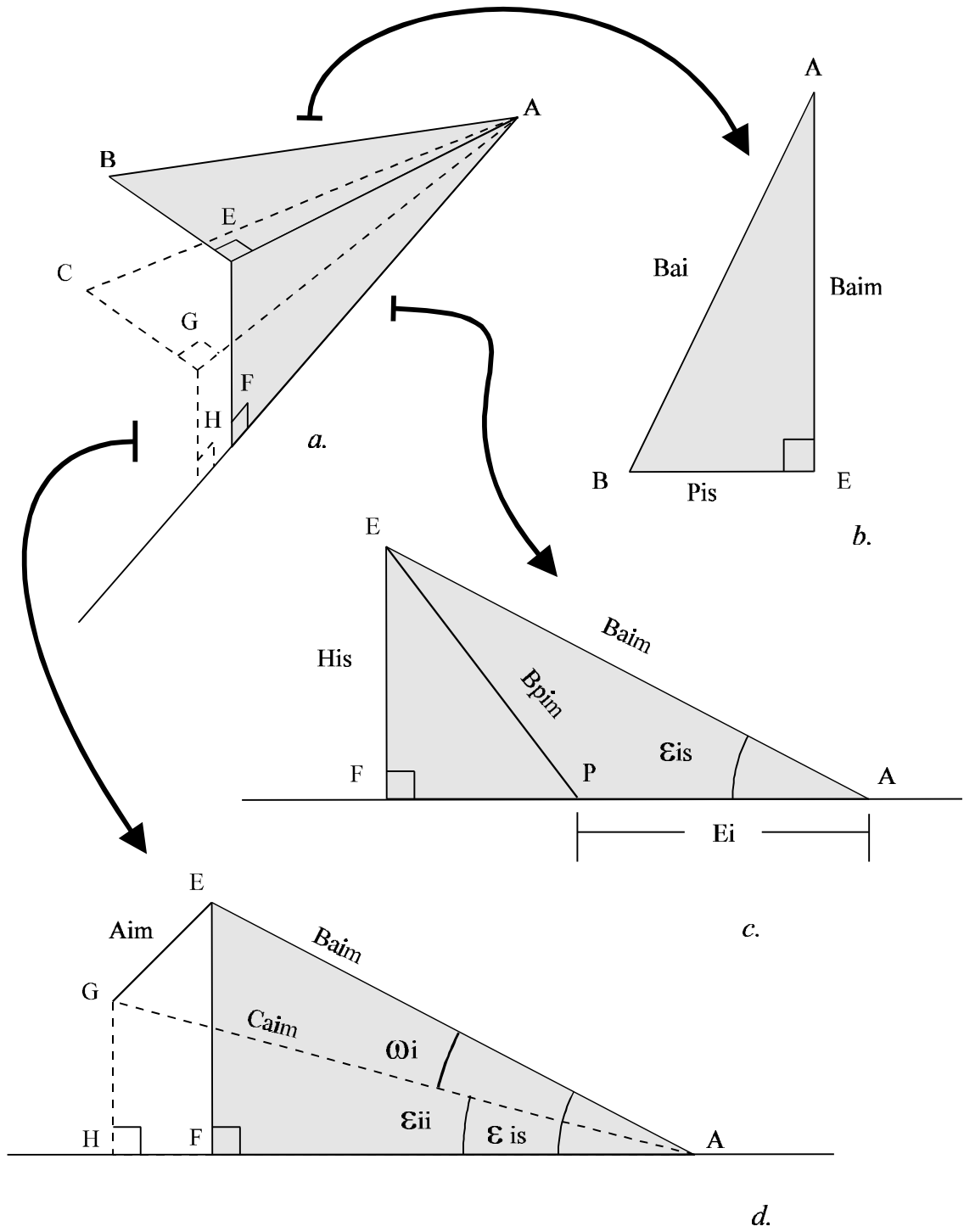


Figure 7
 Projection des mesures dans le plan sagittal médian. Exemple de distances associées au plateau supérieur d'une vertèbre.

2.2.6. Obtention du quadrilatère intervertébral:

A. Longueur des côtés antérieur et postérieur:

Lorsque les mesures de la face inférieure de la vertèbre sus-jacente et celles de la face supérieure de la vertèbre sous-jacente ont toutes été projetées, les longueurs des côtés antérieur et postérieur du quadrilatère représentant l'espace intervertébral peuvent être calculées. Sur la figure 8 sont représentés les angles γ_{ai} et γ_{as} qui permettent de déduire l'angle γ_a opposé à E_a dans le triangle (E_a , B_{asm} , B_{aim}). A partir des valeurs de γ_a , B_{asm} et B_{aim} , E_a peut donc être déduit.

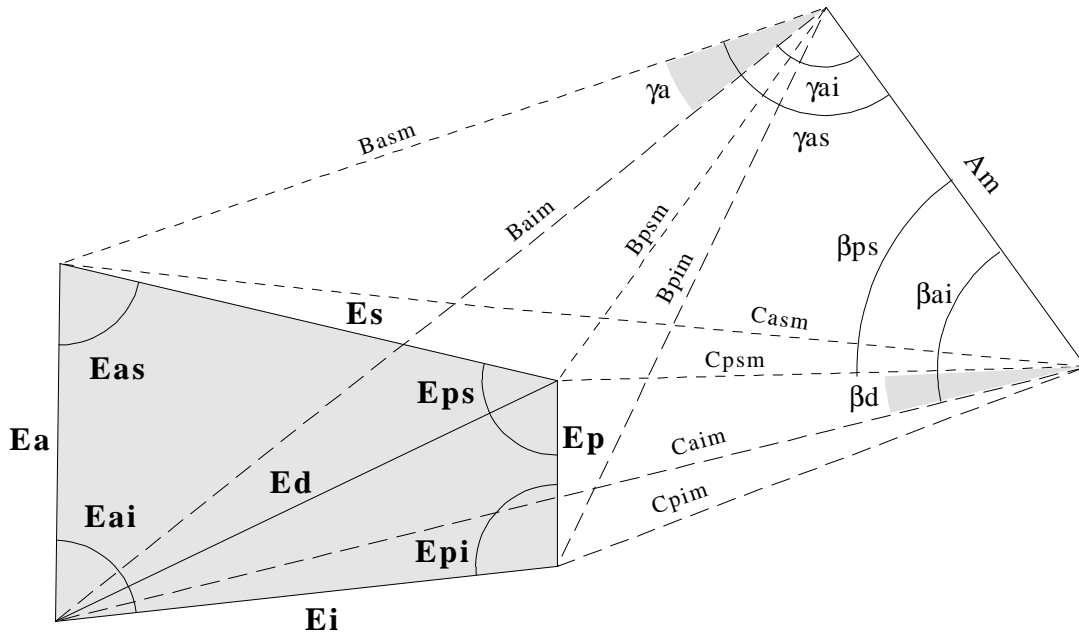


Figure 8

Nomenclature des variables pour le calcul de l'espace intervertébral. Cas général sans ajout d'un espace entre les surfaces articulaires postérieures. Tirets courts: distances dans le plan sagittal médian correspondant aux mesures de la vertèbre sus-jacente à l'espace intervertébral; Tirets longs: distances dans le plan sagittal médian correspondant aux mesures de la vertèbre sous-jacente à l'espace intervertébral. L'espace intervertébral est représenté en grisé. Les angles β permettent le calcul de la diagonale.

D'une manière générale, les formules ci-dessous permettent de calculer E_a et E_p . Il suffit d'y remplacer l'indice x par l'indice a ou p selon que l'on s'intéresse au côté antérieur ou postérieur du quadrilatère, et l'indice y par l'indice i ou s (pour inférieur ou supérieur):

$$\gamma_{xy} = \arccos \left(\frac{A_m^2 + B_{xym}^2 - C_{xym}^2}{2 \cdot A_m \cdot B_{xym}} \right)$$

$$E_x = \sqrt{B_{xsm}^2 + B_{xim}^2 - 2 \cdot B_{xsm} \cdot B_{xim} \cdot \cos \gamma_x}$$

La nomenclature adoptée permet donc de traiter les indices comme des variables dans les noms de variables eux mêmes, et de programmer l'ensemble des calculs de façon très compacte.

B. Localisation de la surface articulaire par rapport au plan des plateaux:

Dans le cas particulier de la figure 8, le segment correspondant au diamètre de la surface articulaire se situe au dessus des deux droites contenant E_s et E_i , c'est-à-dire au dessus des plateaux vertébraux. Le calcul de l'angle ω_s ou ω_i est cependant différent si le segment $[EG]$ se situe au dessus de la droite contenant A et F , comme dans le cas de la figure 8; si il lui est sécant; ou encore s'il se situe en dessous de la droite passant par A et F . Il est donc nécessaire de déterminer la position relative de la surface articulaire par rapport au plateau pour chacune des deux vertèbres définissant l'espace intervertébral.

L'ensemble des cas théoriquement possibles de ce point de vue a été considéré, sans faire d'hypothèse *a priori* quant à la la morphologie vertébrale. Ils sont représentés aux figures 9 et 10.

Le procédé utilisé pour déterminer la position relative de la surface articulaire par rapport au plateau doit être intégré dans la boucle des calculs qui déterminent par approximations successives la distance P entre le plan sagittal du segment $[EG]$ et celui du segment $[AP]$. Il ne peut donc être basé sur des rapports d'égalité ou d'inégalité entre les segments et les angles dans le plan médian, puisque les valeurs exactes de ceux-ci ne sont pas encore déterminées.

La position du segment $[EG]$ est donc déterminée de la manière suivante - comme précédemment, afin de généraliser les noms de variables, l'indice y substitue les indices s ou i , qui se réfèrent aux mesures pour les côtés supérieur ou inférieur de l'espace intervertébral:

Une première valeur hypothétique de ω_y est calculée: $\omega_1 = \varepsilon_{ys} - \varepsilon_{yi}$. Si ω_1 est positif, alors le segment $[EG]$ se situe *au dessus* de la droite contenant A et P (figure 9, *a.* et 10, *d.*), ou bien lui est sécante (figure 9 *b.* et 10 *e.*). Si ω_1 est négatif, alors $[EG]$ se situe *en dessous* de la droite contenant A et P (figure 9, *c.* et 10, *f.*), ou bien lui est sécante. Dans ce cas, ω_1 est recalculé: $\omega_1 = \varepsilon_{yi} - \varepsilon_{xs}$.

Une seconde valeur hypothétique ω_2 est prise: $\omega_2 = \varepsilon_{xi} - \varepsilon_{xs}$, qui correspondrait au cas de figure d'une surface articulaire sécante (figure 9 *b.* et 10 *e.*).

Avec chacune de ces valeurs est calculée une valeur de A_{ym} correspondante. Si la différence entre A_y et A_{ym} , ce dernier étant calculé à partir de ω_2 , autrement dit l'erreur commise sur A_{ym} , est plus petite que lorsque A_{ym} est calculé à partir de ω_1 , alors le segment $[EG]$ est sécant à la droite contenant A et P , sinon, $[EG]$ se situe au dessus ou en dessous selon ce qui avait été déterminé selon le signe de ω_1 .

C. Calcul de la diagonale

C'est suivant le même principe que pour la déduction des côtés antérieur et postérieur qu'est calculé le segment correspondant à la diagonale du quadrilatère (figure 8). L'angle β_{ps} est déduit des côtés du triangle ($Am, Bpsm, Cpsm$), l'angle β_{ai} à partir des côtés du triangle ($Am, Baim, Caim$). L'angle β_d donne ensuite la valeur de Ed dans le triangle ($Cpsm, Ed, Caim$).

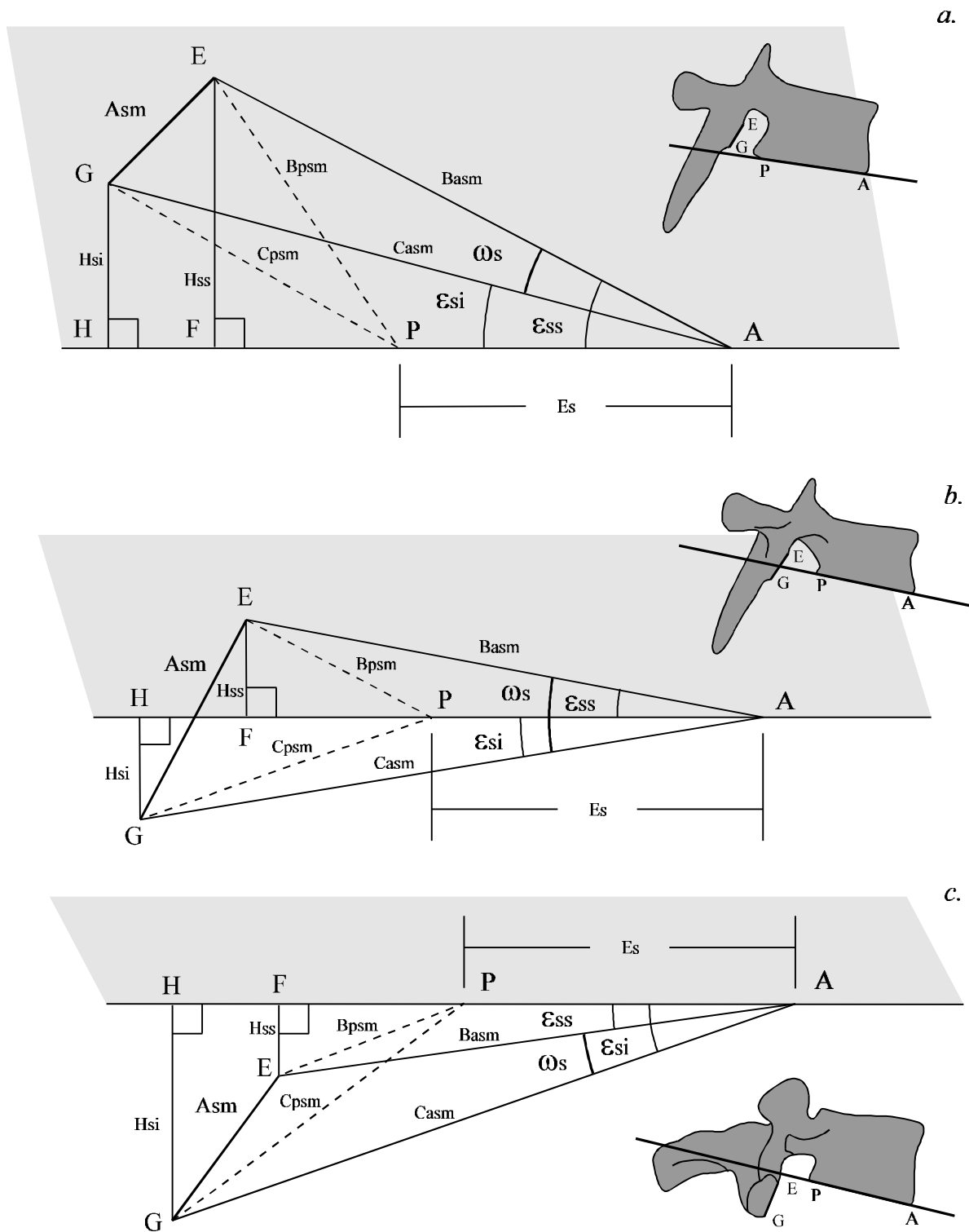


Figure 9
 Détermination de la position du diamètre vertical de la surface articulaire inférieure par rapport au plan du plateau vertébral: *a.*, supérieure; *b.*, sécante; *c.*, inférieures. Les dispositions relatives des distances et des angles qui sont utilisés dans le plan sagittal sont représentées pour chaque cas de figure. En gris: zone du plan située au dessus du plateau. Les dessins de vertèbres permettent de figurer la situation anatomique des points.

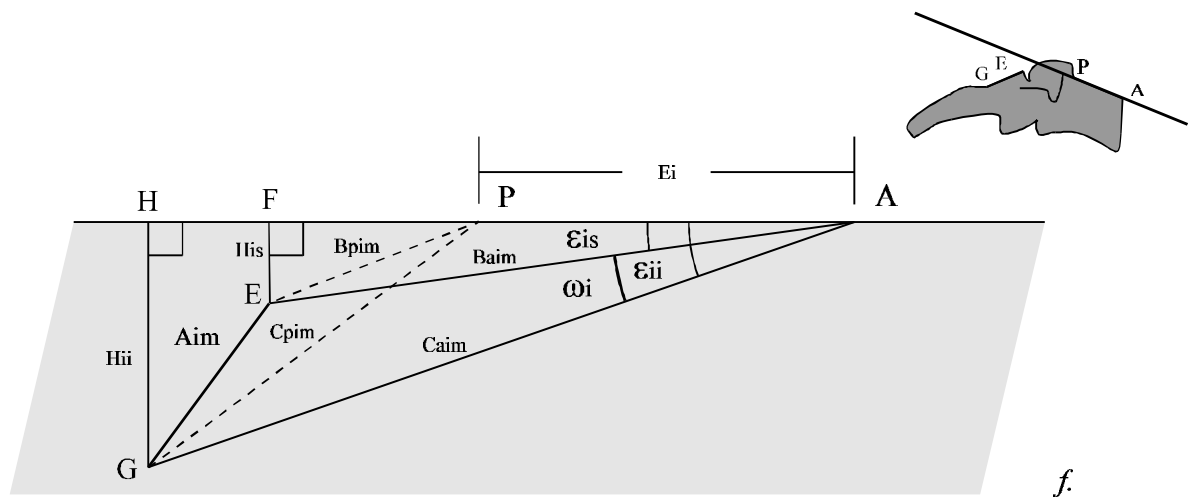
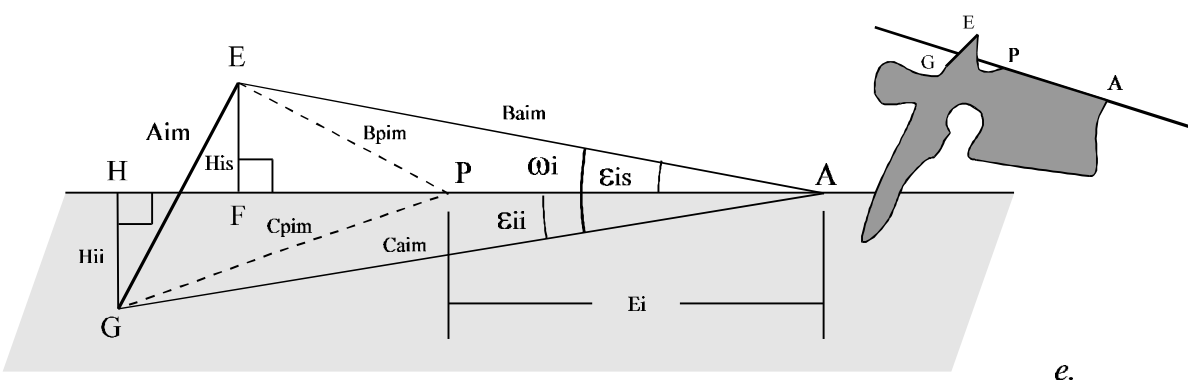
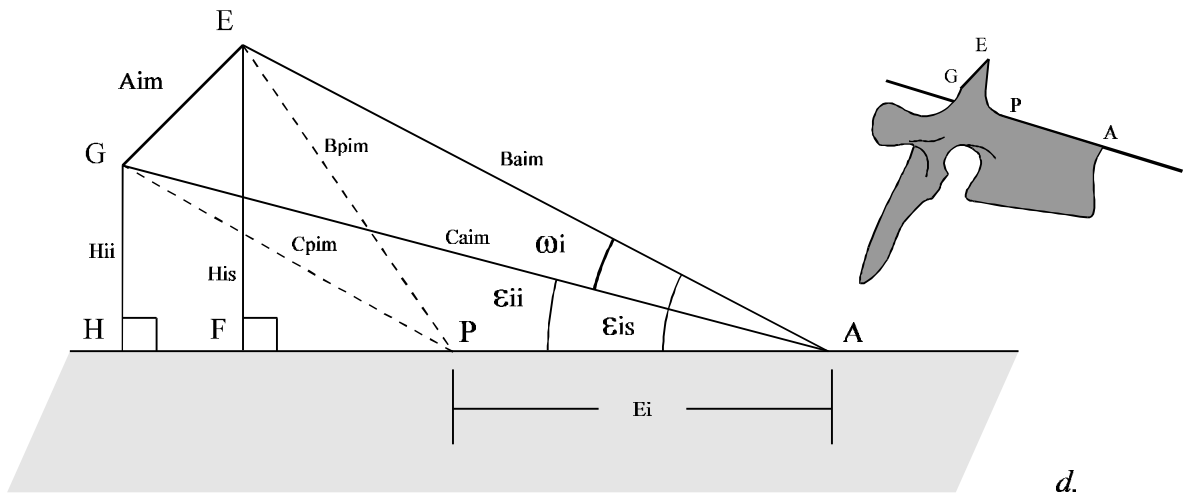


Figure 10

Détermination de la position du diamètre vertical de la surface articulaire supérieure par rapport au plan du plateau vertébral: *d.*, supérieure; *e.*, sécante; *f.*, inférieure. Les dispositions relatives des distances et des angles qui sont utilisés dans le plan sagittal sont représentées pour chaque cas de figure. En grisé: zone du plan située en dessous du plateau.

D. Calcul des angles du quadrilatère intervertébral:

Une fois les segments antérieur et postérieur déduits, ainsi que la diagonale du quadrilatère, on retrouve un cas de figure identique à celui des quadrilatères des corps vertébraux. 70 donc un même sous-programme qui peut être utilisé.

2.2.7. Insertion d'un espace entre les articulaires postérieurs:

L'espace intervertébral tel qu'il est défini correspond donc à l'espace que les deux vertèbres contiguës déterminent lorsqu'elles sont articulées. Il résulte donc de la position relative des surfaces articulaires postérieures par rapport au plan du plateau qui leur correspond (articulaires et plateau inférieurs pour la vertèbre sus-jacente à l'espace intervertébral, articulaires et plateau supérieur pour la vertèbre sous-jacente à l'espace intervertébral)

Sur le vivant, les interlignes corticales des articulaires postérieurs ne sont pas en contact direct et sont maintenus à une certaine distance. Celle-ci correspond à l'épaisseur que peut occuper l'ensemble des structures histologiques de l'articulation intervertébrale: cartilages articulaires, plis synoviaux intra-articulaires de nature fibreuse ou fibro-adipeuse (SINGER *et al.*, 1990), et cavité articulaire proprement dite (*Cavum articulare*). Dans la présente méthodologie, telle qu'elle a été décrite jusqu'ici, les segments représentant une section des surfaces articulaires dans un plan parasagittal sont strictement confondus, puisque c'est seulement le rôle de la morphologie "osseuse" de la vertèbre dans la détermination des courbures sagittales qui nous intéresse. Cependant, cette configuration entraîne parfois la superposition partielle des quadrilatères représentant les corps des deux vertèbres ainsi articulées: les segments représentant les plateaux vertébraux deviennent sécants. Il est donc nécessaire de restituer, lors du calcul, une distance minimale entre les surfaces articulaires (figure 11).

Un espace rectangulaire de $h = 0.5$ mm de hauteur est donc laissé entre les surfaces articulaires postérieures contiguës. Il permet de restituer un articulaire compatible avec la morphologie osseuse en empêchant le chevauchement des quadrilatères représentant les corps vertébraux. Il n'a pas été rencontré d'étude quantitative renseignant précisément sur la variabilité de cet espace. Des clichés étalonnés de coupes histologiques transversales (échantillons non pathologiques) passant par les processus postérieurs maintenus en contiguité (SINGER *et al.*, 1990) ont orienté le choix de la valeur h . Elle est appliquée identiquement pour chaque segment sans préjuger de la variation en fonction de l'étage vertébral et selon les individus. Une connaissance même détaillée de cette variabilité ne permettrait pas de connaître le schéma de variation de h en fonction du segment pour chaque sujet de l'échantillon. L'introduction d'un espace rectangulaire qui maintient le parallélisme entre les surfaces articulaires et dont la hauteur est invariable selon les sujets et les segments reste la solution la plus rigoureuse. Elle préserve la participation angulaire qu'apporte chaque vertèbre, par sa morphologie, au dessin du profil rachidien osseux.

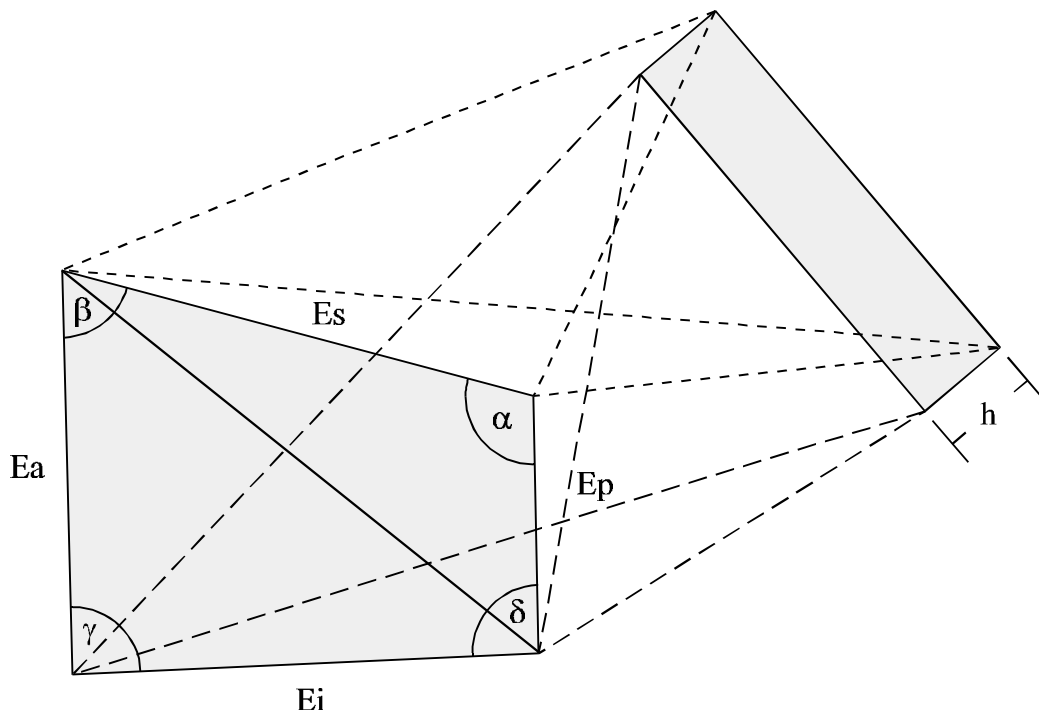


Figure 11

Calcul de l'espace intervertébral avec ajout d'un espace rectangulaire de hauteur h entre les surfaces articulaires postérieures. Ea , Ep , Es et Ei sont, respectivement, les hauteurs antérieure et postérieure de l'espace intervertébral, et ses diamètres sagittaux supérieur et inférieur, tels qu'ils ont été définis.

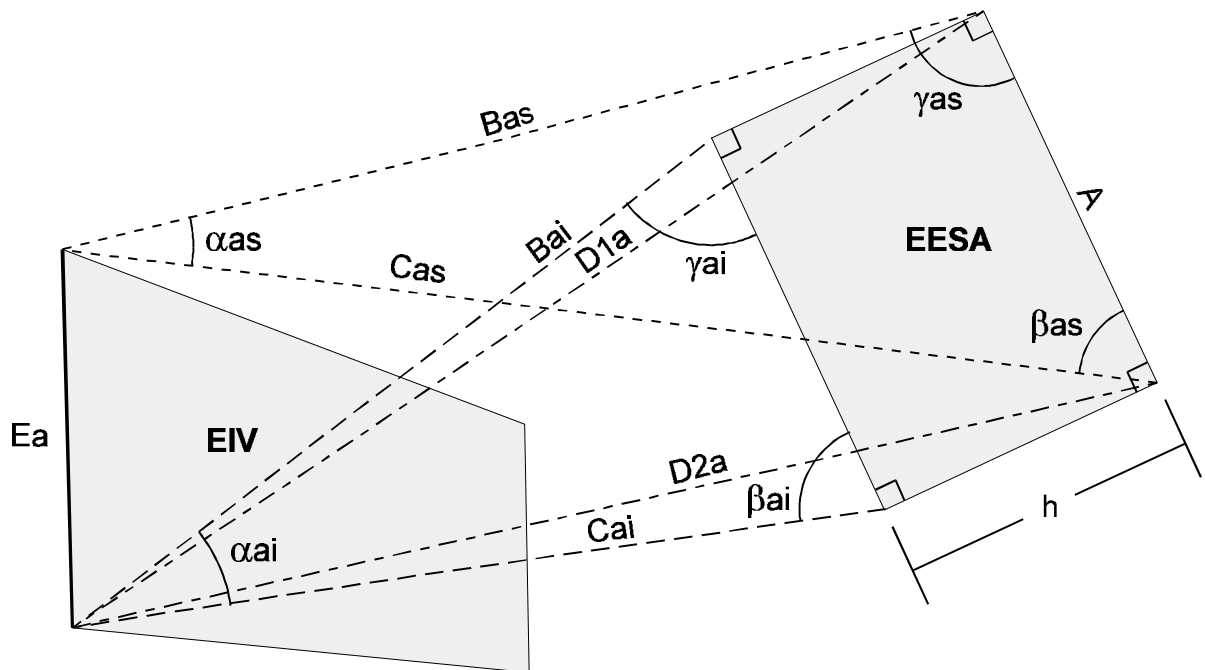


Figure 12

Déduction de la hauteur antérieure de l'espace intervertébral (EIV) avec ajout d'un espace entre les surfaces articulaires postérieures (EESA). Le triangle (A, D1a, D2a) permet de se replacer dans le cas général où $h = 0$. Pour la clarté du schéma, les proportions entre l'espace intervertébral, et l'espace entre les surfaces articulaires, ne sont pas respectées.

Lorsqu'un espace est inséré entre les surfaces articulaires, quelques calculs intermédiaires permettent de se situer à nouveau dans le cas simple où les segments représentant les surfaces articulaires des deux vertèbres sont confondus, c'est à dire où $h = 0$.

Si l'on souhaite déduire, par exemple, la hauteur du segment antérieur de l'espace intervertébral (figure 12), le système des segments (D_{1a}, A, D_{2a}) doit être substitué au système (B_{ai}, A, C_{ai}) . Ce dernier permet tout d'abord de calculer g_{ai} et b_{ai} , à partir desquels D_{1a} et D_{2a} sont déduits:

$$D_{1a} = \sqrt{B_{ai}^2 + h^2 - 2 \cdot B_{ai} \cdot h \cdot \cos(\gamma_{ai} + \frac{\pi}{2})}$$

$$\text{et } D_{2a} = \sqrt{C_{ai}^2 + h^2 - 2 \cdot C_{ai} \cdot h \cdot \cos(\beta_{ai} + \frac{\pi}{2})} .$$

Si $\gamma_{ai} + \frac{\pi}{2} > \pi$, alors l'expression $\gamma_{ai} + \frac{\pi}{2}$ est substituée par $\frac{3\pi}{2} - \gamma_{ai}$, angle intérieur correspondant dans le triangle (B_{ai}, h, D_{1a}) . L'opération équivalente est effectuée pour déduire D_{2a} . Une fois ces valeurs substituées à celles de B_{ai} et C_{ai} , on retrouve le cas de figure dans lequel les segments qui représentent les surfaces articulaires sont confondus. Du point de vue de la programmation, les mêmes sous-programmes sont alors utilisés pour le calcul de E_a . Le calcul de E_p (hauteur postérieure de l'espace intervertébral) suit exactement le même principe.

2.3. Empilement des quadrilatères:

2.3.1. Principe de l'empilement:

Afin de restituer la courbure sagittale impliquée par la forme des éléments vertébraux – corps et espaces intervertébraux – ceux-ci peuvent être empilés mathématiquement dans un système de deux axes matérialisant le plan sagittal. Il est possible, au moyen de formules trigonométriques, d'obtenir dans ce repère les coordonnées des points représentant les sommets de chaque quadrilatère tels qu'ils se situent dans la pile, ainsi que leur orientation par rapport à l'axe horizontal (angle formé par la base du quadrilatère avec cet axe), et par conséquent les mesures des angles interceptant différents segments du rachis et comparables aux angles de Cobb des radiologistes. Les coordonnées permettront ensuite d'ajuster au profil ainsi obtenu un modèle d'équation susceptible de le décrire plus précisément (Cf. 2.5. Calcul d'un polynôme d'ajustement, p. 87). La représentation graphique est de même aisément réalisable.

Afin de déterminer quelle est la part de chaque type d'élément dans la construction des courbures vertébrale, il sera possible d'empiler uniquement les quadrilatères représentant les corps vertébraux, ou de façon alternée avec les quadrilatères représentant les espaces intervertébraux. Dans le cas de l'empilement des corps vertébraux, la longueur du côté inférieur d'un élément ne correspondant pas à celle du côté du supérieur de l'élément sous-jacent sur lequel il s'appuie, il est nécessaire de choisir entre deux possibilités pour réaliser la pile: ajuster les quadrilatères selon leur face postérieure, c'est à dire en confondant le sommet antéro-supérieur d'un quadrilatère avec le sommet antéro-inférieur du quadrilatère sus-jacent; ou bien ajuster les quadrilatères selon leur côté antérieur.

Une légère variation dans la courbure finale doit être attendue selon que l'une ou l'autre de ces options est choisie. Elle est entraînée par la différence existant entre les diamètres sagittaux supérieur et inférieur de deux quadrilatères (respectivement inférieur et supérieur) adjacents, et affectera particulièrement les étages vertébraux où elle est plus accentuée, c'est à dire essentiellement l'étage cervical (Figure 13).

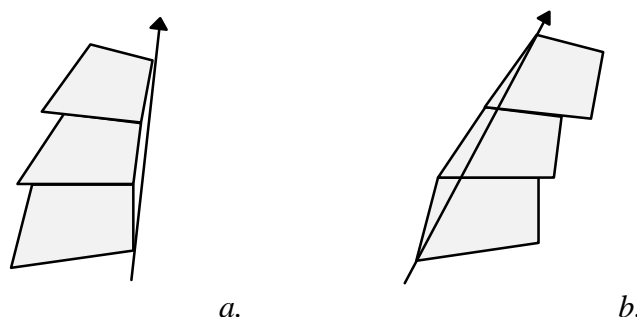


Figure 13

Représentation schématique de la variation entraînée dans l'allure de l'empilement selon que les éléments sont ajustés suivant leur face postérieure (a.) ou antérieure (b.). Cette variation est due à la différence entre les diamètres sagittaux en regard pour chaque paire d'éléments adjacents. Les éléments représentent de manière exagérée le type de forme de quadrilatères qui peut être rencontré au niveau cervical pour les corps vertébraux. Les deux piles sont constituées des mêmes éléments exactement.

2.3.2. Méthode trigonométrique de l'empilement:

Chaque élément 'i' est représenté par son côté antérieur ou postérieur, selon l'ajustement qui a été choisi, et par ses bases dont la représentation, sur une longueur définie arbitrairement, permet d'apprécier leur orientation dans le plan et leur participation à l'allure de la pile. Les extrémités inférieure et supérieure du coté du quadrilatère 'i' ont pour coordonnées, respectives: (x_i, y_i) et (x_{i+1}, y_{i+1}) . L'extrémité libre de la base inférieure de l'élément 'i' aura pour coordonnées: (w_i, z_i) .

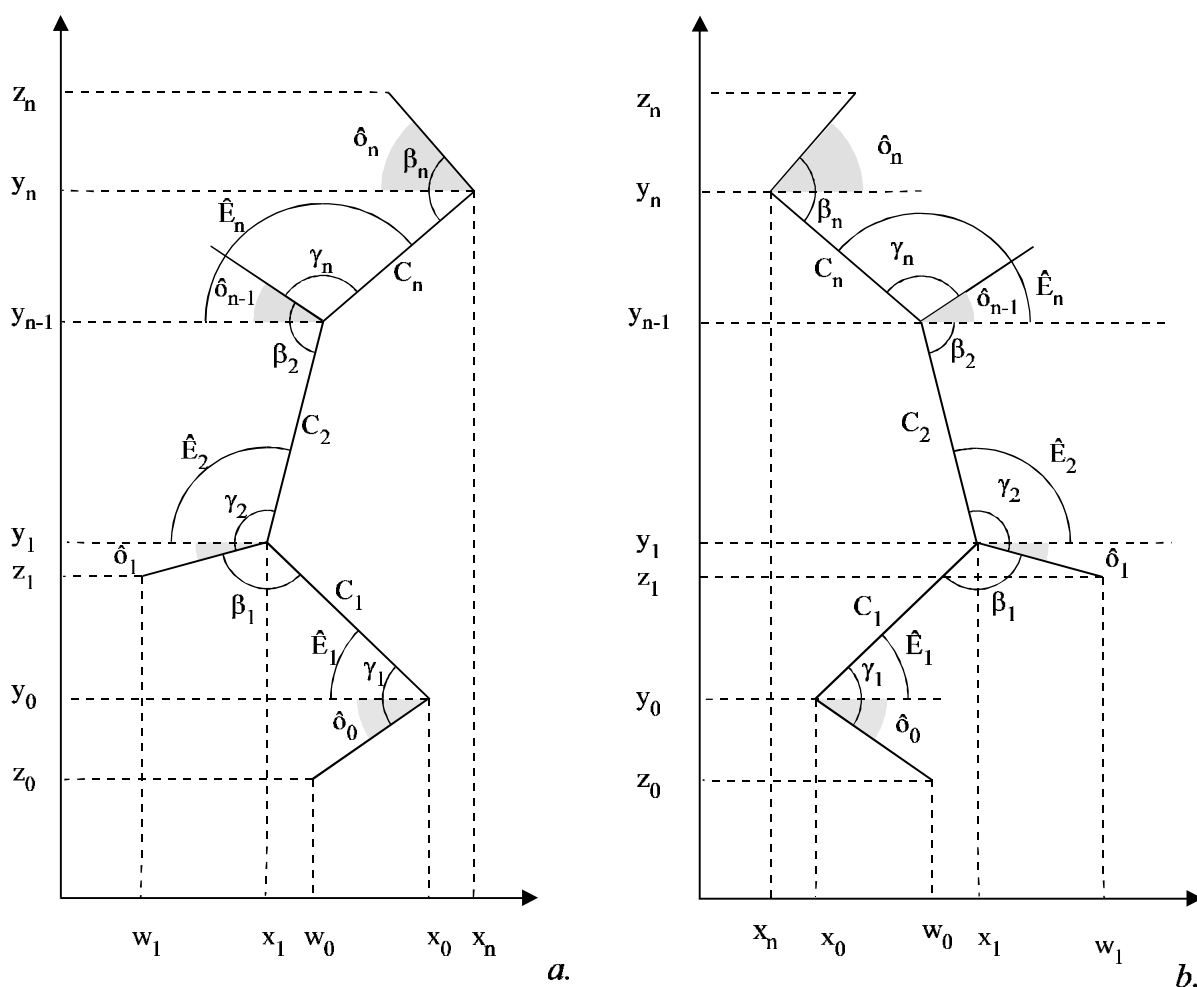


Figure 14

Empilement des quadrilatères dans un repère orthogonal, pour $n=3$. *a.*, ajustement de la face postérieure des quadrilatères, *b.*, ajustement de la face antérieure. (Certaines coordonnées n'ont pas été représentées afin de simplifier la lecture du schéma).

A. Descriptions des variables

Nous définissons donc les variables suivantes (Figure 14):

- $\hat{\delta}_i$: Angle représentant l'élévation de la base du quadrilatère $i+1$ sur l'axe des abscisses. $\hat{\delta}_i$ est négatif si la base est située sous le niveau de la parallèle à l'axe des x issue du sommet du quadrilatère (cas de $\hat{\delta}_0$ et $\hat{\delta}_1$ dans la figure 14).
- \hat{E}_{i+1} : Angle formé entre le côté antérieur ou postérieur (selon l'ajustement) du quadrilatère $i+1$ et l'axe des abscisses et ayant pour sommet le sommet inférieur du quadrilatère, de coordonnées (x_i, y_i) .
- C_{i+1} : Longueur du côté postérieur ou antérieur (selon l'ajustement) du quadrilatère $i+1$.
- β_{i+1} : Angle du sommet postéro-supérieur du quadrilatère $i+1$ si l'empilement est ajusté sur les faces postérieures, ou angle antéro-supérieur s'il est ajusté sur les faces antérieures.
- γ_{i+1} : Angle du sommet postéro-inférieur du quadrilatère $i+1$ si l'empilement est ajusté sur les faces postérieures, ou angle antéro-inférieur s'il est ajusté sur les faces antérieures.

B. Calcul de la pile de quadrilatères

Pour $i=0$, les valeurs $\hat{\delta}_0$, x_0 et y_0 de la base du quadrilatère n°1 qui supporte toute la pile sont fournies au programme par la feuille de paramètres (figure 16, p. 81).

On peut donc déduire:

$$\begin{aligned} \hat{E}_{i+1} &= \gamma_{i+1} + \hat{\delta}_i \\ x_{i+1} &= x_i - C_{i+1} \cdot \cos(\hat{E}_{i+1}) && \text{- si l'ajustement est postérieur.} \\ x_{i+1} &= x_i + C_{i+1} \cdot \cos(\hat{E}_{i+1}) && \text{- si l'ajustement est antérieur.} \\ y_{i+1} &= y_i + C_{i+1} \cdot \sin(\hat{E}_{i+1}) \\ \hat{\delta}_{i+1} &= \beta_{i+1} - \pi + \hat{E}_{i+1} \end{aligned}$$

Ces opérations sont répétées pour ' i ' prenant les valeurs 0 à n , où n est le nombre d'éléments à empiler. Elles permettent donc d'obtenir les coordonnées des quadrilatères dans la pile et de représenter celle-ci graphiquement.

La base de chaque élément est par ailleurs schématisée par un segment de droite qui permet, grâce à la représentation graphique, de juger de son orientation et donc de la contribution de chaque élément à la courbure totale.

Les coordonnées (w_i, z_i) de l'extrémité de la base du quadrilatère $i+1$ sont données par les expressions, dans lesquelles D est la longueur du segment par lequel on souhaite représenter la base du quadrilatère:

$$\begin{aligned} w_i &= x_i - D \cdot \cos(\hat{\delta}_i) && \text{pour un ajustement postérieur,} \\ \text{ou bien} & && \\ w_i &= x_i + D \cdot \cos(\hat{\delta}_i) && \text{pour un ajustement antérieur ;} \\ \text{et} & && \\ z_i &= y_i + D \cdot \sin(\hat{\delta}_i) && \text{quel que soit le type d'ajustement.} \end{aligned}$$

2.3.3. Rotation de la pile et alignement sur l'axe des ordonnées:

Afin d'ajuster les deux extrémités de l'empilement sur l'axe vertical (Figure 15) et de manière à obtenir des données comparables, un premier calcul est effectué en posant $\hat{\delta}_0 = 0$, $x_0 = 0$ et $y_0 = 0$. Le couple de valeurs (x_n, y_n) qui définit les coordonnées du sommet de la pile permet de déterminer son inclinaison (ou rotation ρ) par rapport à l'axe des ordonnées:

$$\rho = \arctan (x_n / y_n)$$

Un second calcul est alors réalisé en posant: $\hat{\delta}_0 = -\rho$ et $x_0 = 0$, et permet de superposer les extrémités de la pile à l'axe des y , c'est à dire en imposant la contrainte $x_n = 0$.

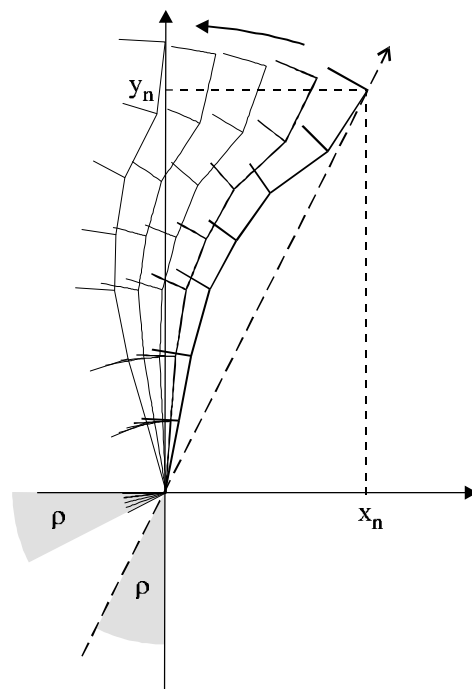


Figure 15

Principe de rotation d'une pile de $n + 1$ quadrilatères destinée à la positionner parallèlement à l'axe des ordonnées. ρ , angle de rotation calculé à partir des coordonnées (x_n, y_n) de la pile quand $\hat{\delta}_0=0$, et valeur appliquée à $\hat{\delta}_0$ pour effectuer la rotation.

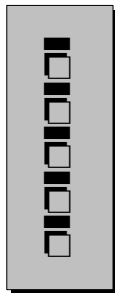
2.3.4. Options d'exécution de l'empilement:

Le programme d'empilement a été développé en langage Macro EXCEL 4. Il calcule les coordonnées de la pile de quadrilatères et effectue sa représentation graphique dans le plan. Il renvoie ces coordonnées exprimées en millimètres, la valeur d'angulation de chaque élément dans la pile par rapport à l'axe horizontal, ainsi qu'un rappel des paramètres de l'empilement. La feuille de résultat modèle contient une formule matricielle donnant les coordonnées de la pile en pourcentage de sa hauteur, qui autorisent les comparaisons. La vitesse d'exécution du langage n'a jamais été un facteur limitant. Les paramètres et les options selon lesquels l'empilement sera réalisé sont envoyés au programme à partir d'une feuille de calcul qui contient les informations suivantes (figure 16):

1. Nom du fichier de données.
2. Nom du fichier de résultat modèle, préparé préalablement pour recevoir le graphique et les valeurs numériques des coordonnées dans le plan et de l'angulation de chaque élément par rapport à l'axe horizontal. Les coordonnées sont aussi mentionnées en pourcentage de la hauteur de l'empilement.
3. Numéro absolu de l'élément le plus caudal à partir duquel la pile doit être calculée:
 - n°25 pour l'espace intervertébral situé entre la première vertèbre sacrée et la cinquième lombaire, n°24 pour la dernière vertèbre lombaire, n°3 pour la troisième vertèbre cervicale, etc.
4. Numéro absolu de l'élément le plus cranial où la pile doit s'achever.
5. Type de chacun de ces éléments limitant la pile – corps ou espace intervertébral.
6. Type d'empilement souhaité:
 - empilement des quadrilatères représentant les corps vertébraux seulement,
 - empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux de chaque segment.
7. Choix de l'option pour un alignement des deux extrémités de la pile sur l'axe vertical.
8. Choix de l'option pour un empilement ajusté sur les côtés postérieurs ou antérieurs des quadrilatères.
9. Numéro de la version du calcul qui sera réalisé, permettant de renvoyer plusieurs types d'empilement sur une même feuille de résultats.
10. Coordonnées du point d'origine de la pile.
11. Angle imposé à la base de la pile (ignoré quand l'option d'un alignement sur l'axe vertical est choisie).
12. Longueur du segment qui représentera l'orientation des côtés supérieur et inférieur du quadrilatère.

Empilement des quadrilatères

Paramètres		
Source	r173res1.xls	Feuille de données source
Cranial	3	Numéro de l'élément à l'extrémité craniale de l'empilement
Caudal	24	Numéro de l'élément à l'extrémité caudale de l'empilement
ESommet	C	Elément au sommet (C ou E)
EBase	C	Elément à la base (C ou E)
type_empil	C	Type d'empilement (Corps seuls, ou Alternatif)
x_0	0	Valeur sur l'abscisse du sommet de la base du premier élément
y_0	0	Valeur sur l'ordonnée de la base du premier élément
ô_0	0	Valeur (en degrés) de l'angle que fait la base du premier élément avec l'axe des abscisses***
valbas	10	Valeur en mm choisie pour représenter l'orientation des bases des quadrilatères
Ecriture	r173emp1.xls	Feuille d'écriture des résultats
Modgrf	empil3g.xls	Modèle de feuille graphique à utiliser (dans C:\...\modeles)
ChangRep	O	Effectuer le changement de repère pour ajuster le profil sur l'axe des ordonnées (O ou N)?
Version_c	1	Version du calcul
Ajust	post	Ajuster selon les côtés antérieurs ou postérieurs des quadrilatères



Ctrl+p

(***) entrer un nombre négatif si la base se situe sous la parallèle aux abscisses)

Figure 16

Feuille d'options utilisée par le programme d'empilement des quadrilatères et partir de laquelle son exécution est ordonnée. Les paramètres sont entrés dans la colonne blanche. Exemple pour un empilement des corps vertébraux depuis L5 (24) jusque C3 (3), avec ajustement sur la face postérieure des quadrilatères. La pile sera alignée sur l'axe des ordonnées, à partir du point de coordonnées (0 ; 0). L'orientation des côtés supérieur et inférieur des quadrilatères dans la pile est visualisée par un segment de 10 mm. Il s'agit de l'individu n°173. Le fichier r173res1.xls contient les résultats du calcul des quadrilatères qui seront utilisés en tant que données par le programme d'empilement. Les coordonnées de la pile seront envoyées dans la feuille r173emp1.xls. Le graphe, tracé à partir de la feuille modèle empil3g.xls, est copié par le programme dans la feuille de résultats. La version du calcul est la n°1, numéro rappelé dans les noms de champs de la feuille de résultat afin de diriger l'écriture. L'exécution du programme est ordonnée par pression du bouton à droite, ou par le raccourci clavier.

Le fichier source contient en fait des données “de second ordre” qui sont le résultat du premier traitement réalisé à partir des mesures proprement dites. Pour les corps vertébraux, il s’agit des mesures des segments simplement recopiées, et des valeurs des quatre angles du quadrilatère qui ont été calculées à partir des quatre côtés du quadrilatère définissant le corps vertébral, et d’une diagonale. Pour les espaces intervertébraux, ces deux types de variables ont été déduites à partir des systèmes de mesures.

2.4. Angles interceptant les segments rachidiens:

2.4.1. Description:

L’inclinaison de la base de chaque quadrilatère par rapport à l’axe des abscisses permet, pour tout segment rachidien, de calculer facilement la valeur de l’angle α qui l’intercepte. Celui-ci est défini par les côtés supérieur et inférieur des quadrilatères les plus extrêmes du segment considéré (Figure 17).

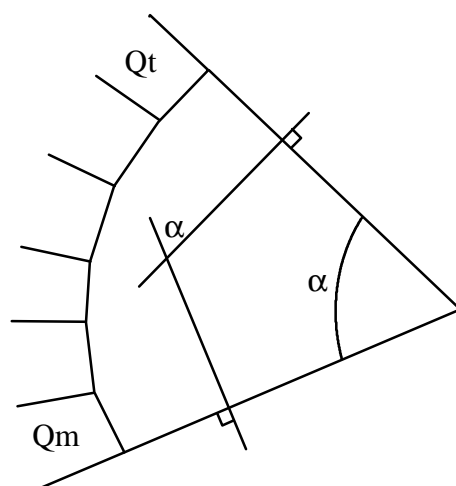


Figure 17

Valeur α de l’angle interceptant un segment de la pile de quadrilatères. Exemple d’un angle à sommet postérieur interceptant un segment à convexité antérieure. Les quadrilatères sont ajustés sur leur côté postérieur.

Cette mesure représente une description partielle du profil rachidien. Elle apporte une information différente de celle qui pourrait être donnée par l’équation d’une courbe ajustée à la pile de quadrilatères, laquelle ne prendrait pas en considération l’inclinaison des bases les plus extrêmes de la pile. Elle permet d’apprécier la courbure de façon globale, et comme dans le cas d’un indice (Figure 17), elle ne décrit pas les variations que celle-ci peut admettre au long du segment étudié, telles que la présence de deux minima dans les valeurs du rayon de courbure, ou d’une asymétrie dans son allure.

Parce qu’elle inclut les valeurs d’inclinaison des côtés supérieur et inférieur de la pile, cette mesure est cependant particulièrement intéressante, notamment pour le niveau lombaire, puisque le plateau inférieur de la cinquième vertèbre, dont le corps est “cunéiforme” peut, selon son inclinaison, modifier de façon conséquente la courbure générale de l’étage. Par ailleurs, cette mesure correspond à celle utilisée par les radiologistes pour effectuer une première quantification des courbures sagittales de la colonne. Elle peut aussi être comparée aux valeurs de l’angle de KOB

utilisé en radiologie. Ce dernier est estimé directement sur le cliché de profil, en traçant les deux droites issues des plateaux vertébraux des extrémités du segment; et les perpendiculaires à ces droites qui permettent la mesure directe au rapporteur (Figure 17).

Mesurée pour des segments de la colonne vertébrale où seule la morphologie de l'os entre en jeu, la valeur de α peut donc être confrontée aux nombreuses données publiées sur la base d'études radiologiques de la colonne vertébrale. Elle représente par conséquent une information non négligeable pour estimer le rôle de la morphologie osseuse dans la détermination des courbures rachidiennes.

2.4.2. Calcul:

Déterminons la valeur de l'angle α qui intercepte la pile des quadrilatères Q_m (quadrilatère qui limite inférieurement la pile) à Q_t (quadrilatère au sommet de la pile).

Le côté inférieur de Q_m forme un angle $\hat{\delta}_{m-1}$ par rapport à l'axe des abscisses et le côté supérieur de Q_t un angle $\hat{\delta}_t$. Les valeurs de $\hat{\delta}$, calculées au moment de l'empilement mathématique des quadrilatères et renvoyées comme résultats accompagnant les coordonnées dans le plan, sont affectées du signe moins si le segment est situé sous la parallèle à l'axe des x . L'angle α_{mm} , en valeur absolue, s'exprime donc de la façon suivante:

$$\begin{aligned} \text{Si les signes de } \hat{\delta}_t \text{ et de } \hat{\delta}_{m-1} \text{ sont différents:} & \quad \alpha_{mm} = \left| \hat{\delta}_{m-1} \right| + \left| \hat{\delta}_t \right| \\ \text{Si les signes de } \hat{\delta}_t \text{ et de } \hat{\delta}_{m-1} \text{ sont égaux:} & \quad \alpha_{mm} = \left| \left| \hat{\delta}_{m-1} \right| - \left| \hat{\delta}_t \right| \right| \end{aligned}$$

Il est par ailleurs possible de déterminer la position du sommet de l'angle, c'est à dire s'il est situé devant ou derrière la pile. Dans le cas d'un empilement ajusté sur les faces postérieures des quadrilatères, le sommet de α_{mm} est postérieur si $\hat{\delta}_{m-1} > \hat{\delta}_t$, et antérieur dans le cas contraire. Pour un empilement ajusté sur les faces antérieures, de par la définition du signe de $\hat{\delta}$, le sommet de α_{mm} est antérieur si $\hat{\delta}_{m-1} > \hat{\delta}_t$, et réciproquement. Pour la suite des calculs, les angles à sommet antérieurs seront affectés du signe moins.

Deux remarques sont à prendre en considération:

- 1) Un angle à sommet postérieur n'est pas nécessairement significatif d'un segment à convexité antérieure, c'est à dire pour notre problème, d'une lordose; de même qu'un angle à sommet antérieur n'est pas nécessairement révélateur d'une cyphose. Si par exemple les angles supérieur et inférieur des quadrilatères (respectivement) supérieur et inférieur qui sont aux extrémités de la pile sont tous deux obtus et ont de fortes valeurs, il est théoriquement possible que α_{mm} ait son sommet en position postérieure par rapport à la pile, bien que la courbure générale possède une convexité postérieure. Toutefois, dans l'analyse des piles de quadrilatères représentant un empilement réalisé sur un segment correspondant à une seule courbure sagittale, un angle à sommet antérieur est bien significatif d'une cyphose, et réciproquement.
- 2) L'ajustement des quadrilatères sur leur face antérieure ou postérieure ne modifie pas la valeur de l'angle α (Figure 13).

2.4.3. Traitement statistique:

Afin d'apprécier la variabilité des valeurs de l'angle α_{mm} aux étages lombaire, cervical et thoracique, la valeur de l'angle moyen $\hat{\alpha}_m$ a été calculée pour chaque sexe selon la méthode décrite par J. H. ZAR (1984). Elle a été accompagnée de son intervalle de confiance bilatéral à 95% et par l'expression de la déviation angulaire s . Cette dernière est un paramètre analogue à l'écart-type des variables linéaires, elle peut être exprimée en degrés et est borné par les valeurs 0° et 81.03° .

J. H. ZAR, alléguant que cette propriété de limitation par une borne supérieure est cohérente avec l'idée d'une mesure de dispersion d'une variable qui est elle-même bornée (0° et 360°), préfère l'emploi de la déviation angulaire à celui d'autres paramètres de dispersion tels que l'écart-type circulaire, dont les valeurs s'étendent de zéro à l'infini. La déviation angulaire est calculée sur la base de la quantité r , qui est la norme du vecteur représentant l'angle moyen en coordonnées cartésiennes et est une mesure de concentration des valeurs dans l'échantillon.

Les publications que nous avons rencontrées où des mesures angulaires sont utilisées pour décrire les segments de la colonne vertébrale ne mentionnent pas de traitement statistique particulier, et seuls les paramètres classiques –moyenne et écart-type– sont utilisés. En toute rigueur, il est pourtant nécessaire d'appliquer au cas des distributions circulaires les paramètres spécifiques que sont l'angle moyen \hat{a}_m , la quantité r , les bornes $b_{1,2}$ de l'intervalle de confiance de la moyenne et la déviation angulaire s .

A. Angle moyen et valeur de r :

L'expression de l'angle moyen et de la quantité r , pour un échantillon de n valeurs angulaires notées \hat{a}_1 à \hat{a}_n se formule comme suit (ZAR, 1984):

Soient X et Y , les coordonnées de l'angle moyen dans un repère cartésien:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n \cos \hat{a}_i}{n} \quad \text{et} \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^n \sin \hat{a}_i}{n}, \quad \text{donc} \quad \hat{a}_m = \arctan \frac{Y}{X}$$

$$\text{et} \quad r = \sqrt{X^2 + Y^2}.$$

B. Signification de l'angle moyen:

La valeur du z de Rayleigh: $z = nr^2$, permet de tester l'hypothèse H_0 d'une distribution uniforme des valeurs d'angle dans l'échantillon, sans direction préférentielle. Le rejet de H_0 permet donc de conclure (pour une distribution unimodale) à l'existence d'une direction moyenne significative dans l'échantillon, autrement dit, à la validité de ce paramètre pour l'échantillon étudié.

La probabilité de z a été dans le cas présent déterminée par interpolation linéaire à partir des tables. Le test a été programmé en langage macro Excel.

C. Intervalle de confiance de l'angle moyen:

Les limites supérieures L_1 et inférieure L_2 de l'intervalle de confiance de la moyenne sont données par: $L_{1,2} = \hat{a}_m \pm d$

$$\text{où pour } r \leq 0.9 \quad \text{et} \quad r > (\chi^2_{\alpha,1}/2n)^{1/2}, \quad d = \arccos \frac{\sqrt{\frac{2n(2R^2 - n\chi^2_{\alpha,1})}{4n - \chi^2_{\alpha,1}}}}{R},$$

$$\text{et pour } r \geq 0.9, \quad d = \arccos \frac{\sqrt{n^2 - (n^2 - R^2) e^{\chi^2_{\alpha,1}/n}}}{R},$$

avec la valeur R de Rayleigh: $R = nr$.

D. Déviation angulaire:

La déviation angulaire en degrés est égale à $s = \frac{180^\circ}{\pi} \sqrt{2(1-r)}$

E. Comparaison des angles moyens de deux échantillons:

De la même façon que les précédents paramètres permettent de décrire un ensemble de valeurs angulaires, la comparaison des angles moyens de deux échantillons de ce type ne peut être faite par un simple test de Student. La méthode à suivre pour tester l'hypothèse $H_0: \hat{m}_1 = \hat{m}_2$ d'égalité des moyennes de deux échantillons utilise une statistique qui, à un facteur correctif près, suit une distribution de F .

Le rapport à tester est donné par:

$$F_{\alpha, 1, N-2} = K \frac{(N-2)(R_1 + R_2 - R)}{N - R_1 - R_2}$$

où $N = n_1 + n_2$ représente le nombre total de valeurs et R la valeur du R de Rayleigh pour les deux échantillons réunis en un seul. K est un facteur correctif dépendant de la moyenne pondérée r_w de r_1 et r_2 ($r_w \neq r_{global}$). Dans ce test, que nous avons programmé en langage Macro EXCEL 4, une valeur plus précise de K est calculée à partir des tables par interpolation linéaire.

F. Représentation graphique:

Les angles seront représentées par des points situés sur la périphérie d'un cercle ou d'un hémicercle unitaire. Leur position par rapport au diamètre horizontal de celui-ci permettra de donner une idée immédiate des valeurs et de leur dispersion. Une valeur négative a été arbitrairement affectée aux angles à sommet antérieur, significatifs, pratiquement, d'une cyphose. A ce type de graphique repris de H. ZAR (1984), nous empruntons la représentation de l'angle moyen \hat{m} et du paramètre r , sous la forme d'un seul vecteur orienté par rapport au diamètre horizontal selon la valeur de \hat{m} (de la même façon que pour les points de données), et de norme égale à r . Plus les valeurs de l'échantillon seront regroupées autour de l'angle moyen, plus l'extrémité du segment sera proche de la circonférence du cercle. Ce vecteur donne donc une lecture directe de la concentration des valeurs.

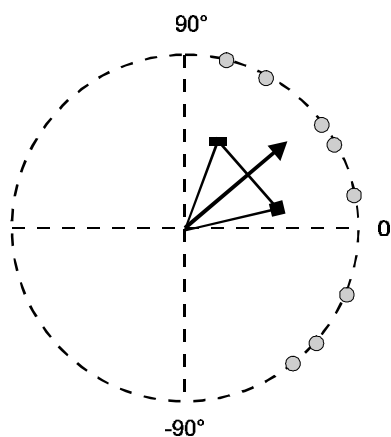


Figure 18
Représentation graphique des valeurs angulaires (●) dans l'échantillon, et de leurs paramètres de dispersion: ↗, vecteur représentant l'angle moyen par sa position et r par sa valeur; ■, limites de l'intervalle de confiance de l'angle moyen (la longueur des segments est sans signification).
Nota: les valeurs du schéma sont fictives.

Cette représentation est complétée par celle des limites de confiances inférieure et supérieure de $\hat{a}m$ ($\alpha = 0,05$), matérialisées par les deux côtés d'un triangle isocèle qui a pour bissectrice le vecteur $\hat{a}m$ (Figure 18). La valeur de l'angle qui sépare les segments correspondant à L_1 et à L_2 est donc égale à $2 \cdot d$. Grâce à cette représentation, l'absence de chevauchement de deux triangles représentant les intervalles de confiance des angles moyens pour deux échantillons permettra, graphiquement, le rejet de l'hypothèse nulle H_0 , selon laquelle les angles moyens pourraient être égaux ($\alpha < 0,05$). Le test de comparaison décrit précédemment donnera plus précisément la probabilité p de cette hypothèse.

2.4.4. Conclusion:

L'allure des piles de quadrilatères représentant le profil rachidien sagittal impliqué par la morphologie osseuse peut donc être partiellement décrit par le calcul des angles interceptant les différents segments représentés. Homologues des angles de COBB des radiologistes (COBB, 1948), ils indiquent le sens de la courbure si celle-ci est simple, et sont dépendants de la forme des deux quadrilatères marquant les extrémités de la pile. Un traitement statistique spécifique aux échantillons constitués de mesures angulaires doit être entrepris.

Cependant, ces mesures ne décrivent les courbures que de façon globale et sont affectées des mêmes types de limitations que les indices exprimant la hauteur au vertex par rapport à la longueur de la corde, puisqu'ils ne rendent pas compte des détails de la courbure *lato sensu* entre les bornes où elle est mesurée. Une étude détaillée incluant la localisation des extrema, des points d'inflexion et la détermination des valeurs d'arcs, de cordes et de rayons de courbure doit passer par le calcul d'une fonction mathématique qui, ajustée précisément au profil, permette de restituer ces informations, lesquelles deviennent alors disponibles pour une description individuelle précise et pour le traitement statistique.

2.5. Calcul d'un polynôme d'ajustement:

2.5.1. Applications de l'ajustement polynomial au profil rachidien en Anthropologie:

Dans la lignée des travaux de FICK (1934) sur la variabilité du profil sagittal du tronc et de la colonne vertébrale, puis de ceux de A. DELMAS (1951, 1958), plusieurs auteurs ont souhaité effectuer une description quantitative des courbures du dos ou de la colonne et ont modélisé le profil rachidien en utilisant un ajustement polynomial. R. KNUSSMANN et E. FINKE (1980) utilisent un polynôme de degré 6 pour décrire le contour externe de la colonne vertébrale. Celui-ci est relevé au moyen d'un Cypholordosomètre de JÜRGEN, depuis le premier point supérieur accessible sur l'individu: le processus épineux de la *Vertebra prominens*, jusqu'au niveau du coccyx. Une indication de la courbure est donnée par la valeur de la dérivée seconde. J.C. PINEAU, R. MOLLARD et G. IGNAZI mènent en 1983 le même type d'étude à partir de 30 points cutanés depuis C7 jusqu'à L5, les coordonnées de ces points dans l'espace étant relevées au moyen d'un anthropostéréomètre. Ces auteurs discutent assez amplement la raison de leur choix d'un polynôme de degré quatre, qui leur permettra d'ajuster un modèle aux données des profils sagittaux. La valeur exacte du rayon de courbure du cercle tangent en chaque point est analysée ainsi que la variation de position du centre de ce cercle. En 1986, V. DELMAS et H. PINEAU reprennent cette méthode pour l'appliquer à l'étude de « l'évolution des courbures vertébrales au cours de la période embryo-foetale précoce »: à partir de clichés de coupes anatomiques médianes d'embryons conservés dans le formol, les coordonnées des vertèbres dans le plan sont recueillies sur papier millimétré et une fonction polynomiale de quatrième degré leur est ajustée.

Les arguments avancés par V. DELMAS pour justifier le choix de leur modèle permettent de définir un compromis entre la simplicité de ce dernier et les contraintes qu'il impose *a priori* aux données. Dans le cas d'une étude des courbures de la colonne vertébrale telles qu'elles peuvent être mesurées sur le vivant depuis la septième vertèbre cervicale jusqu'à la dernière lombaire, le modèle doit pouvoir décrire deux courbures de sens opposés - cyphose dorsale et lordose lombaire - séparées par un point d'inflexion. Une équation polynomiale de degré quatre permet une telle description. Elle serait préférable à une équation du troisième degré dont la dérivée (de second degré) impose mathématiquement une position du point d'inflexion symétrique par rapport aux sommets des deux courbures. L'équation de degré quatre est donc suffisante pour modéliser une série de points correspondant à deux courbures vertébrales, tandis que le choix d'un degré supérieur pourrait entraîner un ajustement de la courbe à des variations minimales des valeurs qui ne sont pas significatives de l'allure générale du profil. Par ailleurs, le polynôme de degré quatre permet de simplifier la localisation du point d'inflexion qui devient une solution de l'équation du deuxième degré correspondant à l'annulation de la dérivée seconde.

2.5.2. Choix du degré du polynôme pour la description des courbures vertébrales impliquées par la morphologie osseuse:

Les données qui seront utilisées et qui décrivent des courbures vertébrales déterminées uniquement par la morphologie osseuse, soit à partir de l'empilement des corps vertébraux seuls, soit à partir de l'empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux, ne montrent effectivement pas plus de deux courbures sur les segments étudiés. Un polynôme de degré

4 peut donc être choisi *a priori* comme outil de description pour les étages définis comme objets d'étude: les étages cervico-thoracique, thoraco-lombaire, et l'étage thoracique qui établit la continuité des deux premiers en les chevauchant. Le modèle permettra en soi la description au maximum de trois courbures successivement de sens opposés, c'est-à-dire séparées de deux points d'inflexion. Trois extrema peuvent donc apparaître, deux minima entourant un maximum, ou deux maxima entourant un minimum, sans contraintes de symétrie entre ces points qui seraient imposées artificiellement par le modèle.

On doit attendre d'un polynôme de degré supérieur qu'il s'ajuste de manière plus précise au profil obtenu, mais aussi qu'il décrive des variations minimales dans l'allure de celui-ci qui ne sont pas significatives et n'ont pas de valeur descriptive. Ce problème est déjà rencontré pour le polynôme de degré 4. En effet, qu'il s'agisse des étages cervico-thoracique ou thoraco-lombaire, et à plus forte raison de l'étage thoracique, le modèle est susceptible de s'ajuster à un nombre de courbures supérieur à celui attendu. Il en résulte que dans certains cas la fonction polynomiale qui minimise les carrés des écarts possède un point d'inflexion situé très près d'une des valeurs extrêmes du nuage, à l'extrémité du profil, ou parfois deux points d'inflexion rapprochés qui entourent une courte inversion de courbure et son extremum. Dans le premier cas (par exemple pour l'individu n°185 et à l'étage cervico-thoracique) l'inversion de courbure décrite à l'extrémité du profil peut ne pas être significative et correspondre à un artefact entraîné par l'ajustement du modèle. Les très hautes valeurs du rayon de courbure au delà de l'inflexion correspondent alors à l'approximation d'une courbure presque nulle, c'est-à-dire à un rayon de courbure tendant vers l'infini. Dans le second cas, le modèle s'ajuste à une variation minimale dans l'allure du profil alors que celui-ci ne présente qu'une seule et unique convexité (individu 205, étage cervico-thoracique), ou décrit une succession d'inflexions sur un profil qui s'écarte très peu de l'axe des abscisses (individu 720, étage cervico-thoracique) et peut être considéré comme n'ayant aucune courbure significative. Le choix d'un polynôme de degré inférieur qui impose à l'ajustement plus de contraintes en limitant le nombre de convexités possibles devrait pallier cet inconvénient.

Afin de tester le comportement de plusieurs modèles envisageables, et de vérifier si malgré les limitations de symétrie imposées par une fonction de degré trois il est possible grâce à une telle équation de solutionner le problème des inflexions non significatives, les polynômes de degré deux à cinq ont été calculés successivement pour un exemple type. Ce test a été réalisé sur les résultats obtenus pour l'individu 185 de *Spitalfields* et correspondant à l'empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux au niveau de l'étage cervico-thoracique. Ces données illustrent le cas typique de deux courbures opposées bien marquées – cyphose thoracique et lordose cervicale – mais pour lesquelles le polynôme de degré quatre décrit un point d'inflexion supplémentaire non significatif situé presque à la base de la pile au niveau du corps vertébral de T6 (la pile s'étendant du corps vertébral de T7 à l'espace intervertébral de C3).

Pour chaque polynôme ont été calculés les paramètres de l'ajustement polynomial mentionnés au tableau 2: **1/** le coefficient de corrélation multiple R et le coefficient de détermination (brut: R^2 ; et ajusté selon les degrés de liberté: R^2_{aj}) qui exprime directement le pourcentage de variation expliqué par la régression, **2/** l'erreur-standard de l'estimation $s_{y,x}$ et la variance résiduelle $s^2_{y,x}$. La valeur du coefficient a_d appliqué au terme de degré le plus élevé dans l'équation, c'est à dire au terme de degré égal à celui du polynôme est aussi mentionnée. Le coefficient est affecté de son erreur standard s_{ad} qui permet de calculer la valeur du t de Student et de tester la signification de a_d c'est-à-dire l'hypothèse nulle selon laquelle le coefficient théorique correspondant ne diffère pas de zéro : $a_d=0$.

Degré du polynôme <i>d</i>	Corrélation et détermination			Erreur standard et variance résiduelle		Coefficient du terme de degré <i>d</i> et erreur-standard, signification			
	<i>R</i>	<i>R</i> ²	<i>R</i> ² _{aj.}	<i>s</i> _{y.x}	<i>s</i> ² _{y.x}	<i>a</i> _{<i>d</i>}	<i>s</i> _{<i>a</i>_{<i>d</i>}}	<i>t</i> = <i>a</i> _{<i>d</i>} / <i>s</i> _{<i>a</i>_{<i>d</i>}}	<i>p</i> (<i>a</i> _{<i>d</i>} =0)
°2	.837	.701	.674	9.1877	84.41	-0.01	0.001	-5.470	2.10 ⁻⁵ ***
°3	.930	.864	.845	6.3372	40.16	3.10 ⁻⁵	7.10 ⁻⁶	5.024	6.10 ⁻⁵ ***
°4	.992	.984	.981	2.2449	5.039	6.10 ⁻⁷	5.10 ⁻⁸	12.14	1.10 ⁻¹⁰ ***
°5	.992	.985	.981	2.2280	4.964	1.10 ⁻⁹	9.10 ⁻¹⁰	1.142	0.268 H ₀

Tableau 2

Choix du polynôme optimal par augmentation progressive du degré de l'équation. Individu masculin n°185 de *Spitalfields*, empilement alterné, étage cervico-thoracique. *n* = 25 points. Le profil présente une cyphose thoracique et une lordose cervicale nette. Le degré du polynôme est incrémenté. L'augmentation des coefficients de corrélation et de détermination, et la décroissance de l'erreur-standard de l'estimation et de la variance résiduelle sont significatifs d'un gain en précision dans la description du profil. L'hypothèse de la nullité du coefficient affecté au terme de degré le plus élevé est testée pour chaque polynôme. A partir du degré 4, l'ajout d'un terme de degré supérieur n'a pas de valeur descriptive. ***: $p < (\alpha=0.001)$; H₀: l'hypothèse nulle $a_d = 0$ ne peut être rejetée.

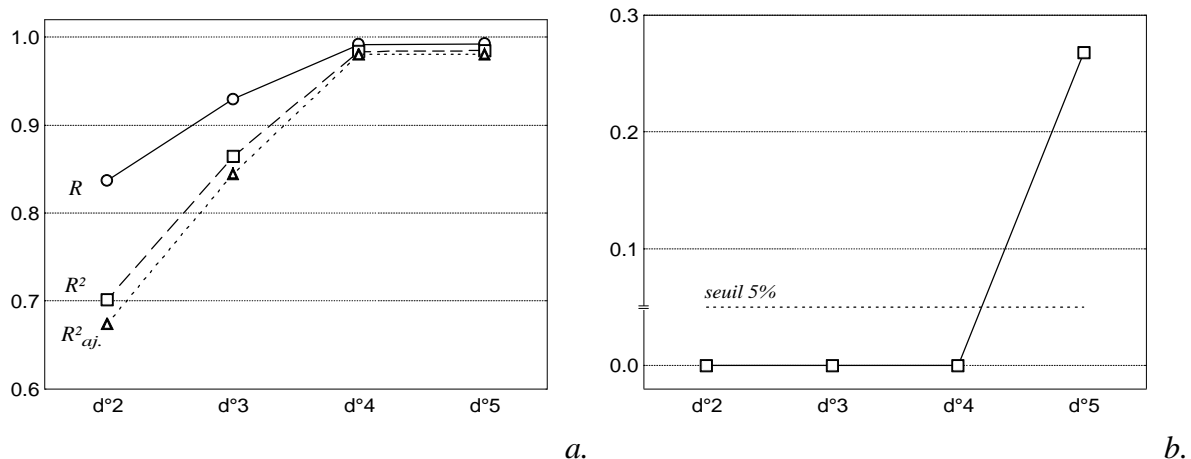


Figure 19

Variation des paramètres de la régression polynomiale selon le degré du modèle. Exemple de l'individu n° 185 de *Spitalfields*, empilement alterné de l'étage cervico-thoracique. *a.*, -○-: *R*, coefficient de corrélation multiple; -□-: *R*², coefficient de détermination; -Δ- , *R*²_{aj.}, coefficient de détermination ajusté; *b.*, ordonnées: *p*(H₀: *a*_{*d*} = 0), probabilité que le coefficient théorique du terme de plus haut degré soit nul, test de Student: *p* tend vers zéro jusqu'au degré 4 et est très supérieur à $\alpha = 0,05$ pour *d*=5.

La croissance de la corrélation et de la détermination (figure 19, *a.* et tableau 2), de même que la décroissance de l'erreur standard de l'estimation et de la variance résiduelle indiquent une amélioration progressive de la valeur descriptive de la régression au fur et à mesure que son degré est augmenté. Le gain est cependant très faible quand on passe du degré 4 au degré 5, avec 98,5% de la variation expliquée au lieu de 98,4%, alors que cette valeur chute à 86,4% pour un polynôme de degré 3. L'analyse de la pente du terme de degré maximal confirme cette constatation. Alors que l'hypothèse d'un coefficient nul est très fortement rejetée pour les équations de degré 2 à 4 ($p < 10^{-4}$), elle ne peut l'être dans le cas de la régression de degré 5 (figure 19, *b.*).

Cette procédure décrite par J. H. ZAR (1984) permet de démontrer de manière rigoureuse que l'ajout d'un terme supplémentaire n'entraînerait pas une meilleure description des données à partir du degré 4. En effet, au seuil de 25%, il est impossible de rejeter l'hypothèse selon laquelle le coefficient du dernier terme de l'équation de degré 5 pourrait avoir une valeur nulle dans la

population statistique. De la même façon, elle montre objectivement la nécessité d'exprimer l'allure du nuage en élevant le degré de la régression jusque 4, qui est la valeur optimale du modèle.

Le modèle de degré 3 a qualitativement l'unique avantage de ne pas posséder de point d'inflexion supplémentaire non significatif, situé pour les polynômes de degrés 4 et 5 à la base de la pile, à 16 % de la hauteur de celle-ci. Mais il présente une très mauvaise qualité d'ajustement, avec un résidu moyen de 5 mm, ordre de grandeur qui n'est pas compatible avec la précision souhaitée pour la description.

Une réduction du degré du polynôme en deçà de quatre n'est donc pas justifiable et l'artefact d'un point d'inflexion non significatif imposé par le modèle ne peut être contourné par ce biais. La représentation graphique du nuage de points avec le tracé de l'ajustement et la matérialisation des points remarquables permettra de juger au cas par cas de la validité de ceux-ci pour la description du profil.

Les régressions de degré 4 et 5 donnent par ailleurs des résultats presque égaux quant à la mesure de la longueur curviligne du profil (différence $\Delta = 0,9 \text{ mm} = 0,4 \%$), à la localisation des extrema de la courbe ($\Delta_1 = 1 \text{ mm}$; $\Delta_2 = 0,2 \text{ mm}$), à la valeur de leur flèche ($\Delta_1 = -0,5 \text{ mm}$; $\Delta_2 = -0,7 \text{ mm}$), et à la situation des points d'inflexions ($\Delta = 2,3 \text{ mm}$) et des courbures maximales ($\Delta_1 = 2,8 \text{ mm}$; $\Delta_2 = -0,2 \text{ mm}$). La localisation de ces points remarquables, quand elle est exprimée selon l'élément vertébral au niveau duquel ils sont situés, est strictement égale pour les deux polynômes ($\Delta = 0$). Cette indépendance vis-à-vis du degré du polynôme est même constatée dans la régression quadratique qui détermine exactement l'étage auquel se situe le premier extremum, et elle est notable dans la régression cubique dont l'erreur n'atteint qu'une seule fois l'équivalent de deux étages vertébraux.

La régression multiple de degré quatre apparaît donc comme le modèle optimal permettant l'étude de profils rachidiens dessinant jusqu'à deux concavités opposées. La méthode de la régression polynomiale elle-même se révèle par ailleurs un outil très précis qui permet de situer exactement dans le repère mathématique et dans la pile des quadrilatères les points remarquables du profil que sont les extrema, points d'inflexion et maxima de courbure.

L'équation de la fonction ajustée s'écrira donc:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4$$

où a_0, a_1, a_2, a_3 et a_4 sont les coefficients dont la valeur est à déterminer.

2.5.3. Détermination des coefficients du polynôme:

Les cinq coefficients caractérisant le polynôme du quatrième degré qui s'ajustera aux données ont été déterminés à l'aide de l'application STATISTICA qui propose deux procédures d'ajustement.

A. Régression linéaire multiple

La première procédure proposée par le logiciel STATISTICA est basée sur la détermination de la droite de régression multiple permettant d'exprimer y en fonction de x, x^2, x^3 , et x^4 considérés comme autant de variables. La recherche des coefficients est donc précédée du calcul des trois nouvelles variables x^2, x^3 , et x^4 , et les coefficients de la droite de régression s'ajustant aux quatre variables indépendantes sont déterminés par la méthode des moindres carrés dans l'espace à cinq

dimensions ainsi défini. Il s'agit de la méthodologie classique de la régression polynomiale traitée comme une régression linéaire multiple dans laquelle la détermination des coefficients est issue de calculs matriciels sur les corrélations.

B. Régression non linéaire

La seconde méthode est une approximation informatique de chaque coefficient par itérations successives selon une procédure qui permet de guider le choix des valeurs en fonction de l'évolution des résultats précédents. La procédure qui a été choisie est la procédure "Quasi-Newton", qui utilise une estimation de la dérivée seconde de la fonction de détermination des résidus, pour prédire le mouvement des paramètres à chaque itération. Les valeurs des coefficients de la fonction pour lesquelles la perte est minimale peuvent ainsi être déterminées. La "fonction de perte" choisie est: $LOSS=(OBS-PRED)^2$, carré de la différence entre observés et prédits. La courbe est donc déterminée en minimisant les moindres carrés. L'équation de la fonction modèle que l'on souhaite ajuster aux données est entrée textuellement au départ de l'analyse. Tout type d'équation peut ainsi être ajusté.

C. Justification de la méthode employée

Ces deux méthodes sont équivalentes, et malgré des valeurs de coefficients qui peuvent différer légèrement, les représentations graphiques des fonctions déterminées par chacune d'elles se superposent exactement sur l'intervalle où elles ont été recherchées. Par ailleurs, la valeur de $a_0 = 0$, donnée *a priori* par l'ajustement de la base de la pile de quadrilatères sur l'origine du repère, permet d'obtenir une détermination exacte des coefficients au moyen de la seconde méthode car la limitation à trois du nombre de coefficients inconnus permet alors d'obtenir une convergence des paramètres après environ 400 itérations.

La recherche des coefficients par approximation successive est complétée d'une représentation graphique des points de données et de la fonction qui vient d'être déterminée sans les manœuvres laborieuses qu'exige la première procédure, où les coefficients doivent être entrés dans l'expression textuelle de la fonction polynomiale pour permettre sa représentation et sa superposition au nuage de points. C'est donc pour cette raison pratique que la seconde méthode a été choisie préférentiellement, puisqu'elle facilite le contrôle rapide de l'allure de la courbe et de son ajustement aux données. La régression linéaire multiple a toutefois été utilisée dans certains cas car elle présente l'avantage de fournir presque instantanément les valeurs des coefficients de corrélation et de détermination. Par ailleurs, la procédure par itérations employée dans la régression non linéaire devient trop lente quand elle un grand nombre de données doivent être traitées. Ce donc essentiellement des critères de maniabilité qui ont amené à opter pour l'une ou l'autre des deux procédures, celles-ci fournissant par ailleurs des résultats totalement équivalents.

2.5.4. Description du profil vertébral au moyen du polynôme:

A. Dimensions des profils

(1) Hauteurs

La hauteur générale de la pile des quadrilatères est donnée par les coordonnées de ses extrémités supérieure et inférieure, qui sont situées sur l'axe vertical.

Par ailleurs, les coordonnées des quadrilatères permettent de calculer aisément la distance entre deux segments quelconques, en employant simplement le théorème de Pythagore. Soient deux points *A* et *B* marquant la position de deux plateaux vertébraux dont on souhaite calculer la distance

qui les sépare en droite ligne. Si les quadrilatères sont ajustés sur leur côté postérieur, A et B sont extrémités postérieures des diamètres sagittaux des plateaux. La distance entre A et B est donnée par :

$$d_{AB} = \sqrt{(y_A - y_B)^2 + (x_A - x_B)^2}$$

où (x_A, y_A) et (x_B, y_B) sont les coordonnées de A et B .

Il sera donc aisé de calculer, en particulier, la distance existant entre les segments extrêmes de chaque étage vertébral, pour obtenir les “*hauteurs*” des étages cervical, thoracique et lombaire. La position de certains points remarquables, comme les sommets de courbure (*cf. infra*), permettra la comparaison entre individus lorsqu’elle sera exprimée relativement à la hauteur totale du profil, en pourcentage de celle-ci.

(2) Longueurs curvilignes

La longueur curviligne d’une partie ou de l’ensemble du profil est une autre mesure intéressante pour sa description. Elle correspond à sa longueur développée ou encore à sa longueur d’arc, bien qu’il puisse s’agir d’un arc comportant plusieurs courbures. Elle sera calculable un fois définie l’équation du polynôme ajusté au profil.

Si cette équation¹ s’écrit $y = f(x)$, et sa dérivée $y = f'(x)$, la longueur curviligne du polynôme entre les bornes A et B est donnée par :

$$l_{AB} = \int_{x_A}^{x_B} \sqrt{1 + f'(x)^2} \cdot dx$$

Une somme de Riemann a été programmée en langage macro EXCEL afin de calculer une approximation de l_{AB} . L’intervalle $(x_B - x_A)$ est divisé en un nombre suffisant de sous-intervalles d’égale étendue pour obtenir une précision supérieure au dixième de millimètre. Cette résolution correspond en fait, pour la présente application, à un calcul exact et non pas approché puisque la précision obtenue est supérieure à celle fournie par la plupart des techniques anthropométriques.

Comme pour la longueur en droite ligne, la longueur curviligne permet d’exprimer (outre sa propre valeur descriptive) la position des points remarquables du profil. Celle-ci est exprimable de manière absolue par rapport à la base de la pile, il s’agit alors de la longueur développée du profil depuis la base jusqu’au point. C’est une mesure intéressante car elle n’est pas dépendante de l’axe selon lequel est orienté le profil et peut donc être donnée même si certains segments au dessus du point remarquable ne sont pas calculables. Les positions des points remarquables tels que points d’inflexion et maxima de courbure de profils dont les segments craniaux ne sont pas conservés sont donc comparables avec les données des profils complets. Ces positions sont aussi exprimables d’une manière relative en proportion (pourcentage) de la longueur développée totale du profil quand il est complet, ou d’une longueur développée partielle s’il est incomplet, afin de permettre la comparaison. La longueur des étages thoracique et lombaire peut par exemple être définie comme référence autorisant des comparaisons relativement indépendantes du format. Par ailleurs, la longueur

¹ Lors du calcul de l’empilement, les y définissent les ordonnées de la pile c’est à dire la hauteur à laquelle se trouvent les quadrilatères par rapport à la base. L’ajustement d’une régression polynomiale $y = f(x)$ doit donc être précédée d’un changement de variables tel que les ordonnées deviennent les abscisses et réciproquement. L’axe de la pile devient ainsi parallèle à celui des abscisses. L’équation du polynôme dans les coordonnées du calcul de la pile est donc $x = f(y)$, mais la notation « $y = f(x)$ », plus intelligible a cependant été conservée. Les bornes x_A et x_B dans calcul de la longueur curviligne correspondent en fait aux y_A et y_B dans le calcul de la distance en droite ligne. L’expression de d_{AB} reste inchangée.

curviligne, au contraire de la longueur en projection, est indépendante de la courbure générale du profil, ce qui permet d'éviter une redondance d'information lors de l'expression des valeurs de courbure. En revanche, l'expression des coordonnées de l'empilement en pourcentage de la longueur curviligne ne correspond pas à une transformation homothétique du profil.

Le rapport h/l donne aussi une première information sur la courbure générale du profil.

B. Recherche des extrema

L'équation de la dérivée première permet la recherche des extrema du polynôme. En d'autres termes, elle permet de situer les maxima et minima de la courbe, qui marquent les points où celle-ci passe, respectivement, d'une pente positive vers une pente négative ou d'une pente négative vers une pente positive. La dérivée s'annule donc quand la fonction passe par un extremum.

La situation des extrema revêt un intérêt tout particulier pour la description des courbures de la colonne vertébrale puisqu'ils correspondent aux points du profil rachidien qui sont les plus éloignés de l'axe par lequel passent les extrémités de ce profil. Selon l'orientation qui a été choisie, les maxima correspondront donc aux lieux où le profil passe par son point le plus postérieur et les minima, aux lieux où celui-ci passe par son point le plus antérieur ; selon la terminologie anatomique, les maxima sont des sommets de cyphoses, et les minima des sommets de lordoses.

La dérivée première d'un polynôme de degré quatre est un polynôme du troisième degré qui a pour expression :

$$y' = a_1 + 2.a_2.x + 3.a_3.x^2 + 4.a_4.x^3$$

L'équation : $a_1 + 2.a_2.x + 3.a_3.x^2 + 4.a_4.x^3 = 0$ n'admet pas de solution générale simple, aussi la valeur de x pour laquelle la dérivée s'annule est-elle recherchée par approximations successives, réalisées au moyen d'un programme informatique.

Le principe de la recherche est le suivant :

Le segment défini par les bornes inférieure et supérieure spécifiées comme limites de la recherche est divisé en parties égales et les valeurs de la dérivée aux extrémités de chacun de ces petits segments sont comparées entre elles. Si le signe de la dérivée change sur l'intervalle, celui-ci est à son tour défini comme segment dans lequel la position de la valeur zéro sera recherchée, et est lui-même divisé en parties égales. Le processus est réitéré un nombre de fois suffisant pour obtenir une précision de cinq chiffres après la virgule. Chaque fois qu'une solution a été localisée avec la précision suffisante, celle-ci est prise comme borne inférieure de la recherche, qui est poursuivie pour trouver une ou deux autres solutions possibles à l'équation, jusqu'à ce que la borne supérieure de l'intervalle choisi soit atteinte.

Notons que la position d'un extremum de la fonction n'est pas nécessairement celle d'un extremum dans les valeurs du rayon de courbure. Les deux notions ne sont pas équivalentes et le calcul d'indices de courbure classiquement utilisé pour la description de profils rachidiens en radiologie, en ramenant la valeur de l'extremum à la corde de la portion de courbe étudiée, n'offre de ce fait qu'une description de la courbure moyenne du segment. L'indice ainsi défini ne permet pas de différencier un segment de courbe qui aurait en un point une très forte courbure d'un segment montrant sur toute sa longueur une courbure moyenne, si ces deux segments ont une longueur de corde et une longueur d'arc au niveau de l'extremum qui sont égales (Figure 20).

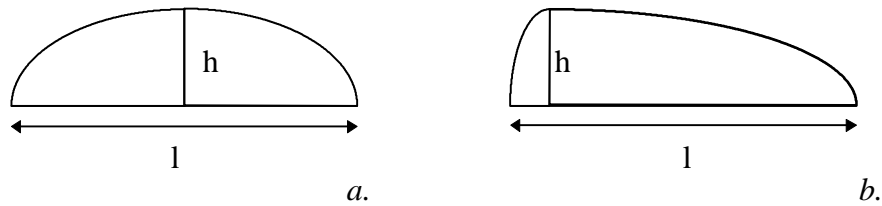


Figure 20

Indice de courbure: $i = h/l$. Dans les deux cas de figure, malgré une courbure maximale beaucoup plus importante en b qu'en a, les valeurs de i sont identiques.

C. Recherche des point d'inflexion

Les points d'inflexion sont donnés par la dérivée seconde dont le signe renseigne sur le sens de la concavité de la fonction. La dérivée seconde est positive quand la concavité de la courbe est dirigée vers le haut (ce qui correspond, selon l'orientation choisie, à une lordose), négative quand elle est dirigée vers le bas (cyphose), et nulle au point d'inflexion. D'un point de vue anatomique, le point d'inflexion correspond donc au passage d'une cyphose à une lordose, ou inversement.

La dérivée seconde est un polynôme du second degré qui s'écrit:

$$y'' = 2 a_2 + 6 a_3 x + 12 a_4 x^2$$

Les valeurs de x pour lesquelles $y'' = 0$, sont données par la résolution de l'équation du second degré. Si le discriminant $\Delta = (6 a_3)^2 - 96 a_4 a_2$ est négatif, l'équation n'a pas de solution réelle; sinon, l'équation admet une ou deux solutions selon que le discriminant est nul ou positif. Ces solutions s'écrivent:

$$x_{1,2} = \frac{-6 a_3 \pm \sqrt{\Delta}}{24 a_4}$$

Un programme réalisé en langage Macro EXCEL 4 renvoie la valeur des solutions en effectuant ces calculs. Bien que deux solutions réelles puissent être déterminées, le programme élimine les racines se situant au delà des abscisses du profil, c'est-à-dire, pratiquement, les racines négatives et celles supérieures à la hauteur du profil.

D. Calcul des rayons de courbure

La valeur du rayon de courbure du cercle osculateur à la courbe est donnée par l'équation:

$$R = \frac{\sqrt{1 + y'^2}^3}{y''}$$

Il est donc possible d'obtenir pour chaque valeur de x une mesure objective de la courbure du profil. Le signe de R , comme celui de la dérivée seconde, permet de déterminer le sens de cette courbure, différent de part et d'autre du point d'inflexion, et passant au niveau de celui-ci par deux

infinis de signes opposés correspondant au changement d'orientation de la concavité et au passage par une courbure intermédiaire nulle. Il est intéressant de localiser les valeurs extrêmes de la courbure du rachis, particulièrement les points où le rayon de courbure est minimal. La dérivée première R' de l'équation s'annule pour ces valeurs. Elle s'exprime de la façon suivante:

$$R' = \frac{3y'y''^2 \sqrt{1+y'^2} - y''' \sqrt{(1+y'^2)^3}}{y''^2} \quad \text{où} \quad y''' = 6 a_3 + 24 a_4 x$$

Les valeurs de x pour lesquelles $R' = 0$ ont été recherchées par la même méthode que celle appliquée pour la localisation des points d'inflexion. La valeur nulle est cernée par réduction progressive de l'intervalle de recherche et localisation du changement de signe.

E. Calcul de la courbure

Afin de faciliter l'interprétation des polynômes, l'étude des rayons de courbure a été complétée par celle d'une variable représentant la courbure elle-même, et donnée simplement par l'inverse du rayon de courbure. « *The curvature is the inverse of the radius of the circle closest-fitting to the outline there, and indicates how rapidly the tangent angle is varying with distance along the outline.* » (Bookstein, 1978). Une augmentation d'un facteur 10^3 donne un ordre de grandeur plus immédiatement intelligible. La courbure C est donc ainsi définie:

$$C = 1000 / R.$$

Au niveau des points d'inflexion, où le profil peut être considéré comme un segment de droite, C prend la valeur zéro ($C = 1000 / \infty$), et rend parfaitement compte de l'absence de courbure. Le rayon de courbure passe en ce point par deux infinis de sens opposés dont l'interprétation est peu aisée et dont la représentation graphique est susceptible de masquer des variations plus intéressantes dans les valeurs faibles de R . En ce même point, la courbure s'annule simplement, et reste sur tout son tracé dans un même ordre de grandeur. Par ailleurs, aux endroits où le profil est le plus courbé, c'est-à-dire où le rayon de courbure passe par une valeur absolue minimale, C prend une valeur maximale. Cette variable permet donc une représentation plus lisible et une lecture plus intuitive de l'allure du profil.

L'utilisation de la courbure pallie aussi un inconvénient majeur du rayon de courbure dont la distribution ne correspond pas à une distribution normale. Par anticipation sur les résultats obtenus à partir des piles de quadrilatères, l'étude de normalité des deux variables -rayon de courbure R et courbure C - peut être présentée pour un exemple concret. Il s'agit des valeurs de R et C obtenues au niveau du corps de la cinquième vertèbre thoracique, à partir des ajustements polynomiaux calculés sur les piles alternées des corps vertébraux et espaces intervertébraux. Le segment T5 a été choisi car il permet d'obtenir pour 23 sujets une valeur de même signe de R ou de C qui correspond à la mesure d'une cyphose.

Il apparaît en effet que le test de Kolmogorov-Smirnov (et Lilliefors) donne une probabilité inférieure à 0.01 pour une acceptation à raison de l'hypothèse de normalité de la variable R . Cette probabilité chute en dessous de 10^{-5} avec le test de Shapiro et Wilk. La représentation graphique des résidus observés contre ceux attendus dans le cas d'une distribution normale montre une répartition presque verticale des points et asymptotiquement horizontale pour les valeurs élevées de R , laquelle répartition se sépare totalement de la diagonale théorique (Figure 21 a.). En revanche, les résultats

des tests ne permettent pas de rejeter l'hypothèse de normalité de C . Le test de Kolmogorov-Smirnov donne une probabilité supérieure à 0.2, et celle-ci s'élève à 0.5 avec le test de Shapiro-Wilk. La distribution des résidus observés s'ajuste parfaitement sur celle des résidus attendus dans le cas d'une distribution normale (Figure 21 *b.*).

L'utilisation de la grandeur C représentant la courbure du polynôme et définie comme l'inverse du rayon de courbure augmenté du facteur 1000 permet donc une interprétation plus aisée des profils et autorise l'emploi des tests statistiques basés sur l'hypothèse d'une distribution normale de la variable.

La formule du polynôme renseigne donc sur la présence et la position des points remarquables pour chaque individu: extrema de la courbe, c'est-à-dire sommets du profil, points d'inflexion marquant précisément le lieu où la courbure s'inverse, et maxima de courbure dont le nombre, l'emplacement et la valeur apportent des informations supplémentaire sur l'allure de la pile des quadrilatères. La courbure elle-même, telle qu'elle a été définie (inverse du rayon de courbure augmenté d'un facteur 10^3), est calculable en chaque point. Elle enrichit encore la description et autorise la comparaison de profils incomplets établis à partir d'un plus petit nombre de quadrilatères.

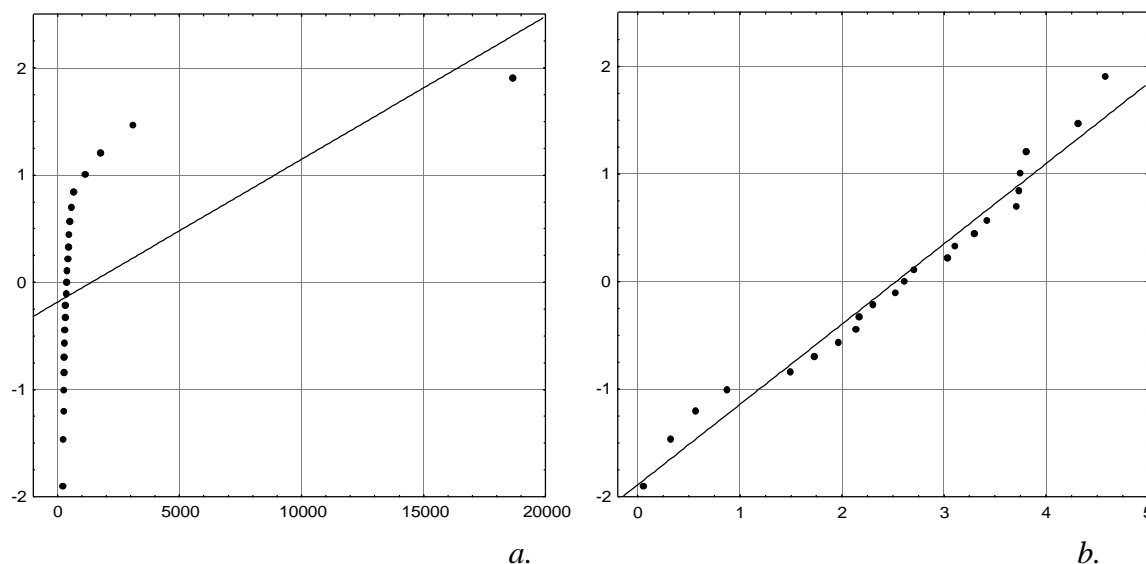


Figure 21
 Test de normalité pour *a.*: le rayon de courbure R et *b.*: la courbure C . Echantillon de *Spitalfields*. Valeurs mesurées au niveau du corps vertébral de T5 sur les polynômes issus des piles alternées des corps vertébraux et des espaces intervertébraux. $n = 23$. Abscisses: valeurs observées des résidus (écarts à la moyenne); ordonnées: valeurs attendues dans l'hypothèse d'une distribution normale. La droite est la droite théorique obtenue dans le cas d'une distribution strictement normale.

2.5.5. Variabilité des polynômes calculés:

En dernier lieu, une vue synoptique de l'ensemble des polynômes de l'échantillon donne un aperçu de la variation rencontrée entre les profils, et bien que regroupant des courbes dont l'allure peut être différente, l'analyse conjointe de données qui correspondent à un groupe d'individus est apparue assez informative pour apprécier leur variabilité. De manière générale, elle permet de

confronter un ou plusieurs sujets à l'échantillon choisi, et elle est particulièrement intéressante pour l'étude des différences sexuelles (Figures 39, 47, 48, 49). Elle ne peut être substituée à l'analyse de variabilité des profils que permet la détermination et la description de leurs points remarquables.

Dans un tel but, une régression polynomiale (régression linéaire multiple) est calculée pour l'ensemble des sujets de chaque sexe. Afin d'obtenir des données comparables, les coordonnées dans le plan des quadrilatères empilés sont préalablement exprimés en pourcentage de la hauteur du profil pour chaque individu. La variabilité est donc réduite, d'une part, à l'équation générale qui exprime pour l'échantillon la valeur moyenne de la coordonnée pour une abscisse donnée, et d'autre part, à l'intervalle de tolérance dont cette estimation est affectée.

Pour une valeur de x (position sur la hauteur de la pile) additionnelle, cet intervalle donne les limites au risque α des valeurs de y (distance à l'axe des abscisses) qui peuvent être rencontrées dans la population. L'intervalle de tolérance est calculé à partir de l'écart-type S_{Tx} de cette estimation pour chaque valeur de x (ZAR, 1984):

$$s_{Tx} = s_{Y_{1,2,\dots,m}} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m c_{ik} (x_i - \bar{x}_i)(x_k - \bar{x}_k)}$$

où $s_{Y_{1,2,\dots,m}}$ est la racine de la variance résiduelle de la régression, m est le nombre de variables indépendantes, égal ici au degré du polynôme, n le nombre de données, et c_{ik} la valeur située à la ligne i et la colonne k dans la matrice inverse des sommes des produits et sommes des carrés des écarts, calculée pour les variables indépendantes de la régression multiple: x , x^2 , x^3 et x^4 .

Les limites de tolérance inférieure et supérieure l_i et l_s sont données par la relation:

$$l_{i,s} = y_{estimé} \pm t_{\alpha} s_{Tx} \quad \text{où } t_{\alpha} \text{ est la valeur du } t \text{ de Student.}$$

La valeur de $s_{Y_{1,2,\dots,m}}$ (« *Standard error of estimate* ») est calculée par le programme d'analyse de données employé pour le calcul de la régression. Les bornes de l'intervalle de tolérance (DIEM, 1972) ou "intervalle de prédiction" (ZAR, 1984) sont les seuils qui doivent être utilisés pour la comparaison d'un individu supplémentaire. Elles ne peuvent être substituées par les limites de l'intervalle de confiance de la régression ou par celles que donne directement l'écart-type $s_{Y_{1,2,\dots,m}}$ de l'estimation. Ce dernier paramètre est fourni par le logiciel, ce qui n'est pas le cas de la valeur de s_{Tx} , dont le calcul laborieux doit être répété pour chaque valeur de x . Cette dernière tâche a été programmée en langage macro EXCEL et la procédure de calcul de s_{Tx} fut appliquée à un nombre d'abscisses suffisant pour autoriser une représentation graphique continue de l'intervalle de tolérance.

Des ellipses d'équiprobabilité ont aussi été employées afin de représenter la variabilité dans la position des points homologues qui correspondent aux mêmes segments pour différents sujets. Les coordonnées de chaque profil sont donc transformées pour être exprimées en pourcentage de la hauteur totale (longueur en projection). L'ensemble des profils est représenté dans un même repère, leurs extrémités ayant toutes pour coordonnées (0, 0) et (100, 0). Une ellipse est ensuite calculée, par exemple, pour l'ensemble des points du plan qui correspondent au sommet postéro-supérieur du corps vertébral de T10, une autre pour le sommet postéro-supérieur de T9, et ainsi de suite. Les ellipses utilisées sont les ellipses de confiance de l'échantillon (DEFRISE-GUSSENHOVEN, 1955; DIEM, 1972; CLEUVENOT, 1993). Elles permettent de comparer d'autres points à l'échantillon en sachant toutefois que les ellipses de tolérance inférées pour la populations sont plus amples que les ellipses de confiance.

3. Matériel d'étude

3.1. La collection

La collection de référence est issue des fouilles archéologiques de la crypte de la paroisse *Christ Church* dans le quartier (*Hamlet*) de *Spitalfields* à Londres. Elle est conservée au *British Museum of Natural History*. Plusieurs facteurs ont amené à choisir cette collection.

Le premier d'entre tous est l'accessibilité au grand nombre de données individuelles qui ont été déterminées lors de l'étude anthropologique et historique des restes (REEVE et ADAMS, 1993 ; MOLESSON *et al.*, 1993). Celles-ci concernent en fait l'échantillon identifié (« *named sample* ») qui comprend 387 sujets parmi les 983 cercueils qui furent trouvés. Cet échantillon est constitué des restes des individus pour lesquels la plaque d'identification était restée fixée au cercueil sans trace observable d'une possible réutilisation de la plaque ou du cercueil. Le prénom et le nom de famille ont ainsi permis de déduire à partir des registres paroissiaux et baptismaux et de registres commerciaux: le sexe, l'âge au décès, la date de décès, et l'activité ou les activités professionnelles ou para-professionnelles de pratiquement chaque sujet.

Le fait de pouvoir disposer de ces informations est *a priori* fondamental. La prise en compte du dimorphisme sexuel semble absolument nécessaire dans le cadre d'une étude de variabilité des courbures sagittales (KNUSSMAN et FINKE, 1980).

Au contraire des critères morphologiques de détermination du sexe, l'utilisation de marqueurs ostéologiques pour la détermination de l'âge au décès s'est avérée très peu fiable, y compris pour la détermination de classes d'âge très larges, et ceci sur la base même de l'étude anthropologique du projet *Spitalfields* (MOLLESON *et al.*, 1993). L'information additionnelle de l'âge au décès permet d'éliminer, indépendamment des critères ostéologiques, les individus trop jeunes dont la croissance pourrait ne pas être achevée. Elle permet surtout, en limitant le choix des individus avancés en âge, de diminuer la probabilité d'introduire dans l'échantillon des colonnes vertébrales dont certains segments pourraient présenter des altérations de la forme des corps vertébraux, par tassement et/ou cunéiformisation (DAI, 1998). Des modifications mineures de la forme des corps vertébraux peuvent en effet ne pas être perceptibles lors d'une simple observation « macroscopique » (AUDRAN *et al.*, 1992 ; MENNECIER et SEBERT, 1992). Même si ces altérations étaient susceptible de ne pas présenter une importance clinique, elles pourraient introduire un biais dans la description de variabilité des courbures sagittales. Cette considération apparaît particulièrement importante pour les sujets de sexe féminin affectés de manière plus importante par les problèmes d'ostéoporose consécutive aux modifications du métabolisme osseux (ostéopénie) à partir de la ménopause (ROBBINS et COTRAN, 1988 ; BURR et MARTIN, 1989 ; ALEXANDRE, 1992 ; AUDRAN *et al.*, 1992, 1993 ; OSMAN *et al.*, 1992 ; COURPRON, 1992 ; MARCELLI et SIMON, 1992 ; ALEXANDRE, 1993 ; COHEN-SOLAL et SEBERT, 1993 ; DEMPSTER, 1993 ; LAVAL-JEANTET *et al.*, 1993 ; EDWARDS et YUAN, 1995 ; SLEMENDA *et al.*, 1996). La grossesse est de même susceptible de modifier et d'altérer la biomécanique rachidienne (BUKOVIC *et al.*, 1993). D'une manière générale, des variations quantifiables des courbures sagittales (AMONOO-KUOFI, 1992) et de la forme des corps vertébraux, corrélées significativement avec l'âge, ont été mises en évidence (ERICKSEN, 1974, 1976, 1978a, 1978b), et particulièrement dans le plan sagittal (MILNE et LAUDER, 1974, 1976 ; HAOND et BIOT, 1992).

L'activité professionnelle *lato sensu* est une donnée non négligeable. Elle permet de s'assurer que n'entrent pas dans l'échantillon des sujets ayant pratiqué au long de leur existence des activités particulièrement dommageables pour les structures vertébrales, ou encore, qu'une activité impliquant des efforts mécaniques particuliers ne soit pas sur-représentée dans l'échantillon.

La date de décès contribue elle aussi à la détermination de l'échantillon. La collection issue du projet *Spitalfields* présente la qualité d'avoir une extension verticale assez limitée. « Plus des trois quarts [des sujets] sont nés dans le courant du XVIII^{ème} siècle, presque la moitié (48 %) dans la seconde moitié » (*ibidem.*).

Un autre critère non négligeable dans le choix de réaliser à Londres l'étude de la collection de référence est la qualité de la muséologie au sens large, qui est mise en œuvre par le *British Museum of Natural History*, et particulièrement pour cette collection ostéologique. Elle se caractérise sous plusieurs aspects assez différents qui forment conjointement un excellent environnement de travail. La qualité des conditions de conservation et d'étude des restes contribuent à donner une grande fiabilité aux données. Par ailleurs, le grand nombre de travaux réalisés sur la collection de *Spitalfields* a conduit à l'élaboration d'une ample documentation scientifique de qualité, par laquelle cette collection revêt un intérêt tout particulier. Cette richesse d'information est rendue possible par la grande ouverture d'esprit et la qualité d'accueil du *Museum*, sans restriction imposée au sujet de recherche, et avec discrétion vis-à-vis de la méthodologie mise en œuvre. C'est ici l'occasion de renouveler des remerciements déjà formulés et de les diriger tout particulièrement à Madame Theya MOLLESON.

3.2. Sélection de l'échantillon

3.2.1. Maturité rachidienne

Un premier tri a consisté à éliminer les sujets immatures au vu de la seule information documentaire relative à l'âge au décès.

Dans leur étude morphologique des plateaux vertébraux selon l'âge, EDELSON et coll. distinguent un stade 4 correspondant à la fusion de l'anneau cartilagineux au plateau vertébral proprement dit qui, à partir de l'échantillon non pathologique étudié, s'étend de 12 à 25 ans au niveau cervical, de 12 à 24 au niveau lombaire et de 14 à 25 au niveau thoracique. Le stade 5 suivant est défini par l'apparition progressive d'ostéophytes et leur accumulation avec l'âge. Il est rencontré dès 20 ans chez certains individus (EDELSON *et al.*, 1988). BIRKNER donne la même limite inférieure de 25 ans pour l'achèvement de la soudure du listel vertébral et des noyaux accessoires des processus transverses (BIRKNER, 1980). Bien que la croissance longitudinale soit fortement réduite après l'âge de 10 ans (HAAS, 1939; BICK et COPEL, 1950; LARSEN et NORDENTOFT, 1962), des coupes histologiques révèlent la présence de cartilage de croissance dans les plateaux cartilagineux jusque dans la deuxième décennie d'âge (BERNICK et CAILLIET, 1982). DICKSON et DEACON remarquent que tant que la fusion entre le corps et le listel vertébral n'est pas réalisée, bien qu'il ait été démontré que ce dernier n'était pas assimilable à une épiphyse de croissance (BICK et COPEL, 1950), la forme du corps vertébral était susceptible de changer (DICKSON et DEACON, 1987). Des mesures telles que le diamètre transversal maximum du *Foramen vertebrale* ou le volume des corps vertébraux (de C2 à L5) montrent en effet que les données quantitatives ne sont pas encore stabilisées à l'âge de 20 ans (TULSI, 1971). Le milieu de la deuxième décennie ne correspond pas, cependant, à une stabilisation complète de la colonne vertébrale dans son ensemble, et l'évolution

dans la maturité d'instabilités rachidiennes déjà déclarées, telles que des courbures scoliotiques, a été amplement étudiée (PONSETI et FRIEDMAN, 1950; COLLIS et PONSET, 1969; DICKSON et LEATHERMAN, 1976; STAGNARA, GONAN et FAUCHET, 1984).

La limite de 25 ans semble donc signifiante d'une certaine maturité acquise par les structures vertébrales osseuses. Elle détermine un seuil satisfaisant, bien que réducteur vis-à-vis de phénomènes de croissance entachés d'une certaine variabilité. Elle servira ici de limite supérieure objective à la période de maturation des structures vertébrales, laquelle ne semble pouvoir être définie plus précisément que « *during the mid-twenties* » (DICKSON et DEACON, 1987).

3.2.2. Dégénérescence rachidienne ¹

Il est difficilement envisageable qu'une étude de la colonne vertébrale passe outre toute incursion dans le domaine de la pathologie et particulièrement de la pathologie dégénérative. La définition par EDELSON du premier stade morphologique « *post-maturation* » (n°5) comme étant celui à partir duquel se développent des ostéophytes (EDELSON, 1988) est significative de la relation étroite qui existe entre colonne vertébrale saine et colonne vertébrale pathologique. Cette liaison est peut-être plus significative encore dans le cadre de la paléoanthropologie que dans celui d'études cliniques ou radiologiques. D'une part, un nombre important de phénomènes dégénératifs affectent la structure osseuse fossilisable, et par ailleurs, l'observation directe n'est pas soumise aux restrictions physiques imposées par l'obtention des clichés radiologiques: superposition des plans, moindre résolution, limitation des *norma* par celle du nombre de clichés, etc. (BIRKNER, 1980; ROGERS *et al.*, 1990). D'autre part, bien que ces phénomènes entraînent une diminution de mobilité avec l'âge (BADELON *et al.*), ces pathologies ne conduisent pas nécessairement à des manifestations cliniques (RESNICK et NIWAYAMA, 1988c; LAGIER, 1992). Il doit donc exister, même si les fréquences d'affectation rapportées par les études cliniques sont fortes, une sous-estimation de ces dernières face à ce qui peut être rencontré lors d'observations directes sur l'os sec (voir plusieurs discussions en ce sens dans: ORTNER ET PUTSCHAR, 1981; ORTNER, 1991; DASTUGUE et GERVAIS, 1992)

La collection de la *Christ Church de Spitalfields* apparaît, selon des critères ostéologiques, fortement affectée par ces types de pathologies dégénératives si l'on considère les localisations vertébrales (WALDRON et COX, 1989 ; WALDRON, 1991a, 1991b ; CASAS, 1997) . Des fréquences de 73 % d'affectations par DISH et/ou Spondylarthropathie ont été déterminées pour la classe d'âge 40-65 ans (CASAS, 1997). La colonne vertébrale a été décrite comme étant dans la collection la première structure osseuse affectée, quel que soit le sexe, alors qu'elle apparaît seulement en 5^{ème} ou 6^{ème} position, parmi 9 localisations considérées, dans une population britannique moderne comparée sur la base de données radiologiques (WALDRON, 1991a).

Les processus de dégénération tissulaire qui affectent la colonne vertébrale avec l'âge ont des répercussions principalement au niveau articulaire (RESNICK, 1988), c'est-à-dire sur le disque et les plateaux vertébraux d'une part, et sur les articulaires postérieurs d'autre part.

¹L'objet de ce chapitre est d'effectuer une très brève revue des modifications dégénératives *lato sensu* qui affectent la colonne vertébrale. Même dans le cas d'une étude basée sur une morphologie supposée non pathologique, elles ne peuvent être négligées, ne serait-ce que comme critère éliminatif de constitution de l'échantillon. Les problèmes de nomenclature et les étiologies des ces maladies, l'usage du terme « dégénératif » (LAGIER 1992), ne sont donc pas discutés et une seule nomenclature sera considérée (RESNICK et NIWAYAMA, 1988 a, b, c, d, e)

La diminution de l'imprégnation en eau du disque - 85 % en moyenne à l'état sain (LAZENNEC, 1995) - entraîne des processus de chondrose voire d'ostéochondrose intervertébrale, avec dégénération de la structure du revêtement cartilagineux (calcification, résorption puis microfractures) voire, de celle de l'os sous-chondral. La fragilisation du plateau peut conduire à l'inclusion de matériel discal dans le corps vertébral par herniation. La présence de ces « nodules de Schmorl » est observable sur l'os sec (ORTNER et PUTSCHAR, 1985). Il y a diminution de la hauteur intervertébrale. Ces modifications dégénératives peuvent être présentes à partir de la troisième ou quatrième décennie (SCHMORL et JUNGHANNS, 1971 ; RESNICK, 1988; RESNICK et NIWAYAMA, 1988b). La présence de hernie intraspongieuse est par ailleurs très fréquemment associée à la cunéiformisation des corps vertébraux dans la cyphose de Scheuermann (DIMEGLIO *et al.*, 1987 ; SCOLES *et al.*, 1991).

Un autre phénomène lié à la dégénérescence discale, et plus particulièrement à la fragilisation des fibres de Sharpey responsables de son ancrage aux plateaux vertébraux, est le développement de Spondylose *deformans*. Le disque est déplacé en direction préférentiellement antérieure et antéro-latérale. Les contraintes mécaniques qu'il transmet au ligament commun antérieur (*Ligamentum longitudinale anterius*) contribuent à la formation d'ostéophytes. Il n'y a pas de diminution de la hauteur intervertébrale (RESNICK, 1988; RESNICK et NIWAYAMA, 1988c).

La calcification dystrophique du *nucleus pulposus*, de l'*annulus fibrosus* ou des plateaux cartilagineux, par dépôts de cristaux d'hydroxyapatite de calcium généralement, peut recouvrir des étiologies diverses (GERSTER, 1992). Elle est aussi liée à l'âge et entraîne douleurs et réduction de la mobilité (RESNICK, 1988).

Les processus dégénératifs peuvent conduire au niveau de toutes les articulations synoviales au développement de lésions arthrosiques (VEYS *et al.*, 1985 ; DAYER, 1985 ; MAROUDAS, 1985). Il y a destruction progressive du cartilage articulaire pouvant conduire à une mise à nu de l'os sous-chondral, avec des phénomènes concomitants (DUNCAN *et al.*, 1985) ou subséquents de destruction osseuse voire de polissage articulaire. L'espace inter-articulaire diminue, la contention capsulaire est réduite mais l'articulation peut finalement s'ankyloser totalement par le développement d'ostéophytes (BAULNY et SENEGAS, 1992). L'installation de ces processus dégénératifs peut être la conséquence d'une hypersollicitation mécanique de l'articulation (MAZIERES et ARLET, 1987 ; HUSSON *et al.*, 1987), ce qui ne contredit pas l'existence de facteur génétique dans leur déterminisme (MAIER et WILHELMI, 1985). Les lésions peuvent être localisées à tous les étages vertébraux (BERAUD et LAMOTTE, 1987). Au niveau cervical, les processus unciformes (*processus uncinatus*) peuvent être affectés d'une manière particulière par la dégénération arthrosique qui y est accélérée lorsque la diminution de turgescence du disque met en contact physique les processus unciformes des plateaux vertébraux adjacents. L'arthrose est présente de manière presque constante au niveau des processus articulaires postérieurs à partir de 60 ans (RESNICK et NIWAYAMA, 1988b ; LOYAU et MACRO, 1992). La dégénérescence discale, par l'instabilité issue de la diminution de hauteur du disque intervertébral est souvent une des causes de manifestations arthrosiques postérieures. Les deux localisations dégénératives sont fréquemment asymptomatiques et leur diagnostic clinique est le plus souvent radiologique. Dans le cas du disque, par exemple, dans une population d'individus âgés de 50 à 59 ans, 90 % des sujets présentent des signes radiologiques de dégénérescence. Mais seulement 47 % d'entre eux présentent des manifestations douloureuses (HULT, 1954).

La maladie de Forestier ou *Diffuse Idiopathic Skeletal Hyperostosis* (DISH) ou encore hyperostose vertébrale ankylosante (FORESTIER et ROTES-SQUEROL, 1950; VIGNON *et al.*, 1962 ;

MORLOCK, 1992; RESNICK et NIWAYAMA, 1988d) est une diathèse du sujet âgé conduisant à des ossifications plurifocales des enthèses (RESNICK, 1988). La colonne vertébrale est le principal site affecté avec une ossification du ligament commun antérieur, le critère diagnostique reposant sur la présence de ponts osseux entre trois ou quatre corps vertébraux contigus.

Enfin, il faut citer les spondylarthropathies séronégatives et l'arthrite rhumatoïde qui, avec des modalités distinctes, conduisent aussi à des destructions articulaires et à des lésions de type arthrosique (RESNICK et NIWAYAMA, 1988a ; THALGOTT *et al.*, 1995).

Toutes ces manifestations pathologiques sont finalement susceptibles de modifier la statique et la dynamique rachidienne. Les causes non exclusives peuvent en être la diminution de hauteur de l'espace intervertébral, les dommages causés aux surfaces articulaires, ou encore des phénomènes d'ankylose totale ou partielle. Cette dernière peut être produite par une synostose de l'articulation dans phases les évoluées de certaines pathologies, ou simplement par une limitation de mouvement imposée à l'articulation par le développement des ostéophytes.

L'ossification des ligaments postérieurs (RESNICK, 1988b ; RESNICK et NIWAYAMA, 1988b ; MATSUNAGA *et al.*, 1996) est une altération fréquente des structures vertébrales. La prolifération osseuse au niveau de l'insertion du ligament jaune, en particulier, est extrêmement fréquente et débute à partir de l'âge de 20 ans. Elle est parfois associée à une hyperostose diffuse. Elle est nettement observable sous forme de spicules osseux (« *spurs* ») plus ou moins développés au niveau des zones d'insertion du *Ligamentum flavum*: en direction craniale, sur le bord supérieur des lames vertébrales, depuis le bord médial du processus articulaire jusqu'au plan médian ; en direction caudale, sur la face antérieure des lames vertébrales à environ la moitié de leur hauteur (PATURET, 1951 ; DELMAS, 1970). Elle ne présente généralement pas de manifestations cliniques, ce qui en association avec sa condition pratiquement morphologique (PATURET la décrivait en ce sens parmi les caractères généraux des vertèbres thoraciques) laisse présumer une faible influence sur la mécanique rachidienne. Etant donnée la fréquence des ossifications du ligament jaune, il semble tout au moins raisonnable d'envisager leur présence comme une condition normale de fonctionnement de la colonne vertébrale. Lorsque le tri est fait des manifestations dégénératives qui entraînent une destruction articulaire et auxquelles elles peuvent être associées, ces enthésopathies peuvent être négligées dans la sélection de colonnes vertébrales sans autres signes pathologiques apparent.

3.2.3. Critères de sélection de l'échantillon

L'ensemble des pathologies liées à l'âge et affectant les segments vertébraux ont donc amené à inclure préférentiellement dans l'échantillon des sujets dont l'âge n'excédait pas 60 ans. Un autre critère de choix fut l'absence de signes pathologiques macroscopiques.

Les colonnes vertébrales dont au moins un segment présentait des signes de modification de la forme du corps vertébral selon un axe vertical ont été éliminées, qu'il s'agisse d'écrasement ou de cunéiformisation antérieure ou postérieure, de même lorsqu'un corps vertébral présentait des signes de déformation scoliotique (OSMAN *et al.*, 1992; ORTNER et PUTSCHAR, 1985, CRUBEZY, 1988).

Une recherche antérieure avait amené à développer et à appliquer une série de critères ostéologiques de cotation au niveau des localisations vertébrales de manifestations dégénératives. Sur 70 colonnes vertébrales issues des fouilles du cimetière de la Paroisse S^t Etienne à Toulouse, plus de 30 000 codages furent réalisés (données non publiées). Ces observations avaient porté sur la présence, la localisation et le degré d'affection mis en évidence pour plusieurs caractères: nodules de Schmorl, lésions arthrosiques au niveau des plateaux vertébraux et des articulations postérieures, costo-vertébrales et costo-transversaires ; et ostéophytes au niveau des insertions du ligament vertébral commun antérieur (diagnostic éventuel d'hyperostose diffuse), vertébral commun

postérieur, surépineux, interépineux, et ligament jaune. L'expérience ainsi acquise a permis l'application des critères de codage à la collection de la *Christ Church* avec une bonne sûreté. Elle a aussi conduit à modifier les critères utilisées (CRUBEZY, 1988) en en précisant certains au vu des différentes morphologies rencontrées. Ceci est particulièrement vrai pour les signes de dégénérescence du disque intervertébral. Dans ce cas, l'observation ne s'est pas limitée au constat d'enfoncements du plateau vertébral avec hernie intraspongieuse – nodule de Schmorl (ORTNER et PUTSCHAR, 1985). D'autres traces de lésions ont été considérées qui mettent en évidence un mouvement d'une partie du matériel discal correspondant le plus souvent à une expulsion en direction postérieure ou postéro-latérale. Une dépression plus ou moins centrale est alors associée avec un ou plusieurs sillons creusant la surface du plateau et pouvant introduire une discontinuité dans le contour du listel vertébral (RESNICK et NIWAYAMA, 1988c). De petits nodules de contour irrégulier ont aussi été observés au centre d'une dépression plus ou moins accusée sur le plateau. Ils correspondent à des inclusions de matériel discal calcifié ou ossifié dans la surface du plateau vertébral (RESNICK et NIWAYAMA, 1988c).

Arthrose -

0. absence de lésion.
1. porosité vasculaire (« *pitting* ») ou léger évasement de la surface articulaire avec effacement de son contour, ou présence d'ostéophytes de moins de 2 mm.
2. Ostéophytes de 2 à 5 mm, et/ou géodes de destruction de l'os sous-chondral.
3. Ostéophytes de plus de 5 mm, avec ou sans géodes et/ou polissage articulaire.

Enthésopathies -

0. Absence de lésion
1. Aspect remodelé de l'insertion sans présence d'exostoses nettes, ou bien petites exostoses de moins de 1 mm sensibles au toucher (particulièrement sur la face antérieure des lames vertébrales au niveau de l'insertion du ligament jaune).
2. Exostoses bien définies de moins de 2 mm.
3. Exostoses exubérantes d'aspect dense et souvent multiple de plus de 2 mm.

Dégénérescence discale et nodules de Schmorl -

0. Absence d'enfoncement du plateau.
1. Léger enfoncement ou dépression sur la surface du plateau sans atteinte à la continuité de sa surface.
2. Enfoncement marqué provoquant une discontinuité sur la surface du plateau, avec rebords nets parfois saillants, et laissant parfois apparaître l'os spongieux sous-jacent; ou bien dépression se prolongeant sur la surface du plateau vertébral par une (ou plusieurs) gouttière nettement observable (le plus souvent en direction postérieure); ou encore enfoncement du plateau avec présence de calcifications. Ces trois morphologies sont significatives d'une dégénération de la structure du disque avec herniation dans le plateau vertébral, expulsion ou calcification ou ossification de matériel discal (Cf. supra).

En dépit des constitutions différentes des articulaires postérieurs et de l'articulation discale qui impliquent des évolutions dégénératives distinctes (RESNICK et NIWAYAMA, 1988c), les mêmes critères ont pu être utilisés pour l'élimination des colonnes présentant des signes de dégénération arthrosique au niveau de ces localisations. Les colonnes vertébrales dont au moins un segment présentait des lésions correspondant au stade 2 ont été éliminées. La faible reproductibilité des observations différentielles entre absence de lésion et stade 1 (CASAS, 1997) ont amené en effet à

accepter ce dernier. D'une part, il est parfois difficile de différencier la porosité consécutive à une destruction vasculaire de l'os sous-chondral d'une porosité liée aux conditions taphonomiques et correspondant à une destruction *post-mortem* de la surface articulaire, particulièrement au niveau des plateaux vertébraux. D'autre part, il a déjà été fait mention de la grande fréquence d'ostéophytose au niveau rachidien, se développant dès la maturité vertébrale, et constituant pratiquement la norme chez *Homo sapiens* (EDELSON *et al.*, 1988).

Les colonnes vertébrales dont certains segments présentaient des signes de dégénérescence discale de type 2 ont été exclues de l'échantillon. Il est apparu difficile de juger du caractère pathologique de dépressions qui n'affectaient pas la continuité du plateau vertébral. Au niveau des segments thoraciques bas et lombaire, le plateau présente souvent une dépression très légère d'un diamètre de l'ordre du centimètre et dont la profondeur est de l'ordre du millimètre. Sa surface y apparaît plus dense. Paturet différencie sur les plateaux vertébraux lombaires deux parties dans la « zones criblée ». Il différencie une zone « centrale ovale, [...] légèrement surélevée, [...] blanchâtre [...] correspondant au *nucleus pulposus* » (PATURET, 1951). La morphologie observée correspond à cette description, si ce n'est qu'il s'agit d'une zone très légèrement déprimée et non surélevée.

Indépendamment des ostéophytes d'arthrose, les ossifications du ligament commun antérieur ont été les seules ossifications ou calcifications qui furent prises en compte. Elles sont un des critères diagnostiques de l'hyperostose diffuse (RESNICK et NIWAYAMA, 1988d), mais surtout, elles peuvent être la conséquence du stress physique exercé par la pression du disque intervertébral lorsqu'il est poussé en direction antérieure et comprimé contre la face postérieure du ligament - « *traction spurs* » (RESNICK et NIWAYAMA, 1988c). Ces ostéophytes peuvent donc être le signe d'une dégénérescence discale et par conséquent celui d'une altération de la mécanique rachidienne.

Au niveau des articulaires postérieurs il existe sur l'os une continuité entre la zone d'insertion de la membrane synoviale et celle du ligament jaune, du bord médial du processus articulaire au bord supérieur de la lame (PATURET, 1951; RESNICK et NIWAYAMA, 1988b). Les ostéophytes d'arthrose correspondant à une ossification de la membrane synoviale (RESNICK et NIWAYAMA, 1988c, 1988e) sont cependant différenciables des ossifications du *ligamentum flavum* car les premiers sont accompagnés d'un remodelage (RESNICK et NIWAYAMA, 1988c) conduisant à un effacement du contour de la surface articulaire (*Cf. supra* critères de cotation). Le rejet des colonnes vertébrales dont certains segments présentent des ossifications du ligament jaune aurait conduit à réduire pratiquement à zéro l'effectif de l'échantillon. La grande fréquence de représentation et l'absence de signification clinique de ces ossifications (RESNICK et NIWAYAMA, 1988b) justifie qu'elles ne constituent pas un critère d'exclusion.

Toutes les formes d'ankylose évidente entre segments ont été des critères indiscutables d'élimination, qu'il s'agisse de ponts osseux continus, quelle qu'en soit l'étiologie présumée, ou d'ostéophytes formant des ponts discontinus comme dans le cas de l'hyperostose diffuse (FORESTIER et ROTES-SQUEROL, 1950 ; RESNICK et NIWAYAMA, 1988d).

3.3. Composition de l'échantillon

3.3.1. Cas de l'individu n°173

La réduction de l'échantillon entraînée par l'application de critères de sélection rigoureux quant à l'absence de pathologies dégénératives a amené à inclure deux colonnes vertébrales particulières.

La colonne correspondant au sujet n° 173 présente une spondylolyse bilatérale complète au niveau des isthmes de L5. Ce sujet est de sexe masculin et est décédé dans sa 41^{ème} année. Il avait exercé successivement les professions de « labourer », c'est-à-dire: « *One who performs physical labour as a service or for a livelihood ; spec. one who does work requiring chiefly bodily strength (often differentiated as agricultural, dock, mason's l., etc.)*. » (LITTLE *et al.*, 1933) ; « weaver », tisserand ; puis « undertaker », employé des pompes funèbres (REEVE et ADAMS, 1993).

La spondylolyse est typique, affectant la *pars interarticularis*. Par sa morphologie et par les données historiques dont on dispose pour ce sujet, elle peut être interprétée avec une grande certitude comme une fracture de stress (MERBS, 1989a ; 1995, 1996 ; ARRIAZA, 1997). L'arc vertébral transmet au niveau lombaire une fraction importante des contraintes imposées à la colonne (PAL et ROTAL, 1987). D'une part, et particulièrement au niveau des dernières vertèbres lombaires, des forces de tension sont imposées à l'isthme, puisque le blocage assuré par la partie médiale des processus articulaires empêche le glissement des vertèbres en direction antérieure (PUTZ, 1985 ; MÜLLER-GERBL, 1992 ; PUTZ et MÜLLER-GERBL, 1996). D'autre part, les contraintes verticales liées au poids du corps sont en partie transmises directement par les processus articulaires inférieurs qui viennent buter sur les lames de la vertèbres sous-jacente (ADAMS et HUTTON, 1980, 1983 ; YANG et KING, 1984). Par conséquent, les stress susceptibles de provoquer une rupture de l'isthme vertébral ne sont pas nécessairement liés à une hyperflexion lombaire (GREEN *et al.*, 1994 ; REVEL *et al.*, 1987 ; ARRIAZA, 1997) et sont plutôt à mettre en relation avec des mouvements d'hyperextension (TAILLAN *et al.*, 1987 ; MERAT, 1987). Les composantes correspondant aux contraintes mécaniques provoquant la lyse isthmique sont donc différentes de celles susceptibles de provoquer des fractures d'écrasement du corps vertébral (WILLEN *et al.*, 1984 ; PANJABI *et al.*, 1994). La présence de spondylolyse n'est donc pas nécessairement associée à une modification de la morphologie du corps vertébral dans le plan sagittal. Sans impliquer systématiquement un olisthesis (MERBS, 1996), puisque les systèmes ligamentaire, musculaire, et les capsules articulaires, assument une grande part de la stabilité rachidienne (HEYLINGS, 1978 ; PUTZ, 1985, 1992 ; NEUMANN *et al.*, 1993 ; ASPDEN *et al.*², 1987 ; SCHENDEL *et al.*, 1993 ; SHIRAZI-ADL et PARNIANPOUR, 1993 ; RALPHS et BENJAMIN³, 1994 ; TUAN, 1995 ; JIANG *et al.*, 1995), la spondylolyse augmente la probabilité d'un glissement relatif du corps vertébral. « Dans une population normale, la lyse isthmique s'observe entre 4.2 et 5.6 % des sujets examinés, préférentiellement chez l'homme jeune, avant 20 ans. Dans le lot de ces lyses, 9 sur 10 seront stables et n'évolueront jamais vers un glissement » (TAILLAN *et al.*, 1987, citant DIMEGLIO et HERISSON, 1985).

Cependant, si l'hypothèse d'un olisthesis est conservée, l'instabilité entraînée, en modifiant la répartition dans la transmission des contraintes, est *a priori* susceptible d'affecter la forme du corps vertébral dans le plan sagittal. La fraction du plateau qui reste située sous la vertèbre sus-jacente sera en effet soumise à des efforts plus importants en compression, au contraire de la portion située par l'olisthesis en avant de la colonne des corps vertébraux. Il apparaît donc nécessaire de vérifier que la spondylolyse n'a pas entraîné une modification de l'angulation du corps vertébral de L5.

L'angulation des plateaux du dernier segment lombaire est de 8.6° dans le sens de la lordose pour l'individu n° 173 de *Spitalfields*⁴. STAGNARA et collaborateurs rapportent les angulations

² Par diffraction de rayons X, ASPDEN et coll. (1987) observent une orientation préférentielle des fibres de collagène - non élastiques (HEYLINGS, 1978) - du ligament interépineux, parallèlement au processus épineux. Les auteurs relèvent une fonction d'ancrage du fascia thoracolombaire avec lequel le ligament intertransversaire est en continuité. Ceci suggère aussi une orientation équivalente des contraintes mécaniques qui sont prises en charge par ce ligament.

³ Pour une revue de la structure et de la composition de la capsule articulaire en relation avec ses fonctions, d'un point de vue général. Les localisations choisies ne sont pas rachidiennes.

⁴ Se reporter au chapitre méthodologie pour le détail du calcul de l'angle entre plateaux.

mesurées à partir de clichés radiographiques de profil pour 100 individus sains⁵ (STAGNARA, 1985). La valeur moyenne déterminée pour L5 dans cet échantillon est de 8°. En L4, l'angulation des plateaux pour le sujet n° 173 est de 0.6° en lordose, tandis qu'elle est en moyenne de 1° dans l'échantillon de STAGNARA. Le calcul du taux d'éloignement bilatéral pour les valeurs du n° 173 par rapport à cet échantillon (en faisant l'hypothèse de la normalité de la distribution⁶) donne 9.4 % pour L5 et 8.6 % pour L4. Autrement dit, les deux valeurs sont comprises à l'intérieur des 10 % de variabilité de la population autour de la moyenne: 90 % des angulations de la population sont plus fortes que celles déterminées pour le sujet n° 173.

La séparation de l'arc neural de L5 du corps vertébral n'a donc pas affecté la morphologie de celui-ci dans le plan sagittal. Le rapport des surfaces articulaires supérieures étant par ailleurs préservé, l'inclusion du sujet n° 173 dans l'échantillon est justifiée.

3.3.2. Cas de l'individu n°254

L'individu n° 254 est un homme décédé à l'âge de 34 ans dont la colonne vertébrale présente une anomalie transitionnelle. Elle est composée de seulement 23 vertèbres libres, dont 11 possèdent des surfaces articulaires pour l'articulation des côtes. La vertèbre la plus craniale appartenant au sacrum ne lui est pas totalement synostosée. L'interligne entre son corps vertébral et celui de la vertèbre sous-jacente est conservé sur les faces antérieure et postérieure, laissant un espace d'environ 4 mm et 2 mm respectivement. L'absence de formation ostéophytique et la localisation de la synostose au niveau des bords latéraux du plateau permet d'éliminer l'hypothèse d'une fusion pathologique (LANIER, 1954). Il existe au niveau de cet interligne une discontinuité de la courbure antérieur du sacrum. Les processus articulaires inférieurs sont totalement différenciés, de même que les surfaces articulaires supérieures du segment sous-jacent, sans aucune marque de remaniement osseux. Les surfaces des deux segments sont contiguës et non synostosées, un espace de moins de 1 mm d'épaisseur étant préservé entre elles et visible sur toute la circonférence. Le processus épineux de la première vertèbre du sacrum est par ailleurs bien développé, mesurant depuis son extrémité distale jusqu'au bord supérieur de la lame: 26 mm. L'extrémité distale du sacrum n'étant pas conservée, il n'est pas possible de déterminer le nombre de segments qui le composent. Au niveau thoracique, la dernière vertèbre portant des surfaces articulaires pour l'articulation des côtes a la morphologie d'une T12 typique (PATURET, 1951, DELMAS, 1970). La surface articulaire costo-vertébrale est complète, située sur la face latérale du corps sous le niveau du plateau, et en arrière sur la base du pédicule. Les surfaces articulaires postérieures sont planes, orientées pratiquement dans un plan frontal, tandis que les surfaces articulaires inférieures sont convexes, orientées dans un plan presque parasagittal.

Il existe une forte variabilité de la différenciation cranio-caudale des segments vertébraux chez les Primates et particulièrement chez *Homo sapiens* (SCHULTZ, 1961 ; KEITH, 1923b). Elle affecte les caractères morphologiques typiques du segment, c'est-à-dire ceux du mode statistique habituellement utilisés comme référence anatomique (PATURET, 1951 ; DELMAS, 1970 ; GRAY, 1977). Cette variabilité dans le décompte des segments de chaque étage a été amplement décrite (LE DOUBLE, 1912; ROSENBERG, 1920 cité par MARTIN et SALLER, 1959 ; FICK, 1933, 1936; FISCHER,

⁵ Pour plus de détail sur les données de Stagnara et leur valeur comparative pour le présent travail, se reporter à la discussion.

⁶ Le taux d'éloignement est la probabilité donnée par le T de Student du rapport: $|m - x| / \sqrt{(s^2 \cdot (1+1/n))}$. Une justification de l'hypothèse de normalité dans le cas de cet échantillon de valeurs angulaires est donnée dans le cadre de la discussion.

1933 ; LANIER, 1954 ; DE BEER KAUFMAN, 1974, 1977 ; ABITBOL, 1987b). Elle est plus élevée caudalement (LE DOUBLE, 1912 ; SCHULTZ, 1961). Elle s'observe avec précision au niveau des zones de transition où le changement de morphologie, bien défini, autorise une observation objective (GEPNER *et al.*, 1994). Ainsi, la variabilité qui existe dans la transition entre la morphologie des surfaces articulaires postérieures à l'étage thoracique (planes, dans un plan proche du plan frontal) et celle de l'étage lombaire (portion de cylindre orientée dans un plan proche du plan para-sagittal) apparaît extrêmement élevée. Sur un échantillon de 32 colonnes, SHINOHARA note 6 schémas de transition différents. Dans 7 cas, (22 %), les surfaces articulaires supérieures de T12 sont concaves avec une orientation dorso-médiale (SHINOHARA, 1997), morphologie qui est typiquement décrite comme acquise seulement à partir du segment L1 (DELMAS, 1970). ABITBOL (1987b) décompte par ailleurs, dans un échantillon de 157 sujets (*Homo sapiens*), 3 colonnes (2 %) dont l'étage thoracique n'est constitué que de 11 segments, et SCHULTZ (1961) détermine une fréquence de 5 % sur 125 individus (*Homo sapiens*). Un sacrum constituées de 6 segments est observé par ces deux auteurs avec des fréquences, respectivement, de 11 % ($n = 157$) et de 24 % ($n = 116$).

La colonne vertébrale de l'individu n° 254 ne peut donc être considérée comme pathologique, mais comme une variation anatomique normale. Elle montre un déplacement en direction craniale de la « variabilité au niveau inter-segmentaire » (LANIER, 1954). L'anatomie comparée indique clairement la constitution du sacrum à 5 segments synostosés à partir d'une forme plésiomorphe à 3 segments, par assimilation des 25^{ème} et 26^{ème} segments⁷ (SCHULTZ, 1961 ; ABITBOL, 1987a). Cette tendance évolutive assez générale dans l'ordre des Primates a de plus une valeur fonctionnelle chez *Homo sapiens*. Elle permet essentiellement d'augmenter la surface d'insertion des muscles extenseurs de la cuisse, une meilleure stabilité de l'articulation sacro-iliaque, et une plus grande résistance de la colonne lombaire (KEITH, 1923b ; ABITBOL, 1987a). L'inclusion, dans l'échantillon, de la variation rencontrée sur la colonne 254 correspond à une représentation de 5 %. Cette fréquence est faible en regard de celles rencontrées dans d'autres échantillons pour les variations correspondant à un déplacement homologue, de la valeur d'un segment et en direction craniale. L'incorporation de ce sujet est donc justifiée, et même souhaitable, dans le cadre d'une étude de variabilité et dans une perspective évolutive. Elle fournit en définitive une meilleure description de la variabilité *non-pathologique* de la colonne vertébrale chez *Homo sapiens*.

La discontinuité qui apparaît sur la face antérieure du sacrum entre ses deux premiers segments définit une angulation⁸ de 154 °. Une valeur moyenne de 140° est donnée pour l'angle formé entre le corps vertébral de L5 et celui de S1 par KAPANDJI (1982). La variabilité de l'angulation lombo-sacrée est très forte (SCHULTZ, 1961). A partir de clichés radiographiques sur un échantillon féminin de 142 sujets, la variabilité de l'angle entre les faces antérieures de L5 et S1 est quantifiée par un écart type de 14.4°, pour une moyenne de 125.7° (BUKOVIC *et al.*, 1993). Cela suppose un intervalle de tolérance de $\pm 28^\circ$ pour 95 % de la variabilité! L'angle formé entre les deux premiers segments du sacrum de l'individu n° 254 de Spitalfields est donc largement compris dans la variabilité de l'angulation lombo-sacrée ainsi définie. Ces deux segments sont les 24^{ème} et 25^{ème} segments de la colonne vertébrale. Ils sont donc homologues de L5 et S1 (ABITBOL, 1987b). Les angulations des plateaux vertébraux de l'individu n° 254 peuvent être comparées, en employant ce critère d'homologie, aux angles mesurés sur un échantillon radiographique de 100 individus (STAGNARA,

⁷ Numérotation des segments à partir de C1 (ABITBOL, 1987a).

⁸ Mesure effectuée sur le contour sagittal de la face antérieure du sacrum relevé au conformateur (tiges de $\varnothing = 1$ mm). L'angle est défini entre les faces antérieurs des 1^{er} et 2^{ème} segments du sacrum.

1985). Le taux d'éloignement calculé est de 1.5 % pour le 24^{ème} segment (L5), et est inférieur à 38 % pour les segments 21 à 23 (L2 à L4).

Le déplacement en direction craniale de la différenciation des étages n'a donc pas affecté la forme des corps vertébraux dans le plan sagittal. Le premier segment qui est partiellement incorporé au sacrum du sujet n° 254, et qui est le 24^{ème} segment vertébral, peut donc être traité comme une vertèbre L5 dont il est homologue.

3.3.3. Echantillon retenu et quantité d'information

L'échantillon qui a finalement été retenu l'a été avant tout sur la base des critères d'absence de pathologie rachidienne précédemment définis. Il est constitué de **24 sujets**, 14 masculins et 10 féminins. Cet ensemble représente, selon la méthodologie définie, plus de **15 000 mesures**. Sur la base d'une conservation totale des 22 éléments vertébraux de C3 à L5 inclus, le chiffre exact de la totalité des segments mesurés est de 15 840, et de 660 par colonne vertébrale. A ce chiffre, il faut retrancher les mesures qui n'ont pu être prise pour des raison d'absence de conservation totale ou partielle de certains segments; et ajouter les mesures supplémentaires effectuées pour la déduction de l'espace intervertébral S1-L5, quand la conservation du sacrum le permettait.

L'argument parfois employé de la redondance d'information entraînée par la multiplication des mesures, et donc de la possible réduction de leur nombre grâce aux corrélations qui peuvent être établies entre elles, n'est pas applicable ici. Tout d'abord, la grande quantité de mensurations nécessaires pour la colonne vertébrale est avant tout le résultat de la multiplication par le nombre d'éléments indépendants et homologues dont elle est composée (22 segments vertébraux étudiés dans le cas présent). Par ailleurs, une description exacte de la morphologie nécessitera la définition de formes unitaires, constituées des segments contigus joignant entre eux un maximum de trois points, c'est-à-dire la formation d'un système de mesures triangulaire⁹ (KRUKOFF, 1978). La démarche visant à réduire le nombre de données en n'utilisant que quelques mesures non corrélées entre elles n'aurait donc pas de sens dans ce cas. D'un point de vue général, elle échoue aussi pour une autre raison quand il s'agit de décrire de manière fine la variabilité. La sélection de quelques mesures indépendantes permet certes une description grossière de l'échantillon et sa comparaison avec d'autres groupes. C'est d'ailleurs cette méthodologie qui est suivie de manière quantitative, *a posteriori*, dans l'analyse en composantes principales. Mais si l'objectif est de réduire pour des raisons pratiques le nombre de mesures, cette réduction doit alors s'effectuer *a priori*, et sur la base de corrélations mises en évidence dans d'autres échantillons. La variation inter-groupes de ces corrélations est donc négligée. Le risque est par conséquent d'ignorer une éventuelle différence entre ces corrélations au sein de l'échantillon étudié, par rapport à celles calculées au sein des échantillons de référence, auquel cas un biais serait introduit dans la description de la variabilité.

⁹ Il existe cependant des méthodologies différentes applicables pour d'autres problématiques, comme l'analyse de Fourier de contours fermés, qui permettent aussi de considérer la totalité de l'information relative à la forme (O'HIGGINS et JOHNSON, 1986, 1987, 1997; JOHNSON et O'HIGGINS, 1988, 1989, 1990, 1992; BOOKSTEIN et CHERNOFF, 1985; BOOKSTEIN, 1947, 1986; ROHLF, 1990).

	<i>n</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>Etendue</i>			<i>Quartiles</i>			
				<i>min</i>	<i>Max</i>	<i>D</i>	<i>inf</i>	<i>médiane</i>	<i>sup</i>	<i>D</i>
Ensemble										
<i>Décès</i>	24	1809.8	22.1	1775.0	1849.0	74.0	1789.5	1810.5	1827.0	37.5
<i>Age</i>	24	42.9	13.2	25.0	77.0	52.0	33.0	39.5	53.0	20.0
<i>Naissance</i>	24	1767.0	24.5	1727.0	1799.0	72.0	1742.0	1778.0	1786.5	44.5
Sujets masculin										
<i>Décès</i>	14	1802.4	21.5	1775.0	1837.0	62.0	1788.0	1792.0	1826.0	38.0
<i>Age</i>	14	43.1	10.4	25.0	63.0	38.0	34.0	42.0	51.0	17.0
<i>Naissance</i>	14	1759.4	23.5	1727.0	1792.0	65.0	1738.0	1755.0	1783.0	45.0
Sujets féminin										
<i>Décès</i>	10	1820.2	19.3	1781.0	1849.0	68.0	1809.0	1826.0	1829.0	20.0
<i>Age</i>	10	42.6	17.1	27.0	77.0	50.0	29.0	35.0	56.0	27.0
<i>Naissance</i>	10	1777.6	22.9	1730.0	1799.0	69.0	1769.0	1784.0	1792.0	23.0

Tableau 3

Collection de la *Christ Church, Spitalfields*. Statistiques descriptives de l'échantillon étudié, pour l'année de décès, l'âge au décès et l'année de naissance. *n*, effectif; *m*, moyenne; *s*, écart-type estimé de la population; *min*, minimum; *max*, maximum; *D*, différence; *inf*, quartile 25 %; *médiane*, 50 %; *sup*, 75 %; *D*, différence entre le 1^{er} quartile et le 3^{ème}.

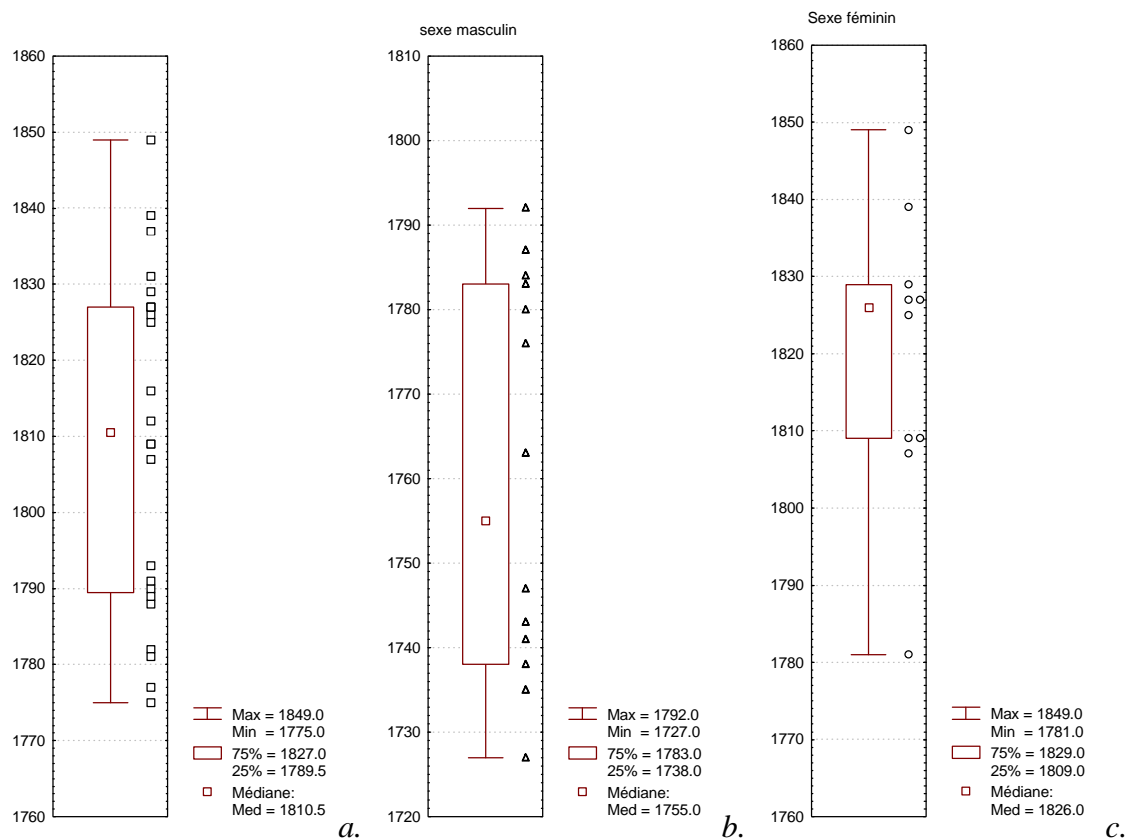


Figure 22

Collection de la *Christ Church, Spitalfields*. Distribution de l'échantillon étudié quant à l'année de décès. **a.**, ensemble des sujets; **b.**, sujets masculins; **c.**, sujets féminins. Etendue et quartiles. Les dates de décès sont réparties entre le dernier tiers du XVIII^{ème} siècle et la première moitié du XIX^{ème}.

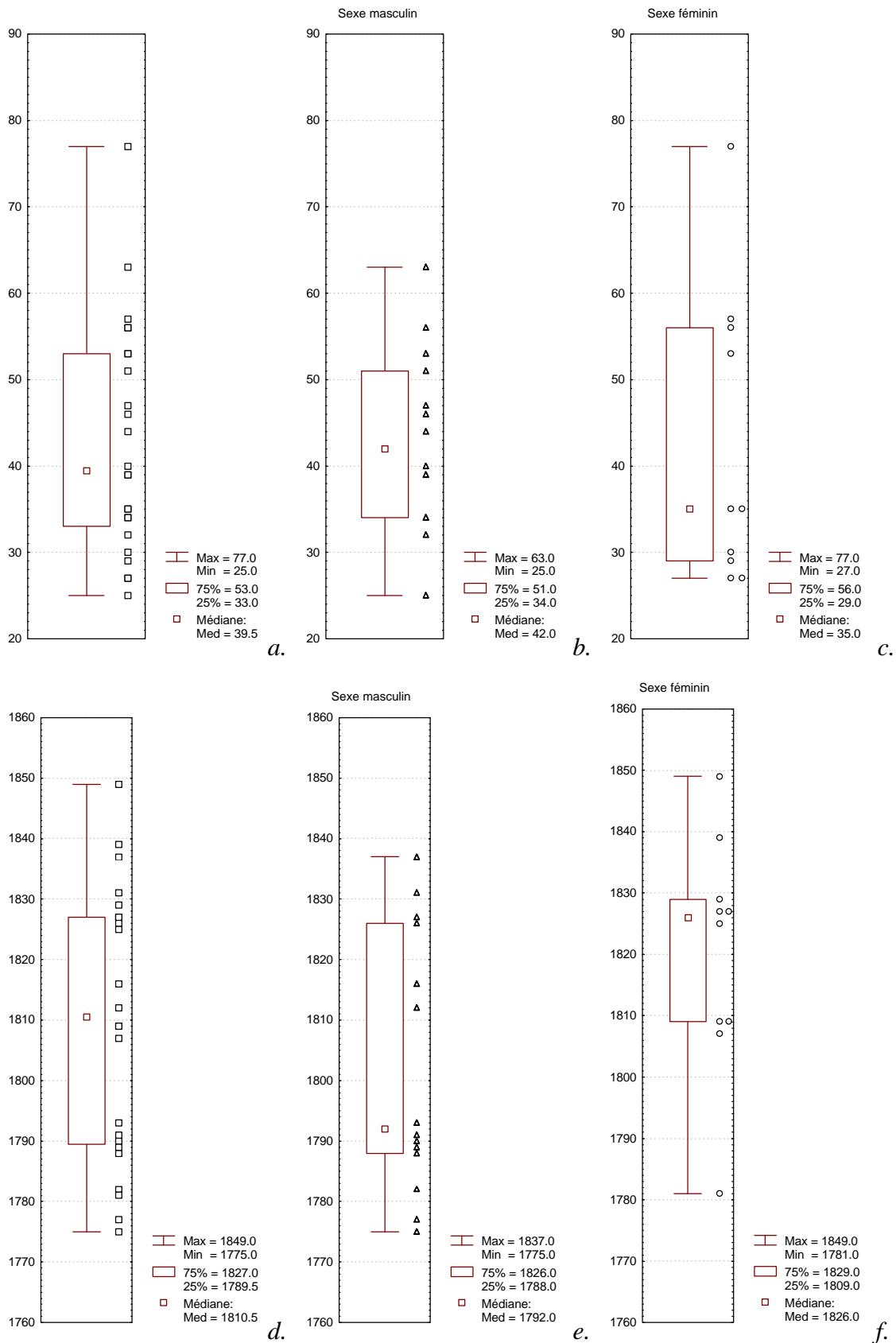


Figure 23

Collection de la *Christ Church, Spitalfields*. Distribution de l'échantillon étudié quant à l'âge au décès: **a.**, ensemble des sujets; **b.**, sujets masculins; **c.**, sujets féminins; et quant à l'année de naissance: **c.**, ensemble des sujets; **d.**, sujets masculins; **e.**, sujets féminins. Etendue et quartiles. Les âges au décès sont compris entre 25 et 77 ans, et entre 25 et 57 ans pour tous les sujets sauf un. Les années de naissance appartiennent toutes aux trois derniers quarts du XVIII^{ème} siècle.

Les 15 000 mensurations correspondent à un volume d'information comparable à celui qui est traité dans la plupart des travaux portant sur la morphologie de la colonne vertébrale. JANKAUSKAS, en utilisant 3 mesures simples qui peuvent être prises rapidement, a permis d'élever à plus de 19 000 le nombre de mesures, à partir de plus de 6 000 vertèbres (JANKAUSKAS, 1994). Cependant, cette somme de données n'outrepasse pas 6 500 dans les autres travaux de référence qui sont rencontrés. Ainsi, les trois publications de Panjabi et collaborateurs sur les trois étages vertébraux ne rassemblent en tout que 5 760 données pour 12 sujets (PANJABI *et al.*, 1991a, 1991b, 1992). Celle de SCOLES et coll., 4 800 données pour 50 sujets (SCOLES *et al.*, 1988); celle de Berry, 6 480 données correspondant à 30 sujets (BERRY *et al.*, 1987). LATIMER et WARD, sur 4 échantillons de 10 à 30 sujets chacun, recueillent au total 8 349 données numériques (LATIMER et WARD, 1993). Ces quelques exemples illustrent la limitation pratique imposée à toute étude morphologique de la colonne vertébrale, et due au simple fait que la quantité d'information jugée suffisante pour la description souhaitée doit être multipliée par le nombre de segments étudiés. Un compromis doit donc être choisi. Il peut s'agir d'une description morphométrique basée sur des mesures simples et permettant une description grossière - au sens de « *Gross Anatomy* » - mais autorisant, en contrepartie, une vue assez large de la variabilité puisqu'un échantillon d'effectif élevé peut être constitué. Une description plus fine implique une multiplication du nombre de mesures et l'augmentation de leur précision, avec des points précisément définis, mais aussi une réduction conséquente de l'échantillonnage. Une troisième voie consiste à ne traiter qu'une partie de la colonne, en ne s'intéressant le plus souvent qu'à un seul étage vertébral.

L'estimation de la participation des segments vertébraux dans la détermination des courbures sagittales serait incomplète si seulement un ou deux étages vertébraux devaient être considérés, alors même que les conformations des trois courbures apparaissent intimement liées (LEGAYE *et al.*, 1993). Les discussions portant sur la forme générale des courbures à partir de celle des segments se sont le plus souvent limitées à la forme du corps vertébral que 5 mesures suffisent à définir dans le plan sagittal. Si l'on souhaite considérer le rôle de l'articulation entre segments, la définition précise de l'orientation des surfaces articulaires relativement au corps vertébral nécessite d'augmenter la quantité d'information recueillie pour chaque sujet. Cette augmentation est géométrique puisque les mesures devront être répétées pour chaque vertèbre. La précision doit aussi être accrue afin de ne pas augmenter l'erreur relative dans la mensuration de structures de format plus faible. C'est cette option d'une description fine de la variabilité qui a été choisie ici.

3.3.4. Statistiques descriptives de l'échantillon

L'échantillon montre, selon les informations conservées, une bonne homogénéité. Les âges de décès s'étalent sur 74 ans, de 1775 à 1849 (tableau 3 et figure 22), les dates de naissance des sujets étant comprises entre les années 1727 et 1799, soit une étendue de 72 ans (figure 23). Si l'on excepte le cas d'un sujet féminin de 77 ans dont la colonne vertébrale n'a pas montré *a posteriori* des courbures significativement différentes de celles du reste de l'échantillon, les âges au décès sont régulièrement répartis entre 25 et 63 ans.

Des informations relatives à l'activité exercée par les individus au cours de leur vie ont été conservées (REEVE et ADAMS, 1993). Parmi les sujets de sexe masculin, 4 exerçaient au moment de leur décès la profession de *master weaver* (n° 207, 254, 671, 714). Cette activité impliquait une longue période de formation de 6 à 12 années, dès l'âge de 14 ans, et durant laquelle l'apprenti exerçait comme ouvrier le métier de tisserand. Celui-ci impliquait une sollicitation mécanique fréquente du tronc, particulièrement dans le mouvement répétitif de flexion-extension requis par la manipulation du peigne sur le métier. Cependant, à *Spitalfields*, aucune relation claire n'a pu être

mise en évidence entre cette catégorie d'activité et la fréquence d'indicateurs de stress mécanique de localisation rachidienne (CASAS, 1997). Un sujet a exercé des activités essentiellement physiques: *labourer*, *weaver* puis *undertaker* (n° 173), mais il a été montré précédemment que, du point de vue de la détermination des courbures sagittales, cela n'avait très probablement pas eu de répercussions sur la morphologie vertébrale. L'activité de *victualler* du sujet n° 519 implique une très probable sollicitation du tronc avec des efforts importants, mais il est difficile d'apprécier sans autres données individuelles sa fréquence et sa magnitude. C'est aussi le cas, et certainement dans une moindre mesure, des deux *cheesemongers* (n°s 185 et 495). Les professions de trois autres sujets n'impliquent pas en soi un travail particulier de la colonne: *cordwainer*, *publican* et « *victualler gentleman* » (n°s 542, 556 et 749). Enfin, dans trois cas, l'activité reste inconnue, un de ces individus étant fils de *master weaver* (n°s 613, 661 et 720).

Parmi les femmes, un seul sujet est répertoriée comme ayant exercé une activité professionnelle *stricto sensu*: la profession de joaillier (*goldsmith*), laquelle n'est pas censée avoir d'implications particulières pour la colonne vertébrale (n° 309). Les autres sujets sont répertoriés comme *housekeeper*, ou « femmes au foyer ». Les sollicitations physiques qui sont impliquées seront donc dépendantes de la catégorie sociale qui est parfois appréciable grâce à la profession du mari. Ainsi, deux sujets sont de classes sociales plutôt aisées: l'une est l'épouse du consul des îles Canaries (n° 872), l'autre femme de *master weaver* (n° 667). Quatre sujets sont de classes probablement peu aisées (fille de tisserand, soeur de charpentier, femme de cordonnier, et femme de saleur; respectivement: 142, 205, 301, 498). Pour trois autres femmes au foyer, il n'y a pas d'information supplémentaire disponible (70, 438, 459).

3.4. Les Néandertaliens

La méthodologie sera appliquée a plusieurs segments vertébraux appartenant à des restes squelettiques identifiés comme néandertaliens. Ils correspondent à 5 individus. Il s'agit des néandertaliens européens de La Chappelle-aux-Saints, La Ferrassie 1, Regourdou, et des néandertaliens proche-orientaux de Shanidar 2 et Kebara II.

3.4.1. La Chapelle-aux-Saints

En dépit de la description ancienne de ce fossile (BOULE, 1911-1913), il est apparu nécessaire de reprendre l'inventaire détaillé des restes vertébraux avec leur état de conservation.

A. *Atlas et axis*

Atlas: 3 fragments en tout: 2 fragments correspondent aux deux masses latérales droite et gauche avec les surfaces articulaires supérieure et inférieure conservées, ainsi que la partie proximale des deux racines des processus transverses. 1 fragment correspond au processus transverse droit avec la partie distale de ses deux racines.

Axis: fragment comprenant le corps vertébral, l'os cortical n'étant pas conservé sur la face antérieure, dont le tissu spongieux est donc apparent; les deux surfaces articulaires supérieures parfaitement conservées, la base du processus odontoïde et le foramen vertébral droit.

B. Série vertébrale continue cervico-thoracique

En dessous de C2, Marcelin Boule avait identifié la série cervico-thoracique C5, C6, C7, T1, T2 et T3 (BOULE, 1911-1913), les segments C3 et C4 étant supposés ne pas être conservés. Cette identification fut maintenue sans être discutée et a été utilisée jusque très récemment (ARAMBOURG, 1955 ; STRAUSS et CAVE, 1957 ; STEWART, 1962 ; TRINKAUS, 1983, 1985 ; DAWSON et TRINKAUS 1997). Les six vertèbres s'articulent en effet parfaitement entre elles dans cet ordre et celui-ci n'est pas problématique. L'identification de leur rang dans la série vertébrale est cependant discutable.

La pénultième vertèbre de ce groupe conserve sur la face droite du corps vertébral une surface articulaire costo-vertébrale complète localisée au niveau du pédicule. Cette morphologie ne peut correspondre à une facette costo-vertébrale supérieure de T2 qui présente la forme type des vertèbres thoraciques pour l'articulation de la côte, avec une facette semi-circulaire située à la jonction entre la face latérale du corps vertébral et le plateau (PATURET, 1951 ; DELMAS, 1970 ; GRAY, 1977 ; KAHLE *et al.*, 1980 ; McMINN *et al.*, 1993). Elle est en revanche caractéristique du segment T1.

L'état de conservation des segments ne permet pas de discuter avec assez de précision de la présence ou non de traces de une ou deux racines pour le processus transverse, c'est-à-dire l'absence ou la présence d'un foramen transversaire, autre caractère qui serait décisif pour localiser la fin de l'étage cervical. Cependant, l'articulation costo-vertébrale n'est pas le seul caractère qui appuie l'assignation de l'antépénultième et de la pénultième vertèbres de la série aux segments C7 et T1.

Les surfaces articulaires supérieures de l'antépénultième vertèbre sont « appliquée[s] à la fois sur la face postérieure de l'apophyse [du processus] transverse et sur la lame adjacente » (PATURET, 1951). Cette morphologie est décrite par Paturet comme caractéristique de C7. Leur relation avec les lames est aussi typiquement cervicale, la facette étant séparée de la face postérieure de la lame par « une étroite gouttière » (*ibid.*).

Les processus transversaires de l'avant dernière vertèbre, supposée T1, sont « implantés par une base épaisse et solide à l'union du pédicule et des deux tiers supérieurs du bord *externe* de la lame vertébrale » (*ibid.*). Au niveau de cette union, le plan de la surface articulaire supérieure forme un angle d'environ 100° avec la face supérieure du processus transverse au niveau de son insertion sur la face postérieure de la lame. En C7, en revanche, la facette articulaire supérieure se situe pratiquement dans le même plan que la lame et la face postérieure du processus articulaire inférieur. La racine postérieure du processus transverse gauche en C7 (le processus droit n'est pas conservé) est aussi située *en avant* du processus articulaire supérieur, et est implantée à l'union du pédicule et du processus articulaire, disposition typiquement cervicale (PATURET, 1951 ; DELMAS, 1970 ; GRAY, 1977 ; FERNER et STAUBESAND, 1983).

En C7, les surfaces articulaires inférieures sont orientées obliquement, de haut en bas et d'avant en arrière tandis qu'elles sont beaucoup plus verticales en T1. En effet, sur cette vertèbre, les surfaces articulaires se situent dans le même plan que la face antérieure de la lame qui les supporte presque complètement et directement, sans qu'il existe un processus bien défini. Cette configuration est typiquement thoracique (PATURET, 1951), et s'oppose à celle rencontrée en C7. Il ne fait donc aucun doute que « *The vertebra called "T1" by BOULE is, in actuality, C7* » (HOLLIDAY, comm. pers.).

La séquence conservée est donc **C4.C5.C6.C7.T1.T2**.

Les atteintes dégénératives dans cette série de vertèbres ont été étudiées en détail (TRINKAUS, 1985 ; DAWSON et TRINKAUS, 1997). Elles devront être prises en compte dans l'interprétation des courbures.

En T2, le bord antérieur du plateau inférieur a été reconstitué avec un matériau plastique, mais le plateau s'étend très antérieurement au niveau du plan sagittal. Il est donc possible de considérer avec une bonne précision la forme du corps vertébral à ce niveau. En tous les cas, la méthodologie est telle que le calcul de l'angulation entre les plateaux vertébraux n'est pas affectée puisque les segments mesurés sont contigus. En revanche, les limites inférieures des surfaces articulaires inférieures de cette vertèbre ne sont pas conservées. Les segments définis entre le plateau et ces surfaces ne sont donc pas mesurables.

C. *Autres restes thoraciques*

L'assignation du numéro de segment aux fragments vertébraux de l'étage thoracique nécessite que leur description soit faite dans le sens caudo-cranial.

T12: Est conservé l'arc vertébral dont il manque le processus épineux, les processus transverses et le processus articulaire supérieur gauche. Chaque pédicule conserve un fragment du corps vertébral auquel il était attaché, de l'ordre du cm à gauche et du demi cm à droite. Les surfaces articulaires inférieures s'articulent parfaitement avec celles supérieures de L1, et sont concaves avec une orientation antéro-latérale. Les surfaces articulaires supérieures sont planes et orientées frontalement. En l'absence de toute donnée pouvant indiquer une anomalie transitionnelle, l'attribution du fragment à T12 est donc la plus probable.

La distance qui sépare les bords médiaux des deux surfaces articulaires supérieures est de 16.6 mm.

T9 ou T10: Fragment d'arc conservant les quatre surfaces articulaires postérieures. L'extrémité distale du processus épineux n'est pas conservée. Le pédicule est brisé à proximité des processus articulaires postérieurs. La distance qui sépare les bords médiaux des deux surfaces articulaires inférieures est de 15.0 mm. Cette vertèbre n'a donc pas de contiguïté articulaire avec T12. Etant donné la différence qui existe entre la mesure d'écartement des processus de cette vertèbre et celle en T12, la variabilité de cet écartement dans les populations actuelles (LATIMER et WARD, 1993), et le fort remaniement des articulations (TRINKAUS, 1985), ce reste peut être identifié aussi bien comme T9 que comme T10.

T8 ou T9: Vertèbre presque complète. Manquent: la partie supérieure de la surface articulaire supérieure droite, la moitié inférieure de la surface articulaire inférieure gauche, et un fragment du plateau inférieur à gauche. Le contour du plateau supérieur est déjà réniforme et régulier: il ne présente pas l'asymétrie provoquée par le passage de l'aorte descendante ou « empreinte aortique » (PATURET, 1951 ; DELMAS, 1970). Celle-ci existe caudalement jusque T6 ou T7, mais parfois jusque T9 (TESTUT et LATARJET, 1932). La surface articulaire inférieure droite est fortement remaniée, avec ostéophytose marginale, et est criblée de microgéodes. Son aspect est identique à celui de la surface articulaire supérieure droite et, sa forme lui étant complémentaire, elle s'articule très précisément avec elle. Ce segment est donc bien celui qui est immédiatement supérieur à «T9 ou T10». L'aspect réniforme du plateau et l'absence d'empreinte aortique permettent de lui assigner avec une plus grande probabilité le segment T9 (donc le segment T10 au fragment précédent), mais sans qu'il soit possible d'identifier exactement son rang.

T7 ou T8: Conservation: moitié gauche du corps vertébral (la face antérieure est endommagée) et arc vertébral pratiquement complet. Les extrémités distales des processus transversaires et épineux ne sont pas conservées. Le contour du plateau inférieur est conservé pratiquement jusqu'au niveau du plan sagittal, et ne permet pas de supposer la présence de l'empreinte aortique. Cette vertèbre s'articule parfaitement au dessus de la précédente. Les surfaces articulaires gauches s'ajustent exactement entre elles et la droite présente un polissage articulaire correspondant à celui qui existe sur la portion proximale conservée de la surface supérieure de «T8 ou T9». L'écartement des surfaces est le même et lorsque les vertèbres sont mises en contiguïté, les corps vertébraux se correspondent précisément. Il s'agit donc d'une T7 ou T8, ce dernier rang étant plus probable.

Corps et arc vertébral T4, T5 ou T6: Un corps et un arc vertébral de vertèbre(s) thoracique(s) sans connexion anatomique visible. Les deux fragments ont été attribués au même segment en reconstituant des pédicules avec un matériau plastique.

Il manque un fragment du corps en position antérieure gauche (environ 5^{ème} de la surface). Ce corps n'est pas adjacent à celui de T2, il est donc d'un rang plus caudal que T3. Le plateau inférieur est par ailleurs de plus grandes dimensions que celui supérieur de «T7 ou T8». Ce corps appartient donc au segment T4, T5 ou T6.

Sur l'arc vertébral, il manque les pédicules, la totalité des processus articulaires supérieurs, et les processus épineux. L'écartement des surfaces articulaires inférieures est plus faibles que celui des surfaces articulaires supérieures de «T7 ou T8». Il semble aussi trop faible, par rapport à celui déterminé en T2, pour que ce fragment soit attribué à T3. Comme pour le corps vertébral, ce fragment peut donc être assigné aux rangs T4, T5 ou T6.

Arc et fragment de corps vertébral T5, T6 ou T7: Arc vertébral. La totalité du processus épineux est manquante. Au pédicule gauche est attaché un fragment du corps vertébral, avec environ 5^{ème} (postérieur gauche) de la surface du plateau inférieur et du tissu spongieux jusqu'à la hauteur du bord supérieur du pédicule. La surface articulaire inférieure droite, et la moitié (environ) distale de la gauche ne sont pas conservées. Les surfaces articulaires supérieures s'articulent bien avec les surfaces inférieures de «T4, T5 ou T6». Les vertèbres sont donc très probablement adjacentes. L'état de préservation des surfaces articulaires inférieures et du corps ne permettent pas de discuter avec assez de précision de la possible articulation avec la vertèbre «T7 ou T8». Ce fragment pourrait donc appartenir à T5, T6 ou T7.

Fragment de lames de vertèbre thoracique: Les 2 surface articulaires inférieures sont incomplètement conservées. Les rangs possibles ne peuvent être déduits que par élimination, et la taille du fragment ne permet pas d'affiner l'identification: T3, T6 ou T7.

D. Vertèbres lombaires

L1: La vertèbre est presque entièrement conservée. Manquent les deux processus costiformes, l'extrémité distale du processus épineux, le bord inféro-latéral de la surface articulaire supérieure droite, et le bord inféro-médial de la surface articulaire inférieure gauche. Le plateau inférieur a été en grande partie grossièrement reconstitué avec un matériau plastique. Il n'est pas mesurable avec une approximation suffisante.

L2: L'arc est rompu au niveau de la *pars interarticularis*. Le bord antérieur du plateau supérieur est reconstitué, sans que la limite de l'os conservé puisse être appréciée précisément. Cependant, une grande part de la face antérieure du corps est préservée. Le point de mesure antéro-supérieur peut donc être apprécié précisément. En tous les cas, le calcul de l'angulation entre les

plateaux n'est pas affecté. La largeur maximale du plateau inférieur est de 52 mm. Celle du plateau supérieur de L4 est de 57 mm. Cette vertèbre ne peut donc être L3 et est donc bien une L2.

L4: Les processus costiformes et l'extrémité distale du processus épineux manquent. La partie antérieure du corps vertébral est reconstituée sur environ **4** de la surface au niveau du plateau supérieur, et **5^{ème}** au niveau du plateau inférieur. Les mesures impliquant les points antéro-supérieur et antéro-inférieur du corps sont donc approchées. Le calcul de l'angulation entre les plateaux est une bonne approximation. L'articulation avec L5 est bonne.

L5: Il manque environ **5^{ème}** du plateau inférieur en position antérieure droite, avec une portion de tissu spongieux correspondant, sur environ la moitié de la hauteur. Le point antéro-inférieur doit donc être estimé. Cette estimation a été faite par le calcul, à partir de la mesure des segments suivants *dans le plan sagittal*:

- point postéro-supérieur — point antéro-supérieur
- point postéro-supérieur — limite supérieure du fragment manquant
- point postéro-supérieur — limite inférieure du fragment manquant
- hauteur postérieure
- point antéro-supérieur — limite supérieure du fragment manquant
- limite supérieure du fragment manquant — limite inférieure du fragment manquant
- limite inférieure du fragment manquant — point postéro-inférieur

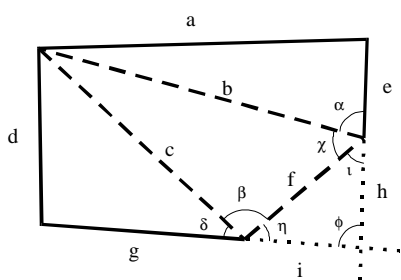


Figure 24

Principe de déduction du point antéro-inférieur sur le corps vertébral L5 de La Chapelle-aux-Saints. - - -, limite de la cassure ; ····, limites du fragment manquant. Les angles α , γ , β et δ sont déduits à partir des côtés des triangles où ils sont compris selon la formule (exemple pour le premier triangle): $\cos \alpha = (e^2 + b^2 - a^2) / 2be$. Les angles ϵ et η sont déduits à partir des deux angles supplémentaires dont les valeurs viennent d'être calculées. L'angle ϕ est supplémentaire de $\epsilon + \eta$. Enfin, h est calculé selon la formule: $h = f \cdot \sin(\eta) / \sin(\epsilon + \eta)$. Pour i , la formule équivalente est utilisée. Sont donc déduits ϵ , η , ϕ , h et i .

E. Affections dégénératives

L'interprétation des courbures sagittales impliquées par la morphologie osseuse nécessite que soient pris en considération les remaniements pathologiques de la morphologie des segments. Afin de conserver une information objective et détaillée du degré d'affectation des éléments vertébraux, les critères de codage précédemment définis (Cf. § critères de sélection de l'échantillon) ont été appliqués. Ont été cotées la présence d'enfoncement du plateau vertébral (nodule de Schmorl); les remodelages arthrosiques sur le plateau au niveau antérieur, gauche, droit et postérieur, ainsi que sur les surfaces articulaires; la présence d'ostéophytes d'enthésopathies du ligament jaune sur les lames et, pour le ligament commun postérieur, sur les processus épineux (Tableau 4 a.). L'ossification du ligament commun antérieur n'a pas été cotée. Elle est évidente par exemple en C4 au niveau de la marge antérieure du plateau inférieur. Les ostéophytes, de plus de 2 mm, ont leur

origine sur la face antérieure du corps vertébral et le contour du plateau reste distinct. Sa morphologie n'est donc pas affectée directement.

F. Calculs possibles

Au vu de leur état de conservation et de l'identification révisée de leur rang dans la colonne vertébrale, les restes vertébraux permettent les calculs suivants:

- Empilement des corps vertébraux de T2 à C4.
- Empilement des corps vertébraux de L4 et L5.
- Empilement alterné des espaces intervertébraux et des corps vertébraux de T2 à C4, depuis le corps vertébral de T2 jusqu'au corps vertébral de C4.
- Angulation des plateaux de «T8 ou T9».
- L'espace intervertébral T9 peut être calculé et superposé au corps vertébral.

3.4.2. La Ferrassie 1

Les restes vertébraux du squelette de La Ferrassie 1 ont été étudiés de manière détaillée du point de vue de leur morphologie et leur état de conservation a été explicité (HEIM, 1976).

Les pièces ne seront donc décrites ici que du point de vue des mesures qui peuvent en être prises dans le cadre de la méthodologie.

A. Conservation

C3: Le pédicule gauche est reconstitué avec un matériau plastique. Il n'y a pas de contact osseux de ce côté entre le corps vertébral et l'arc. A droite, un faible contact existe. En dépit d'une bonne préservation de C2 du côté inférieur, l'espace intervertébral C3 ne peut pas être déduit avec une précision suffisante.

C4: Le pédicule gauche n'est pas conservé et a été reconstitué, sans qu'il existe de point de contact sûr entre les extrémités. Le pédicule droit est lui aussi reconstitué mais il existe une continuité de contact osseux entre les fragments. L'arc est rompu au niveau de la racine du processus épineux. La jonction entre lame gauche, lame droite et processus épineux a été elle aussi reconstituée. Les surfaces articulaires inférieures sont remaniées, avec une ostéophytose marginale. Elles présentent un aspect comparable à celui des surfaces articulaires supérieures de C5 avec lesquelles elles s'articulent précisément de chaque côté de façon séparée, mais l'articulation des deux côtés simultanément n'est pas correcte, vraisemblablement à cause de l'estimation de la longueur du pédicule gauche lors de la reconstitution. Seules les mesures du côté droit peuvent donc être considérées.

La partie antérieure du corps vertébral est endommagée mais le listel est conservé pratiquement jusqu'au niveau de plan sagittal. La mesure de la longueur antéro-postérieure du plateau supérieur est cependant estimable avec une bonne précision. La diagonale postéro-supérieur—antéro-inférieur permet de s'affranchir du point antéro-supérieur du corps qui n'est pas conservé.

Les mesures des segments joignant ce point à la surface articulaire droite sont donc approximatives, et par conséquent aussi l'espace intervertébral C4.

Étage	N.	Arthrose				Enthésop.			Ét.	N.	Arthrose				Enthés.							
		Corps				SA	l. jaune				l.c.		Corps				SA	l. jaune		l.c.	l.i.	
		a	g	d	p	g	d	g			d	p.	a	g	d	p	g	d	g	d	p.	-é.
C4 s	0	2	3	3	2	3	3	0	0	2	C1 s	-	0	-	-	-	0	0	-	-	-	-
C4 i	0	3	3	3	2	2	3	0	0	-	C1 i	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-
C5 s	0	1	2	3	0	1	3	0	0	1	C2 s	-	-	-	-	0	-	0	-	0	2	-
C5 i	0	3	3	3	1	1	1	0	0	-	C2 i	-	-	0	-	1	3	2	0	0	0	2
C6 s	3	1	2	2	0	1	1	0	0	1	C3 s	-	1	0	-	0	3	3	1	1	1	0
C6 i	2	0	1	1	0	0	1	0	0	-	C3 i	-	-	1	1	1	1	1	0	0	-	-
C7 s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	C4 s	-	-	-	0	2	2	2	0	0	0	0
C7 i	0	0	0	0	0	3	3	1	1	-	C4 i	-	-	1	1	0	2	2	0	0	-	0
T1 s	0	-	-	-	0	3	3	0	0	0	C5 s	-	-	-	0	2	2	2	0	0	0	0
T1 i	2	-	-	1	2	2	1	0	0	-	C5 i	-	0	0	1	0	3	2	0	0	-	0
T2 s	0	2	2	0	0	1	0	0	0	0	C6 s	-	-	-	-	1	0	0	-	0	0	0
T2 i	0	-	-	0	-	-	-	0	0	-	C6 i	-	-	-	0	0	3	0	0	-	0	0
T4, T5 ou T6 s	1	-	-	-	0	-	-	-	-	0	C7 s	-	-	-	-	1	1	0	0	-	0	0
T4, T5 ou T6 i	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	C7 i	-	-	-	-	1	1	1	1	-	0	0
T5, T6 ou T7 s	-	-	-	-	-	1	-	0	0	-	T1 s	-	-	-	-	1	2	0	0	-	0	0
T5, T6 ou T7 i	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-	T1 i	-	0	-	-	0	1	1	1	1	-	2
T7 ou T8 s	1	-	-	-	-	3	3	0	2	-	T2 s	-	-	-	0	1	1	0	0	0	0	0
T7 ou T8 i	1	-	0	-	-	-	3	0	0	-	T2 i	-	-	0	0	0	-	0	0	-	3	0
T8 ou T9 s	2	0	0	-	0	2	3	0	1	0	T3 s	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0
T8 ou T9 i	1	-	-	-	1	-	3	1	1	-	T3 i	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
T9 ou T10 s	-	-	-	-	-	3	3	1	2	-	T4 s	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	-
T9 ou T10 i	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-	T4 i	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
T12 s	-	-	-	-	-	-	-	0	1	-	L2 i	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-
T12 i	-	-	-	-	-	1	2	0	0	-	L3 s	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
L1 s	-	-	-	-	-	0	-	0	0	0	L3 i	-	-	-	-	2	-	0	0	-	-	-
L1 i	-	-	-	-	-	0	2	0	0	-	L4 s	-	-	-	-	1	2	0	0	-	-	-
L2 s	-	-	-	-	1	-	1	-	-	2	L4 i	-	-	-	-	3	2	0	0	-	-	-
L2 i	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	L5 s	-	-	-	-	3	-	0	0	-	-	-
L4 s	0	-	-	-	0	0	0	0	0	2	L5 i	-	-	-	-	3	2	0	0	-	-	-
L4 i	0	-	-	-	0	0	-	0	0	-												
L5 s	0	-	-	-	0	2	2	0	0	0												
L5 i	0	-	-	-	-	1	-	0	0	-												

a.

b.

Tableau 4

Lésions dégénératives sur les segments vertébraux de La Chapelle-aux-Saints (a.) et La Ferrassie 1 (b.), cotées selon les critères précédemment définis. Les moitiés supérieure et inférieure de chaque segment sont considérées. Successivement: N., hernie discale ou nodules de schmorl; arthrose sur le corps vertébral de localisation antérieure, gauche, droite et postérieure, et sur les surfaces articulaires postérieures, à droite et à gauche; enthésopathies du ligament jaune, du ligament commun postérieur, et du ligament interépineux (La Ferrassie 1 seulement). Le tiret signifie que la cotation n'est pas possible par défaut de conservation totale ou partielle de la pièce.

C5: Pédicule droit reconstitué apparemment sans contact osseux. Pédicule gauche fragmentaire mais avec contiguïté des fragments. Les mesures de ce côté sont bonnes.

C6: La vertèbre est déformée. Le pédicule droit est reconstitué. Le pédicule gauche est fragmenté mais il y a contact des fragments. L'articulation avec C5 est approximative, et par conséquent aussi l'espace intervertébral qui est estimé.

C7: Arc vertébral et fragment de corps. Les pédicules ne sont pas conservés.

T1: L'arc vertébral est bien préservé. Il manque toute la partie antéro-supérieure du corps vertébral.

T2: Il manque la face antérieure du corps. A gauche, l'isthme est fragmentaire et la lame est dans une orientation trop interne. La déduction de l'espace intervertébral T2 (entre T2 et T1) n'est pas possible.

B. Affections dégénératives

Les affections dégénératives des segments (tableau 4 *b.*) ont été cotées suivant les critères définis précédemment (*Cf.* § critères de sélection de l'échantillon).

C. Calculs possibles

- Empilement des corps vertébraux de C6 à C3.
- Empilement du corps vertébral de C4, de son espace intervertébral (approché), du corps vertébral de C3 et de son espace intervertébral (approché).
- Empilement du corps vertébral de C6, de son espace intervertébral (approché), et du corps vertébral de C5.
- Empilement de T2 et de son espace intervertébral.

3.4.3. Le Régourdou

Les restes post-craniens du squelette du Régourdou en Dordogne (PIVETEAU, 1959) ont été partiellement décrits par les travaux de J. Piveteau publiés dans les *Annales de Paléontologie*, série dont la publication est restée malheureusement inachevée (PIVETEAU, 1963-1965). Tandis qu'une description morphométrique récente des restes post-craniens de la ceinture scapulaire et du membre supérieur a été éditée (VANDERMEERSCH et TRINKAUS, 1995), c'est la publication de J. Piveteau qui continue de faire référence pour l'étude du squelette rachidien. Une chance relative a voulu en effet que la presque totalité des segments vertébraux conservés aient été décrits avant que l'édition n'en soit interrompue.

A. Conservation

Vertèbres cervicale et thoracique:

Les vertèbres C2 à C6 sont conservées.

C3 est pratiquement complète, seul manque le processus transverse gauche qui est rompu au niveau du foramen transversaire.

En C4, les segments définis depuis le corps vertébral jusqu'aux surfaces articulaires à gauche (supérieure et inférieure) ne peuvent pas être prises. Il manque par ailleurs le processus transverse gauche et la racine antérieure du droit, mais le tubercule antérieur droit est présent. La lame droite est rompue au niveau de la base du processus épineux.

Sur C5, seules les mesures du corps vertébral peuvent être prises avec assez de précision. Il manque les deux tubercules antérieur et postérieur gauches du processus transverse, et le tubercule antérieur droit.

Sur C6, il manque le processus épineux, le tubercule antérieur gauche, et le processus transverse droit. Toutes les mesures peuvent être définies.

La vertèbre T1 n'a pas conservé l'extrémité distale de son processus épineux ni ses processus transverses. Toutes les mesures peuvent être définies.

Vertèbre thoracique basse:

Un fragment assez complet de vertèbre thoracique « se place vers la fin de la série » (*ibid.*), selon J. Piveteau qui suggère la possibilité d'une T10. Il s'agit d'un corps vertébral pratiquement intact, la surface du plateau supérieur étant endommagée du côté gauche en position interne au listel, et contre le bord postérieur. De l'arc sont conservés les deux pédicules et les processus articulaires supérieurs, ainsi que la partie proximale de la lame et du processus transverse gauche.

La face droite du corps vertébral montre une surface articulaire costo-vertébrale en continuité avec le bord du plateau, mais de grandes dimensions ($\varnothing \approx 9$ mm), et en position très postérieure: elle repose à la fois sur la face droite du corps et sur celle du pédicule. Sur la face gauche du corps, la surface costo-vertébrale a un contour fermé, en ce sens qu'elle ne présente pas de continuité avec le rebord du plateau vertébral. Sa position est donc basse, à 1 ou 2 mm sous le rebord du plateau supérieur. Elle est de grandes dimensions ($\varnothing_{\text{antéro-postérieur}} \approx 14$ mm ; $\varnothing_{\text{vertical}} \approx 6$ mm) et située très postérieurement, plus de la moitié de sa surface étant sur le pédicule. Il n'existe pas de surface costo-vertébrale inférieure à gauche ni à droite.

La base du processus transverse montre que celui-ci est dirigée très postérieurement, dans une orientation qui correspond à celle du pédicule. A partir du plan de la surface articulaire postérieure, environ 9 mm de ce processus sont conservés sur la face latérale, et 7 mm sur la face supéro-médiale. Sur cette longueur, la face latérale du processus transverse ne présente aucune modification de son orientation qui est toujours dans le même plan que le pédicule. Cette situation du processus transverse dans le prolongement du pédicule conduit à une morphologie particulière en vue postérieure: la face supéro-médiale du processus transverse est située sous la moitié latérale de la surface articulaire supérieure et forme avec elle un angle d'environ 100° . Elle constitue donc une sorte de rebord sur lequel peut buter le processus articulaire correspondant de la vertèbre sus-jacente.

Cette ensemble de dispositions morphologiques, et particulièrement celle des surfaces articulaires costo-vertébrales (en l'absence de donnée pouvant indiquer la présence d'une anomalie transitionnelle), permettent d'identifier avec une très grande sécurité ce segment à **T12**. La très forte réduction du processus transverse qui existe à ce niveau est seule susceptible d'expliquer l'absence d'angulation dans le prolongement de la face latérale du pédicule. Ce sont les tubercules mamillaires et accessoire, non conservés, qui prennent naissance postérieurement de la base du processus transverse (TESTUT et LATARJET, 1932 ; PATURET, 1951 ; DELMAS, 1970 ; WHITE et FOLKENS, 1991 ; et McMINN *et al.*, 1993).

L2: Vertèbre bien conservée dont il manque, à gauche: les processus costiforme, mamillaire et accessoire, et le processus articulaire inférieur ; à droite: les processus transverse et articulaire supérieur. Le processus épineux est rompu en biseau, au ras de la lame du côté de son bord inférieur, et à 16 mm du bord supérieur de la lame. La marge antérieure du plateau inférieur est endommagée.

B. Précision

La mesure de la hauteur postérieure du corps vertébral est comparable à celle du segment définissant le côté postérieur du quadrilatère représentant le corps vertébral. Elle permet donc de comparer les données présentes et celles publiées précédemment (PIVETEAU, 1963-1965). L'erreur absolue est inférieure à 0.6 mm (en C3), sa moyenne est de 0.23 mm. L'erreur relative est inférieure à 5 % (en C3), et en moyenne de 2 %.

C. *Calculs possibles*

Les calculs qui peuvent être réalisés sont donc:

- Empilement des corps vertébraux de C6 à C3 inclus
- Empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux depuis le corps vertébral de C6 jusqu'au corps vertébral de C3.
- Angulation des plateaux vertébraux de T1.
- Angulation des plateaux vertébraux de T12.
- Angulation des plateaux vertébraux de L2.

3.4.4. **Shanidar 2**

Des moulages des vertèbres cervicales de Shanidar 2 ont permis de réaliser plusieurs mesures dans la limite permise par la conservation des restes (TRINKAUS, 1983).

La définition de la hauteur dorsale du corps est comparable à celle du segment définissant le côté postérieur du quadrilatère représentant le corps vertébral dans la présente méthodologie. Elle permet donc de contrôler la précision du moulage par confrontation avec les données publiées (TRINKAUS, 1983). L'erreur absolue est faible, elle n'excède pas 0.72 mm (segment C4) et est en moyenne de 0.57 mm. L'erreur relative est inférieure à 6.4 % (segment C4), elle est en moyenne de 4.8 %.

A partir des restes préservés, il est possible de réaliser l'empilement des corps vertébraux de C6 à C3 inclus, et de déduire l'espace intervertébral de C3, qui peut donc être empilé au dessus du corps vertébral du même segment.

3.4.5. **Kébara 2**

Les restes vertébraux du squelette de Kebara 2 sont les plus complets attribués à un Néandertalien. Ils ont fait l'objet d'une étude morphologique et métrique très détaillée qui a donné lieu à une comparaison avec des échantillons d'*Homo sapiens sapiens* de morphologie moderne (ARENSBURG, 1985, 1991). Cette étude dispense de revenir ici sur la description détaillée des restes, excepté pour certains points précis qui sont susceptibles d'intervenir dans le déterminisme osseux des courbures sagittales.

A. *Pathologies*

Des troubles de l'ossification ont été mis en évidence sur le squelette axial de Kebara 2. Certains points secondaires d'ossification ne sont pas synostosés, notamment pour l'extrémité distale des processus épineux lombaires et pour les processus transversaires de L1. Un élargissement anormal des listels vertébraux, qui s'étendent vers la zone centrale du plateau vertébral, a aussi été noté (DUDAY et ARENSBURG, 1991). Une hernie intraspongieuse de stade 1 est présente en L2, sur le plateau supérieur. Il existe des signes d'atteinte dégénérative qui, à l'exception de l'articulation atlanto-odontôidienne, des articulations postérieures C2-C3 (polissage articulaire) et L5-S1, restent limitées (DUDAY et ARENSBURG, 1991). Si une forme légèrement biconcave des corps vertébraux a été notée de L2 à L5, l'ensemble de ces processus pathologiques ne semble pas susceptible d'avoir affecté la morphologie des éléments vertébraux du point de vue de leur participation à la détermination des courbures sagittales.

B. Préservation des restes

Tous les segments sont représentés, de C3 à L5, et le sacrum est aussi préservé. Quelques réserves doivent toutefois être faites du point de vue de la conservation, en relation avec la méthodologie développée.

- Rapports du corps et de l'arc:

Les pédicules vertébraux de l'étage cervical ont été reconstitués. Les rapports du corps et de l'arc sont donc susceptibles d'être altérés lorsque les parties manquantes ne permettent qu'une contiguïté partielle. C'est essentiellement le cas du segment C4 dont les deux pédicules sont très fragmentaires. Au niveau thoracique, la conservation des pédicules est suffisante pour assurer une bonne contiguïté des fragments sur au moins un côté de la vertèbre, et reconstituer avec une précision acceptable les rapports anatomiques du corps et de l'arc vertébral avec ses processus articulaires.

- Reconstitution du corps vertébral de C4:

La partie postérieure du corps vertébral de C4 est manquante. L'angulation des plateaux vertébraux peut être déduite à partir des mesures prises classiquement et appliquées ici, pour le plateau supérieur, aux extrémités de la partie conservée. Toutefois, le profil des empilements ajustés sur les faces postérieures des quadrilatères serait altéré si ce quadrilatère était introduit sans correction dans la pile. Il faut donc estimer la forme de la partie manquante du corps. Une inconnue doit nécessairement être imposée. Il a donc été choisi d'estimer l'angle postéro-inférieur du quadrilatère à partir des segments directement adjacents C3 et C5. En effet, la valeur de cet angle varie très peu entre ces deux vertèbres: elle est de 103.1° en C3 et de 100.1° en C5. On peut donc considérer la moyenne des deux valeurs, égale à 101.6° , comme une estimation très correcte de ω en C4 (figure 25 a.). Les mesures d'une diagonale sur le corps, du segment antérieur (a), du segment inférieur (i), des segments correspondant à la partie restante du plateau supérieur (t) et à la limite de la partie fracturée postérieure (q), permettent de calculer les angles des sommets du quadrilatère. Le triangle correspondant à la partie manquante est déduit aisément à partir de ces angles et de l'estimation de ω (voir la légende de la figure 25).

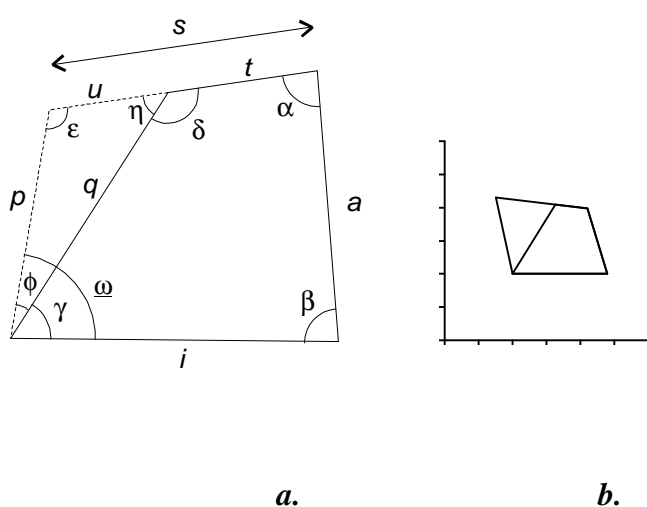


Figure 25

Estimation de la partie postérieure manquante du corps vertébral de C4 du squelette de Kebara 2. **a., schéma de principe.** - - -, fragment manquant estimé. Les angles α , β , γ et δ sont calculés selon la méthode habituelle à partir des mesures sur l'os de a , t , q , i et d'une diagonale (non représentée). L'angle ω est estimé à partir des valeurs des quadrilatères adjacents. $\phi = \omega - \gamma$, $\eta = 180^\circ - \delta$, et $\epsilon = 180^\circ - \phi - \eta$. Donc $u = q \cdot \sin \phi / \sin(\eta + \phi)$ et $p = q \cdot \sin \eta / \sin(\eta + \phi)$. **b., corps vertébral C4 de Kebara.** Même orientation: côté antérieur à droite. Une graduation = 5 mm. Le segment contenu dans le quadrilatère estimé correspond au segment de la fracture (q).

Le quadrilatère ainsi obtenu (figure 25 b.) est une bonne estimation du quadrilatère définissant le corps de C4. Sa forme est comparable aux quadrilatères de C3 et de C5, et entre parfaitement dans la variabilité qui est rencontrée dans l'échantillon de référence.

- Endommagement des corps vertébraux du côté antérieur:

En T2, la partie antéro-supérieure du corps est fracturée et repoussée en direction postérieure, mais l'angulation des plateaux est préservée.

Il existe plusieurs segments pour lesquels la partie antérieure du corps vertébral est fragmentée. La moins bonne conservation de cette zone en comparaison avec la face postérieure plus dense (HEGGENESS *et al.*, 1997) est le principal des arguments qui ont conduit à opter pour un calcul des empilements effectué en ajustant les faces postérieures des éléments. En effet, si les deux plateaux sont partiellement préservés dans le plan sagittal, l'endommagement d'une partie du corps vertébral n'altère pas le calcul de leur angulation puisque celui-ci repose sur la constitution d'un système de points suffisamment indépendant des repères morphologiques, et reposant essentiellement sur le fait que les segments mesurés doivent être contigus. Si par ailleurs la fraction non préservée est située antérieurement, l'allure de l'empilement ajusté sur les faces postérieures ne sera pas modifié puisque l'intégrité de ces dernières est préservée. Ainsi, l'endommagement partiel en position antérieure des corps vertébraux de C3, T2, T4 et T9 n'affecte pas le profil des empilements ajustés sur la face postérieure ni, par conséquent, le calcul de la régression polynomiale.

En T10, le plateau supérieur est endommagé du côté gauche. La position des points antérieur et postérieur est cependant estimée avec une bonne sécurité car la partie conservée s'étend pratiquement jusqu'au niveau de la ligne sagittale.

- Restauration du corps vertébral de T9:

En T9, l'endommagement du bord postérieur du plateau supérieur engendre un problème similaire à celui rencontré pour C4. Le segment définissant le côté postérieur du quadrilatère est trop incliné d'avant en arrière et de haut en bas: le sommet postéro-supérieur du quadrilatère définissant pour ce segment un angle de 99.8° , contre 84.5° en T8 comme en T10. Cette imprécision n'intervient pas dans le calcul des angulations réciproques, mais modifie l'allure de l'empilement ajusté sur les faces postérieures des corps vertébraux. Il est donc nécessaire de corriger l'orientation du côté postérieur du quadrilatère de T9 à partir de la valeur déterminée pour l'angulation des plateaux. La partie manquante du bord postérieur du plateau supérieur réduit à 17.2 mm la longueur du segment supérieur du quadrilatère, contre 19.6 et 23 mm en T8 et T10 respectivement. La moyenne entre ces deux valeurs, qui est de 21.3 mm, permet de corriger avec une bonne précision l'allure de l'empilement à partir des valeurs des côtés inférieur et antérieur et de l'angulation entre les plateaux vertébraux, qui ne sont pas affectées par l'état de conservation. Le quadrilatère corrigé a un côté postérieur de 17.3 mm, qui définit avec le côté supérieur une angulation de 85.5° . Cette valeur entre dans la faible variabilité qui est rencontrée au niveau thoracique inférieur: la moyenne de l'angle au sommet postéro-supérieur pour les segments T5 à T12 est $m = 85.1^\circ$ avec $s = 2.4^\circ$.

- Espace intervertébral T6:

Les surfaces articulaires supérieures de T6 ne sont pas conservées et le calcul de l'espace intervertébral T6 n'est donc pas possible. Afin que l'absence d'un seul élément n'interdise pas la possibilité de considérer le dessin d'ensemble des courbures, il a été choisi de lui substituer l'élément homologue le plus proche. L'état de conservation des restes laissant présumer une plus grande précision pour la déduction de l'espace intervertébral T7, c'est donc le quadrilatère correspondant qui a été utilisé pour remplacer celui de T6 au cours du calcul des empilements.

- Espaces intervertébraux des segments thoraciques supérieurs:

Des segments T1 à T3, l'état de conservation des vertèbres est trop mauvais pour permettre de déduire les espaces intervertébraux correspondants.

- Espaces intervertébraux de l'étage cervical:

L'espace intervertébral de C3 ne peut être calculé.

La reconstitution des pédicules fragmentaires de C3 à C7 ne permet qu'une estimation des rapports anatomiques existant entre le corps et l'arc vertébral. L'empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux de ces segments devra donc être interprété avec prudence. La courbure sagittale impliquée par la morphologie osseuse à ce niveau est une estimation.

C. Calculs possibles

Peuvent donc être calculés:

- L'empilement des corps vertébraux depuis L5 jusqu'à C3 inclus.
- L'empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux depuis l'espace intervertébral S1 jusqu'au corps vertébral de T3 inclus.
- L'empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux depuis le corps vertébral de T2 jusqu'au corps vertébral de C4 inclus. Le profil déterminé sur ces segments est une estimation.

4. Résultats:

4.1. ***Courbures rachidiennes impliquées par les corps vertébraux, dans la collection de Spitalfields:***

La représentation du corps vertébral par un quadrilatère quelconque dont quatre segments et une diagonale définissent la forme permet, grâce à la méthodologie simple qui a été développée, d'étudier la participation des seuls corps vertébraux aux courbures sagittales de la colonne. Une telle étude est motivée autant par des raisons qui ont trait à la conservation des restes que par l'intérêt propre de la question. En effet, bien que soulevée maintes fois par les anthropologues et les anatomistes, la question du rôle des corps vertébraux dans la détermination des courbures sagittales fut toujours traitée par des méthodes qui ne rendent compte que partiellement de l'implication de la morphologie osseuse, ou dont le but a plutôt été une réduction de la variabilité observable à des classes de valeurs.

L'implication réelle des corps vertébraux dans le dessin des courbures sagittales ne sera toujours qu'approchée par des études qui, appartenant au domaine de l'anthropologie du vivant ou à celui de la radiologie, ne peuvent, méthodologiquement, abstraire complètement les éléments vertébraux "osseux" de leur environnement anatomique. Par ailleurs, de nombreux travaux directement orientés vers la description de la variabilité morphologique de la vertèbre sont basés, pour des raisons pratiques, sur des *a priori* visant à simplifier l'anatomie du corps vertébral en une forme géométrique qui présente un minimum de régularité. Dans la plupart des publications du domaine de la paléanthropologie, la possibilité d'utiliser un ensemble de mesures de référence bien défini et partagé par l'ensemble des chercheurs constitue une motivation non négligeable. Les mesures utilisées sont le plus souvent celles définies par R. MARTIN (MARTIN et SALLER, 1959), qui sont insuffisantes pour définir la forme du corps vertébral dans le plan sagittal, puisque seulement quatre distances sont proposées. Celles-ci correspondent d'autre part à des segments qui n'ont aucune extrémité en commun et qu'il est impossible de conserver pour constituer un système plus élaboré, susceptible de fixer la forme du corps vertébral: mesure supplémentaire d'une diagonale ou d'un angle par exemple. Soucieux de publier des travaux qui montrent une certaine homogénéité méthodologique, les anthropologues en sont réduits pratiquement à l'utilisation de l'indice des hauteurs antérieure et postérieure comme indicateur de la forme dans le plan sagittal (COWN & KEITH, 1939 ; PIVETEAU, 1965 ; MAFART, 1980 ; VANDERMEERSCH, 1981 ; TRINKAUS, 1983 ; ARENSBURG, 1991 ; JANKAUSKAS, 1994). L'utilisation de l'indice antéro-postérieur comme un moyen d'approcher l'angle entre les plateaux supérieur et inférieur repose implicitement sur l'hypothèse que la section du corps vertébral dans le plan sagittal est assimilable à un trapèze isocèle, c'est à dire que les segments définissant les hauteurs du corps (bases du trapèze) sont parallèles. Cette hypothèse est encore implicite dans l'étude des étages thoracique et lombaire des vertèbres de Nariokotome (SCOLES *et al.*, 1991; LATIMER et WARD, 1993), bien que le calcul soit plus élaboré puisqu'il fait intervenir le diamètre sagittal d'un plateau dans le calcul de l'angle (Cf. 2.1. *Forme du corps vertébral*, p. 57).

Grâce à un morphomètre tridimensionnel, PANJABI et ses collaborateurs (PANJABI *et al.*, 1991a, 1991b, 1992) ont pu étudier sur des vertèbres issues de dissections la variabilité de nombreuses mesures parmi lesquelles l'angulation des plateaux pour les étages thoracique et cervical. La vertèbre étant fixée, le contour de chaque plateau est défini par plusieurs dizaines de points dont les coordonnées sont calculées dans un repère cartésien à trois dimensions. Par la méthode des moindres carrés, un plan est ajusté à ces points. Il est fait de même pour quatre points choisis pour matérialiser le plan frontal contenant l'axe z, et qui sont les sommets supérieurs et inférieurs droits et gauches de la face postérieure du corps. L'angle existant entre chaque plateau et ce plan peut alors être déduit. Une mesure "directe" est aussi donnée par une radiographie latérale avant

dissection. Par sommation des valeurs déterminées pour chaque segment, les auteurs estiment, pour un petit échantillon de 12 sujets, la contribution des corps vertébraux à l'angle de la cyphose thoracique: « *bony angle* » (PANJABI *et al.*, 1991b).

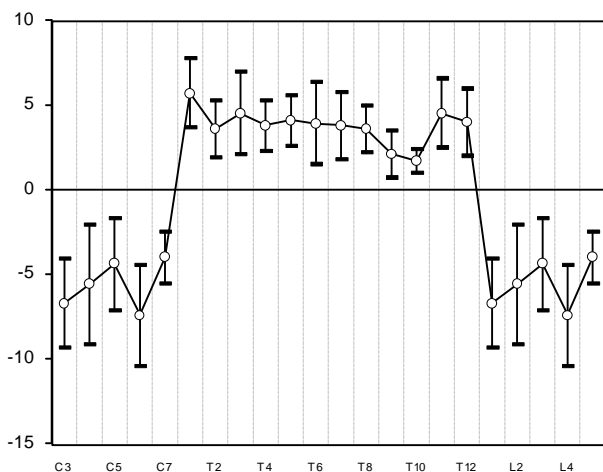


Figure 26

Angle déterminé par l'orientation des plateaux supérieur et inférieur par rapport à la face postérieure du corps vertébral, d'après les données de PANJABI (PANJABI *et al.*, 1991a, 1991b, 1992). Moyenne des angles pour chaque segment, entourée de son intervalle de confiance à 95 %. Un signe négatif a été arbitrairement affecté aux valeurs correspondant aux étages dont les segments sont supposés décrire une lordose. Les données étant insuffisantes pour déduire les paramètres statistiques spécifiques des mesures angulaires (MARDIA, 1972), les intervalles de confiance ont été calculés en utilisant le *t* de Student.

Si ce protocole ne permet pas d'accéder à des paramètres plus précis du profil osseux tels que la position du sommet de la cyphose et les rayons de courbure, l'angle "osseux" est très exactement déterminé et les résultats sont méthodologiquement comparables à ceux du présent travail. Les auteurs obtiennent une valeur moyenne de 3.8° pour chaque corps vertébral, les valeurs extrêmes de cet angle étant de 1.7° pour la moyenne des segments T10 et de 5.7° pour celle des segments T1. La sommation des moyennes de chaque segment donne une estimation de la participation des corps vertébraux à la cyphose thoracique (ce calcul nous a semblé plus exact que la formule $12 \times 3.8^\circ$ qui est proposée par les auteurs). On détermine ainsi que la seule orientation des plateaux vertébraux est susceptible de décrire un angle total de 45.3° de cyphose thoracique. Le même calcul est possible pour l'étage cervical, il donne un angle total de 28.1° correspondant à une moyenne de 5.6° par segment, avec une fourchette de 4° en C7 et 6° en C6. A l'étage lombaire, l'ensemble des corps vertébraux décrivent aussi un angle de 28.1° . La moyenne est de 5.6° pour chaque segment, avec une fourchette allant de 4° en L5 à 7.4° en L4. L'orientation des angles ainsi mesurés n'est cependant jamais précisée par les auteurs.

On doit donc supposer que leur sommet est en moyenne situé antérieurement pour les segments appartenant à l'étage thoracique, et postérieurement aux étages cervical et lombaire. En affectant du signe négatif les angles à sommet antérieur, qui déterminent donc une cyphose, il est possible de représenter la variation de ces valeurs moyennes en fonction du segment (Figure 26). Une discontinuité importante est alors notée lors de la transition entre étages, qui ne correspond pas à la variation morphologique continue réelle. Le passage d'une morphologie du corps vertébral, telle que les plateaux forment un angle à sommet postérieur, à une morphologie où le sommet de l'angle est situé antérieurement, a lieu en fait au niveau de segments différents selon les individus: la situation des "charnières" cervico-thoracique et thoraco-lombaire est variable. Les valeurs moyennes sont donc très insuffisantes pour décrire la variation morphologique des corps vertébraux en fonction du segment de la colonne auquel ils appartiennent, et donc pour discuter la participation de chacun d'eux au dessin du profil sagittal. Il est nécessaire d'utiliser une méthodologie susceptible de décrire ce schéma de variation pour chaque sujet afin de pouvoir traiter de la variabilité de ce schéma entre les individus (Cf. note ¹ pp. 205 et 206).

4.1.1. Traitement des données

A. *Quadrilatères représentant les corps vertébraux*

Un système de mesures constitué de cinq segments permet de calculer les angles des quatre sommets du quadrilatère ainsi défini. Ces segments représentent dans le plan sagittal les côtés antérieur, supérieur, postérieur et inférieur du corps vertébral, ainsi que la diagonale issue du sommet antéro-supérieur. La seconde diagonale qui joint le sommet antéro-inférieur au sommet postéro-supérieur a aussi été mesurée. Elle peut être utilisée lorsque la morphologie du plateau et des processus inférieurs ne permettent pas de positionner correctement les branches du pied à coulisse et d'accéder à la diagonale antéro-supérieure. Ce cas s'est parfois présenté au niveau lombaire.

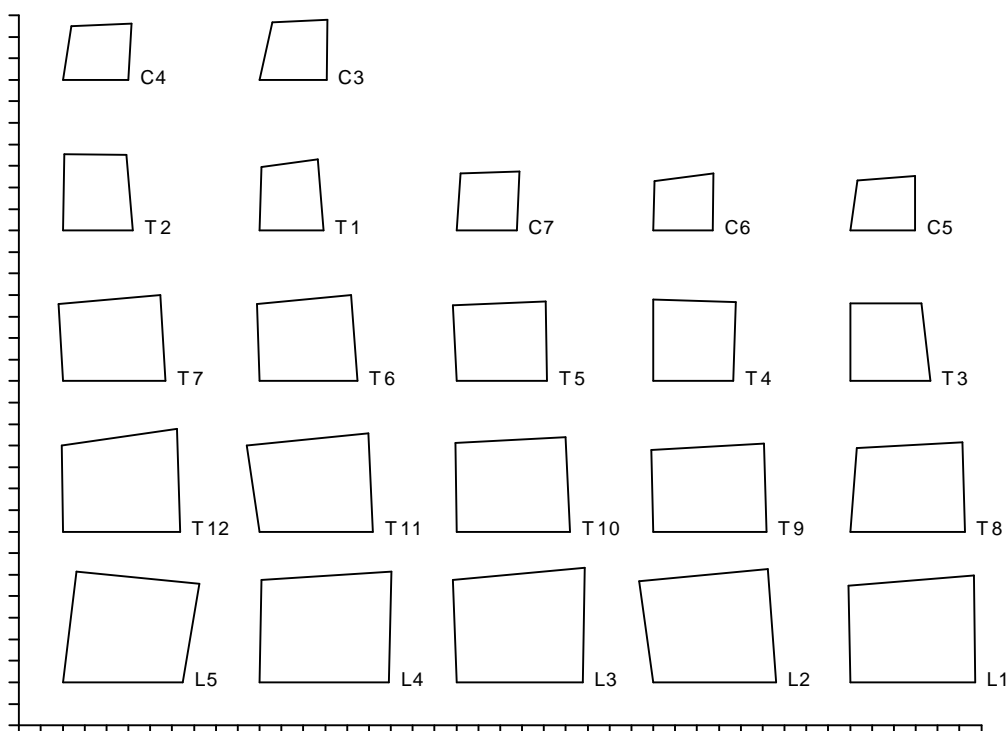


Figure 27

Tracé des quadrilatères représentant les corps vertébraux dans le plan sagittal tel qu'il a été réalisé pour chaque sujet. Exemple de l'individu n° 556 de sexe masculin appartenant à la collection de Spitalfields. Les bases des quadrilatères sont positionnées parallèlement à l'axe des abscisses. Le côté antérieur du quadrilatère est situé près de l'origine (à gauche). Une division de l'axe = 5 mm.

L'ensemble des quadrilatères déterminés pour chaque individu est l'objet d'une représentation graphique (Figure 27), programmée afin d'être réalisée systématiquement pour chaque sujet. Elle permet de vérifier qu'aucune erreur n'est intervenue lors de l'entrée des données ou de la préparation des feuilles de données. Elle donne surtout un premier aperçu de la variation rencontrée entre les individus.

Les quadrilatères montrent une variabilité importante de leur forme. Leur géométrie est différente de celle qui serait obtenue en schématisant les contours du corps vertébral à partir d'une radiographie latérale. En effet, la concavité des bords postérieurs des plateaux vertébraux situe le

segment définissant le côté postérieur du quadrilatère à l'intérieur du contour général de la vertèbre tel qu'il apparaît dans la projection donnée par la radiographie, ou encore sur une photographie latérale de l'os. Les points de mesure étant situés sur le listel vertébral, les polygones sont aussi plus hauts, relativement à leur largeur, que ceux dessinés par les contours du corps dans une coupe sagittale.

B. Piles des quadrilatères représentant les corps vertébraux

Les angles des sommets des quadrilatères étant connus, ceux-ci sont "empilés" mathématiquement. Le segment supérieur d'un quadrilatère n'ayant pas exactement la même mesure que le segment inférieur du quadrilatère sus-jacent, il n'est pas possible de faire correspondre à la fois les côtés antérieurs et les côtés postérieurs de deux quadrilatères voisins. La pile peut donc être réalisée en ajustant les polygones sur leur côté antérieur ou sur leur côté postérieur. Cette différence ne modifie pas les valeurs angulaires de la pile (Cf. 2.3. *Empilement des quadrilatères*, p. 77, et figure 13). L'ajustement postérieur a été choisi. Il correspond à la disposition qui respecte le mieux la limite antérieure du canal neural, et a semblé de ce fait plus fidèle à la disposition physiologique.

L'ensemble des résultats de la pile et une représentation graphique de celle-ci sont présentés par le programme sur une même feuille de calcul qui rappelle aussi les paramètres selon lesquels a été effectué l'empilement.

La figure 28 présente une de ces feuilles dans le cas concret de la pile des corps vertébraux d'un individu masculin. Les paramètres mentionnés sur la feuille sont:

1. Le nom de la feuille de calcul contenant les données (*Feuille source*), c'est-à-dire les longueurs des segments et les angles de chaque quadrilatère, et celui de la feuille utilisée pour l'écriture des résultats (*Feuille écriture*, en fait rappel du nom de la feuille en cours).
2. Le numéro de la *série de données utilisée* dans la feuille source (plusieurs séries peuvent être ainsi regroupées dans une même feuille).
3. Les numéros absolus des *segments* extrêmes *caudal* et *cranial*, entre lesquels est réalisé l'empilement: de 3 (pour C3) à 24 (pour L5). L'empilement doit pouvoir en effet être réalisé sur seulement quelques segments, afin de permettre l'étude de colonnes incomplètes.
4. Le type des *éléments* situés aux extrémités de la pile, c'est-à-dire si la *base* de la pile est formée par un corps vertébral (C) ou un espace intervertébral (E), et de même pour le *sommet* de la pile. Ce paramètre est nécessaire dans le cas d'empilement alternant les corps vertébraux et les espaces intervertébraux.
5. Le *type d'empilement* réalisé: seulement les corps vertébraux (C, cas présent), ou alternance (A) des corps vertébraux et des espaces intervertébraux.
6. Les coordonnées x_0 , et y_0 du premier point de la pile, et l'angle $\hat{\theta}_0$ imposé au segment qui en forme la base. Il s'agit de la valeur initiale à partir de laquelle est effectuée le calcul, modifiée lors de la rotation de la pile si celle-ci doit être ajustée parallèlement à l'axe des ordonnées.
7. La *longueur* du segment qui représentera la *base* de chaque quadrilatère et permettra de vérifier sur le graphe son orientation.
8. La *hauteur* calculée de la pile, cette valeur permettant le calcul des coordonnées en pourcentage.

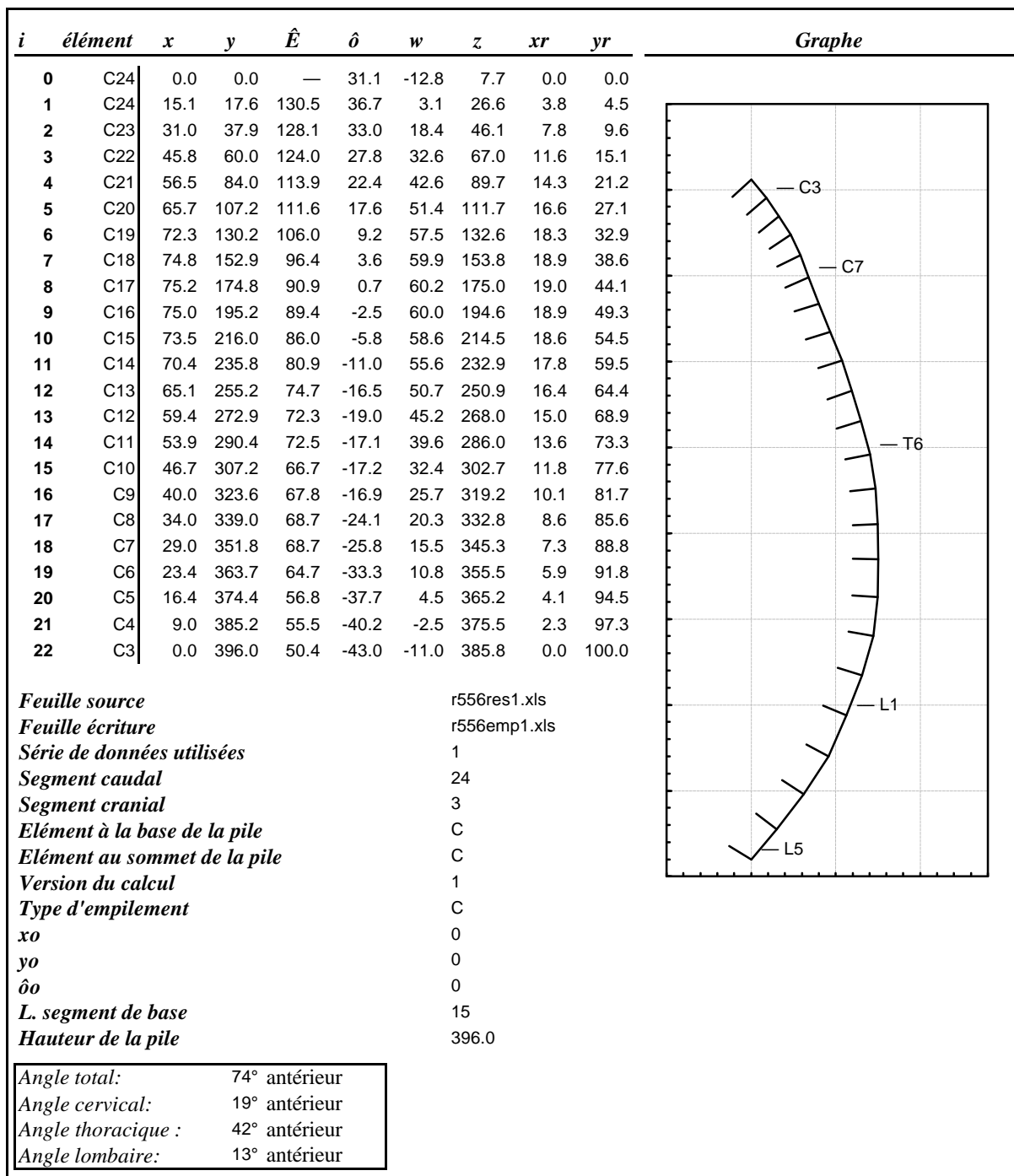


Figure 28

Feuille de résultat de l'empilement. Exemple: empilement des quadrilatères représentant les corps vertébraux de l'individu 556, de sexe masculin. Sont donnés: les résultats de l'empilement pour chaque segment (en haut à gauche), les paramètres selon lesquels a été calculée la pile (en bas à gauche), une représentation graphique de la pile (à droite), les angles interceptant les étages de la pile avec l'orientation de leur sommet (encadré, en bas). Les données métriques sont en mm et les données angulaires sont converties en degrés. Graphe: graduation = 10 mm, quadrillage = 50 mm; le point (0,0) origine du repère est confondu avec le sommet postéro-inférieur de L5, à la base de la pile, et pour la lisibilité de la représentation, l'intersection des axes est positionnée en (-50,-10).

Les résultats de l'empilement sont présentés selon l'indice i correspondant à la base du quadrilatère. Ils désignent aussi le type d'élément auquel correspondent les données numériques, selon un code faisant mention de sa nature (C pour corps vertébral et E pour espace intervertébral) et de son numéro absolu de segment, par exemple: « C19 » pour le corps vertébral de T12. Ces résultats comprennent les coordonnées absolues x et y des points dans la pile; les angulations \hat{o} et \hat{E} de la base et du côté postérieur du quadrilatère par rapport à l'axe des abscisses; les coordonnées w et z de l'extrémité du segment de droite marquant la base du quadrilatère; et enfin les coordonnées relatives xr et yr des points exprimés en pourcentage de la hauteur de la pile (Cf. 2.3.3. Méthode trigonométrique de l'empilement, p. 78, et figure 14). Les valeurs de \hat{o} pour chaque segment permettent de calculer directement les angles interceptant les étages vertébraux, et de donner leur orientation (sommet *antérieur* ou *postérieur*).

4.1.2. Mesure des angles interceptant les profils rachidiens

Les quadrilatères représentant la forme des corps vertébraux dans le plan sagittal ont dans un premier temps été empilés sans que les espaces intervertébraux soient ajoutés. Ce traitement permet d'évaluer la part des courbures sagittales de la colonne vertébrale qui peut être attribuée à la forme des corps vertébraux.

A. Angle décrit par les plateaux de chaque segment vertébral

Il est intéressant de calculer pour chaque corps vertébral l'angle déterminé par l'orientation de ses plateaux supérieur et inférieur. Cette valeur permet de considérer la participation moyenne de chaque segment à l'angulation totale de l'étage considéré :

1. Au niveau cervical, les plateaux de chaque corps vertébral décrivent en moyenne un angle orienté dans le sens de la cyphose (son sommet étant situé antérieurement) qui est de -4.5° pour les hommes et de -3.9° pour les femmes; mais quelque soit le segment, il existe dans les deux sexes des sujets chez lesquels l'angulation est orientée dans le sens de la lordose.
2. Au niveau thoracique, chaque segment contribue en moyenne à -4° de la cyphose dans le sexe masculin, et à -2° dans le sexe féminin. Il existe cependant des angles positifs (sommet postérieur) au niveau des segments T2 à T4 et T9 à T11 dans le sexe masculin, et au niveau de tous les segments excepté T6 dans le sexe féminin.
3. A l'étage lombaire, chaque corps vertébral montre une angulation de ses plateaux égale en moyenne à 0.4° dans le sexe masculin et à 4.2° dans le sexe féminin, mais les moyennes par segment ne sont positives qu'à partir de L4 chez les hommes contre L2 chez les femmes. On trouve cependant, à partir de L2 chez les hommes, des individus pour lesquels les angles sont positifs, de même chez les femmes dès L1.

La déviation angulaire s , analogue de l'écart-type (Cf. 2.4.3. Traitement statistique, p. 83), se situe dans une fourchette de 3 à 6° à l'étage cervical, de 2 à 4° à l'étage thoracique chez les hommes mais de 3 à 9° (valeur en T2) chez les femmes. Elle varie entre 2 et 4° à l'étage lombaire.

Les paramètres de l'angle moyen et de la déviation angulaire permettent de noter des différences significatives quand sont comparées segment par segment les valeurs trouvées pour les deux sexes (Tableau 5 et Figure 29 a. & b):

1. A l'étage thoracique, l'angulation des corps vertébraux est significativement plus forte dans le sexe masculin au niveau des corps de T1, T9 (au seuil $\alpha = 0.05$) et T12 ($\alpha = 0.01$).
2. A l'étage lombaire, la différence est significative de L2 à L5. Cette différence correspond à des valeurs positives (angle en lordose) dans le sexe féminin qui sont opposées à des valeurs négatives (angle en cyphose) dans le sexe masculin, au niveau des segments L2 (au seuil $\alpha = 0.01$) et L3 ($\alpha = 0.001$). Au niveau des segments L4 et L5, l'angulation est lordotique dans les deux sexes mais elle est significativement plus forte chez les femmes (au seuil $\alpha = 0.001$ en L4 et $\alpha = 0.05$ en L5).

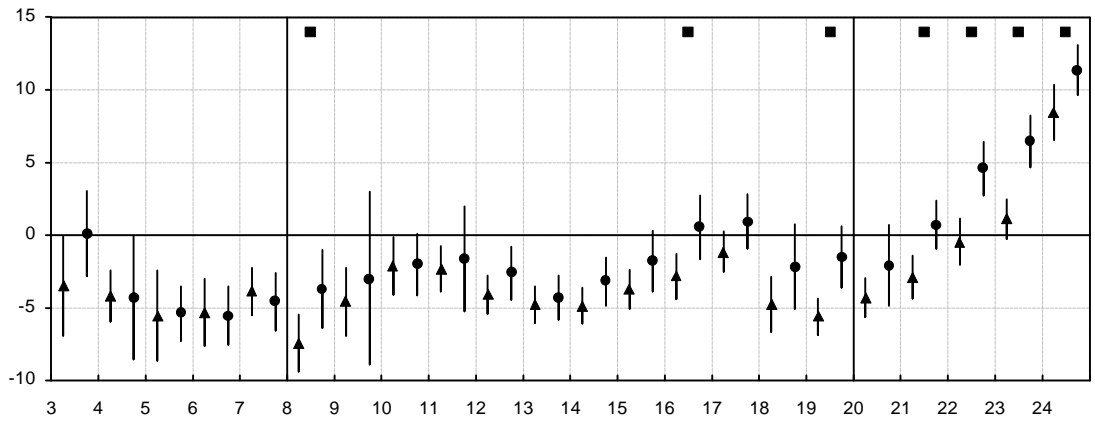
	sexe masculin			sexe féminin			pHo
	n	âm	s	n	âm	s	
C3	13	-3.5 °	5.80	10	+0.1 °	4.26	0.13
C4	14	-4.2 °	3.14		-4.3 °	6.19	> 0.5
C5		-5.5 °	5.50		-5.4 °	2.72	> 0.5
C6		-5.3 °	4.11		-5.5 °	2.93	> 0.5
C7		-3.9 °	2.93		-4.6 °	2.87	> 0.5
T1		-7.4 °	3.49		-3.7 °	3.92	0.029 *
T2		-4.6 °	4.13		-3.0 °	8.60	> 0.5
T3		-2.1 °	3.54		-2.0 °	3.09	> 0.5
T4		-2.3 °	2.79		-1.6 °	5.28	> 0.5
T5		-4.1 °	2.34		-2.6 °	2.67	0.19
T6		-4.8 °	2.24		-4.3 °	2.24	> 0.5
T7		-4.8 °	2.17		-3.2 °	2.41	0.10
T8		-3.7 °	2.38		-1.8 °	3.05	0.11
T9		-2.8 °	2.82		+0.6 °	3.17	0.015 *
T10		-1.1 °	2.43		+1.0 °	2.74	0.076
T11		-4.7 °	3.40		-2.2 °	4.24	0.13
T12		-5.6 °	2.20		-1.5 °	3.07	0.0014 **
L1		-4.3 °	2.38		-2.0 °	4.05	0.12
L2		-2.9 °	2.65		+0.7 °	2.41	0.0036 **
L3		-0.4 °	2.82		+4.6 °	2.71	0.0004 ***
L4		+1.1 °	2.42		+6.5 °	2.60	0.0001 ***
L5		+8.5 °	3.39		+11.4 °	2.50	0.038 *

Tableau 5

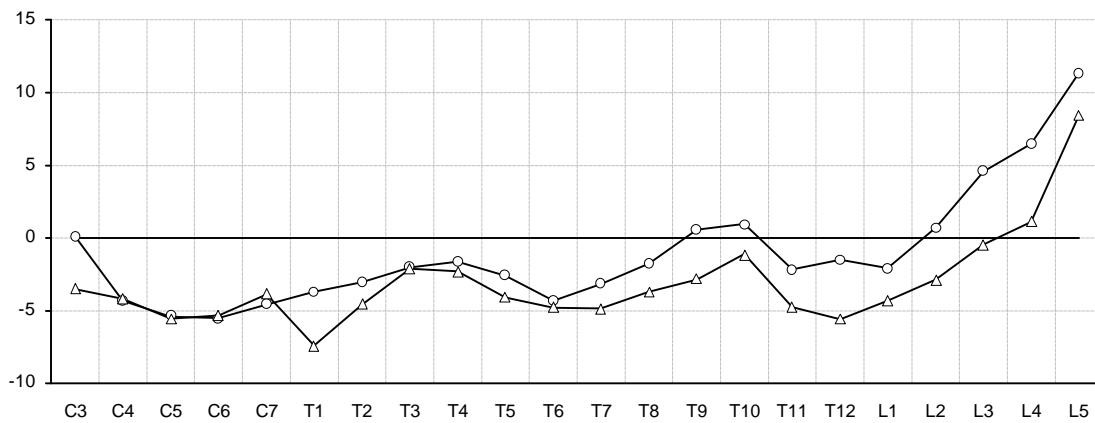
Angle formé par les plateaux supérieur et inférieur du corps vertébral pour chaque segment et comparaison entre les sexes. Sont donnés: l'effectif (**n**), la valeur de l'angle moyen (**âm**) et celle de la déviation angulaire (**s**). Notation des segments: **C**, cervical; **T**, thoracique; **L**, lombaire. **pHo** est la probabilité de l'hypothèse d'égalité des angles moyens des groupes masculin et féminin au niveau du segment considéré. Les astérisques indiquent le rejet de l'hypothèse pour $\alpha = 0.05$ (*), $\alpha = 0.01$ (**) et $\alpha = 0.001$ (***)

Les plateaux des corps vertébraux aux étages cervical et thoracique ont donc une orientation telle qu'ils déterminent en moyenne un angle dirigé dans le sens de la cyphose. Cela n'exclut pas, pour certains sujets, l'existence de segments ayant des angles positifs, c'est-à-dire orientés dans le sens de la lordose. Chez les individus féminins en particulier, il existe à pratiquement tous les segments des valeurs positives. Ceci, et l'existence de plusieurs différences significatives dans la comparaison entre les sexes, indique à cet étage un dimorphisme qui peut être mis en relation avec celui, très clair, de l'étage lombaire. A ce niveau, l'angulation dans le sens de la lordose est rencontrée plus haut dans le sexe féminin, et est aussi significativement plus accentuée.

Il semble que l'angulation moyenne d'un étage vertébral n'est que partiellement expliquée par la contribution que chaque segment est, en moyenne, susceptible d'apporter. La variabilité morphologique des corps vertébraux est telle, en effet, que des sujets différents peuvent présenter pour un même segment des angulations des plateaux de sens opposés. Il existe un schéma général de variation de la morphologie des corps vertébraux depuis les segments supérieurs de la colonne vers les segments inférieurs. Celui-ci est objet de description de tous les manuels d'anatomie et reste indiscutable. Il s'agit par exemple, dans le sens cranio-caudal, de l'augmentation de surface de la section sagittale du corps vertébral, qui est dans ce plan le caractère le plus évident. Transversalement, les modifications les plus remarquables sont l'augmentation progressive de la surface des plateaux, de même que la transition d'une forme sub-rectangulaire à l'étage cervical, sub-triangulaire ou cordiforme à l'étage thoracique, vers une morphologie réniforme à l'étage lombaire. La forme générale de la colonne des corps vertébraux est donc le résultat de ces modifications progressives. Mais le schéma suivi par ce changement de morphologie lorsque l'on



a.



b.

Figure 29

Angle formé par les plateaux supérieur et inférieur de chaque segment. Comparaison de la variation pour les deux sexes: ●, femmes; ▲, hommes. a., angle moyen entouré de son intervalle de confiance à 95 %; ■, segments montrant une différence significative ($\alpha = 0.05$) dans le test de comparaison des angles moyens (la simple observation du chevauchement des intervalles est affectée d'une erreur de seconde espèce plus importante, elle entraînerait une conservation à tort de l'hypothèse d'égalité pour les segments T1, T9 et L5). En abscisse, le numéro absolu du segment est indiqué à gauche de chaque paire d'intervalles, de C3 (n° 3) à L5 (n° 24), les étages étant séparés par un trait vertical. En b., seuls les angles moyens sont représentés.

considère le passage d'un segment au segment adjacent est lui aussi variable selon les sujets, et cette variation ne sera que partiellement responsable de celle du profil dans son ensemble.

La variabilité du schéma selon lequel se modifie la morphologie des corps vertébraux dans le sens cranio-caudal est bien illustrée par l'exemple de deux individus de sexe masculin : les sujets n°254 et 542 dans la numérotation de la collection de *Spitalfields*. Les piles des quadrilatères représentant les corps vertébraux montrent une grande similitude (Figure 30 a. et b.). Elles ne diffèrent pas de plus de 10 mm pour leur hauteur. Surtout, elles dessinent toutes deux une cyphose générale dont le sommet se situe vers le milieu de l'étage thoracique, à une distance d'environ 70 mm, ainsi qu'une inflexion à la base de l'étage lombaire. Cependant, si l'on considère l'angle formé par les plateaux supérieur et inférieur de chaque segment, on note une grande irrégularité des valeurs depuis C3 jusque L5, et une différence notable du schéma selon lequel celles-ci varient tout au long de la colonne (Figure 30 c.). Par exemple, l'individu 254 montre une angulation positive en

T10 et le sujet 542 présente le même phénomène en C6. A la base de l'étage lombaire, tous deux ont une angulation des plateaux dans le sens de la lordose, qui décroît cranialement, mais qui, chez le sujet 542 est présente jusqu'en L2 et est plus accentuée en L3 qu'en L4! Ces variations restent pourtant presque imperceptibles sur la représentation graphique de la pile des corps vertébraux.

Ces deux cas explicitent bien de quelle manière la morphologie de chaque segment intervient dans le dessin d'ensemble de la colonne. La sommation des valeurs angulaires autorise une certaine irrégularité qui peut être compensée par les segments voisins, de telle façon qu'elle reste imperceptible sur la totalité du profil. Ce phénomène est bien décrit pour les scolioses dans lesquelles la cunéiformisation latérale d'un segment est compensée par les corps vertébraux adjacents, voire par l'ensemble du rachis, de telle manière que sa déviation par rapport au plan sagittal reste faible (STAGNARA, 1985). La variabilité de chaque élément vertébral est contrainte dans certaines limites entre lesquelles se trouvent les morphologies telles qu'on les trouve décrites par les anatomistes. Un écart trop important par rapport à ces formes "moyennes" entraîne une instabilité du système (GRACOVETSKY, 1990 ; ROY-CAMILLE, 1994 ; PANJABI *et al.*, 1995) et le passage dans le champ de la pathologie. Mais, bien qu'étant une variable fondamentale pour la morphologie générale du rachis, l'angle entre les plateaux du corps vertébral peut cependant avoir des valeurs très différentes, non seulement si l'on compare sa valeur pour un même segment entre différents sujets, mais aussi si l'on s'intéresse à la façon dont cette valeur, suivant les sujets, varie de segment à segment. Ces mesures montrent pourtant des tendances correspondant à l'allure générale des profils puisque, par exemple, l'angulation dans le sens de la lordose est bien observée, et qu'elle suit des schémas significativement différents selon le sexe. L'angle moyen par segment garde donc une valeur comparative, mais il restera de toutes façons hasardeux de conclure sur la forme supposée d'un profil à partir de celle d'un ou deux de ses éléments. La portée de ce qui peut être inféré d'un étage vertébral à partir de l'étude de segments isolés est donc limitée. Une étude de variabilité basée sur une méthodologie qui puisse prendre en compte l'ensemble des segments correspondant à un étage vertébral est donc indispensable.

Etage	Sexe	n	âm	r	s	L1	L2	L2-L1
Lombaire	M	13	1°	0.99	9°	-4°	6°	10°
	F	10	21°	0.99	8°	16°	27°	11°
	-	23	10°	0.97	13°	4°	15°	11°
Thoracique	M	13	-51°	0.97	13°	-59°	-43°	15°
	F	10	-24°	0.96	16°	-36°	-13°	23°
	-	23	-40°	0.94	19°	-48°	-31°	17°
Cervical	M	13	-23°	0.98	12°	-30°	-16°	14°
	F	10	-20°	0.98	12°	-28°	-12°	16°
	-	23	-22°	0.98	12°	-27°	-16°	10°
C3-L5	M	13	-81°	0.94	19°	-93°	-70°	24°
	F	10	-57°	0.72	43°	-91°	-23°	67°
	-	23	-73°	0.83	34°	-89°	-56°	34°

Tableau 6

Echantillon de *Spitalfields*, angles interceptant les segments rachidiens, pour les piles de quadrilatères représentant les corps vertébraux seulement. *n*, nombre d'individus; *âm*, angle moyen; *r*, norme du vecteur représentant *âm*; *s*, déviation angulaire; **L1** et **L2**, limites de confiance de l'angle moyen à 95% de sûreté; **L2-L1**, amplitude de l'intervalle de confiance de l'angle moyen.

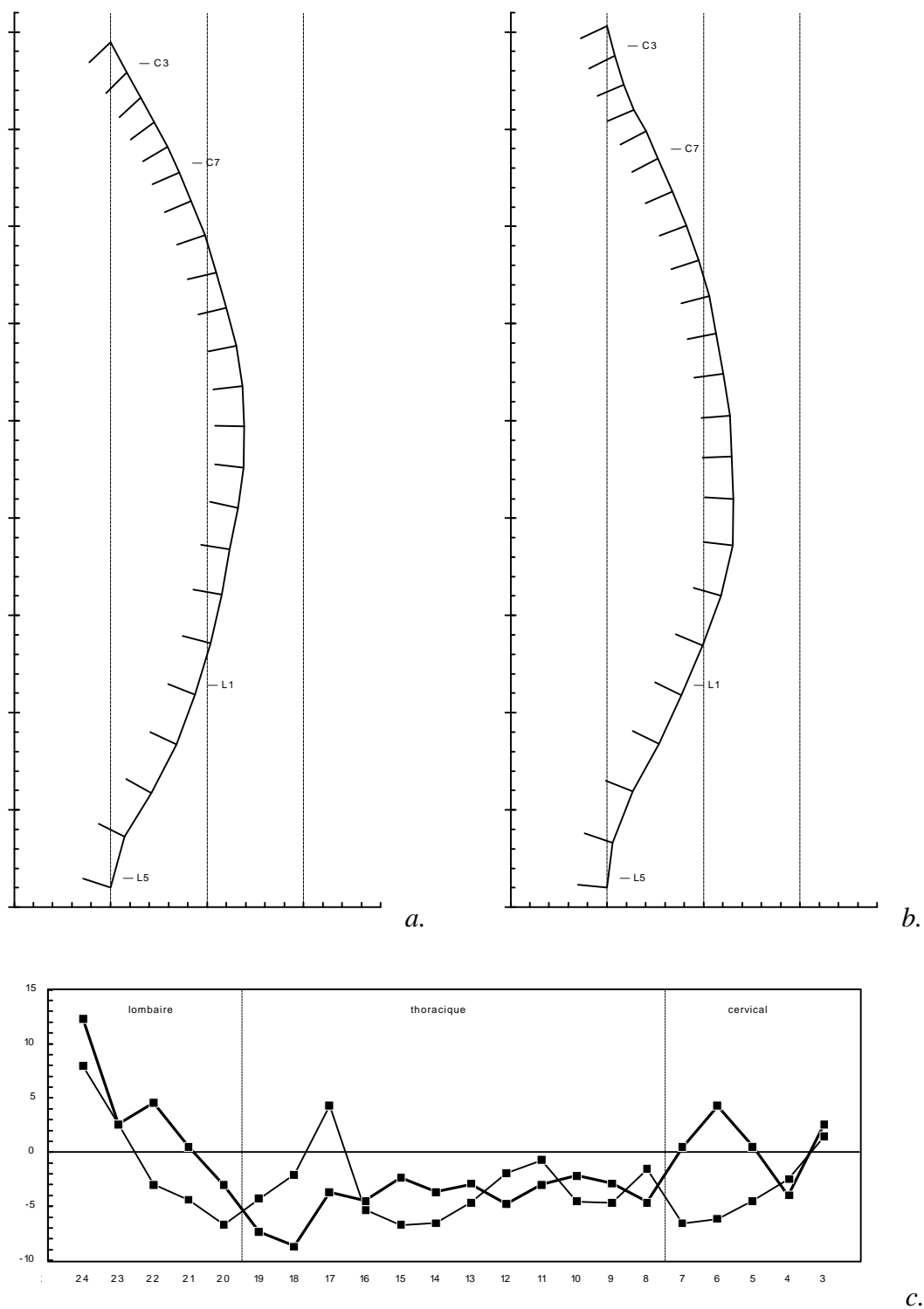


Figure 30
Empilement des quadrilatères représentant les corps vertébraux et ajustés selon leur côté postérieur. Représentation de la pile dans le repère cartésien. Exemple de deux individus masculins: *a.*, individu n°254; *b.*, individu n°542 (une division représente 5 mm). *c.*, angle formé entre les plateaux supérieur et inférieur de chaque corps vertébral pour les deux individus 254 (—) et 542 (---), avec en abscisse le numéro absolu du segment de 3 (pour C3) à 24 (pour L5) et en ordonnées l'angle en degrés. Malgré une grande similarité dans l'allure des piles, les valeurs d'angulation des plateaux selon le segment ont des profils très différents pour chaque individu. Elles montrent de fortes irrégularités et des changements de signe qui sont compensés par les segments voisins.

B. Angle interceptant chaque étage de la pile des corps vertébraux

Les valeurs des angles interceptant la pile constituée des quadrilatères représentant les corps vertébraux ont été calculées pour l'ensemble de la pile, et séparément pour les étages cervical, thoracique et lombaire de chaque individu. Les paramètres statistiques décrivant les échantillons masculin, féminin et la totalité des individus permettent d'estimer les angles moyens ainsi que la concentration (et la dispersion) des valeurs (tableau 6). Le test des valeurs du z de Rayleigh a montré que les angles moyens sont très significatifs, l'hypothèse d'une distribution uniforme étant nettement rejetée ($\alpha < 0.004$). Les intervalles de confiance des angles moyens sont calculés pour une sûreté de 95%. Une représentation graphique de ces données telle qu'elle a été décrite précédemment permet de remarquer plusieurs tendances (figure 31).

Au niveau cervical, les intervalles de confiance des angles moyens des deux sexes se chevauchent très largement. Il est remarquable que la morphologie osseuse des corps vertébraux n'intervienne pas dans la formation de la lordose. Un individu de chaque sexe présente cependant une valeur positive de l'angle interceptant l'étage cervical, mais qui n'excède pas 5° et peut être assimilée à un angle nul.

La cyphose thoracique apparaît clairement, elle est plus prononcée chez les hommes dont l'angle moyen est supérieur en valeur absolue. Les intervalles de confiance des échantillons masculin et féminin ne se recoupent pas. Une femme possède un angle dont la valeur est positive mais très proche de zéro.

L'étage lombaire, enfin, montre un schéma particulier: Chez toutes les femmes, la morphologie des corps des vertèbres lombaires intervient dans le dessin de la lordose. Chez les hommes, les valeurs se répartissent autour de zéro et ne semblent pas avoir de signification fonctionnelle, puisqu'elles dénotent aussi bien une lordose qu'une cyphose lombaire. L'hypothèse d'un angle moyen nul chez les hommes ne peut d'ailleurs être rejetée puisque la valeur zéro se situe à l'intérieur de l'intervalle de confiance, et même, très proche de l'angle moyen. Les intervalles de confiance des angles moyens ne se recoupent pas.

Une comparaison entre les données de chaque étage montre par ailleurs que la lordose lombaire dans le groupe féminin n'est pas compensée par une cyphose plus prononcée de l'étage thoracique. La morphologie particulière des corps vertébraux des vertèbres lombaires doit donc être liée exclusivement au schéma particulier de l'ensemble lombo-sacré chez les femmes, la "cunéiformisation" des dernières lombaires venant compenser la plus forte inclinaison du sacrum (BUKOVIC *et al.*, 1993 ; LEGAYE *et al.*, 1993). Il est envisageable que la stabilisation de l'ensemble de la colonne vertébrale implique jusqu'à la morphologie des corps des vertèbres thoraciques sus-jacentes qui, en intervenant de moindre manière dans la constitution de la cyphose thoracique chez les femmes que chez les hommes, participe elle aussi à la compensation de l'instabilité entraînée par l'inclinaison du plateau sacré.

L'existence d'un dimorphisme sexuel dans la morphologie des corps vertébraux à l'étage lombaire, mais aussi à l'étage thoracique, est confirmée par le test de comparaison des moyennes (tableau 7) qui, dans les deux cas, rejette de manière très significative l'hypothèse d'égalité ($\alpha < 0.01$ et $\alpha < 0.001$).

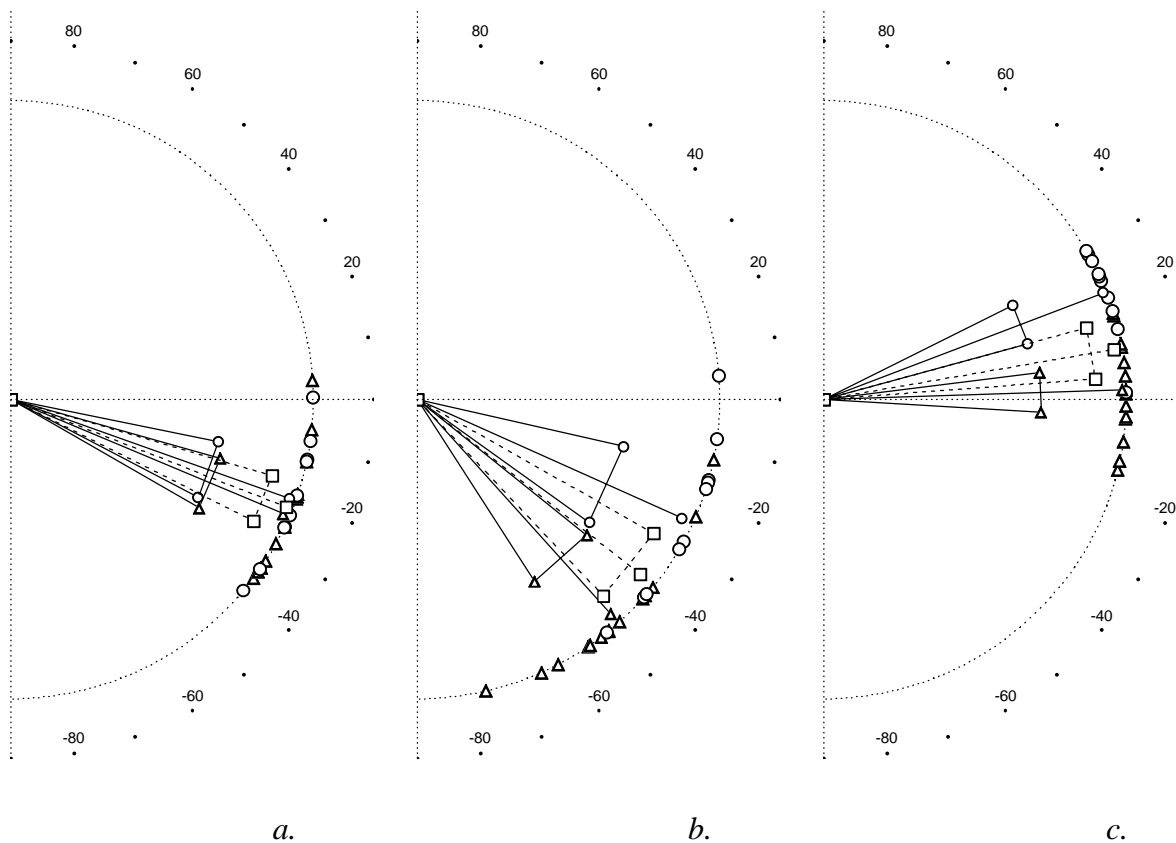


Figure 31

Angles interceptant les étages cervical, thoracique et lombaire de la pile des quadrilatères représentant les corps vertébraux, dans l'échantillon de *Spitalfields*. Segments cervical (a.), thoracique (b.) et lombaire (c.). Δ , hommes ; \circ , femmes; $\text{---}\Delta\text{---}$ & $\text{---}\circ\text{---}$, angle moyen entouré de son intervalle de confiance à 95% pour les sujets de sexe masculin et féminin, respectivement ; $\text{---}\square\text{---}$, angle moyen et intervalle de confiance pour l'ensemble des individus. Les valeurs négatives correspondent à des angles à sommet antérieur. La longueur du segment représentant l'angle moyen est égale à r ($0 \leq r \leq 1$), mesure de la concentration des données. Graduation en degrés.

Segment	n_M	n_F	$\hat{a}m_M$	$\hat{a}m_F$	p_{Ho}	
Cervical	13	10	-22.9°	-19.7°	0.542	—
Thoracique	14	10	-48.2°	-24.4°	0.0024	**
Lombaire	14	10	+ 2 °	+ 21.1°	0.00005	***
De C3 à L5	13	10	-81.5°	-57.2°	0.12	

Tableau 7

Echantillon de *Spitalfields*, angles interceptant les segments rachidiens, pour les piles des quadrilatères représentant les corps vertébraux seulement. Test de l'hypothèse d'égalité des angles moyens des échantillons féminin et masculin à chaque étage. n , effectif; $\hat{a}m_M$ et $\hat{a}m_F$, angles moyens (indices M et F pour féminin et masculin), p_{Ho} , probabilité de l'hypothèse nulle d'égalité des angles moyens; —, l'hypothèse d'égalité ne peut être rejetée, **, les moyennes sont significativement différentes entre les sexes avec $\alpha < 0.01$, ***, *idem* avec $\alpha < 0.0001$. Nota: un individu supplémentaire dont C3 n'est pas conservé est inclus dans le test pour les étages thoracique et lombaire.

4.1.3. Description des profils au moyen des régressions polynomiales:

A. Dimensions des profils:

(1) Calcul de la longueur curviligne:

L'étude de certains points remarquables a parfois nécessité le calcul de deux polynômes pour décrire un profil, chaque régression étant alors effectuée sur une moitié de la colonne vertébrale, de C3 à T6 d'une part, et de T7 à L5 d'autre part. L'expression de la position des points en proportion de la hauteur totale du profil permet de comparer les résultats entre individus. Elle est surtout intéressante par rapport à la hauteur totale de la colonne vertébrale. La longueur curviligne du profil est sa longueur développée, elle peut être aussi considérée comme une longueur d'arc. Une autre possibilité est donc d'exprimer la position des points remarquables en proportion de cette longueur d'arc, mais la sommation des longueurs curvilignes de chaque "demi-profil" doit permettre d'obtenir une valeur qui soit comparable à celle obtenue sur une colonne complète. Il s'est avéré que les longueurs curvilignes restent en effet tout à fait semblables, qu'elles soient calculées pour un ajustement polynomial de C3 à L5, ou par addition des longueurs des profils C3-T6 et T7-L5. Les ajustements plus détaillés obtenus par la seconde méthode n'augmentent pas la longueur d'arc de telle façon qu'elle puisse fausser les résultats. L'écart entre les méthodes n'excède pas 6 mm et les trois-quarts des valeurs ne sont pas supérieures à 2.7 mm. L'écart relatif est toujours inférieur à 1.2 % de la longueur totale du profil, et le troisième quartile se situe à 0.6 %. La division de la colonne vertébrale en deux fragments pour le calcul des régressions est donc de ce point de vue tout à fait justifiable.

(2) Variabilité et différence entre les sexes:

Les résultats obtenus pour chaque sexe montrent que les hauteurs des profils, c'est-à-dire leur longueur en projection, ou encore la longueur de leur corde, ne sont pas significativement différents entre les groupes masculin et féminin (Tableau 8). La longueur curviligne n'apparaît pas non plus significativement différente entre les sexes, bien que les valeurs du groupe féminin appartiennent aux valeurs faibles de la variabilité masculine. L'indice $i = h / l$, rapportant la hauteur du profil à sa longueur curviligne montre par conséquent une tendance inverse, les valeurs du groupe féminin correspondant à la partie supérieure de la variabilité masculine.

			<i>n</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>p</i> 0.025	<i>p</i> 0.5	<i>p</i> 0.975
Hommes	hauteur	<i>h</i>	13	410	24	366	411	440
	longueur curviligne	<i>l</i>		448	21	411	456	472
	indice	$i = h/l$		92 %	4 %	85 %	92 %	97 %
Femmes	hauteur	<i>h</i>	10	407	15	385	407	429
	longueur curviligne	<i>l</i>		420	13	402	421	437
	indice	$i = h/l$		97 %	2 %	93 %	98 %	99 %
Hommes et Femmes	hauteur	<i>h</i>	23	409	20	366	411	438
	longueur curviligne	<i>l</i>		436	22	403	434	470
	indice	$i = h/l$		94 %	4 %	85 %	94 %	99 %

Tableau 8

Échantillon de *Spitalfields*, mesures des profils obtenus à partir des piles de corps vertébraux. *n*, effectif; *m*, moyenne; *s*, écart-type; *p* 0.025 et *p* 0.975, percentiles symétriques autour de la médiane et renfermant 95 % des valeurs de l'échantillon; *p* 0.5, percentile 50 %, médiane. Valeurs exprimées en mm.

Les longueurs curvilignes et en projection prises comme indicateurs de forme et de format ne montrent donc pas de différence nette entre les sexes du point de vue de la morphologie des corps vertébraux et de l'implication de ceux-ci dans le dessin des courbures sagittales du rachis. Cependant, il a déjà été noté que l'indice i ne pouvait rendre compte de la forme précise des profils, c'est-à-dire de la nature et du nombre des courbures présentes. L'étude de la position de leurs extrema et d'autres points remarquables doit donc compléter la description en palliant cette insuffisance.

B. Situation des extrema et valeurs des flèches aux extrema:

Tous les individus masculins admettent un extremum et un seul qui se situe au niveau des vertèbres T7 ou T8, se déplaçant jusque T6 ou T9 chez seulement deux sujets. On peut considérer en première approximation que c'est l'existence d'un extremum qui détermine la présence d'une courbure. Les extrema notés dans le groupe masculin décrivent donc le sommet d'une seule et unique courbure à concavité antérieure, une cyphose qui s'étend sur tout le segment étudié, de la troisième vertèbre cervicale à la cinquième vertèbre lombaire. Exprimée en pourcentage de la corde, c'est-à-dire en pourcentage de la hauteur totale de la pile, la position du maximum se situe en moyenne à 56 % à partir de la base, presque au milieu du profil. Elle est d'ailleurs assez invariante, puisque 95 % des valeurs se situent dans une frange de 16 % entourant la moyenne, les percentiles 0.025 et 0.975 ayant pour valeurs respectives 47 % et 63 %. La médiane, à 55 %, est presque égale à la moyenne (tableau 9).

La flèche au sommet de la courbure à une valeur moyenne de 77 mm. Les percentiles contenant 95 % des valeurs autour de la médiane sont situés à 44 mm et 107 mm, soit une fourchette de 62 mm, valeur assez importante si l'on considère la hauteur moyenne des profils qui est de 410 mm. Ramenée en pourcentage de la corde, l'intervalle est de 17 % (11 % - 28 %).

En d'autres termes, le sommet de la cyphose imposée par la morphologie des corps vertébraux se situe assez précisément à la moitié de la hauteur du profil, et il varie de 6 cm par rapport à l'axe C3-L5 dont il est éloignée de 4 à 10 cm chez 95 % des sujets masculins.

Les individus de sexe féminin présentent un autre schéma puisque la moitié d'entre eux possèdent deux courbures de sens opposés qui semblent marquer une lordose lombaire ou thoracolumbale nette, et une cyphose cervico-thoracique. Les autres profils ont un aspect identique à ceux obtenus pour le sexe masculin, avec une seule et même cyphose. Cependant la position de l'extremum y apparaît plus variable que dans le sexe masculin, se situant entre les quatrième et dixième vertèbres thoraciques, soit aux valeurs extrêmes de 49 % et 75 % de la hauteur de la pile, avec une situation moyenne à 61 %. La flèche au sommet de la courbure est de 51 mm, avec des valeurs comprises entre 28 et 68 mm, intervalle qui n'est pas significativement différent de celui calculé pour le sexe masculin.

Si l'on s'intéresse aux longueurs h des cordes des profils et à leurs longueurs curvilignes l , on constate que l'indice h/l ne présente pas de variation significative si sont comparés les individus féminins possédant deux courbures ($h/l = 0.98$ et pour $\alpha = 0.05$, c'est-à-dire pour 95 % des valeurs, l'intervalle de tolérance est donné par : $0.97 < h/l < 0.99$), et les autres sujets possédant une seule cyphose ($h/l = 0.93$ et pour $\alpha = 0.05$: $0.85 < h/l < 0.98$). L'existence de deux courbures imposées par la morphologie des corps vertébraux, n'entraîne donc pas de diminution remarquable de la hauteur du profil, ce qui se manifeste aussi par des flèches aux extrema qui restent assez faibles. Celles-ci se situent dans des valeurs comprises entre -20 et 0 mm pour la lordose (en percentiles et pour $\alpha = 0.05$, le signe moins indiquant une position antérieure par rapport à l'axe de la pile), et 3 et 50 mm pour la cyphose, tandis que les individus ne possédant qu'une cyphose (sexes confondus) ont des valeurs comprises entre 32 et 106 mm.

		<u>Sgt.</u>	<u>n</u>	<u>m</u>	<u>s</u>	<u>p 0.025</u>	<u>p 0.975</u>	<u>i 0.95</u>
Hommes	extremum	T6 - T9	13	227	20	188	258	70
	flèche			77	20	44	107	62
	extremum (%)			56 %	5 %	47 %	63 %	16 %
	flèche (%)			19 %	5 %	11 %	28 %	17 %
Femmes								
un seul extremum	extremum	T4 - T10	5	243	45	199	294	95
	flèche			51	18	28	68	40
	extremum (%)			61 %	12 %	49 %	75 %	26 %
	flèche (%)			13 %	5 %	7 %	18 %	11 %
deux extrema								
lordose	extremum	L1 - L5	5	60	34	17	103	86
	flèche			-8	8	-20	0	20
	extremum (%)			15 %	8 %	4 %	26 %	22 %
	flèche (%)			-2 %	2 %	-5 %	0 %	5 %
cyphose	extremum	C6 - T8	5	295	43	238	347	108
	flèche			23	19	3	50	47
	extremum (%)			72 %	12 %	56 %	87 %	31 %
	flèche (%)			5 %	4 %	1 %	12 %	11 %
Ensemble des profils								
à un seul extremum	extremum	T4 - T10	18	232	28	187	290	102
	flèche			70	22	32	106	74
	extremum (%)			57 %	8 %	47 %	73 %	27 %
	flèche (%)			17 %	6 %	8 %	28 %	20 %

Tableau 9

Localisation des extrema (sommets de la courbe) et flèches aux extrema pour les profils obtenus à partir des piles de corps vertébraux. *Sgt.*, intervalle des segments où ont été localisés des extrema; *n*, effectif; *m*, moyenne; *s*, écart-type; *p 0.025* et *p 0.975*, percentiles renfermant 95 % des extrema de l'échantillon; *i 0.95*, longueur de l'intervalle où sont rencontrés 95 % des extrema ($i 0.95 = p 0.975 - p 0.025$). *Nota* : pour $n = 5$, les percentiles sont assimilables aux valeurs minimale et maximale.

Lorsque le critère choisi pour la détermination d'une courbure est la présence d'un extremum, la morphologie des corps vertébraux ne semble intervenir que dans le dessin d'une seule courbure cyphotique générale chez les individus masculin. En revanche, elle imposerait à la moitié des sujets féminins deux courbures opposés marquées par deux extrema différents (minimum et maximum), sans entraîner pourtant une diminution notable de la hauteur relative du profil. Les flèches aux extrema ont alors des valeurs plus faibles que chez les sujets ne possédant qu'une seule courbure. Situé en moyenne pour tous les sujets presque exactement à la moitié de la colonne vertébrale, le sommet de la cyphose a par ailleurs une position plus variable chez les femmes que chez les hommes.

C. Points d'inflexion:

Pour chaque polynôme ont été déterminées les coordonnées du point d'inflexion ou éventuellement des deux points d'inflexion donnés formellement par l'annulation de l'équation de la dérivée seconde. Les points décrivant une inversion significative dans la courbure du profil ont été retenus parmi les solutions obtenues mathématiquement. Les coordonnées qui n'ont pas de valeurs descriptive mais sont des artefacts impliqués par le modèle sont éliminées (Cf. *supra* 2.5.2.

Choix du degré du polynôme, p. 87). Par ailleurs, afin d'obtenir une meilleure description des profils, la position des points est déterminée séparément pour deux piles distinctes de corps vertébraux calculées, d'une part de C3 à T6, et d'autre part de T7 à L5. C'est à partir de l'équation d'un polynôme ajusté à chacune de ces piles que les coordonnées du ou des points d'inflexions théoriques sont déterminées. La meilleure qualité de l'ajustement permet ainsi de décrire des inversions de courbure, notamment au niveau cervical, qui n'apparaissent pas toujours quand la régression est calculée sur l'ensemble des corps vertébraux de C3 à L5. Inversement, certains points d'inflexion situés au niveau thoracique bas près de l'extrémité supérieure T6 de la pile thoraco-lombaire n'ont pu être localisés qu'à partir du polynôme calculé pour l'ensemble de la colonne.

(1) Détermination sur des profils partiels:

Un exemple du gain apporté dans la description du profil par la limitation du calcul de régression à une pile thoraco-lombaire peut être donné avec l'individu 173, de sexe masculin. Celui-ci possède une inflexion que le polynôme calculé pour l'ensemble du rachis permet de situer au niveau de la quatrième vertèbre lombaire, à proximité de son plateau inférieur. Cette inversion n'apparaît donc pas significative puisqu'elle n'affecte qu'un seul segment, ce que semble confirmer dans un premier temps l'observation du tracé et les valeurs très faibles des courbures qui sont de 0.1 mm^{-1} et 0.7 mm^{-1} au niveau des plateaux supérieur et inférieur de L5, tandis que le maximum absolu de courbure est de -5 mm^{-1} . La représentation graphique de l'ajustement montre cependant des résidus ($\hat{y} - y$) positifs en L4-L5 et négatifs aux étages thoracique bas et lombaire, ce qui laisse suspecter une description médiocre du profil au niveau de l'inflexion lombaire. En calculant le polynôme sur la seule colonne thoraco-lombaire, le résidu au niveau du plateau supérieur de L5 passe en effet de 2.5 à 0.7 mm. La nouvelle équation situe l'inflexion en L3 et donne une valeur de courbure égale à 3.7 mm^{-1} en L4, de 8.4 mm^{-1} au niveau du plateau supérieur de L5 et de 12.1 mm^{-1} au plateau inférieur de L5. Le profil atteint par ailleurs un maximum de courbure (en valeur absolue) de -4.5 mm^{-1} en T11.

Bien qu'il n'existe pas d'extremum au niveau de la courbure lombaire, c'est à dire de sommet de la lordose, celle-ci possède donc une courbure dont la valeur est tout à fait comparable à celle de la cyphose cervico-thoracique, et le point d'inflexion déterminé à partir du polynôme ajusté à la pile thoraco-lombaire décrit bien cette inversion de courbure chez le sujet 173.

(2) Choix des points d'inflexion significatifs:

Le critère de sélection des points significatifs est donc essentiellement graphique, complété d'une lecture au cas par cas des autres types de données qui décrivent le polynôme, telles que les valeurs du rayon de courbure. Les points éliminés correspondent à des inflexions rapprochées entourant un petit segment de courbe assimilable à une droite, ou encore à des inflexions situées près d'une extrémité du profil, la courbure de ce dernier restant au delà de ce point dans des valeurs proches de zéro. Dans ce cas, on ne peut pas considérer qu'il existe une inversion significative de la courbure à l'extrémité du profil. L'exemple de l'individu masculin numéro 301 sera choisi pour illustrer ce fait. Le polynôme ajusté à la pile de corps vertébraux calculée de T6 à C3 possède une inflexion théorique située au niveau de la cinquième vertèbre thoracique, à 18 % de la base de la pile. En T6, la courbure présente une valeur de $+1 \text{ mm}^{-1}$ tandis qu'elle atteint un maximum (en valeur absolue) de -5 mm^{-1} au niveau du corps vertébral de C6. Elle est donc négative sur presque toute la longueur du profil et ne change de signe que sur un très court segment, et en se maintenant dans des valeurs presque nulles. La courbure inversée est imperceptible sur le tracé du profil, et il existe localement, au niveau du plateau supérieur de T6 un résidu de -1 mm , qui est tel que la courbe se situe au dessous du point. Aucune qualité descriptive ne peut donc être accordée à l'inflexion calculée (Figure 32). Le profil cervico-thoracique de cet individu peut effectivement être décrit comme ne présentant qu'une seule courbure à concavité antérieure, qui s'étend de la troisième vertèbre cervicale à la sixième vertèbre thoracique où sa valeur est presque nulle.

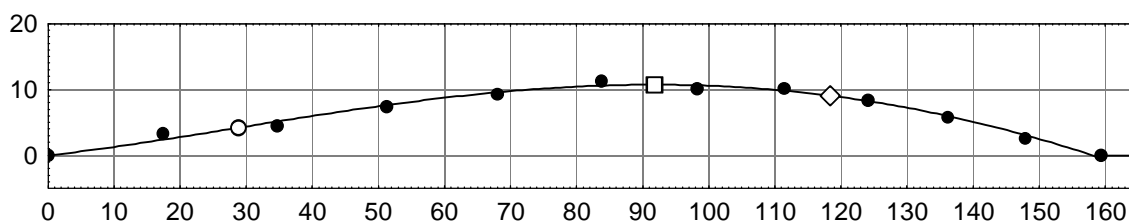


Figure 32

Individu n° 301 de *Spitalfields*. Sexe féminin. Ajustement polynomial à la pile des quadrilatères représentant les corps vertébraux de T6 (abscisses 0 à 17 mm) à C3 (abscisses 147 à 159 mm). Abscisses: hauteur du profil ; ordonnées: distance postérieure par rapport à l'axe T6-C3 marquant la hauteur du profil. ●, sommets postérieurs contigus de deux quadrilatères adjacents ; □, extremum ; ◇, courbure minimale ; ○, point d'inflexion ; —, régression polynomiale. La courbure positive existant entre les abscisses 0 mm et 29 mm n'est pas perceptible, et le point d'inflexion de coordonnées (29, 4) n'a pas de qualité descriptive pour l'analyse du profil. Il n'est pas retenu comme point significatif.

Les points d'inflexion significatifs, par leur présence et leur position, viennent donc aider à l'analyse du profil en complétant l'étude des extrema. La présence de deux extrema implique en effet une inversion de courbure matérialisée par un point d'inflexion. En revanche, une inversion de courbure peut exister sans qu'un second extremum soit présent car celui-ci dépend de l'étendue sur laquelle se manifeste la seconde courbure et de la valeur qu'elle acquiert. Il est aussi lié à l'orientation de l'axe du profil (pour cette raison les extrema ont été déterminés sur un profil complet). La situation du point d'inflexion permet donc de révéler de manière plus sensible la présence d'une inversion de courbure et de définir quelle est la vertèbre charnière au niveau de laquelle cette inversion se réalise.

(3) Points d'inflexion au niveau cervico-thoracique:

Seulement deux individus masculins et un individu féminin présentent une inversion significative de la courbure du profil cervico-thoracique. Cette inversion est située au niveau de la cinquième vertèbre cervicale pour un des individus masculins, et au niveau de la septième vertèbre cervicale pour les deux autres sujets. Cette localisation correspond à des abscisses comprises entre 65 % et 79 % de la hauteur du profil C3-T6. En exprimant la position de ces points par rapport à la longueur curviligne de l'ensemble du profil, on détermine qu'ils se situent à 86 %, 89 % et 92 % de la totalité de la colonne vertébrale. Il y a donc une très faible variation de leur emplacement. En ramenant ces pourcentages à la longueur moyenne des profils de l'échantillon, qui est de 43.7 cm, et ceci afin de retrouver un ordre de grandeur plus explicite, l'écart de 6 % observé correspond à une valeur de seulement 2.6 cm.

(4) Points d'inflexion au niveau thoraco-lombaire:

Un point d'inflexion au niveau thoraco-lombaire existe chez 9 individus masculins (n = 13; 70 %) où il se situe au niveau de la deuxième, troisième ou quatrième vertèbre lombaire, soit entre 10 et 21 % de la longueur du profil de C3 à L5. Exprimé par rapport à une longueur moyenne de 43.7 cm, cet écart correspond à une variation maximale de 4.8 cm. Il est nécessaire d'effectuer une

transformation arc sinus de la variable correspondant à l'abscisse curviligne relative du point d'inflexion pour l'ajuster à une distribution normale. Les statistiques paramétriques qui peuvent alors être calculées donnent, après transformation inverse des résultats, un intervalle de tolérance estimé de la population ($\alpha = 0.05$) compris entre les limites de 5.5 et 22.5 % de la longueur curviligne.

Tous les individus de sexe féminin possèdent en revanche une inversion de la courbure qui détermine une lordose lombaire impliquée par la seule forme des corps vertébraux. Cette lordose affecte même le niveau thoracique bas chez la moitié des sujets féminins, pour lesquels le point d'inflexion se situe entre les 8^{ème} et 11^{ème} vertèbres thoraciques, soit à environ la moitié de la colonne vertébrale, et précisément entre 42 et 55 % de la longueur curviligne du profil. Chez les autres sujets où l'inversion de courbure ne commence qu'au niveau lombaire, il se situe inférieurement jusqu'à la 3^{ème} vertèbre lombaire, soit de 14 à 24 % de la longueur du profil. Le commencement de la courbure lombaire peut donc se trouver, pour les sujets féminins, dans un espace correspondant à sept segments vertébraux, de T8 à L3, ce qui correspond à une abscisse curviligne s'étendant de 14 à 55 % si sont considérées les valeurs extrêmes de l'échantillon, et de 0 à 67.7 % pour l'intervalle de tolérance à $\alpha = 0.05$ (après transformation arc sinus). Cette variabilité est à mettre en relation avec celle du sommet de la cyphose thoracique ou cervico-thoracique notée précédemment.

Afin de rendre plus objectives les différences apparaissant entre les sexes quant à la position du point d'inflexion thoraco-lombaire, une comparaison des paramètres est effectuée après transformation en arc sinus de la variable. La comparaison des moyennes donne une localisation significativement plus basse du point d'inflexion chez les hommes ($p = 0.001$), et la variance de cette mesure dans le groupe féminin confirme sa plus grande variabilité ($p < 0.001$).

La seule morphologie des corps des vertèbres détermine donc chez tous les sujets féminins de notre échantillon une inflexion de la courbure correspondant à l'existence d'une lordose lombaire. La position de cette inflexion est plus haute et bien plus variable qu'elle ne l'est dans le groupe masculin. Elle doit donc permettre le développement d'une lordose plus accentuée, et telle qu'elle puisse dans certains cas déterminer un sommet de courbure quand le profil est ajusté selon l'axe C3-L5 (Cf. *supra*).

D. Maxima de courbure:

(1) Isolation des maxima significatifs:

Les extrema dans les courbures sont des points remarquables qui, par leur position et leur valeur, sont susceptibles de caractériser l'allure des profils. Le signe de C ayant été défini arbitrairement pour indiquer le sens de la concavité, ce sont en réalité les maxima de courbure (en valeur absolue) qui, parmi les extrema, ont une valeur descriptive. Les points au niveau desquels le profil devient de moins en moins courbé pour ensuite s'infléchir à nouveau et qui correspondent à des minima de la courbure (en valeur absolu) ont peu de signification pour l'analyse. Quant aux points de courbure nulle, exception faite du cas théorique (absent de l'échantillon) où la fonction de courbure $C = f_c(x)$ serait exactement tangente à l'axe des x , ils représentent les points d'inflexion précédemment étudiés.

Les maxima de courbure sont donc les points où la fonction représentant la valeur du rayon de courbure passe par un minimum et où la valeur de la courbure passe par un maximum. Cependant, ils ne correspondent pas nécessairement à la plus forte courbure du profil. Celui-ci peut par exemple ne présenter aucun extremum et avoir une courbure toujours croissante.

Afin de déterminer, parmi les extrema de courbure calculés, quels sont ceux qui sont réellement susceptibles de décrire le profil, il est nécessaire de comparer les ajustements obtenus pour l'ensemble des corps vertébraux et ceux calculés uniquement sur les étages cervico-thoracique et

thoraco-lombaire. Par le même phénomène que celui apparu au moment de l'étude des points d'inflexion, une légère irrégularité dans l'allure de la pile peut entraîner l'ajustement d'un polynôme dont la courbure va varier localement. C'est le cas de certains polynômes calculés sur un segment thoraco-lombaire ou cervico-thoracique qui permettent un ajustement très détaillé, mais qui entraînent une mauvaise description par rapport à l'allure générale du profil. En revanche ce type d'ajustement permet de mettre en évidence ou de bien localiser des extrema de courbure qui passent inaperçus ou sont localisés avec peu de précision à partir du polynôme calculé sur la totalité des corps vertébraux.

Le cas de l'individu 459 illustre bien ce phénomène. Les points du profil cervico-thoracique se situent tous à moins de 3 mm de l'axe C3-T6 sur lequel est aligné la pile. De C7 à T3 les points se trouvent sous l'axe tandis que les extrémités du profil se situent au dessus de l'axe. Cette irrégularité est suffisante pour que le polynôme ajusté décrive une courbure brutalement inversée avec passage par un maximum au niveau de T2 qui prend une valeur $C = + 3.5 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. L'ajustement d'un polynôme sur l'ensemble des corps vertébraux de C3 à L5 est en revanche moins sensible à cette irrégularité et la courbure reste dans des valeurs positives très faibles qui correspondent à la fin d'une lordose cervicale peu marquée. C est en effet égal à $0.69 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ au plateau supérieur de T2 et change de signe en T3. Le maximum de courbure qui avait été observé tout d'abord en T2 est donc clairement exempt de valeur descriptive et la régression calculée sur l'ensemble du rachis doit être préférée.

L'observation des tracés des ajustements et de la fonction de courbure $C = f(x)$ permet donc d'isoler, comme dans le cas des points d'inflexion, les maxima de courbure significatifs. Plusieurs considérations générales peuvent alors être dégagées de l'échantillon quant à la présence et aux valeurs des extrema de courbure qui permettront de décrire le profil.

(2) Description:

Aucun des extrema de courbure se situant au niveau cervico-thoracique ne correspond à une valeur positive, c'est à dire qu'aucune lordose cervicale ne peut être caractérisée par un tel point.

Un maximum de courbure est présent au niveau cervico-thoracique chez 69 % des individus masculins où il peut se situer entre la cinquième vertèbre cervicale et la quatrième vertèbre thoracique; et chez 40 % des individus féminins avec une localisation allant de la septième vertèbre cervicale à la quatrième vertèbre thoracique. La position de ces extrema de courbure, traduite en abscisse curviligne relative (c'est-à-dire en pourcentage de la longueur développée totale du profil) correspond à des positions extrêmes de 71 et 91 % pour le groupe masculin et de 70 et 87 % pour le groupe féminin.

Les abscisses curvilignes au niveau cervico-thoracique pour l'ensemble des individus ont une distribution dont la normalité ne peut être rejetée. Le test de Kolmogorov-Smirnov donne en effet une probabilité supérieure à 0.2 et les résidus suivent la droite théorique correspondant à la distribution normale. Les limites de confiance de la moyenne et de tolérance peuvent donc être calculées. Elles apparaissent très semblables pour les deux sexes: les différences entre les groupes masculin et féminin sont inférieures à 11.6 % de la longueur développée. Par ailleurs, bien qu'une différence significative des variances ne puisse être mise en évidence, on peut noter que la variabilité des femmes pour cette donnée (intervalle de tolérance pour $\alpha = 0.05$: 54 à 100 %), contient celle des hommes (65 à 96 %). Pour l'ensemble des individus, les maxima de courbure observés se situent en moyenne à 81 % de la longueur curviligne (intervalle de confiance pour $\alpha = 0.05$: 78 %-84 %), et au niveau de ces maxima, la courbure moyenne est de $-6.2 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$, là encore sans différence significative entre hommes et femmes (respectivement $-6.1 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ et $-6.5 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$; $p > 0.5$).

Au niveau thoraco-lombaire, 12 individus masculins, soit 86 % des sujets de ce sexe, présentent un extremum de courbure. Celui-ci peut se situer sur presque tout l'étage considéré, de T7 à L1, et correspond toujours à une courbure négative, c'est-à-dire à une cyphose. Parmi les sujets de sexe féminin, quatre (40 %) présentent aussi un extremum de courbure sur la cyphose, situé entre T9 et

T12. Si l'on considère la localisation de ces extrema, on constate qu'elle ne diffère pas significativement entre les sexes ($p = 0.3$): les extrema sont situés en moyenne à 38 % de la longueur curviligne chez les hommes et à 43 % chez les femmes. Il en est de même pour la valeur des courbures aux extrema ($p > 0.5$), dont les intervalles de confiance des moyennes ne diffèrent pas de plus de six dixièmes entre hommes et femmes, la valeur moyenne de l'ensemble étant de $-4.1 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$.

Par ailleurs, quatre individus de sexe féminin possèdent un extremum au niveau de la lordose lombaire, c'est à dire une courbure maximale positive dont la localisation s'étend entre les segments L2 et L5 inclus. Leur position moyenne est de 11.3 %, avec des localisations extrêmes à 2 et 23 %. La courbure correspondante est en moyenne de $+4.8 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ mais avec une forte variation des valeurs, de +1 à $+10 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$, et une estimation de la limite supérieure de l'intervalle de tolérance égale à $+18.5 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ ($\alpha = 0.05$). Il existe en effet une différence significative des variances ($p < 0.001$) si l'on compare la dispersion des valeurs des courbures lordotiques (situées aux maxima de courbure) trouvées chez les sujets féminins et celle des courbures cyphotiques de l'ensemble des sujets au niveau thoraco-lombaire. En revanche, il n'existe pas de différence significative entre les moyennes ($p > 0.5$), abstraction faite du signe de la courbure. Autrement dit, les courbures déterminées sur les lordoses lombaires sont, au niveau de leur maximum (s'il existe), identiques en moyenne aux courbures des cyphoses à leur maximum, mais elles sont plus variables.

Au delà de la division méthodologique qui a été réalisée entre un "étage" cervico-thoracique et un étage thoraco-lombaire, une vision d'ensemble permet de constater que 7 individus (30 %) présentent deux extrema de courbure sur leur cyphose. Ces sept individus sont tous masculins (soit 54 % de ce groupe) et pour chacun, un des extrema se trouve au niveau cervico-thoracique entre C7 et T3, et l'autre au niveau thoraco-lombaire¹ entre T10 et L1. Les extrema se répartissent donc chez ces individus de part et d'autre d'une zone thoracique moyenne où aucun maximum n'est présent. Quant aux individus restants qui possèdent un seul extremum (6 hommes et 8 femmes), celui-ci peut se situer chez eux sur presque toute la colonne cervico-thoracique: de C5 à T12. Les intervalles de tolérance estimés de la population ($\alpha = 0.05$) permettent d'exprimer cette variabilité dans la localisation des extrema. On détermine ainsi à partir des sujets possédant deux maxima dans la courbure cyphotique une fourchette allant de 65 à 94 % pour l'abscisse curviligne relative de l'extremum cervico-thoracique, et de 17 à 51 % au niveau thoraco-lombaire. Si un seul extremum est présent, celui-ci ne possède pas de localisation privilégiée sur la colonne vertébrale, pouvant se situer statistiquement entre 13 et 100 % de sa longueur curviligne. Il existe en effet une différence nettement significative quant à la variabilité de localisation de ces extrema. Celle-ci apparaît si sont comparées les variances de cette mesure en opposant d'une part les extrema cervico-thoraciques correspondant à une paire d'extrema et les extrema uniques (Test de Fisher de comparaison des variances: $p = 0.001$), et d'autre part les extrema thoraco-lombaires et les extrema uniques ($p = 0.003$). Une comparaison analogue des moyennes montre le même type de différences significatives: les extrema appartenant à des paires d'extrema, qu'ils aient une localisation cervico-thoracique (intervalle de confiance de la moyenne: 74 à 84 %) ou thoraco-lombaire (28 à 40 %), ont une abscisse curviligne relative significativement différente de celle des extrema uniques (Probabilité du test de Student: respectivement, $p = 0.006$ et $p = 6.10^{-4}$). Les extrema uniques se situent donc à une position moyenne intermédiaire (intervalle de confiance de la moyenne: 48 à 73 %).

¹ Cette répartition des extrema n'est pas un artefact lié à la division entre étages cervico-thoracique et thoraco-lombaire. La validité de ces points peut être contrôlée par l'observation des graphes représentant la valeur de la courbure selon la hauteur de la pile et de ceux représentant les courbes d'ajustement C3-T6 et T7-L5, mais surtout C3-L5. La différence de répartition entre les extrema uniques et ceux qui vont par paire est d'autre part un argument décisif pour rejeter tout doute à l'égard de la division effectuée.

La mesure de la courbure elle-même, au niveau de l'extremum de courbure, est en revanche indépendante du type de configuration du profil, sans variation significative de sa valeur moyenne, qu'il s'agisse d'un polynôme comprenant deux extrema de courbure ou un seul. Dans le premier cas, cette valeur moyenne au niveau cervico-thoracique est de $-5.3 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ avec un intervalle de confiance ($\alpha = 0.05$) de -3.1 à $-7.4 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. Elle est au niveau thoraco-lombaire de $-4.1 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$, comprise à 95 % de sûreté entre -3 et $-5.2 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. Il n'y a donc pas de différence significative entre les courbures des maxima cervico-thoraciques et celles des maxima thoraco-lombaires, et cette similitude est confirmée, non seulement pour les valeurs moyennes générales, mais aussi pour chaque individu. La différence entre les courbures aux extrema cervico-thoracique et thoraco-lombaire d'un même individu est en effet toujours très faible. Si l'on excepte le seul cas d'un sujet où elle atteint $4 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$, cette différence est en moyenne de $0.7 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$, avec des valeurs extrême de 0.03 et $1.8 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. Par ailleurs, l'existence de deux extrema ne modifie pas significativement la courbure au niveau de l'extremum. En effet, si l'on s'intéresse à l'ensemble des individus qui ne présentent qu'un seul maximum de courbure, on trouve pour celui-ci une valeur moyenne de $-5.7 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$,

<i>individus</i>	<i>étage</i>	<i>mesure</i>	<i>sexe</i>	<i>n</i>	<i>f</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>i. confiance</i>		<i>i. tolérance</i>	
								<i>L.inf.</i>	<i>L.sup.</i>	<i>L.inf.</i>	<i>L.sup.</i>
	C-T	<i>localisation</i>	M	9	69%	80.7	6.4	75.7	85.6	65.0	96.4
			F	4	40%	80.4	7.3	68.8	92.0	54.5	100.0
				13	57%	80.6	6.4	76.7	84.5	66.1	95.1
		<i>courbure</i>	M	9	69%	-6.1	2.6	-8.1	-4.1	-12.4	0.0
			F	4	40%	-6.5	4.6	-13.8	0.0	-22.7	0.0
				13	57%	-6.2	3.1	-8.1	-4.3	-13.3	0.0
	T-L	<i>localisation</i>	M	11	85%	37.9	10.3	31.0	44.8	14.0	61.9
			F	4	40%	43.2	7.0	32.1	54.4	18.3	68.2
			F (<i>L.</i>)	4	40%	11.3 ^o	10.3	0.0	27.6	0.0	47.8
		<i>courbure</i>	M	15	65%	39.3 ^o	9.6	34.0	44.6	18.1	60.6
			F	12	86%	-4.2	1.3	-5.0	-3.4	-7.2	-1.2
			F (<i>L.</i>)	4	40%	-4.0	0.8	-5.3	-2.8	-6.8	-1.2
	F (<i>L.</i>)	4	40%	4.8	3.8 ^a	0.0	11.0	0.0	18.5		
			16	67%	-4.2	1.2 ^a	-4.8	-3.5	-6.8	-1.5	
<i>possédant deux extrema</i>	C-T	<i>localisation</i>	M	7	54%	79.3 ²	5.4 ¹²	74.3	84.4	65.1	93.6
		<i>courbure</i>	M	7	54%	34.0	6.4	28.1	39.8	17.3	50.6
	T-L	<i>localisation</i>	M	7	54%	-5.3 ³	2.4 ¹³	-7.5	-3.1	-11.4	0.0
		<i>courbure</i>	M	7	54%	-4.1	1.2 ^{*~}	-5.2	-3.0	-7.1	-1.1
<i>possédant un seul extremum</i>		<i>localisation</i>		14	61%	60.3 ²³	21.3 ²³	48.0	72.7	12.6	100.0
		<i>courbure</i>		14	61%	-5.7	2.8 [~]	-7.3	-4.0	-12.0	0.0

Tableau 10

Localisation et valeur des maxima de courbure (rayon de courbure minimal) des profils réalisés à partir des piles de corps vertébraux. **C-T**, étage cervico-thoracique; **T-L**, étage thoraco-lombaire; **M**, masculin; **F**, féminin; (*L.*), extrema de courbure situés au niveau d'une lordose (sinon d'une cyphoses); *n*, effectif; *f*, fréquence; *m*, moyenne; *s*, écart-type. Sont donnés l'intervalle de confiance de la moyenne et l'intervalle de tolérance estimé de la population. La localisation est exprimée en pourcentage de la longueur curviligne du profil, et la courbure à l'extremum est exprimée en 10^{-3}mm^{-1} . L'absence de mention sous-entend qu'aucun critère de choix n'a été appliqué pour la catégorie considérée: par exemple, l'absence de spécification du sexe signifie que les individus ont été traités indépendamment du sexe. Les exposants ^{a,*}, ^o, ^{1,2,3} et [~], indiquent parmi les paramètres moyenne et écart-type (donc variance) les paires de valeurs significativement différentes. Ces exposants sont repris dans le tableau 11.

<i>e.</i>	<i>données</i>	<i>groupe 1</i>	<i>groupe 2</i>	<i>P</i>	<i>n1</i>	<i>n2</i>	<i>p</i>	<i>sens</i>
0	<i>position des extrema thoraco-lombaires</i>	<i>au niveau d'une lordose (tous sujets féminins)</i>	<i>au niveau d'une cyphose (ensemble des individus)</i>	<i>m</i>	4	15	< 0.001	<i>m1 < m2</i>
a	<i>courbures aux extrema thoraco-lombaires</i>	<i>au niveau d'une lordose (tous sujets féminins)</i>	<i>au niveau d'une cyphose (ensemble des individus)</i>	<i>s²</i>	4	16	< 0.001	<i>s1 > s2</i>
1	<i>position des extrema paires (tous sujets masculins)</i>	<i>au niveau cervico-thoracique</i>	<i>au niveau thoraco-lombaire</i>	<i>s²</i>	7	7	< 0.001	<i>s1 < s2</i>
2	<i>position des extrema</i>	<i>extrema uniques quelle que soit leur position (ensemble des sujets)</i>	<i>extrema paires cervico-thoraciques (tous sujets masculins)</i>	<i>s²</i>	14	7	0.002	<i>s1 > s2</i>
3			<i>extrema paires thoraco-lombaires (tous sujets masculins)</i>	<i>m</i>	14	7	0.006	<i>m1 > m2</i>
			<i>extrema paires thoraco-lombaires (tous sujets masculins)</i>	<i>s²</i>	14	7	0.004	<i>s1 > s2</i>
			<i>extrema paires thoraco-lombaires (tous sujets masculins)</i>	<i>m</i>	14	7	< 0.001	<i>m1 < m2</i>
*	<i>courbure aux extrema</i>	<i>extrema paires au niveau thoraco-lombaire (tous sujets masculins)</i>	<i>au niveau d'une lordose (tous sujets féminins)</i>	<i>s²</i>	7	4	0.008	<i>s1 < s2</i>
~			<i>extrema uniques quelle que soit leur position (ensemble des sujets)</i>	<i>s²</i>	7	14	0.02	<i>s1 < s2</i>

Tableau 11

Différences significatives dans les tests d'égalité des variances (Fisher) ou des moyennes (Student) réalisés sur les mesures de localisation (pourcentage de la longueur curviligne du profil) et de courbure (en 10^{-3}mm^{-1}) des extrema de courbures. *e.*, exposant indiquant dans le tableau 10 les paires de valeurs différentes; *données*, type de données comparées; *groupe 1* et *2*, définition des deux groupes comparés; *P*, paramètres significativement différents: *m*, moyennes et *s²*, variances; *n1* et *n2*, effectifs de chaque groupe; *p*, erreur de première espèce; *sens*, sens de l'inégalité entre les paramètres *s²* ou *m*.

comprise dans l'intervalle de confiance -4 à $-7.3 \cdot 10^{-3}\text{mm}^{-1}$ ($\alpha = 0.05$), fourchette qui recoupe très largement celle des extrema présents par paires. Ces valeurs apparaissent pourtant assez dispersées, l'intervalle de tolérance ayant une amplitude de $11.4 \cdot 10^{-3}\text{mm}^{-1}$ et $12 \cdot 10^{-3}\text{mm}^{-1}$ pour les extrema cervico-thoraciques et les extrema uniques (respectivement). Elle est cependant de $7 \cdot 10^{-3}\text{mm}^{-1}$ seulement pour les extrema thoraco-lombaires qui montrent une plus faible dispersion avec une variance significativement différente de celle des extrema uniques ($p = 0.02$). Cette variabilité restreinte des courbures impliquées par la morphologie des corps vertébraux au niveau des maxima de courbure thoraco-lombaires pourrait être mise en relation avec les contraintes fonctionnelles auxquelles ceux-ci sont soumis à l'étage lombaire.

Les tableaux 10 et 11 reprennent l'ensemble de ces données et des différences significatives qu'elles permettent de dégager.

En résumé, on peut relever plusieurs conclusions générales quant à la localisation et à la valeur des maxima de courbure qui sont impliqués, dans le dessin du profil, par la seule morphologie des corps vertébraux:

1. Les lordoses cervicales ne possèdent pas d'extremum de courbure.
2. Il n'existe pas de différence sexuelle quant à la localisation des extrema sur les cyphoses et à la valeur de leur courbure quand sont confrontés les extrema cervico-thoraciques et thoraco-lombaires.
3. Il existe une différence sexuelle quant au nombre et à la nature des maxima de courbure car d'une part:
 - a) aucune femme ne possède plus d'un extremum au niveau de la cyphose,
 - b) quand deux extrema sont présents chez un individu, ils se situent de part et d'autre de la zone thoracique moyenne, à une position significativement différente de celle des extrema uniques dont la position moyenne est intermédiaire mais très variable,
 - c) seuls les individus féminins possèdent un maximum de courbure au niveau de la lordose lombaire.

D'autre part:

- d) les courbures aux extrema au niveau des lordoses lombaires sont plus variables que celles des extrema au niveau des cyphoses,
- e) la valeur de la courbure n'est pas significativement différente selon la localisation et le type d'extremum,
- f) les courbures de deux extrema de cyphose appartenant à un même individu ont une valeur semblable.

E. Présence et localisation des différents points remarquables:

(1) Résultats:

Les points remarquables que sont les extrema de la courbe, les points d'inflexion et les maxima de courbure donnent donc une description objective et exacte du profil dessiné par l'empilement des corps vertébraux. La situation de ces points sur la courbe et les valeurs de certaines mesures caractéristiques comme les flèches aux extrema et les courbures à leur maximum permettent d'apprécier en grande partie la variabilité des profils, mais c'est finalement la possibilité de déterminer comment ces différents types de points se présentent sur une même courbe et quelles sont leurs positions relatives qui donnera une description complète des profils et de leurs schémas possibles. Une représentation synoptique de tous les polynômes caractérisés par leurs points remarquables en donne un bon aperçu en permettant de visualiser les tendances déjà notées quant à la position des points remarquables, mais surtout de noter quelles sont les relations existant entre ces derniers chez un même sujet. Deux types de représentations des données, par simple juxtaposition des individus ou en graphique circulaire, mettent en évidence des tendances différentes quant à la localisation des points (figures 33 *a.* et *b.*).

Le plus frappant dans ces représentations est la stabilité de l'extremum de la courbe chez les hommes autour de la limite T6-T7, correspondant à une position égale environ à la moitié de la hauteur du profil des corps vertébraux, et ceci comparativement à la dispersion notable de ce même point au niveau de la courbure cyphotique chez les femmes. Il peut dans ce dernier groupe appartenir aussi bien à l'étage thoracique haut (T1-T6) qu'à l'étage thoracique bas (T7-T12), et même à l'étage cervical pour un sujet (C6). Exprimée en fonction de la longueur curviligne du profil, l'extremum est en effet significativement plus haut en moyenne et sa position est plus variable dans le sexe féminin: $p < 0.001$ pour la comparaison des variances et $p = 0.002$ pour la comparaison des moyennes.

La variation du sommet de la cyphose semble suivre celle du point d'inflexion thoraco-lombaire, avec une distance entre eux qui varie faiblement: l'écart qui sépare le sommet de la cyphose et le début de la lordose lombaire est en moyenne² de 42 % pour les hommes ($s = 5.3$). Significativement plus faible ($p \ll 0.001$), la moyenne de cet écart dans le groupe féminin est de 29.6 % ($s = 5$). Cette différence montrant que l'extremum et le point d'inflexion sont plus rapprochés chez les femmes peut être mise en relation avec la position du point d'inflexion thoraco-lombaire dans ce groupe (Cf. **4.1.3. C.** (4) Points d'inflexion au niveau thoraco-lombaire, p. 141). Il a été noté en effet que la situation du point d'inflexion, à une moyenne de 36.2 % ($s = 14.7$) chez les femmes contre 14 % ($s = 3.5$) chez les hommes, est significativement plus variable et plus haute dans le premier groupe ($p < 0.001$ pour le test des variances et $p = 0.001$ pour le test des moyennes).

Les trois seuls cas de points d'inflexion déterminant une lordose cervicale ont une localisation elle-même cervicale, et correspondent à l'emplacement exact de la jonction anatomique cervico-thoracique (C7) dans deux cas (un de chaque sexe). La position moyenne est de 88.8 %. Il existe pour ces trois cas une courbure maximale thoracique située précisément à quatre segments sous le point d'inflexion, soit une distance moyenne de 28.3 %.

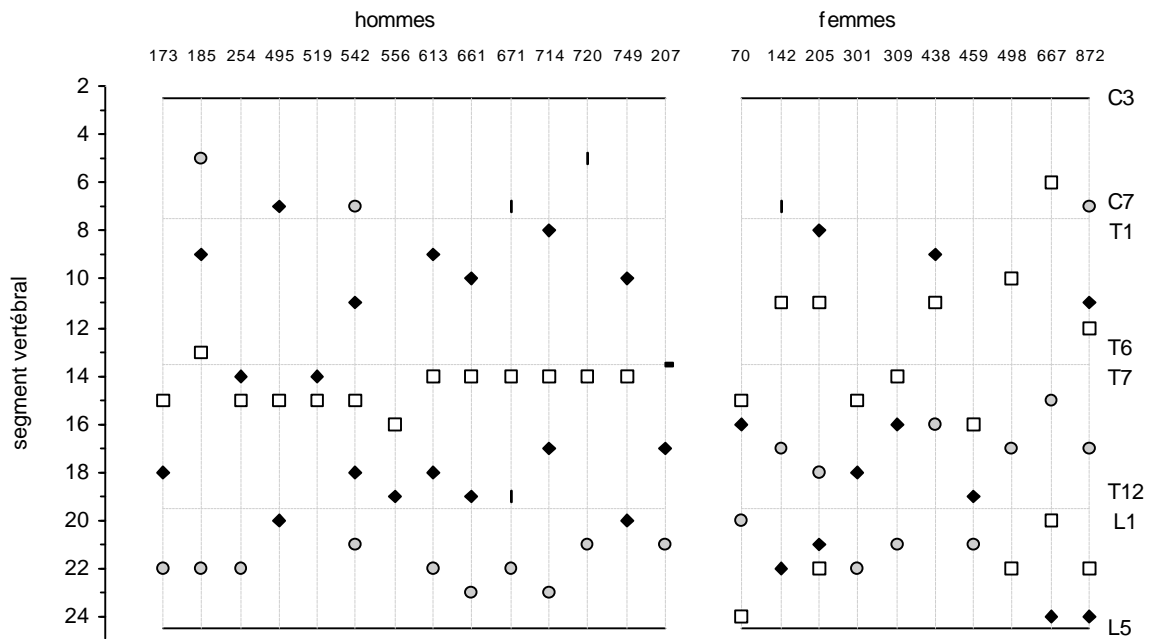
La présence et la position des maxima de courbure semble quant à elle assez indépendante des autres types de points. Parmi les six individus de sexe masculin qui ne présentent qu'un seul maximum de courbure, celui-ci se situe au dessus de l'extremum de la cyphose pour quatre d'entre eux, à une distance moyenne de 4 segments (soit 14.2 % de la longueur curviligne), qui peut aller de 1 à 9 segments. La courbure maximale est située à 3 segments sous l'extremum chez les deux individus restants (15.8 %).

Par ailleurs, les 7 autres individus de ce sexe présentent deux maxima de courbure qui entourent l'extremum. Pour ces cas, le maximum sous-jacent est à 4 segments en moyenne de l'extremum (variation: 3 à 6) , et celui situé au dessus de l'extremum en est distant de 5 segments en moyenne (variation: 4 à 8). Exprimées en pourcentage de la longueur curviligne ces distances sont, pour les points situés en dessous de l'extremum, de 21 % en moyenne, avec un intervalle de tolérance compris entre 5.7 et 36.3 % ($\alpha = 0.05$). Pour les maxima de courbure situés au dessus de l'extremum elles sont de 24.3 % en moyenne, avec un intervalle de tolérance compris entre 9.4 et 39.3 %. Il n'existe pas de différence significative entre ces distances moyennes ($p = 0.28$), et les deux maxima de courbure sont pour chaque individu, équidistants de l'extremum à trois segments près. Quand deux maxima de courbure sont présents, ils sont donc situés environ à la même distance de l'extremum de la cyphose.

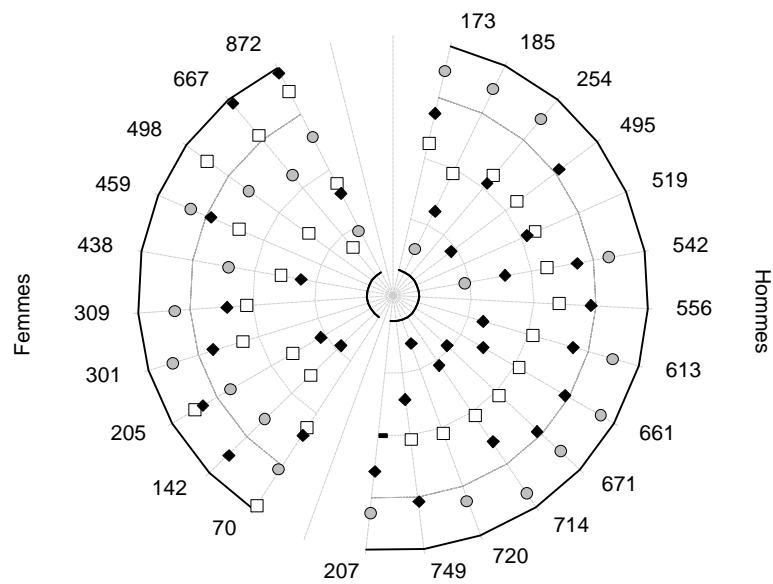
Dans le sexe féminin, 2 individus ne possèdent pas de maximum de courbure, et tous les autres n'en possèdent qu'un seul. Il se situe au dessus de l'extremum chez 4 sujets, à une distance de 1 à 4 segments, et de 2 segments en moyenne. En abscisses curvilignes la position moyenne est égale à 10.4 % de la longueur et les valeurs observées sont comprises entre 1 et 17.6 %. Chez les 4 autres individus, le maximum de courbure se place de 1 à 3 segments sous l'extremum, et en moyenne à 2 segments, correspondant à 9.6 % de la longueur totale. Les limites observées sont 6.1 et 13.3 %.

Un maximum de courbure est par ailleurs noté au niveau de la lordose lombaire chez quatre individus féminins. La position de ce point semble indépendante de celle de l'extremum (c'est-à-dire du sommet) de la lordose, avec une distance de 1, de 2, ou de 4 segments, l'extremum étant sous le maximum de courbure dans le premier cas. Cette variation est importante si on la considère relativement à la faible longueur de la lordose: en pourcentage de celle-ci, l'écart entre l'extremum et le maximum de courbure est, respectivement, de -22, +30 et +44 %. La variation est plus grande encore si l'on situe le maximum de courbure par rapport au point d'inflexion qui détermine la lordose lombaire. Il en est éloigné de 3, 7 ou 9 segments, correspondant aux valeurs extrêmes de 46 et 96 % de la longueur développée de la lordose.

²Les paramètres de moyenne et de variance sont calculés sur les différences entre les positions des points exprimées en pourcentage de la longueur curviligne (c'est-à-dire développée) du profil.



a.



b.

Figure 33

Représentation schématique des profils constitués par l'empilement des corps vertébraux, et caractérisés par leurs points remarquables. En abscisse, le numéro d'individu. □, extremum de la courbe; ●, point d'inflexion; ◆, maximum de courbure (rayon de courbure minimal). a., situation des points remarquables sur chaque profil et selon les segments vertébraux où ils se situent. Les trois divisions (— —) séparent les étages vertébraux, et distinguent les moitiés cervico-thoracique et thoraco-lombaire. b., représentation circulaire, segments craniaux vers le centre, mêmes divisions des étages qu'en a.. Nota: seul le profil thoraco-lombaire peut être étudié pour le sujet n° 207.

Quant à l'extremum sur la lordose lombaire (sommet de la lordose), il est présent chez 5 individus féminins et semble en revanche à une position assez stable par rapport au point d'inflexion: à 5 ± 1 segments de celui-ci, soit en moyenne 6.6 % de la longueur *totale* du profil (intervalle de confiance: 5 à 8 %). L'expression de cette distance proportionnellement à la longueur *de la lordose* montre pourtant une forte variabilité, avec des valeurs minimale et maximale de 50 et 88 %.

Le sommet de la lordose lombaire a donc une position assez constante relativement à l'inflexion thoraco-lombaire, mais sa situation absolue sur la lordose est variable. La position de ce point semble donc contrainte par celle de l'inflexion thoraco-lombaire plus que par d'autres types de facteurs (les plus évidents étant des facteurs mécaniques) qui seraient liées à sa localisation exacte sur la lordose, en un ou plusieurs segments particuliers.

Par ailleurs, si aucune contrainte imposée par la localisation d'un autre point remarquable ne semble déterminer celle du maximum de courbure sur la lordose, il existe en revanche une relation entre la *présence d'un maximum de courbure* et la *localisation du point d'inflexion*, ce dernier étant toujours situé à l'étage thoracique lorsqu'il existe sur le profil une courbure maximale.

Cette relation est cohérente avec l'absence de maximum de courbure dans le groupe masculin où toutes les lordoses commencent à l'étage lombaire. Une relation du même ordre avait précédemment été relevée pour l'extremum de la cyphose thoracique dont la position apparaissait dépendante de celle du point d'inflexion thoraco-lombaire. Ce type de relation est encore trouvé pour l'extremum de la lordose, ainsi que pour le maximum de courbure qui montre une liaison entre sa *présence* et la localisation thoracique du début de la lordose.

Afin de tester statistiquement ces relations deux tableaux de contingence peuvent être bâtis qui opposent localisation thoracique ou lombaire du point d'inflexion et présence ou absence, d'une part, d'un maximum de courbure sur la lordose lombaire, d'autre part d'un extremum (sommet) sur la lordose (tableau 12). Les calculs laborieux du test de Fisher qui permettent de déduire la probabilité exacte d'obtenir au hasard les distributions d'effectifs observées ont été programmés (FISHER, 1958 ; DAGNELIE, 1975 ; ZAR, 1984). Ils rejettent l'hypothèse nulle pour le maximum de courbure ($p = 0.003$) et pour l'extremum ($p = 0.01$), avec une répartition des fréquences absolues qui confirment donc les relations :

- 1/ présence d'un maximum de courbure sur la lordose lombaire — localisation thoracique de l'inflexion marquant le début de cette lordose;
- 2/ présence d'un sommet sur la lordose lombaire — localisation thoracique de l'inflexion marquant le début de cette lordose.

		<i>point d'inflexion</i>		
		T	L	
<i>maximum de courbure sur la lordose lombaire</i>	P	4	0	$\Sigma = 21$
	A	2	15	$p = 0.003$

a.

		<i>point d'inflexion</i>		
		T	L	
<i>sommet sur la lordose lombaire</i>	P	4	1	$\Sigma = 21$
	A	2	14	$p = 0.011$

b.

Tableau 12

Tableaux de contingence pour le test des probabilités exactes de Fisher. Liaison entre la position du point d'inflexion et : a., la présence d'un maximum de courbure sur la lordose lombaire ; b., la présence d'un sommet de courbure (extremum) sur la lordose lombaire. T et L, localisations thoracique ou lombaire ; P et A, présence ou absence du point remarquable. Sont donnés : les fréquences absolues pour chaque cas, l'effectif total testé (Σ) et la probabilité exacte p d'obtenir un tableau au moins aussi hétérogène par tirage au sort.

(2) Discussion:

Chaque corps vertébral, par sa morphologie, contribue à la détermination des courbures sagittales. La variabilité de ces dernières est donc non seulement déterminée mais aussi limitée par celle des segments. En contrepartie, la variation morphologique de l'ensemble doit être maintenue dans un domaine permettant l'intégrité des structures anatomiques environnantes et donc celle de la colonne elle-même. Des limitations sont donc imposées dans ce sens aussi à la variation des éléments constitutifs que sont les corps vertébraux. Toute morphologie du corps vertébral n'est pas compatible avec les contraintes mécaniques de la colonne, même si une compensation réalisée au niveau d'autres segments est susceptible de laisser la morphologie de l'ensemble invariante.

La lordose lombaire plus accentuée des femmes se traduit en partie par une position haute du point d'inflexion. La cyphose sus-jacente s'étend donc sur un nombre restreint de segments et la contribution de chacun d'eux devrait être supérieure pour obtenir une même convexité générale. Or la cyphose lombaire n'est pas équivalente dans les deux sexes: la valeur de la flèche maximale est plus faible chez les femmes, et la situation du sommet est aussi plus craniale dans ce groupe. En contre partie, la distance entre point d'inflexion thoraco-lombaire et extremum de la cyphose est très significativement plus faible chez les sujets féminins. Sur la base des données du groupe masculin, le sommet de la cyphose dans le groupe féminin apparaît donc "moins haut" qu'il ne devrait être (le raisonnement inverse étant équivalent).

La variation morphologique des corps vertébraux lombaires est donc liée à une modification de la configuration des étages thoracique et cervical. Cette modification est toutefois limitée et semble permettre une compensation partielle ou un ajustement réciproque des deux parties de la colonne vertébrale. Un déplacement du point d'inflexion en direction craniale correspond à une diminution de la cyphose, mais le déplacement de son sommet reste limité. Une étude des variations morphologiques ne donne pas une information directe sur les modifications que ces variations entraînent dans les contraintes mécaniques mises en jeu. Cependant, il est possible d'entrevoir comment le maintien de ces contraintes à un niveau tel qu'elles préservent l'ensemble rachidien du développement de processus pathologiques, limite les possibilités de variation des éléments constitutifs.

Une augmentation de la contribution de chaque corps vertébral qui soit suffisante pour retrouver avec un plus petit nombre de segments une courbure cyphotique équivalente entraîne nécessairement une augmentation de l'angle antérieur entre plateau supérieur et inférieur de chaque segment (cunéiformisation). Des modélisations du comportent rachidien montrent qu'une variation minime dans la composition de la pile des quadrilatères est susceptible de modifier fortement l'énergie nécessaire pour maintenir le système en équilibre (GRACOVETSKY, 1990). Une énergie plus importante doit donc être mise en jeu par les éléments de contention musculaires et ligamenteux pour maintenir le système en équilibre et empêcher particulièrement le déplacement des segments en direction postérieure: spondylolisthesis. La diminution de l'expression de la cyphose, corrélative d'une position craniale du point d'inflexion s'intègre parfaitement dans ce schéma. Par ailleurs, l'extremum de la cyphose ne peut pas être trop haut: d'une part pour permettre le développement de la cyphose cervicale *physiologique* et d'autre part à cause de sa participation à la paroi postérieure de la cage thoracique.

La configuration des profils sagittaux impliqués par la seule morphologie des corps vertébraux semble montrer comment la variabilité de ces derniers reste limitée par la nécessité de maintenir la stabilité rachidienne (BONNEL et MOREL, 1990 ; PRIVAT *et al.*, 1990 ; TROISIER, 1992 ; PANJABI *et al.*, 1995 ; ROY-CAMILLE, 1994 ; SAILLANT *et al.*, 1994 ; HANDAL et SELBY, 1995 ; STOKES, 1995 ; HUSSON *et al.*, 1995 ; LAVASTE et ROBIN, 1995) et illustre l'équilibre existant entre la morphologie de l'ensemble, celle de ses constituants, et les contraintes auxquelles elles doivent répondre.

F. Comparaison générale des courbures:

La présence et l'emplacement des différents points remarquables montrent une variabilité importante des schémas des profils basés sur la morphologie des corps vertébraux. La réduction de ces profils à des valeurs moyennes qui permettent la comparaison est donc délicate, tout comme les conclusions qui peuvent en être tirées sur la forme générale d'un ou plusieurs étages vertébraux. La situation variable du point d'inflexion lombaire est la principale contrainte à ce type d'analyse, puisqu'un même segment vertébral pourra correspondre à des convexités inverses (courbures de signes opposés) pour différents individus. En s'intéressant indépendamment aux valeurs des lordoses et à celles des cyphoses, il est toutefois possible d'en donner une description d'ensemble.

(1) Lordoses lombaires:

Pour chaque segment de chaque individu ont été calculées les valeurs des rayons de courbure (R_c) et des courbures ($C = 1000 / R_c$). Les valeurs positives au niveau thoracique bas et à l'étage lombaire correspondent aux lordoses lombaires. Elles montrent en moyenne une diminution progressive de la courbure depuis le plateau inférieur de L5 et, en direction craniale, vers le point d'inflexion (figure 35 a.). Chez l'ensemble des individus, la valeur moyenne maximale se situe donc au niveau du plateau inférieur de L5, extrémité caudale de la pile, où la courbure atteint environ $6 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ mais où elle est affectée d'une variabilité assez forte, et telle que les sujets de la population (estimée) les plus éloignés de la moyenne pourraient avoir en ce point une courbure nulle ou supérieure à $12 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. Les individus masculins ne présentent plus de courbure lordotique en L2.

Il existe pour l'ensemble de la lordose de nettes différences sexuelles confirmant celles relevées dans l'étude des points remarquables. L'allure dans les deux sexes correspond à celle notée pour l'ensemble des sujets et sa courbure la plus forte est située au niveau du point correspondant au plateau inférieur de L5, mais celle-ci est en moyenne de $5 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ chez les hommes, et de $7 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ chez les femmes.

La différence entre les deux sexes se maintient donc à peu près constante (figure 35 b.) puisque la valeur de courbure chute ensuite d'environ $2 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ pour chaque segment, puis se stabilise dans l'échantillon féminin à partir de L2, segment pour lequel aucun individu masculin ne présente plus de courbure lordotique. Par ailleurs, bien que les intervalles de confiance des moyennes pour chaque sexe se chevauchent toujours au niveau d'un même segment (figure 34 a. & b.), le test de Student, qui est plus puissant qu'une simple comparaison des intervalles, révèle des différences significatives en L4 et en L3 (au plateau supérieur), avec un rejet de l'hypothèse d'égalité à $p = 0.02$ dans les deux cas. On note aussi qu'en L3, la variance apparaît significativement plus faible dans le sexe masculin ($p = 0.03$).

La lordose lombaire est donc plus étendue dans le sexe féminin et, au niveau d'un même segment vertébral, sa courbure moyenne est toujours plus forte, cette différence devenant significative au dessus du segment L4.

(2) Cyphoses:

Les valeurs moyennes des courbures négatives de l'échantillon (seulement les courbures négatives) permettent d'apprécier de façon générale l'évolution des cyphoses selon le segment considéré. Au niveau des étages thoracique et cervical, elles présentent, pour l'ensemble des sujets (figure 37 a.), une courbure maximale (en valeur absolue) située à proximité du segment T3 et atteignant une valeur d'environ $-4 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$.

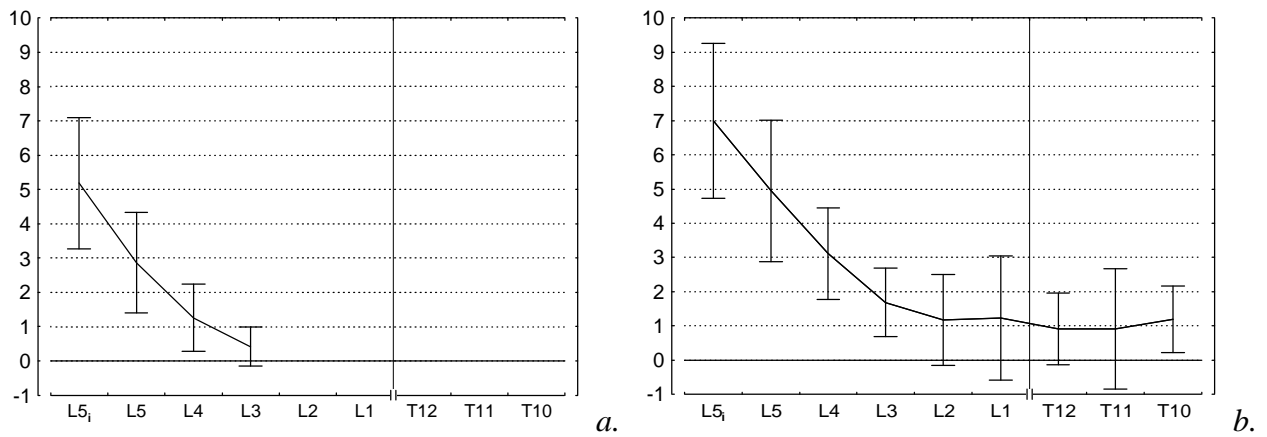


Figure 34

Valeurs des courbures ($C = 1000 / R_c$) des lordoses lombaires déterminées par l'empilement des corps vertébraux, depuis le plateau vertébral inférieur de L5 (L5_i) jusqu'au plateau vertébral supérieur de T10 (T10). *a.*, échantillon masculin; *b.*, échantillon féminin. Valeur moyenne au niveau de chaque segment entourée de son intervalle de confiance ($\alpha = 0.05$). *Nota:* les points L5 et L4_i sont confondus, et de même pour tous les points.

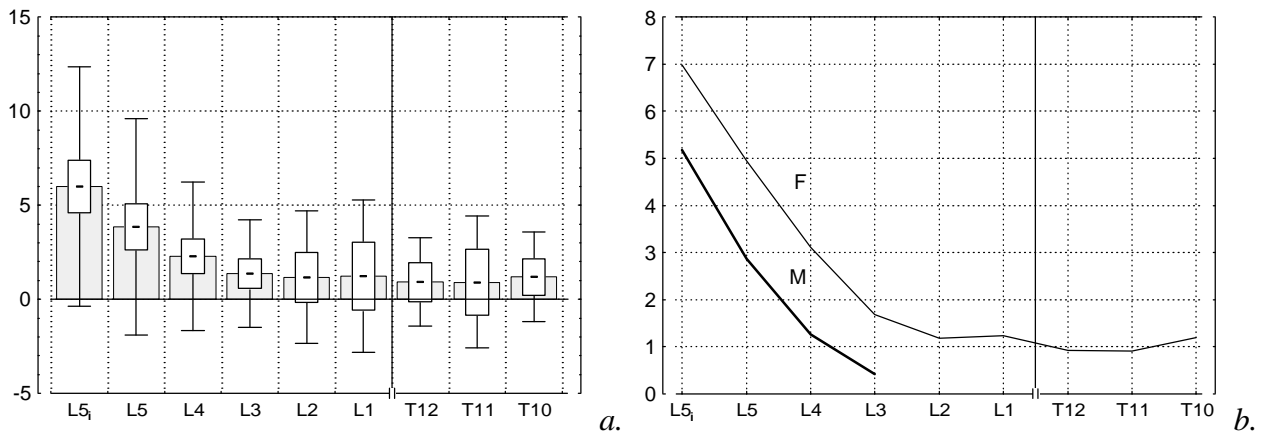


Figure 35

Valeurs des courbures ($C = 1000 / R_c$) des lordoses lombaires déterminées par l'empilement des corps vertébraux, depuis le plateau vertébral inférieur de L5 (L5) jusqu'au plateau vertébral supérieur de T10 (T10). *a.*, pour l'ensemble des individus: \circ , valeurs moyenne; \square , intervalle de confiance de la moyenne ($\alpha = 0.05$); \mathbf{I} , intervalle de tolérance estimé ($\alpha = 0.05$); *b.*, comparaison des valeurs moyennes dans les deux sexes.

Autour de cet extremum, la courbure décroît de façon presque continue, caudalement et cranialement, jusqu'à une moyenne d'environ $-2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ aux extrémités des étages étudiés. La courbure moyenne maximale correspond cependant aux segments qui montrent la plus forte variabilité, comme l'indiquent les intervalles de confiance et de tolérance. La courbure maximale moyenne possède donc une qualité descriptive et comparative limitée, autant par sa valeur numérique que par sa situation sur la colonne.

Le schéma décrit reste vrai lorsque seulement les individus masculins sont considérés, mais avec une variabilité plus constante des valeurs et un maximum qui est déplacé vers T5 (figure 36 *a.*). Les sujets de sexe féminin montrent comparativement une forte dispersion des valeurs de leur courbure sur toute la hauteur de la colonne vertébrale, et particulièrement au niveau du segment T3 (figure 36 *b.*), et les comparaisons des variances entre les sexes montrent effectivement une différence significative de celles-ci depuis le segment T3 jusqu'au segment C3 – tests de Fisher pour

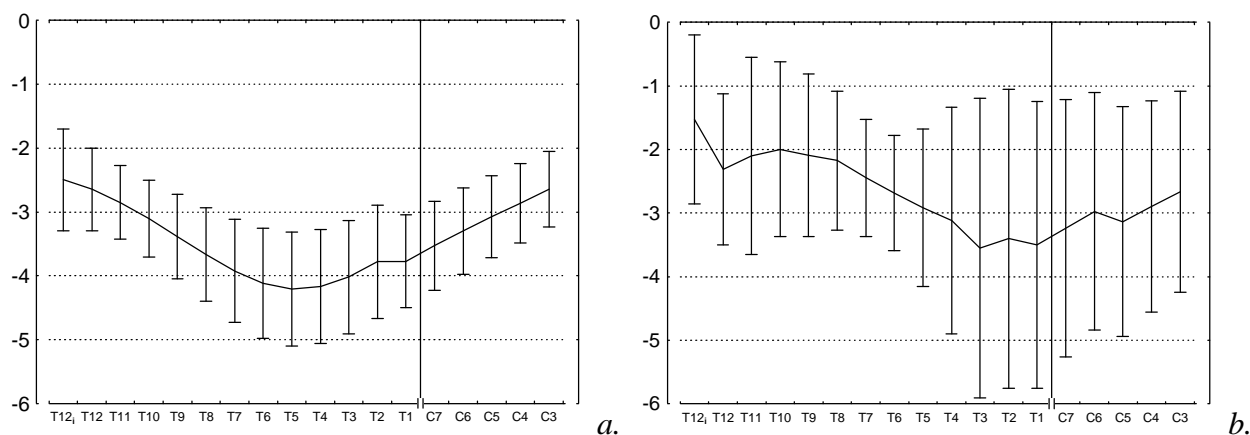


Figure 36

Valeurs des courbures ($C = 1000 / Rc$) des cyphoses déterminées par l'empilement des corps vertébraux, depuis le plateau vertébral inférieur de T12 (T_{12i}) jusqu'au plateau vertébral supérieur de C3. *a.*, échantillon masculin; *b.*, échantillon féminin. Valeur moyenne au niveau de chaque segment entourée de son intervalle de confiance ($\alpha = 0.05$).

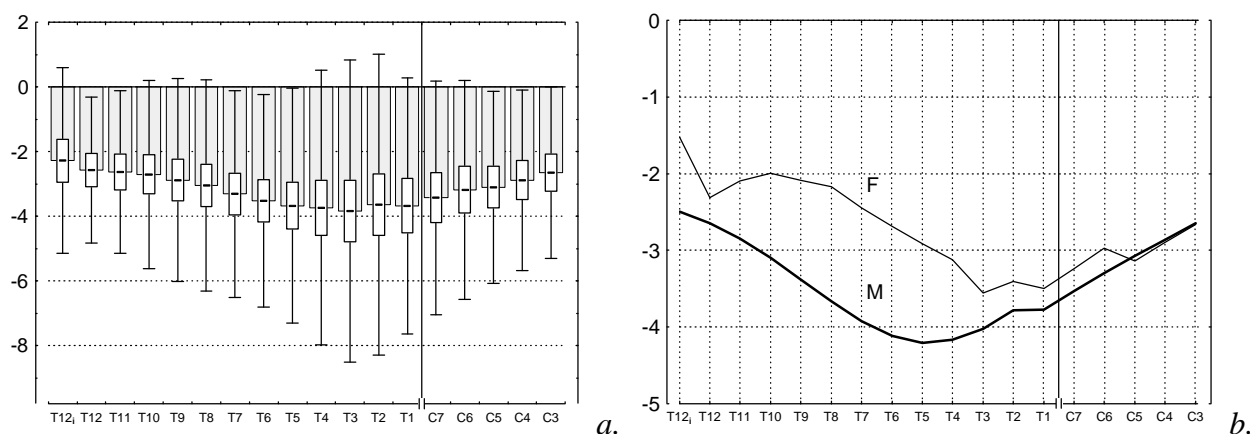


Figure 37

Valeurs des courbures ($C = 1000 / Rc$) des cyphoses déterminées par l'empilement des corps vertébraux, depuis le plateau vertébral inférieur de T12 (T_{12i}) jusqu'au plateau vertébral supérieur de C3. *a.*, pour l'ensemble des individus: \circ , valeurs moyenne; \square , intervalle de confiance de la moyenne ($\alpha = 0.05$); \mathbf{I} , intervalle de tolérance estimé ($\alpha = 0.05$); *b.*, comparaison des valeurs moyennes dans les deux sexes.

ces segments: $0.013 \leq p \leq 0.048$. Le point T3 est aussi un maximum mais qui se distingue peu des valeurs qui l'entourent et qui sont affectées de larges intervalles de confiance. Au niveau thoracique, les courbures des cyphoses sont toujours plus faibles (en valeur absolue) dans le sexe féminin (Figure 37 *b.*), et bien que les variations pour chaque segment se recoupent, les moyennes sont significativement différentes entre les segments T9 et T6 inclus – tests de Student pour ces segments: $0.013 \leq p \leq 0.032$. A l'étage lombaire cette différence s'amenuise, elle est toujours inférieure à 0.5 mm^{-1} , et elle devient presque nulle à l'étage thoracique pour les segments C5 à C3, dont les courbes des valeurs moyennes apparaissent confondues.

Les courbures des cyphoses sont donc plus variables dans le sexe féminin, et de manière significative à l'étage thoracique haut et à l'étage cervical. Elles sont en moyenne plus faibles chez les femmes à l'étage thoracique dans la comparaison segment par segment, et de manière significative à l'étage thoracique moyen. A l'étage cervical, les courbures moyennes sont identiques.

(3) Discussion:

Les différences sexuelles notées dans l'analyse des points remarquables sont donc confirmées par l'étude des courbures pour chaque segment de la colonne des corps vertébraux. La lordose est plus accentuée chez les individus féminins, c'est-à-dire qu'elle est plus étendue en direction craniale, ce que décrivait déjà l'analyse des points d'inflexion, mais surtout, sa courbure est en moyenne toujours supérieure à celle des hommes, et significativement pour les segments situés au dessus de L4. Pour la cyphose, les différences sexuelles relevées lors de l'analyse des maxima de courbure se retrouvent à l'étage thoracique dans la comparaison des moyennes segment par segment: les valeurs dans le sexe féminin sont plus dispersées que dans le sexe masculin, particulièrement aux étages cervical et thoracique haut. La courbure est aussi toujours plus faible dans le sexe féminin, et de façon significative au niveau thoracique moyen. Par ailleurs, les courbures moyennes sont presque égales dans les deux sexes à l'étage cervical.

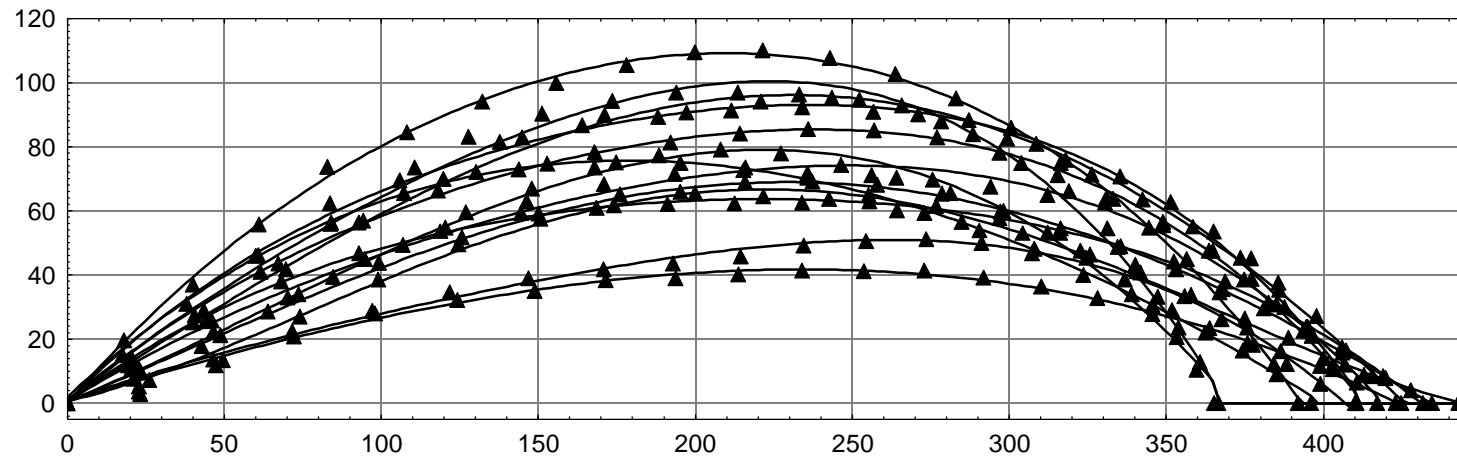
L'égalité des courbures des cyphoses cervicales chez les hommes et les femmes peut être mise en relation avec une identité des contraintes présentes au niveau de cet étage, impliqué d'un point de vue mécanique dans une fonction invariante selon le sexe: le maintien et la mobilité de la tête. Mais une interprétation biomécanique de ces tendances reste délicate pour plusieurs raisons: la variabilité rencontrée dans les données; la grande liberté de mouvement de cet étage dont on peut, de ce fait, difficilement abstraire les corps vertébraux; et enfin l'opposition entre la lordose physiologie par laquelle la colonne cervicale exerce sa fonction et la cyphose décrite par la morphologie des seuls corps vertébraux.

G. Régressions polynomiales sur l'ensemble des points:

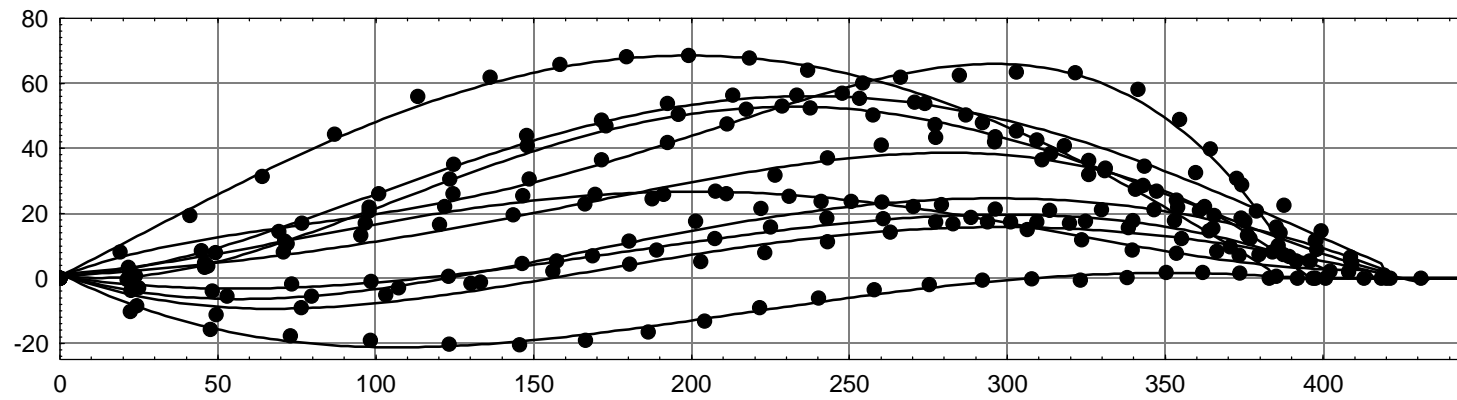
Tandis que les points remarquables permettent de caractériser chaque profil et de calculer précisément certaines différences statistiques, une représentation synoptique de l'ensemble des polynômes de chaque sexe rend directement intelligible certaines de ces caractéristiques.

En premier lieu, les tracés des régressions et des points auxquels elles s'ajustent montrent l'identité existant dans la hauteur des piles des corps vertébraux entre hommes et femmes, est égale à environ 400 mm. La plus forte valeur de la flèche au niveau du sommet dans le groupe masculin peut aussi être notée. Mais surtout, la différence apparaît nettement entre les dessins des profils globalement cyphotiques des hommes pour qui tous les points ont une ordonnée positive, et l'existence dans le groupe féminin d'une bien plus grande variabilité dans l'allure des courbes. La lordose lombaire peut être suffisamment développée pour situer les trois quarts des points dans les valeurs négatives, mais il existe aussi des profils cyphotiques dont l'allure ne semble pas différente de celle des sujets masculins.

Une fois les coordonnées des points transformées pour chaque individu en pourcentage de la hauteur totale de la pile, il est possible d'étudier de manière générale la variabilité rencontrée dans chaque sexe, et de telle façon que d'autres données puissent lui être comparées. Une régression polynomiale générale est donc calculée. Une telle démarche est en fait critiquable car elle amène à regrouper des courbes d'allures différentes. Elle n'est donc pas *suffisante* pour décrire la variabilité et ne peut remplacer l'étude de chaque fonction ajustée à un sujet telle qu'elle est faite, particulièrement, dans la détermination des points remarquables. En effet, il est évident que si la moitié des polynômes ont par exemple une concavité tournée vers le haut et l'autre moitié vers le bas, la régression calculée sur l'ensemble des points sera une mauvaise synthèse de l'échantillon, mais si l'ensemble des profils est assez homogène, elle permet d'obtenir un profil moyen, de décrire objectivement la variabilité de l'échantillon et de lui comparer d'autres sujets. Par ailleurs, la régression générale n'est pas indépendante de l'option choisie pour représenter les empilements dans le plan: ici, l'ajustement des extrémités sur l'axe des abscisses.



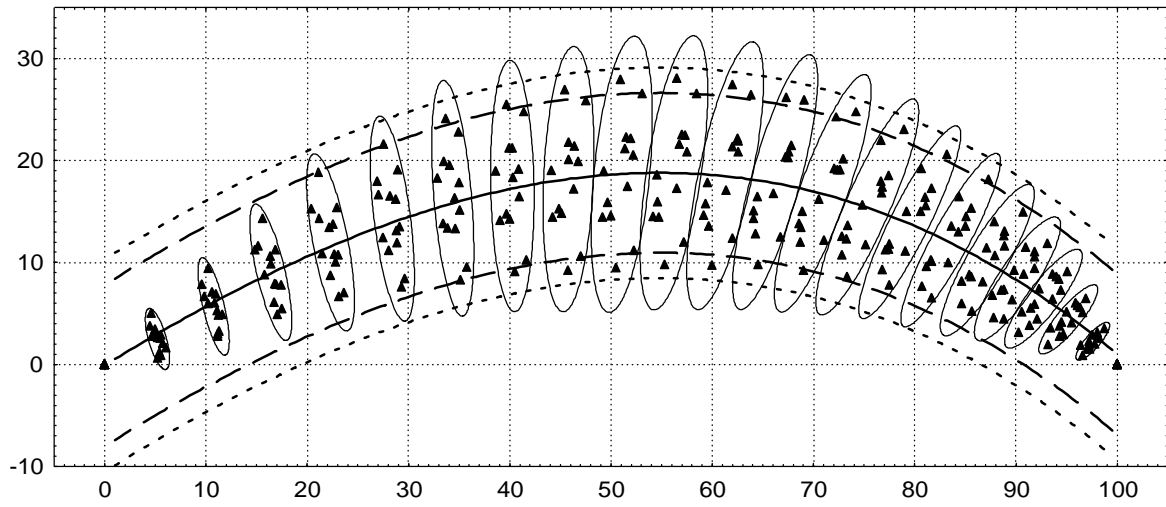
a.



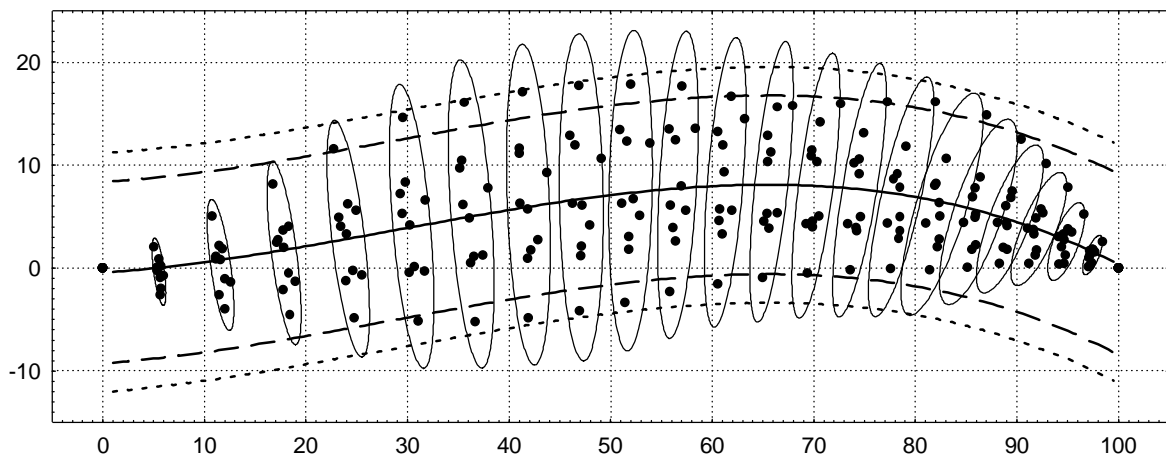
b.

Figure 38

Coordonnées des quadrilatères dans les piles de corps vertébraux et polynômes qui leur sont ajustés. Les points définissent la position dans le plan de la limite entre deux quadrilatères contigus de la pile (ajustement des quadrilatères selon leur côté postérieur). *a.*, ensemble des individus masculins; *b.*, ensemble des individus féminins. Valeurs réelles, échelle en mm.



a.



b.

Figure 39

Polynômes pour l'ensemble des profils déterminés par la forme des corps vertébraux, avec leurs intervalles de tolérance à 95 % (---) et 99 % (-.-). Ellipses de confiance à 95 % pour les points homologues, depuis le point inférieur du corps vertébral de L5 (0, 0) jusqu'au point supérieur du corps vertébral de C3 (100, 0). *a.*, sexe masculin ; *b.*, sexe féminin. Les coordonnées utilisées sont exprimées en pourcentage de la hauteur totale de chaque empilement, c'est-à-dire de sa longueur en projection. Lecture des ellipses, ex.: l'ellipse dont le foyer a pour abscisse 40 % environ dans *a.* décrit la variabilité de positionnement dans le plan des points postéro-supérieurs des quadrilatères qui représentent, dans les différents empilements, les corps vertébraux des segments T11.

Des informations complémentaires sont données par les tracés des ellipses de confiance correspondant chacune à un groupe de points homologues (par exemple, les sommets postéro-supérieurs des quadrilatères qui représentent T11 dans toutes les piles). Leur grand axe renseignera sur la variabilité de la flèche du profil au niveau du segment vertébral considéré, et leur petit axe donnera une description de la variabilité relative de hauteur des segments. L'interprétation de ces ellipses, qui confondent des points issus d'empilements différents, est donc soumise aux mêmes restrictions que celle de la régression sur l'ensemble des points.

Les individus masculins étudiés ici, dont tous les profils ont une concavité tournée vers le bas (cyphose), sont bien décrits par le polynôme général (Figure 39 a.). Celui-ci possède un sommet situé à 55 % de la hauteur et dont la flèche est de 18 %. Ce sommet appartient à l'ellipse de confiance correspondant à la limite entre les quadrilatères T7 et T8, (cette ellipse représente 95 % de la variabilité qui existe dans l'échantillon quant à la position de ce point dans le plan selon les empilements). Les limites de tolérance de l'estimation suivent le tracé de la régression générale et définissent un intervalle d'une étendue de 15 % environ pour $\alpha = 0.05$ et de 21 % environ pour $\alpha = 0.01$.

Dans l'échantillon féminin (Figure 39 b.), la régression calculée sur l'ensemble des points est plus délicate d'interprétation puisque les profils sont très variables d'un individu à l'autre. Le point d'inflexion pour la lordose lombaire peut avoir, comme le sommet de la cyphose, une abscisse assez différente selon le sujet (Cf. analyse de points remarquables). Il est toutefois intéressant de constater que le tracé de l'équation générale, bien que situé entièrement dans les ordonnées positives, montre très nettement une courbure de sens opposé au niveau des segments lombaires, l'inflexion se situant à la jonction thoraco-lombaire. Les seuils de tolérance définissent une étendue pratiquement égale à celle trouvée pour le sexe masculin. Le sommet de la cyphose est situé à 65 % de la hauteur. Il se situe, pour le polynôme général, au niveau de l'ellipse marquant la limite entre les segments T5 et T6 (côtés supérieurs des quadrilatères correspondants).

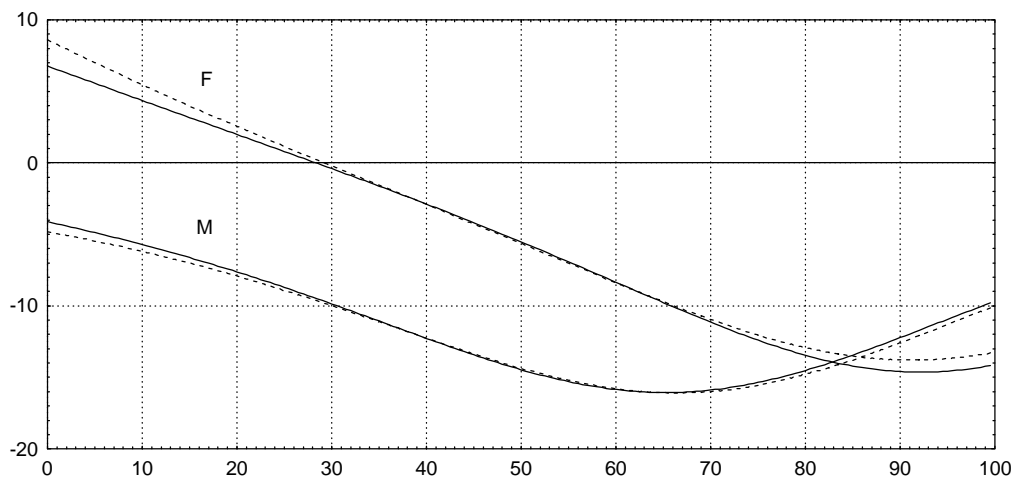


Figure 40

Valeurs des courbures des limites de tolérance de la régression calculée pour l'ensemble des profils de chaque sexe: M, masculin; F, féminin. Seuil $\alpha = 0.01$ (99% de la variabilité). - - -, courbure de la limite de tolérance inférieure ; —, courbure de la limite de tolérance supérieure. Abscisses: hauteur sur la pile, en pourcentage de la hauteur totale; ordonnées: valeur de la courbure. Les ordonnées négatives correspondent à des concavité antérieures (cyphose), le passage par $y = 0$ est significatif d'une inversion de la courbure.

Une régression polynomiale de degré quatre permet un très bon ajustement aux limites de tolérance: pour 101 valeurs de x dans les abscisses (de 0 à 100%) à partir desquelles sont calculées les ordonnées des limites de tolérance, on a toujours $r > 0.9999$. Les valeurs de courbure de ces limites peuvent ensuite être déduites à partir du polynôme.

Bien que les limites de tolérance ne soient pas symétriques autour de la régression générale, les courbures sont très peu différentes pour les limites inférieure et supérieure dans chaque sexe. La comparaison entre les deux sexes, en revanche, rend patente la différence observée dans les tracés des régressions générales (figure 40). La courbure dans le sexe masculin est toujours comprise dans les ordonnées négatives (cyphose), entre -4 et -16 %. Cette dernière valeur est celle d'un extremum qui se situe à 65 %, c'est-à-dire environ aux \mathbf{Q}_1 de la hauteur (figure 40). La courbure de la régression générale dans le sexe féminin est positive (lordose) et décroissante jusque 28 % de la hauteur, à partir d'une valeur de + 6.7 à + 8.5 % à la base (abscisse zéro). Un maximum dans les négatifs est atteint à 92 % de la hauteur, sa valeur étant comprise entre -13.7 et -14.7 %. Un point d'inflexion est donc situé à $3/10^{\text{èmes}}$ environ de la hauteur.

Les régressions établies sur l'ensemble des empilements et leurs intervalles de tolérance déterminent donc dans le sexe féminin une courbure au niveau des segments lombaires, qui est déterminée par la présence de plusieurs points d'ordonnées négatives. La variabilité, décrite par l'étendue des intervalles de tolérance et par les ellipses de confiance est semblable pour les deux sexes.

4.2. Courbures sagittales déterminées par la forme des corps vertébraux et des espaces intervertébraux impliqués par la morphologie vertébrale

A partir des mesures des angles et des côtés des quadrilatères qui représentent, d'une part, les corps vertébraux et, d'autre part, les espaces intervertébraux, l'empilement de ces éléments a été réalisé en respectant l'alternance des corps vertébraux et des espaces intervertébraux qui leur correspondent. La pile est calculée à partir de l'espace intervertébral S1 sus-jacent à la première vertèbre sacré, et jusqu'à l'espace intervertébral C3, sus-jacent à la troisième vertèbre cervicale. La morphologie particulière de l'axis et l'impossibilité de définir pour cet élément les systèmes de mesures permettant de schématiser le corps vertébral et l'espace intervertébral qui lui correspond nous ont amené à l'éliminer du calcul.

Deux types d'empilements ont été calculés pour chaque individu, en ajustant les côtés postérieurs des quadrilatères puis leurs côtés antérieurs.

Comme dans le cas des piles ne faisant intervenir que les corps vertébraux, les résultats issus d'un premier calcul où la base du premier élément est ajusté sur l'axe de abscisses (angle \hat{o}_0 ayant une valeur nulle) sont ensuite modifiés de manière à placer les points extrêmes sur l'axe des ordonnées ($x_0 = x_n = 0$). Cette rotation appliquée à l'ensemble de la pile permet d'obtenir des profils comparables dont la corde se confond avec l'axe vertical du repère. Chaque profil complet est constitué de quarante cinq points.

4.2.1. Aspect général des courbures:

Seulement 17 individus de l'échantillon (8 de sexe masculin et 9 de sexe féminin) présentent l'ensemble des segments nécessaires pour reconstituer la totalité du profil, de l'espace intervertébral de C3 à l'espace intervertébral de S1. Cependant, les empilements incomplets des sept autres individus sont suffisants pour permettre une première observation de l'allure des courbures rachidiennes impliquées par la morphologie osseuse.

Il n'existe pas de variation notable entre les profils obtenus par ajustement des côtés postérieurs des quadrilatères et ceux obtenus par ajustements de leurs côtés antérieurs. La différence qui peut exister entre le diamètre sagittal du plateau inférieur d'une vertèbre et celui du plateau supérieur de celle qui lui est sous-jacente, particulièrement caractéristique à l'étage cervical, reste dans un ordre de grandeur qui n'est pas susceptible d'entraîner une variation conséquente du profil. Par ailleurs, ces différences dans l'ajustement des segments ne modifient pas les valeurs des angles interceptant plusieurs segments adjacents.

1. Trois individus féminins ont des courbures qui ne sont que très faiblement marquées (Figure 41, *a.*). Bien que les segments inférieurs du profil se situent à gauche de l'axe, marquant une légère lordose, tandis que les segments supérieurs se situent à sa droite et dessinent une cyphose correspondant aux étages thoracique et cervical, les flèches maximales restent dans des valeurs inférieures à 10 mm.
2. Quatre individus (trois hommes et une femme) ne présentent qu'une seule courbure à concavité antérieure, sans lordose lombaire ni cervicale. Les flèches de cette unique cyphose ont des valeurs allant jusqu'à 75 mm (Figure 41, *b.*).
3. Quatre hommes et deux femmes montrent encore une cyphose thoracique importante qui s'étend à l'étage cervical, mais une inversion de la courbure est visible au niveau des vertèbres lombaires basses, de L3 à L5 ou de L4 à L5 (Figure 42, *a.*). La flèche de la cyphose est inférieure à 55 mm. Les segments lombaires à la base de la pile ont leur côté postérieur (ou antérieur selon l'ajustement) qui est confondu avec l'axe vertical. La flèche est donc nulle ou très faible, inférieure à 5 mm.
4. Un homme et trois femmes montrent une lordose lombaire bien dessinée et une cyphose thoracique s'étendant à l'étage cervical (Figure 42, *b.*). L'inversion de la courbure se situe dans les segments thoraciques bas, de T10 à T12. La flèche de la cyphose, par rapport à l'axe de la pile, est inférieure à 50 mm et la flèche de la lordose reste en deçà de 25 mm. L'inflexion marquant le passage de la lordose à la

cyphose n'est pas situé sur l'axe vertical, mais à sa droite. L'axe des ordonnées constitue par conséquent une mauvaise référence pour estimer le développement de chacune des courbures.

5. Deux hommes ont un profil représenté par une cyphose englobant les étages thoracique et lombaire mais avec une lordose cervicale nettement dessinée (Figure 43, *a.*).
6. Enfin, quatre individus masculins présentent les trois courbures vertébrales (Figure 43, *b.*): lordose cervicale, cyphose thoracique et lordose lombaire, bien que dans des modalités différentes de celles qui peuvent être observées sur le vivant, les points de transition d'un type de courbure à l'autre pouvant se situer plus bas ou plus haut que ceux habituellement décrits.

Ce regroupement des profils obtenus en six catégories ne contenant chacune qu'un très petit nombre de sujets ne saurait constituer une typologie. Il permet simplement de constater la très grande variabilité obtenue lorsque sont considérées la forme des corps vertébraux et celle des espaces intervertébraux impliqués par la morphologie des vertèbres qui les définissent.

L'empilement des quadrilatères représentant les corps vertébraux a montré que la forme de ceux-ci détermine une cyphose générale pour les étages thoracique et cervical, et une lordose lombaire chez les individus féminins, ainsi que chez certains individus masculins, où elle reste toujours moins prononcée. La participation des espaces intervertébraux dans la pile de quadrilatères modifie ce schéma, sans retrouver cependant la succession des trois courbures physiologiques de la colonne vertébrale. La morphologie des processus articulaires postérieurs et leur position dans l'espace relativement aux plateaux vertébraux qui leur correspondent n'intervient donc que d'une manière incomplète dans le déterminisme des courbures sagittales. La cyphose thoracique reste toujours marquée, parfois très faiblement; la lordose lombaire est déterminée chez les trois quarts des individus exactement —18 sur 24—, et chez autant de femmes que d'hommes. Enfin, la lordose cervicale n'est présente que chez 6 individus.

Il apparaît donc, dès cette première observation des profils dessinés par l'empilement des deux types de quadrilatères, que les seuls éléments osseux des segments rachidiens ne suffisent pas à déterminer les courbures physiologiques de la colonne vertébrale. En renversant ce lien de causalité qui est aussi un artefact lié au sens de l'analyse, on peut avancer, en d'autres termes, que les courbures rachidiennes se reflètent seulement de manière partielle dans la morphologie des vertèbres. C'est ce qui apparaît clairement si l'on considère la forme très irrégulière que montrent les quadrilatères représentant les espaces intervertébraux. Particulièrement aux étages cervical et lombaire, la géométrie obtenue correspond de façon très imparfaite à celle qui est observée sur le vivant, et il est fréquent d'observer sur un profil des quadrilatères dont l'aspect diffère significativement par rapport à l'ensemble. Cependant, ces irrégularités n'entraînent pas de rupture dans l'allure du profil. Les points marquant les limites entre quadrilatères suivent des incurvations régulières et l'inversion du sens de la courbure, quand elle existe, s'effectue continûment. La régression polynomiale est toujours possible: elle présente une très bonne qualité d'ajustement qui caractérise cette régularité dans l'allure générale des profils — le coefficient de corrélation de la régression a pour valeur 0.89 au percentile 3 et 0.999 au percentile 97.

Plus encore que pour les corps vertébraux, il sera difficile d'analyser la colonne vertébrale en termes de morphologie osseuse et de forme des espaces intervertébraux à partir d'un élément isolé. Il est cependant peu probable que parmi les deux vertèbres qui déterminent un espace intervertébral, aucune ne permette, par son état de conservation, de définir le quadrilatère représentant le corps vertébral. Dans le pire des cas, ce sont donc au minimum trois éléments (rarement deux) qui seront susceptible de représenter une portion de la colonne vertébrale afin d'étudier le rôle de la morphologie osseuse dans le déterminisme des courbures sagittales.

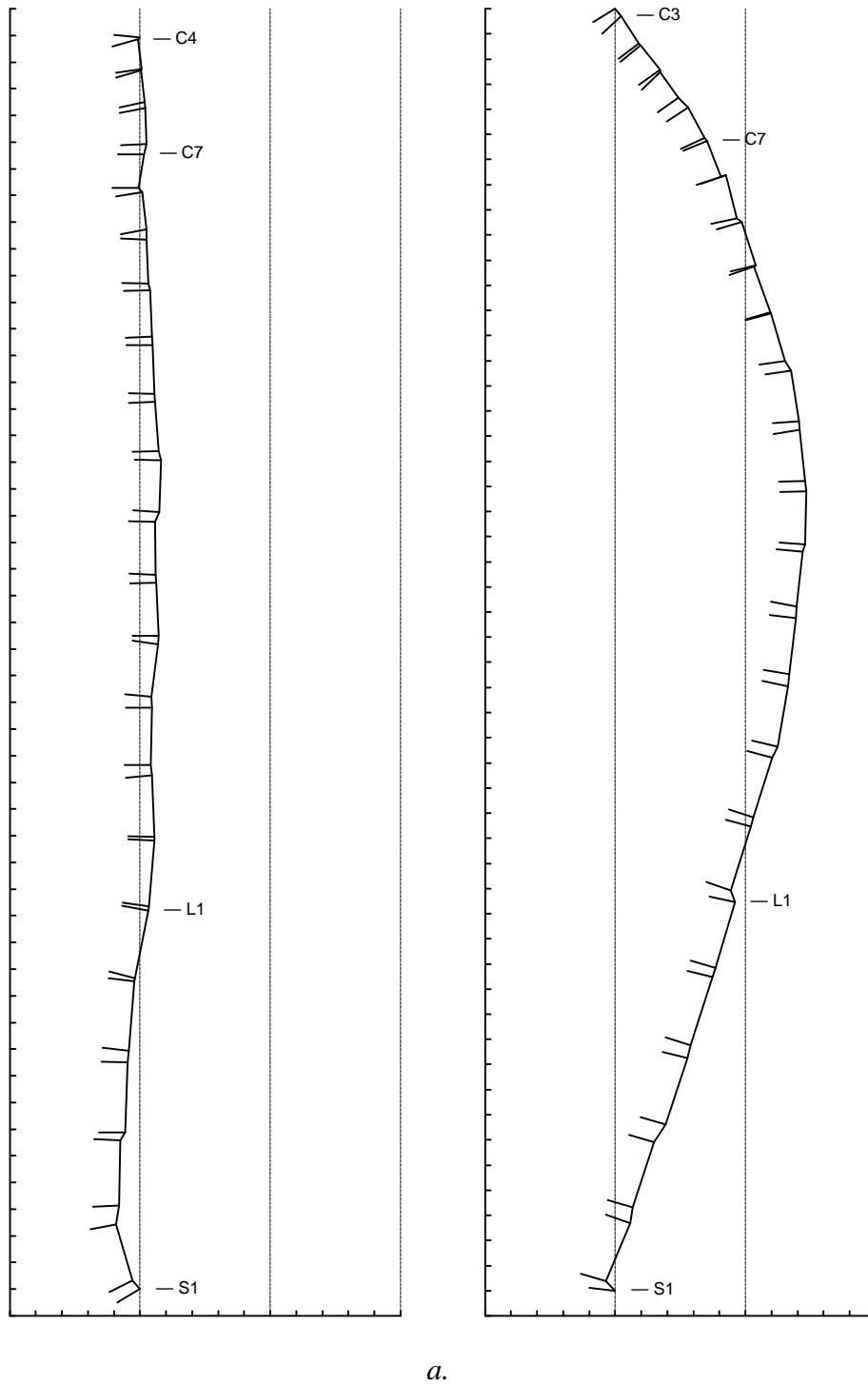


Figure 41

Représentation graphique de l'empilement alterné des quadrilatères représentant les corps vertébraux et des quadrilatères représentant les espaces intervertébraux induits par la morphologie osseuse. Ajustement des côtés postérieurs. Deux types de profils rencontrés dans l'échantillon de *Spitalfields*: *a.*, individu n° 459, sexe masculin, courbures très faiblement marquées; *b.*, individu n° 749, sexe féminin, une seule et unique courbure cyphotique apparente. Echelle: une division = 10 mm; espacement des axes, 50 mm.

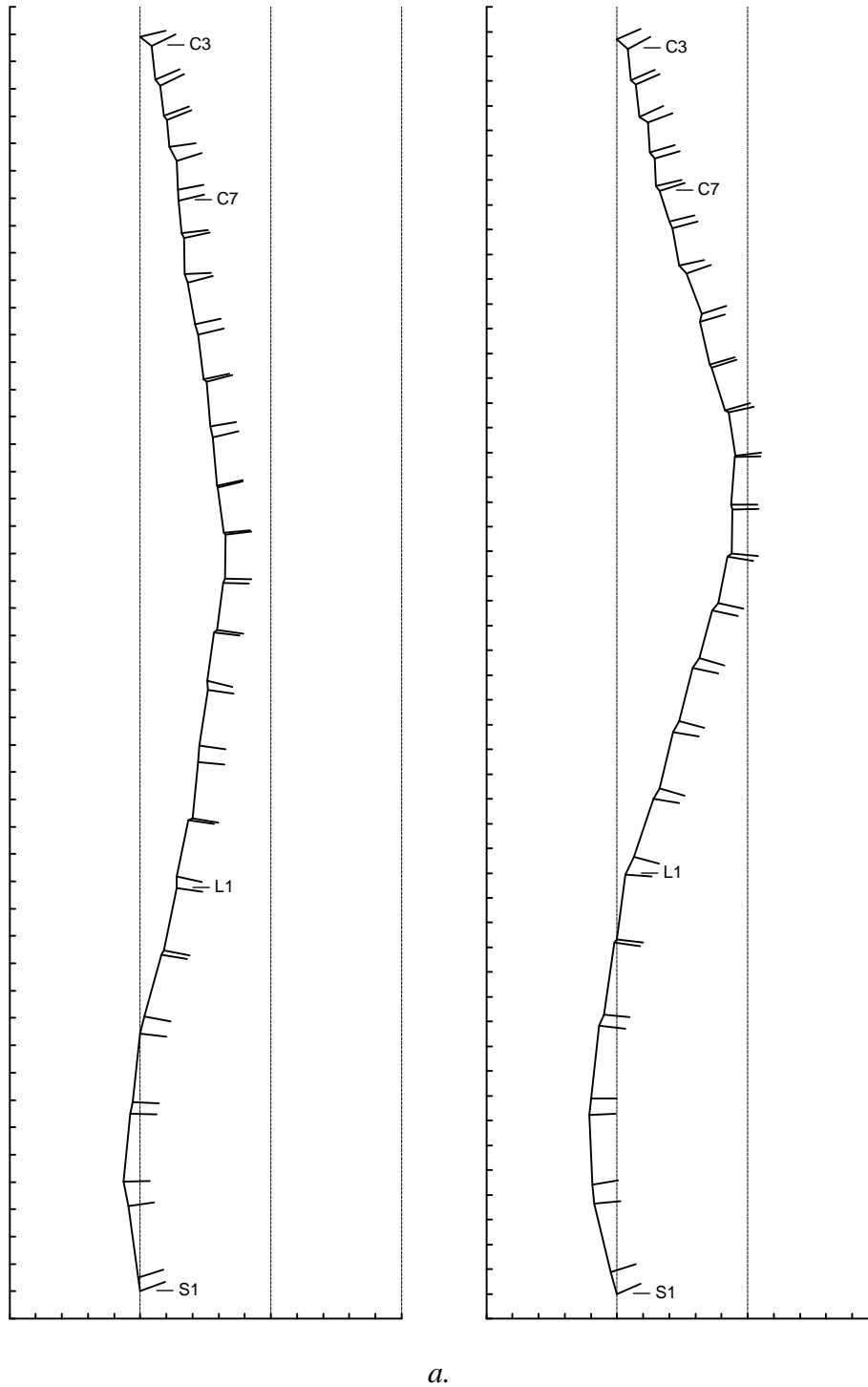


Figure 42

Empilement alterné. Deux types de profils rencontrés dans l'échantillon de *Spitalfields*: *a.*, individu n° 720, sexe masculin, une cyphose cervico-thoracique et une légère lordose affectant les vertèbres lombaires basses; *b.*, individu n° 070, sexe féminin, une cyphose cervico-thoracique avec lordose lombaire bien dessinée, l'inversion de la courbure pouvant se situer au niveau des dernières vertèbres thoraciques. Echelle: une division = 10 mm; espacement des axes, 50 mm. A titre d'exemple, ce sont les empilements avec ajustement antérieur qui ont été représentés sur cette figure: le calcul est effectué en mettant bord à bord les côtés antérieurs des quadrilatères.

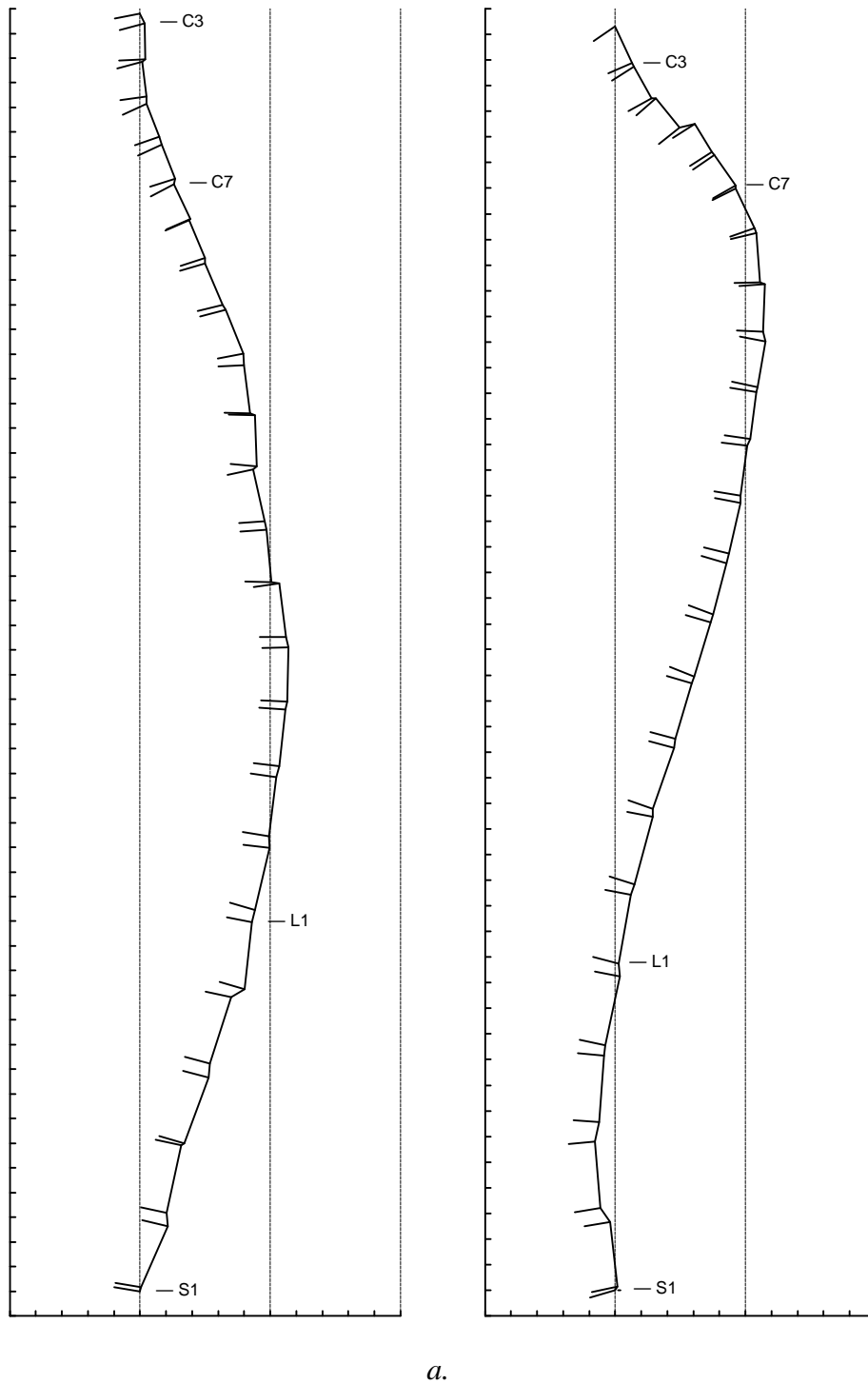


Figure 43

Empilement alterné. Deux types de profils rencontrés dans l'échantillon de *Spitalfields*: *a.*, individu n° 519, sexe masculin, une seule cyphose pour les étages thoracique et lombaire, la lordose cervicale est présente; *b.*, individu n° 714, sexe masculin, les trois courbures sont représentées. Echelle: une division = 10 mm; espacement des axes, 50 mm.

4.2.2. Mesures des angles interceptant les segments vertébraux

Comme pour les empilements des quadrilatères représentant les corps vertébraux, une première description quantitative des empilements alternés des corps vertébraux et des espaces intervertébraux est donnée peut être faite à partir des angles α interceptant les étages vertébraux. Les étages ont été définis de telle manière qu'ils incluent l'espace intervertébral du segment le plus cranial :

Etage cervical: du côté supérieur du quadrilatère représentant l'espace intervertébral de C3 jusqu'au plateau inférieur du quadrilatère représentant le corps vertébral de C7.

Etage thoracique: du côté supérieur du quadrilatère représentant l'espace intervertébral de T1 jusqu'au plateau inférieur du quadrilatère représentant le corps vertébral de T12.

Etage lombaire: du côté supérieur du quadrilatère représentant l'espace intervertébral de L1 jusqu'au plateau inférieur du quadrilatère représentant le corps vertébral de L5.

(1) Etage cervical:

Les valeurs de α sont assez variables dans l'échantillon (Figure 44 a.). Elles se distribuent autour de la valeur zéro, ce qui limite la valeur descriptive de l'angle moyen. Celui-ci est le même dans les deux sexes, égal à -2.3° . Les deux sexes sont donc représentés dans les valeurs positives comme dans les valeurs négatives. La valeur extrême en lordose correspond à un individu (n°185) qui montre une angulation cervicale très prononcée ($\alpha = 92^\circ$). La variabilité est donc un peu supérieure dans le sexe masculin. La valeur du s de Rayleigh, qui est un indicateur de la dispersion des données est de 32° dans ce sexe contre 22° pour le sexe féminin. Ce sont des valeurs fortes, en comparaison des 12° calculés pour l'empilement des corps vertébraux seuls considérés, et pour le même étage cervical. Les intervalles de confiance des deux sexes sont donc presque exactement superposés, et l'hypothèse de leur égalité ne peut absolument pas être rejetée ($p > 25\%$). Il faut noter que la prise en compte du segment C3 modifie fortement la distribution des angles. Ce segment est responsable de la plus grande partie de la lordose cervicale impliquée par la morphologie osseuse vertébrale. En effet, la distribution de l'angle mesuré depuis le corps vertébral de C7 jusqu'à celui de C4 seulement, montre une répartition du plus grand nombre de points des deux sexes dans les valeurs cyphotiques entre 0° et -30° (Figure 75: c.C4-c.C7).

(2) Etage thoracique:

A l'exception d'un individu masculin, toutes les valeurs sont négatives, et décrivent donc une cyphose (Figure 44 b.). Elles restent cependant assez dispersées, avec une valeur de s égale à 17° pour l'ensemble des individus, qui est plus forte pour le sexe masculin (20°) que pour le sexe féminin (10°). L'hypothèse d'égalité de l'angle moyen des individus masculins (26.3°) et des individus féminins (19.8°) ne peut être rejetée ($p > 25\%$): les intervalles de confiance pour chaque sexe sont largement chevauchants.

(3) Etage lombaire:

Toutes les valeurs sont positives, indiquant que la lordose lombaire est toujours décrite par la valeur de α (Figure 44 c.). La dispersion des valeurs est un peu plus faible qu'à l'étage thoracique, avec $s = 15^\circ$ pour les hommes et $s = 9^\circ$ pour les femmes. Les intervalles de confiance sont encore largement chevauchants et les angles moyens ne sont pas significativement différents ($p > 25\%$), l'angle moyen pour l'ensemble des sujets est de 23.8° .

Le calcul des angles interceptant les trois étages de l'empilement alterné des quadrilatères permet d'ores et déjà de constater que les valeurs des individus féminins sont plus concentrées que

celles des individu masculins. Si l'angulation au niveau cervical ne décrit pas toujours une lordose. En revanche la cyphose thoracique est clairement déterminée, de même que la lordose lombaire. Il n'existe en aucun cas de différences sexuelles dans les valeurs de l'angle moyen.

Sur 100 sujets et à partir de clichés radiographiques, COSTANZO et collaborateurs (STAGNARA, 1985) mesurent un angle lombaire "physiologique" (espace intervertébral de L1 non inclus ici) dont la variabilité est tout à fait comparable à celle de l'angle déterminé par la morphologie vertébrale (Cf. discussion pour plus de détail sur l'échantillon de référence). L'étendue des valeurs est légèrement supérieure, et décalée vers des valeurs un peu plus fortes de lordose. Elle est limitée par un minimum de 18° et un maximum de 69°, la moyenne de l'échantillon étant de 42°.

L'angulation au niveau de l'étage thoracique est aussi rapportée, mesurée seulement depuis T12 jusque T4. Ce même angle déterminé par la morphologie vertébrale est, dans l'échantillon de Spitalfields, de -19.3° en moyenne, avec une étendue de 69° limitée par les valeurs -42° et + 27° ($s = 16^\circ$). Les données physiologiques de COSTANZO donnent une moyenne de -36° et une étendue de 72° comprise entre -60° et + 12° ($s = 10^\circ$). L'angle thoracique déterminé par la morphologie vertébrale apparaît donc plus faible que l'angle physiologique, tant du point de vue de sa valeur moyenne que des valeurs extrêmes qui peuvent être rencontrées. Bien que les étendues soient presque égales, l'angle déterminé par la morphologie vertébrale est aussi plus variable.

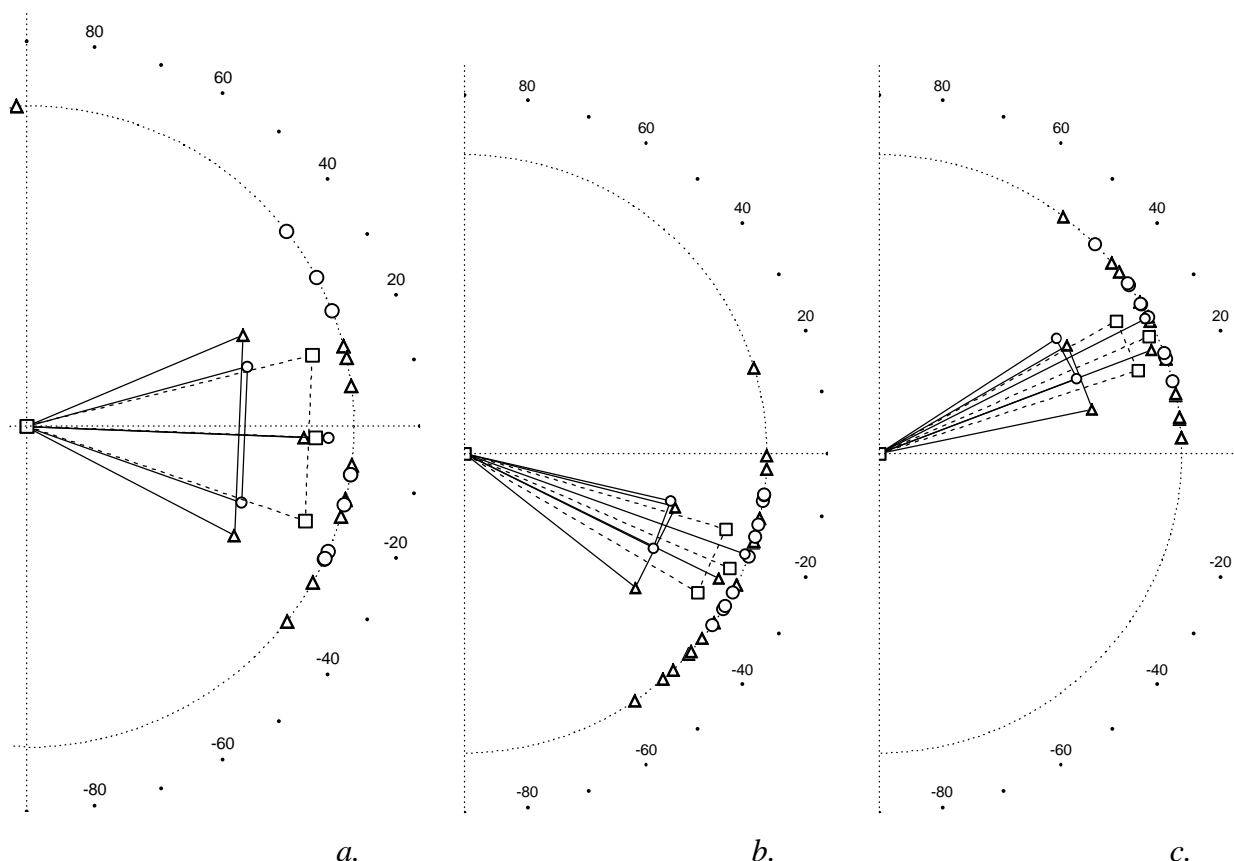


Figure 44

Angles interceptant les étages cervical, thoracique et lombaire de l'empilement alterné des quadrilatères représentant les corps vertébraux et les espaces intervertébraux, dans l'échantillon de Spitalfields. Segments cervical depuis le corps vertébral de C7 jusqu'à l'espace intervertébral de C3 inclus (a.), thoracique depuis le corps vertébral de T12 jusqu'à l'espace intervertébral de T1 inclus (b.) et lombaire depuis le corps vertébral de L5 jusqu'à l'espace intervertébral de L1 inclus (c.). Δ , hommes ; \circ , femmes; $-\Delta-$ & $-\circ-$, angle moyen entouré de son intervalle de confiance à 95% pour les sujets de sexe masculin et féminin, respectivement ; $--\square--$, angle moyen et intervalle de confiance pour l'ensemble des individus. Les valeurs négatives correspondent à des angles à sommet antérieur. La longueur du segment représentant l'angle moyen est égale à r ($0 \leq r \leq 1$), mesure de la concentration des données. Graduation: 10°.

4.2.3. Calcul des polynômes

Il a été démontré qu'un polynôme de degré quatre était susceptible de donner le meilleur ajustement à un nuage de points décrivant deux courbures (*cf. supra*). Les empilements réalisés de L5 à C3 peuvent cependant présenter jusque trois courbures, mais des cas ne montrant qu'une seule courbure générale sont aussi rencontrés. Un polynôme d'un degré supérieur à quatre serait à même de décrire plus exactement les empilements décrivant plus de deux courbures, mais il ne serait pas approprié pour les profils ne montrant qu'une seule concavité. L'ajustement serait susceptible d'être infléchi par des variations minimales dans l'allure de la concavité. Elle conduirait à une description erronée du profil sagittal en décrivant, par le calcul des rayons de courbure, des variations non significatives de cette concavité.

Afin de limiter ces biais et de fournir un ensemble méthodologique homogène, l'ajustement de degré quatre a donc été conservé pour les empilements alternés. La qualité de l'ajustement est assurée en calculant pour chaque profil une série de trois équations différentes et qui se chevauchent. Trois régressions sont donc calculées:

1. une régression thoraco-lombaire prenant en compte les quadrilatères depuis le corps vertébral de L5 jusqu'à l'espace intervertébral de T7 (11 segments),
2. une régression thoracique depuis le corps de T12 jusqu'à l'espace intervertébral de T1 (12 segments),
3. et une régression cervico-thoracique depuis le corps vertébral de T7 jusqu'à l'espace intervertébral de C3 (12 segments).

Les coefficients de détermination multiples donnent une bonne description de la qualité des ajustements. Ce paramètre (R^2) indique la proportion de variabilité de y attribuable à la dépendance vis-à-vis des variables x , x^2 , x^3 et x^4 telle qu'elle est exprimée dans le modèle de régression choisi. Une estimation non biaisée de R^2 est donnée en divisant les sommes des carrés résiduelle et totale par leurs degrés de liberté respectifs (ZAR, 1984).

Les valeurs de R sont en moyenne de 0.98 pour l'ensemble des ajustements effectués sur les trois étages cervico-thoracique, thoracique et thoraco-lombaire; avec une moyenne de 0.95 pour le coefficient de détermination R^2 . Bien que très élevée, la moyenne de R est inférieure à 0.99 qui est mentionnée par DELMAS et PINEAU (1986), et par PINEAU, MOLLARD et IGNAZI (1983). Trois sujets présentent en fait un profil pratiquement sans courbure au niveau cervico-thoracique et leurs régressions ont comme coefficients de détermination R^2 : 0.61, 0.76 et 0.79. La faiblesse relative de ces valeurs n'indique pas un mauvais ajustement du polynôme, dont le tracé ne suivrait pas le profil de l'empilement, mais, pour ces trois cas, une description assez médiocre par la fonction, due à une faible corrélation entre les y et les variables indépendantes x , x^2 , x^3 et x^4 , qui est indépendante du degré du polynôme.

Pour l'ensemble des sujets, la médiane des valeurs de R^2 est de 0.974 à l'étage cervico-thoracique, 0.989 à l'étage thoracique, et de 0.974 à l'étage thoraco-lombaire; les valeurs maximales pour sont supérieures à 0.997. L'écart-type de l'estimation est de 1.3 mm en moyenne, et la probabilité du test F de la variance de la régression et de la variance résiduelle rejette l'hypothèse d'indépendance de y , dont la probabilité est dans tous les cas inférieure à $1 \cdot 10^{-5}$.

Les paramètres des régressions multiples et les tests d'indépendance confirment donc le très bon ajustement des polynômes de degré quatre aux profils des empilements alternés des corps vertébraux et des espaces intervertébraux.

4.2.4. Dimensions des profils

A. Dimensions générales de C3 à L5

Parmi l'échantillon issu de la collection de *Spitalfields*, 10 individus masculins et 9 individus féminins possèdent tous les éléments osseux permettant de déduire les espaces intervertébraux entre les corps vertébraux des segments L5 (corps vertébral de la dernière vertèbre lombaire) à C3. La hauteur du profil, c'est-à-dire sa longueur en projection, a été calculée à partir des empilements réalisés pour l'ensemble des 43 quadrilatères. En revanche, la longueur curviligne ou développée du profil est déduite par sommation des distances trouvées pour chaque étage vertébral, à partir des trois polynômes ajustés séparément aux zones thoraco-lombaire, thoracique, et cervico-thoracique. La fonction $y = (1 + f'(x))^{1/2}$ correspondant à chaque polynôme est donc intégrée entre les bornes suivantes (respectivement):

1. corps vertébral de L5 et espace intervertébral de L1, pour le polynôme ajusté à la zone thoraco-lombaire;
2. corps vertébral de T12 et espace intervertébral de T1, pour le polynôme ajusté à la zone thoracique; et
3. corps vertébral de C7 et corps vertébral de C3 pour le polynôme ajusté à la zone cervico-thoracique.

Les quadrilatères extrêmes sont inclus dans le calcul. Les résultats sont additionnés pour trouver la longueur curviligne de L5 à C3.

La hauteur moyenne des profils (tableau 13) est de 49.5 cm pour les sujets masculins et de 47.6 cm pour les sujets féminins, sans que cet écart de seulement 1.9 cm soit significatif ($p = 0.07$). Les valeurs sont contenues, à 95 %, dans une fourchette de 7.6 cm. En revanche, les longueurs curvilignes sont significativement différentes entre les deux sexes ($p = 0.013$), bien que l'écart entre les moyennes ne soit que de 2.9 cm en faveur du groupe masculin. La dispersion des valeurs est aussi légèrement plus élevée chez les hommes, mais l'hypothèse d'égalité des variances ne peut être rejetée ($p = 0.32$). Le faible écart entre les moyennes des longueurs curvilignes n'est pas suffisant pour que l'indice de courbure diffère entre hommes et femmes ($\Delta = 1.8$ %).

			<i>n</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>p 0.025</i>	<i>p 0.5</i>	<i>p 0.975</i>
Hommes	<i>hauteur</i>	<i>h</i>	10	495	24	453	498	529
	<i>longueur curviligne</i>	<i>l</i>		514	25	465	515	544
	<i>indice</i>	<i>i = h/l</i>		96 %	1 %	94 %	96 %	98 %
Femmes	<i>hauteur</i>	<i>h</i>	9	476	19	443	483	496
	<i>longueur curviligne</i>	<i>l</i>		485	21	457	486	520
	<i>indice</i>	<i>i = h/l</i>		98 %	2 %	95 %	99 %	100 %
Hommes et Femmes	<i>hauteur</i>	<i>h</i>	19	486	23	443	485	526
	<i>longueur curviligne</i>	<i>l</i>		500	27	455	502	541
	<i>indice</i>	<i>i = h/l</i>		97 %	2 %	94 %	97 %	100 %

Tableau 13

Hauteur et longueur curviligne des profils obtenus par empilement alterné des quadrilatères représentant les corps vertébraux et les espaces intervertébraux depuis l'espace intervertébral du segment S1 jusqu'à celui du segment C3. *n*, effectif; *m*, moyenne; *s*, écart-type; *p 0.025* et *p 0.975*, percentiles symétriques autour de la médiane et renfermant 95 % des valeurs de l'échantillon; *p 0.5*, percentile 50 %, médiane. Valeurs exprimées en mm.

			<i>n</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>p</i> 0.025	<i>p</i> 0.5	<i>p</i> 0.975
<i>Cervical</i>	<i>Hommes</i>	<i>h</i>	11	79	8	68	77	93
		<i>l</i>		80	7	74	78	93
		<i>i = h/l</i>		99 %	3 %	92 %	100 %	100 %
	<i>Femmes</i>	<i>h</i>	9	74	5	67	73	80
		<i>l</i>		74	6	68	73	83
		<i>i = h/l</i>		99 %	1 %	96 %	100 %	100 %
	<i>Hommes et Femmes</i>	<i>h</i>	20	77	7	67	76	91
		<i>l</i>		77	7	68	76	91
		<i>i = h/l</i>		99 %	2 %	93 %	100 %	100 %
<i>Thoracique</i>	<i>Hommes</i>	<i>h</i>	14	273	14	247	276	291
		<i>l</i>		278	14	250	282	295
		<i>i = h/l</i>		98 %	1 %	95 %	98 %	100 %
	<i>Femmes</i>	<i>h</i>	10	260	13	241	262	279
		<i>l</i>		263	13	245	264	281
		<i>i = h/l</i>		99 %	1 %	97 %	99 %	100 %
	<i>Hommes et Femmes</i>	<i>h</i>	24	267	14	241	268	288
		<i>l</i>		272	15	245	274	294
		<i>i = h/l</i>		98 %	1 %	96 %	99 %	100 %
<i>Lombaire</i>	<i>Hommes</i>	<i>h</i>	13	148	7	133	149	157
		<i>l</i>		149	7	135	149	158
		<i>i = h/l</i>		99 %	1 %	97 %	100 %	100 %
	<i>Femmes</i>	<i>h</i>	10	142	6	134	140	150
		<i>l</i>		143	6	135	141	151
		<i>i = h/l</i>		99 %	1 %	97 %	99 %	100 %
	<i>Hommes et Femmes</i>	<i>h</i>	23	145	7	133	148	156
		<i>l</i>		146	7	134	149	157
		<i>i = h/l</i>		99 %	1 %	96 %	99 %	100 %

Tableau 14

Hauteur et longueur curviligne des profils obtenus par empilement alterné des quadrilatères représentant les corps vertébraux et les espaces intervertébraux. Étage **cervical**: depuis le corps vertébral du segment **C3** jusqu'à celui du segment **C7** ; étage **thoracique**: depuis le corps vertébral du segment **T1** à celui du segment **T12** ; étage **lombaire**: depuis le corps vertébral du segment **L1** jusqu'à celui du segment **L5** (les segments extrêmes sont inclus). *n*, effectif; *m*, moyenne; *s*, écart-type; *p* 0.025 et *p* 0.975, percentiles symétriques autour de la médiane et renfermant 95 % des valeurs de l'échantillon; *p* 0.5, percentile 50 %, médiane. Valeurs exprimées en mm.

Les tests de normalité, ainsi que les graphiques des résidus observés contre ceux attendus dans le cas d'une distribution normale, ne permettent pas de rejeter l'hypothèse de normalité pour *h* ni pour *l* (dans le test de Shapiro et Wilk: $p < 0.98$ pour *h*, et $p < 0.66$ pour *l*). L'intervalle de tolérance estimé de la population ($\alpha = 0.05$) permet donc d'apprécier la variabilité de ces mesures. La hauteur de la pile est ainsi comprise, pour 95 % de sa variation, dans une fourchette 10.1 cm autour de la moyenne, c'est-à-dire entre 43.5 cm 53.6 cm. La variabilité de la longueur curviligne de C3 à L5 est similaire, avec une fourchette de 11.9 cm chez les sujets masculins et de 10.3 cm chez les sujets féminins.

B. Dimensions selon l'étage vertébral

Les coordonnées des quadrilatères dans l'empilement permettent de calculer n'importe quelle distance entre deux points du profil au moyen du théorème de Pythagore. Les longueurs curvilignes

correspondantes peuvent aussi être déduites en utilisant l'intégrale de la fonction entre ces bornes. Il est donc aisé d'étudier séparément la variabilité des dimensions des étages vertébraux cervical, thoracique et lombaire. Les points extrêmes choisis sont ceux correspondant à la définition de l'étage: le plateau supérieur du corps vertébral le plus cranial, et le plateau inférieur du corps vertébral le plus caudal (tableau 14).

Au niveau cervical, il existe peu de variation entre les hauteurs moyennes de la colonne vertébrale chez les hommes et les femmes ($\Delta = 5$ mm), de même pour la longueur curviligne ($\Delta = 6$ mm). Ces deux mesures ne montrent pas, d'ailleurs, de différence significative entre les sexes, que l'on s'intéresse à leur valeur moyenne ($p = 0.09$) ou à leur dispersion ($p = 0.13$ pour le test F des variances). Cette dernière possède une amplitude de 2.4 cm quand sont considérés les percentiles 2.5 et 97.5, l'intervalle de tolérance bilatéral estimé de la population étant de 3 cm. Pour l'ensemble des individus, la hauteur de l'étage cervical est en moyenne de 7.7 cm, 95 % des valeurs étant comprises entre 6.8 et 9.1 cm. La longueur curviligne est aussi *en moyenne* de 7.7 cm et 95 % des valeurs se situent entre 6.8 et 9.1 cm, l'intervalle de tolérance est de 2.8 cm, et il n'y a pas de différence entre les sexes, tant pour la variance ($p = 0.32$) que pour la moyenne ($p = 0.06$). L'indice de courbure moyen est de 99 %, mais il atteint 93 % au percentile 2.5. Sa valeur minimale observée est de 90 %.

L'étage lombaire ne montre pas non plus de différence notable entre les groupes masculin et féminin dont les valeurs moyennes de hauteur et de longueur curviligne montrent une différence de seulement 6 mm ($p = 0.06$ pour h et pour l dans le test de Student). De même, les écarts-type sont tout à fait comparables, non seulement pour l'étage lombaire entre les deux sexes ($\Delta = 1$ mm; $p = 0.27$ pour h et $p = 0.36$ pour l dans le test des variances), mais aussi par rapport à l'étage cervical ($\Delta = 1$ mm). La hauteur moyenne de la colonne lombaire pour l'ensemble de l'échantillon est de 14.5 cm, 95 % des valeurs étant situées entre les bornes de 13.3 et 15.6 cm. La longueur curviligne moyenne est de 14.6 cm, dans une fourchette très semblable de 13.4 et 15.7 cm. L'intervalle de tolérance ($\alpha = 0.05$) pour ces deux mesures est de 3 cm. L'indice de courbure indique, en conséquence, que cette dernière est faible: i est égal ou supérieur à 96 % (valeur du percentile 2.5 et du minimum observé).

Un écart de 12 mm est observé pour les hauteurs moyennes des colonnes thoraciques entre les sujets masculins et féminins, avec une valeur de 24.7 cm dans le premier groupe et de 25 cm dans le second. Il correspond à une différence significative au seuil de 5 % ($p = 0.03$). Les longueurs curvilignes du groupe masculin sont elles aussi supérieures à celles du groupe féminin, avec une différence de 15 mm, la moyenne des hommes se situant à 27.8 cm et celle des femmes à 26.3 cm. La différence est significative au seuil de 1 % ($p = 0.009$). Toutefois, pour ces deux mesures, il n'existe pas de différence significative en ce qui concerne la variabilité des valeurs. Elles sont aussi dispersées chez les hommes que chez les femmes, mais beaucoup plus à l'étage thoracique qu'aux étages cervical et lombaire. Si l'on s'intéresse simplement à la mesure h , la fourchette contenant 95 % des valeurs est en effet de 2.4 cm à l'étage cervical et de 2.3 cm à l'étage lombaire pour l'ensemble des sujets ; mais elle est, à l'étage thoracique, égale à 4.4 cm chez les hommes et à 3.7 cm chez les femmes. Les écarts-type sont environ deux fois plus élevés à l'étage thoracique qu'aux autres étages.

La plus grande variation des dimensions de l'étage thoracique peut être partiellement imputée au fait que celui-ci représente une fraction beaucoup plus importante de la colonne vertébrale, c'est-à-dire qu'il inclut un nombre plus élevé d'éléments, chacun susceptible de variation.

La longueur curviligne calculée pour l'ensemble de la colonne (du plateau supérieur du corps vertébral de C3 jusqu'au plateau inférieur du corps vertébral de L5) permet en effet de déduire quelle est la part que chaque étage vertébral représente dans cette mesure (Tableau 15).

La longueur curviligne de l'étage cervical est égale en moyenne à 15 %, c'est à dire à un peu plus de 7^{ème} de la longueur totale. La longueur de l'étage lombaire contribue à environ 30 % c'est-

à-dire à un peu plus de $\mathbf{u}^{\text{èmes}}$ de l'ensemble de la colonne. L'étage thoracique enfin, représente à lui seul plus de la moitié de la longueur d'arc de la colonne, il contribue à 54 % de celle-ci. Ces proportions sont peu variables, les percentiles 2.5 et 97.5 ne sont pas situés à plus de 2 % de la médiane. Toutefois, tandis qu'aux étages cervical et lombaire les écarts-type ne diffèrent pas de plus de 0.2 % entre les deux sexes, cette valeur est de 0.8 % au niveau thoracique, et le groupe féminin enregistre la plus forte variation rencontrée, avec un écart-type s égal à 1.3 %.

En résumé, les dimensions générales des profils obtenus par empilement alterné des quadrilatères représentant, d'une part, les corps vertébraux et, d'autre part, les espaces intervertébraux impliqués par la morphologie osseuse, permettent de formuler les remarques suivantes:

La hauteur de la pile et sa longueur développée sont significativement plus grandes dans le groupe masculin, mais également dispersées dans les deux sexes, et avec un indice de courbure semblable. Pourtant, lorsque les dimensions de chaque étage sont étudiées séparément, l'étage thoracique est le seul qui présente une différence significative, en faveur du groupe masculin. Dans tous les cas la variabilité est la même chez les sujets féminins et masculins. Cette variabilité des mesures est par ailleurs deux fois plus élevée à l'étage thoracique qu'aux étages cervical et lombaire, ce qui s'explique en partie par le fait que la longueur curviligne (ou développée) du premier représente plus de la moitié de la longueur du profil de C3 à L5, tandis que l'étage lombaire n'en représente que $\mathbf{u}^{\text{èmes}}$ et l'étage cervical $\mathbf{7}^{\text{ème}}$. La proportionnalité de l'étage thoracique apparaît en outre plus variable dans le sexe féminin.

<i>Longueur curviligne (mm)</i>		<i>n</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>int. tolérance 95 %</i>		
<i>de C3 à L5</i>	<i>H.</i>	10	514	25	454	574	
	<i>F.</i>	9	485	21	433	537	
	<i>H. & F.</i>	19	500	27	442	559	
<i>Proportion de chaque étage (%)</i>		<i>n</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>p 0.025</i>	<i>p 0.5</i>	<i>p 0.975</i>
<i>Cervical</i>	<i>H.</i>	10	15	1.0	14	15	17
	<i>F.</i>	9	15	1.0	14	15	17
	<i>H. & F.</i>	19	15	0.9	14	15	17
<i>Thoracique</i>	<i>H.</i>	10	54	0.6	53	54	55
	<i>F.</i>	9	54	1.3	52	54	56
	<i>H. & F.</i>	19	54	1.0	52	54	56
<i>Lombaire</i>	<i>H.</i>	10	29	0.7	28	29	30
	<i>F.</i>	9	30	0.9	29	30	31
	<i>H. & F.</i>	19	29	0.8	28	29	31

Tableau 15

Longueurs curvilignes des profils obtenus par empilement alterné des quadrilatères représentant les corps vertébraux et les espaces intervertébraux, du plateau supérieur de C3 jusqu'au plateau inférieur de L5, et proportion de cette mesure représentée par chaque étage vertébral. n , effectif; m , moyenne; s , écart-type; intervalle de tolérance à 95 % symétrique pour la longueur curviligne totale; $p 0.025$, $p 0.5$ et $p 0.975$, percentiles renfermant respectivement 2.5, 50 et 97.5 % des valeurs de l'échantillon. Valeurs exprimées en mm et en pourcentage.

4.2.5. Etude des extrema

La localisation des minima et des maxima sur le polynôme correspond aux points où la dérivée s'annule. Ces extrema sont circonscrits par un processus itératif d'approximations successives jusqu'à obtenir une précision supérieure au $10^{\text{ème}}$ de millimètre. La description des extrema est intéressante pour celle du profil dont ils représentent les sommets de lordose (minima) et de cyphose (maxima). Par conséquent, ils n'ont de valeur que par rapport à l'axe sur lequel est ajusté le profil et ne peuvent être définis à partir des polynômes calculés sur une fraction seulement de l'ensemble de la pile. Le nombre des extrema, leur nature et la valeur de y correspondante ont donc été déterminés pour chaque sujet à partir de l'ajustement polynomial calculé sur l'ensemble de la pile des quadrilatères, depuis l'espace intervertébral de S1 jusqu'à l'espace intervertébral de C3. Afin d'obtenir des régressions qui décrivent correctement les profils, un polynôme de degré 6 a été utilisé pour deux d'entre eux ($R^2 = 0.92$ et $R^2 = 0.99$), et un polynôme de degré 8 pour quatre autres ($0.97 < R^2 \leq 0.99$). Il y a par ailleurs 6 individus pour lesquels l'empilement complet des corps vertébraux et espaces intervertébraux n'est pas réalisable. Il s'agit de cas où le sacrum n'est pas conservé, ou encore de cas dans lesquels certaines facettes articulaires sont endommagées, ce qui ne permet pas d'accéder à l'ensemble du système de mesures nécessaire au calcul d'un ou de plusieurs espaces intervertébraux (Les espaces intervertébraux manquants appartiennent des segments cervicaux adjacents). Ces sujets ont été éliminés des descriptions métriques des extrema (position et flèche), et quatre d'entre eux ont aussi été mis à l'écart des descriptions qualitatives du nombre et de l'orientation des extrema car il n'était pas possible de définir les segments absents étaient susceptibles de déterminer un extremum supplémentaire.

Parmi les 20 profils dont on peut définir le nombre et la nature des extrema, 11 correspondent à des sujets masculins et 9 à des sujets féminins. Trois schémas sont observables:

1. le profil peut ne posséder qu'un seul extremum dont la flèche est négative, disposition qui correspond à un sommet de cyphose;
2. il peut posséder deux extrema: un premier localisé dans la moitié inférieure du profil, de flèche positive, et un second de flèche négative situé au dessus du premier, c'est-à-dire un sommet de lordose lombaire (dont la localisation peut aussi appartenir aux segments thoraciques bas), et un sommet de cyphose thoracique;
3. enfin, le profil peut présenter trois extrema correspondant successivement aux sommets de la lordose lombaire, de la cyphose thoracique et de la lordose cervicale.

Sept sujets présentent le schéma à un seul extremum (six hommes et une femme, 6:1), 9 sujets présentent un profils avec un sommet de lordose lombaire et un sommet de cyphose thoracique (3:6), et 4 sujets possèdent trois sommets (2:2). Les profils possédant plus d'un sommet, c'est-à-dire ceux qui montrent une lordose lombaire, sont donc au nombre de 13: 5 masculins et 8 féminins.

Les tableaux de contingence ne permettent pas de rejeter l'hypothèse d'une distribution au hasard quand les fréquences absolues des différents schémas sont comparées deux par deux et entre les sexes (3 tests différents). Les probabilités exactes données par le test de Fisher vont de $p = 0.06$ pour la comparaison "1 extremum *versus* 2 extrema"; à $p = 0.61$ pour la comparaison "2 extrema *versus* 3 extrema". Donc rien ne permet de dire que la présence de un, deux, ou trois extrema soit liée avec le sexe.

A. *Extremum négatif au niveau cervical*

Le sommet de lordose cervicale est donc présent chez trois individus, pour lesquels il est toujours associé aux deux autres sommets de courbure et est localisé au niveau de la troisième ou quatrième vertèbre cervicale. Plus précisément, il se situe entre 95 et 98 % de la hauteur totale du profil (Tableau 16). Il est peu marqué: sa distance par rapport à l'axe qui joint l'espace intervertébral de S1 et l'espace intervertébral de C3, autrement dit, sa flèche, n'étant pas supérieure à 2 % (en proportion de la hauteur du profil).

B. *Sommet de cyphose*

(1) Description et comparaisons

Le sommet de la cyphose a une localisation assez variable, qui peut aller de la deuxième à la dixième vertèbre thoracique, soit entre 46 et 80 % de la hauteur, si l'on considère les valeurs extrêmes rencontrées. L'intervalle de tolérance estimé de la population donne une meilleure description de cette variabilité, et situe la position du sommet entre 36 et 86 %, pour $\alpha = 0.05$. La distribution des données ne conduit pas à rejeter l'hypothèse de normalité: les résidus se répartissent sans motif régulier de part et d'autre de la droite théorique de normalité, et le test de Kolmogorov-Smirnov donne une probabilité de $p > 0.2$. Les comparaisons de moyennes qui peuvent donc être entreprises montrent que l'emplacement du sommet de la cyphose est significativement différent selon l'allure de l'empilement. D'une manière générale, il semble que l'extremum soit situé plus haut pour les profils qui comportent un plus grand nombre de sommets de courbures. En effet, si la position moyenne du sommet de la cyphose, pour les profils ne possédant que cette courbure, est comparée à celle des profils possédant aussi un sommet de lordose lombaire, le sommet de cyphose apparaît situé plus haut dans ce dernier groupe (il existe une différence $\Delta = 12.4$, exprimée en % de la hauteur), et l'hypothèse d'égalité est nettement rejetée ($p = 0.007$). La comparaison entre les profils à 1 extremum et ceux à 3 extrema va dans le même sens ($\Delta = 23.2$ %; $p = 0.001$); et de même quand sont regroupés les profils à 1 ou 2 extrema, face aux profils à 3 extrema ($\Delta = 16.1$ %; $p = 0.013$); ou ceux à un seul extremum face à ceux possédant 2 ou 3 extrema ($\Delta = 15.3$ %; $p = 0.001$).

En revanche, il n'y a pas de différence dans la position moyenne du sommet de cyphose entre les profils possédant les 3 extrema (c'est-à-dire ceux qui ont un sommet de lordose cervicale) et ceux ne montrant que deux extrema: un sommet de lordose lombaire et un sommet de cyphose thoracique ($\Delta = 10.8$ %; $p = 0.054$). De plus, le sommet de lordose cervicale qui est présent dans trois cas se situe très haut, pratiquement au sommet de l'empilement, et est très peu accusé: la flèche est très courte. Son influence sur la distribution des deux autres extrema semble donc négligeable. Au contraire, la lordose lombaire se situe dans l'échantillon jusque pratiquement 5^{ème} profil (18 %) et au moins à 6 % de la base, avec une flèche pouvant égaler 4 % de la hauteur.

C'est donc la présence d'une lordose au niveau lombaire, suffisamment accusée pour définir un extremum, qui entraîne un déplacement du sommet de la cyphose thoracique en direction craniale. Ce phénomène était déjà observable quand seule la morphologie des corps vertébraux était prise en compte.

Les comparaisons entre groupes masculin et féminin indiquent aussi que le sommet de la cyphose thoracique est situé plus bas dans le groupe masculin ($\Delta = 9.9$ %; $p = 0.049$). Pour ce sexe, la flèche de la cyphose est aussi significativement plus grande ($\Delta = 4.6$ %; $p = 0.008$).

Cette dernière valeur, pour l'ensemble des individus, est égale en moyenne à 8 % de la hauteur du profil et pourrait atteindre, selon l'intervalle de tolérance estimé de la population ($\alpha = 0.05$), des

valeurs allant de zéro (absence de courbure) à 17 %. La fourchette observée, avec une amplitude de 14 %, est peu différente de cette estimation, puisqu'elle a pour bornes les valeurs 3 et 17 %. Les comparaisons entre groupes des valeurs des *flèches* révèlent *exactement* les mêmes différences significatives, et elles seules, que lorsque les *localisations* des extrema ont été comparées; mais le signe de la différence est opposé. Les profils comportant 2 ou 3 extrema ont des flèches plus courtes que ceux qui ne possèdent qu'un seul extremum. Pour la comparaison '1 extremum *versus* 2 extrema', on a $\Delta = 4.4\%$ et $p = 0.012$; pour le test '1 extremum *versus* 3 extrema': $\Delta = 7.9\%$ et $p = 0.005$. Et de même, l'ensemble des profils à un ou deux extrema, comparé aux profils à un extremum montre une différence $\Delta = 5.4\%$ ($p = 0.021$); et la comparaison "1 *versus* 2 ou 3 extrema" donne une différence $\Delta = 5.4\%$ ($p = 0.002$).

	<i>nb. Extr.</i>		<i>Position</i>					<i>Flèche</i>												
			<i>Sgt.</i>	<i>n</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>Frch.</i>	<i>i.T.</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>Frch.</i>	<i>i.T.</i>								
<i>Lordose cervicale</i>	3	∇	C3-C4	3	97	1	95	98	3	-	-	-1	1	-2	-1	2	-	-		
<i>Cyphose thoracique</i>	∇	M	T2-T10	8	57	§	10	46	77	31	32	81	11	▣	4	6	16	10	2	20
		F	T2-T9	9	66	§	10	47	80	33	42	91	6	▣	3	3	10	8	0	13
		∇	T2-T10	17	62		11	46	80	34	38	86	8		4	3	16	14	0	17
<i>Lordose lombaire</i>	∇	M	L3-L4	3	10		6	6	17	11	-	-	-1	1	-3	0	3	-	-	
		F	L3-L4	8	11		4	7	18	11	4	25 ¹	-2	1	-4	0	4	-6	0	
		∇	L3-L4	11	11		4	6	18	12	4	24 ¹	-2	1	-4	0	4	-5	0	
<i>Cyphose thoracique</i>	3	T	T2-T4	3	75	‡	6	68	80	12	-	-	4	£	2	3	6	3	-	-
	2	M	T7-T8	2	56		1	55	56	1	-	-	9	2	8	11	3	-	-	
		F	T3-T7	6	67		7	60	75	15	48	86	7	3	3	10	7	0	14	
		∇	T3-T8	8	64	†‡	8	55	75	20	45	84	8	£¥	3	3	11	7	1	14
1	M	T7-T10	5	53		7	46	61	14	31	74	13	3	9	16	8	3	22		
	F	T9	1	47		-	-	-	-	-	-	9	-	-	-	-	-	-		
	∇	T7-T10	6	52	†	7	46	61	14	33	70	12	¥	3	9	16	8	3	21	
<i>Lordose lombaire</i>	3	∇	L3-L4	3	11		5	7	17	10	-	-	-2	1	-3	-1	2	-	-	
	2	M	L4	2	7		1	6	7	1	-	-	-1	0	-1	0	0	-	-	
		F	L3-L4	6	12		4	8	18	10	4	30 ¹	-2	2	-4	0	4	-7	0	
		∇	L3-L4	8	11		4	6	18	12	3	26 ¹	-2	2	-4	0	4	-6	0	

Tableau 16

Positions et flèches des extrema pour les profils obtenus à partir des piles alternées des corps vertébraux et des espaces intervertébraux, de C3 à L5. Les paramètres sont calculés à partir des valeurs exprimées en pourcentage de la hauteur du profil. Des groupes sont formés suivant le nombre d'extrema (*nb. Extr.*) du profil (∇, quel que soit le nombre d'extrema; et 1, 2 ou 3 extrema); ainsi que suivant le sexe (M, masculin; F, féminin; ∇, quel que soit le sexe). *Sgt.*, intervalle des segments où ont été localisés des extrema; *n*, effectif; *m*, moyenne; *s*, écart-type; *Frch.*, fourchette de valeurs (minimum, maximum et différence); *i.T.*, intervalle de tolérance estimé de la population contenant 95 % des valeurs. Les moyennes qui sont significativement différentes quand elles sont comparées deux à deux sont identifiées par un signe diacritique (§, †, ‡, £, ¥).

Note 1: la position de la lordose lombaire ne suit pas une distribution normale mais s'ajuste à une distribution logarithmico-normale. En conséquence, les intervalles de tolérance sont calculés sur la variable transformée $X' = \log(X+1)$ (BARTLETT, 1947 cité par ZAR, 1984). Ils sont donc asymétriques autour de la moyenne.

(2) Interprétation

Ces résultats, qui recoupent très exactement ceux trouvés pour les *localisations* des extrema, indiquent que la présence d'un extremum négatif au niveau lombaire, autrement dit l'existence d'une lordose suffisamment développée pour présenter un sommet, est liée à une position plus craniale de la cyphose thoracique, qui présente aussi une flèche maximale plus faible.

Une telle relation entre le dessin de la lordose lombaire et celui de la cyphose thoracique est *a priori* d'autant plus concevable que les profils pris en considération ne font intervenir que la morphologie *osseuse* du segment. Les possibilités de variation dans la forme des vertèbres sont nécessairement limitées, et le nombre des éléments osseux qui interviennent dans le dessin de la cyphose est, par voie de conséquence, plus faible lorsque le profil possède une lordose lombaire. La cyphose, qui débute à partir de segments situés en position plus craniale, voit donc son extremum déplacé dans cette direction. Par ailleurs, la plasticité¹ osseuse limitée de chaque segment implique que cette cyphose soit moins accentuée, c'est-à-dire qu'elle possède une flèche maximale plus courte.

Une étude des corrélations entre les coordonnées des extrema (position et flèche) pour la lordose thoracique et pour la cyphose conforte les déductions qui peuvent être faites des comparaisons de moyennes. Il existe en effet une corrélation négative significative ($\alpha = 0.05$) entre:

1. la position de la lordose lombaire (après transformation logarithmique) et la valeur de sa flèche ($R = -0.89, p = 0.0002$),
2. la position de la cyphose et la valeur de sa flèche ($R = -0.6, p = 0.01$),
3. la flèche de la lordose et la position de la cyphose ($R = -0.65, p = 0.03$).

La flèche maximale de la lordose est donc d'autant plus petite que le sommet de cette lordose est situé cranialement et la même relation est valable pour la cyphose. La dernière relation (3.) est liée aux deux premières si l'on peut démontrer qu'il existe une corrélation positive entre les positions des sommets de lordose et de cyphose. En fait, cette corrélation ($R = -0.58$) n'est pas significativement différente de zéro, mais l'erreur de première espèce est très proche du seuil de 5% : $p = 0.06$. De plus, l'effectif correspondant au test, et dû au petit nombre de profils possédant une lordose lombaire, est faible ($n = 11$). L'hypothèse d'une réelle corrélation entre positions de lordose et de cyphose dans la population peut donc être envisagée avec assez de sûreté.

L'utilisation de coordonnées exprimées en fonction de la hauteur du profil est critiquable, d'un point de vue méthodologique, quand elle s'applique à l'étude des flèches maximales. On s'attend en effet à trouver une corrélation négative entre ces dernières et la hauteur: un profil dont les courbures sont plus marquées étant *a priori* susceptible de présenter une longueur en projection qui soit plus faible. En réalité, cette corrélation n'est pas rencontrée. Entre la hauteur et la somme des valeurs absolues en millimètres des flèches maximales lombaire et thoracique, la corrélation est $R = 0.35$, elle n'est pas significative: $p = 0.3$. D'autre part, tous les tests statistiques précédemment décrits et les calculs de variabilité ont été effectués sur les coordonnées des extrema exprimées en fonction de la longueur développée. Les résultats ont toujours été confirmés, et avec un même degré de signification. L'expression des valeurs relativement à la hauteur a , par conséquent, été conservée. Elle possède en effet l'avantage de correspondre à une transformation homothétique des profils.

¹ Le terme de *plasticité* ne se réfère pas dans ce contexte à la plasticité mécanique. Il s'agit de la variation qui est permise à la morphologie vertébrale. Elle est limitée à la fois par le patrimoine génétique de la population (JOHNSON *et al.*, 1989) et par la flexibilité dans les processus de développement (BODEN, 1995; JOHNSON *et al.*, 1990; HOSSEINI et HOGG, 1991; NAGATA, 1993) et de remodelation osseuse (TSCHANT et RUTISHAUSER, 1967; BAULNY, 1992; LAGIER, 1992). Cependant, ce sont effectivement les contraintes mécaniques auxquelles est soumise la colonne vertébrale dans son ensemble qui, en dernier lieu, limitent indirectement cette variabilité (AHMED, 1990, ADAMS, 1983, BODEN, 1995; PAL, 1991).

C. *Extremum lombaire*

Parmi les dix-sept profils dont la conservation est suffisante pour décrire de manière quantitative leurs extrema, onze présentent un sommet de lordose lombaire, soit près de deux tiers des sujets. La description de lordoses lombaires plus accentuée pour les sujets féminins, avec une totale indépendance vis-à-vis du présent échantillon (AMONOO-KUOFI, 1992; DELMAS, 1951-1952; ERICKSEN, 1976, 1978a, 1978b; JANKAUSKAS, 1994; KNUSSMANN et FINKE, 1980; SCOLES, 1988; et de manière indirecte: MILNE et LAUDER, 1976), permet de supposer *a priori*, qu'il y ait un nombre significativement plus élevé de sujets féminins pour lesquels la morphologie osseuse des vertèbres détermine un sommet de lordose lombaire. Des tests unilatéraux peuvent donc être entrepris pour les tableaux de contingence 2 x 2:

Hommes / Femmes versus
Possédant un extremum lombaire négatif / N'en possédant pas.

La probabilité exacte d'obtenir la distribution correspondante [3;8;5;1] est de 0.043 (test de Fisher). Cette valeur est à considérer en regard de celle trouvée pour le tableau prenant en compte trois profils supplémentaires pour lesquels est possible une description qualitative des extrema. La répartition des fréquences absolues qui est obtenue [5;8;6;1] a une probabilité $p = 0.058$ d'être due au hasard. Ces valeurs circonscrivent de près le seuil décisif des 5 %, et chaque classe est peu représentée. Par ailleurs, de nombreuses données physiologiques décrivent une différence sexuelle dans la configuration de la lordose lombaire (*cf. supra*). L'élévation de l'erreur de première espèce à la valeur de seulement 6 % paraît donc justifiée.

L'hypothèse d'une différence sexuelle de la morphologie osseuse des vertèbres, qui soit susceptible de se manifester dans la détermination plus fréquente d'un sommet de courbure sur les profils féminins est donc hautement probable.

Un extremum de lordose lombaire est trouvé, quelque soit le sexe, entre les segments L3 et L4, soit entre 6 et 18 % de la hauteur du profil à partir de sa base. La moyenne est égale à 11 % sans différence significative quand les sexes sont comparés ($p > 0.5$). Si la localisation est limitée dans l'échantillon à ces deux segments, la variabilité estimée est toutefois plus importante, puisqu'elle s'étend sur un intervalle égal à 5^{ème} de la hauteur, entre les bornes 4 et 24 % ($\alpha = 0.05$).

La distance dont l'extremum lombaire s'éloigne de l'axe, c'est-à-dire sa flèche, n'est pas non plus significativement différente selon que l'on s'intéresse sujets masculins ou féminins. Elle est égale en moyenne à 2 % de la hauteur, la plus grande valeur observée n'étant que de 4 %, et la limite de tolérance de 5 %.

Les tests de variances (test du F de Fisher) préalables aux comparaisons de moyennes n'ont pas révélé de différences significatives entre les sexes. La variabilité dans la position de l'extremum est donc semblable pour les sujets masculins et féminins ($p = 0.2$). Il en est de même de la variabilité des flèches aux extrema ($p > 0.5$).

Enfin, si pour ces mêmes variables sont opposés, d'une part, les profils qui ne comportent qu'une seule lordose, et d'autre part ceux qui dessinent une seconde lordose au niveau cervical, aucune différence des moyennes n'est mise en évidence ($p > 0.3$ quelque soit le test).

D. Valeurs absolues

Si elles sont difficilement interprétables puisque liées au format, les coordonnées réelles des extrema permettent d'apprécier quels sont les ordres de grandeurs rencontrés. L'abscisse d'un extremum de la fonction polynomiale correspond donc à la hauteur à laquelle il est situé par rapport à la base de la pile (ici l'espace intervertébral de S1). Son ordonnée exprime sa distance par rapport à l'axe du profil, lequel joint l'espace intervertébral de S1 à celui de C3 par leurs sommets respectivement postéro-inférieur et postéro-supérieur. Position et flèche des sommets de courbure peuvent ainsi être décrits (Tableau 17).

Le sommet de la lordose cervicale se situe en moyenne à 47 cm de la base, avec une flèche de 7 mm dont la valeur maximale rencontrée excède de peu le centimètre (1.2 cm). Une valeur de 30 cm est trouvée pour la position de la cyphose. La fourchette observée, de 16 cm environ, est une estimation étroite de la variabilité, puisque l'intervalle de tolérance ($\alpha = 0.05$) décrit une amplitude de 22 cm. La flèche, de 4 cm en moyenne, peut atteindre le double de cette valeur, comme l'indiquent aussi bien le minimum rencontré que la borne supérieure de l'intervalle de tolérance. Elle pourrait aussi tendre vers zéro. Enfin, la lordose lombaire se trouve à environ 5 cm de l'espace intervertébral de S1. La transformation logarithmique permet d'estimer une variabilité qui est distribuée, à 95 %, entre les bornes de 2 et 12 cm. La flèche est de 8 mm en moyenne. Elle peut être virtuellement nulle, ou atteindre plus de 2 cm.

	<i>nb. Extr.</i>		<i>Position</i>						<i>Flèche</i>								
			<i>n</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>Frch.</i>			<i>i.T.</i>		<i>m</i>	<i>s</i>	<i>Frch.</i>			<i>i.T.</i>	
<i>Lordose cervicale</i>	3	∇	3	471	4	468	476	8	-	-	-7	5	-12	-3	9	-	-
<i>Cyphose thoracique</i>	∇	M	8	281	48	234	377	143	159	402	54	17	29	79	50	11	98
		F	9	320	50	231	392	161	199	441	30	14	13	45	32	0	64
		∇	17	302	52	231	392	161	189	414	42	19	13	79	66	0	84
<i>Lordose lombaire</i>	∇	M	3	49	30	32	84	52	-	-	-7	7	-15	-2	13	-	-
		F	8	53	20	36	85	49	20	121	-9	7	-22	-1	21	-27	0
		∇	11	52	22	32	85	53	19	119	-8	7	-22	-1	21	-24	0
<i>Cyphose thoracique</i>	3	T	3	365	33	328	392	64	-	-	19	9	13	29	16	-	-
		∇	3	365	33	328	392	64	-	-	19	9	13	29	16	-	-
	2	M	2	273	32	250	295	45	-	-	46	15	35	56	22	-	-
		∇	8	310	40	250	377	127	209	410	37	13	16	56	40	3	70
	1	M	5	265	34	234	307	73	160	369	63	14	44	79	35	21	105
		∇	6	259	34	231	307	76	165	353	59	15	42	79	37	18	101
<i>Lordose lombaire</i>	3	∇	3	53	27	36	84	48	-	-	-9	6	-15	-3	12	-	-
		∇	3	53	27	36	84	48	-	-	-9	6	-15	-3	12	-	-
	2	M	2	32	0	32	32	0	-	-	-3	1	-3	-2	1	-	-
		∇	8	51	22	32	85	53	18	128	-8	8	-22	-1	21	-27	0

Tableau 17

Positions et flèches des extrema pour les profils obtenus à partir des piles alternées des corps vertébraux et des espaces intervertébraux, de C3 à L5. Valeurs en mm. Des groupes sont formés suivant le nombre d'extrema (*nb. Extr.*) du profil (∇, quel que soit le nombre d'extrema; et 1, 2 ou 3 extrema); ainsi que suivant le sexe (M, masculin; F, féminin; ∇, quel que soit le sexe). *n*, effectif; *m*, moyenne; *s*, écart-type; *Frch.*, fourchette de valeurs (minimum, maximum et différence); *i.T.*, intervalle de tolérance estimé de la population contenant 95 % des valeurs.

E. Sommets de courbure impliqués par la morphologie osseuse des corps vertébraux et des espaces intervertébraux, résumé:

La morphologie osseuse des corps vertébraux et des espaces intervertébraux détermine des profils sagittaux qui, par leurs extrema, peuvent être distingués en trois catégories. 1/ Trois sommets de courbures opposés correspondant aux courbures physiologiques: lordose cervicale (C3-C4), cyphose thoracique (T2-T4) et lordose lombaire (L3-L4); 2/ Un sommet de cyphose (T3-T8) et un sommet de lordose (L3-L4); 3/ Un seul sommet correspondant à une cyphose de localisation thoracique (T7-T10). On ne peut mettre en évidence de relation statistique entre la configuration du profil (1, 2 ou 3 extrema) et le sexe. Cependant, les profils correspondant à des sujets féminins présentent plus fréquemment (et de manière significative) un sommet de lordose au niveau lombaire.

L'extremum cervical est peu marqué et situé pratiquement au sommet de l'empilement.

L'extremum thoracique a une localisation très variable, qui est déplacée cranialement quand le profil présente un sommet de lordose lombaire. Sa flèche est alors plus courte. De façon totalement cohérente, la même relation est mise en évidence quand sont comparés les profils des sujets masculins et féminins: ces derniers possèdent un sommet de cyphose qui est moins accusé et localisé plus haut sur l'empilement. De telles différences (qui sont liées au sexe puisque les profils féminins possèdent plus fréquemment un extremum lombaire) correspondent au fait qu'un nombre plus restreint de segments prennent part à la détermination de la cyphose lorsqu'une lordose au niveau lombaire est assez accusée pour présenter un extremum.

Si la présence d'un extremum négatif au niveau lombaire est liée au sexe, on ne peut mettre en évidence de différences allant dans ce sens pour les données quantitatives. La position du sommet, limitée dans l'échantillon aux segments L3 et L4, pourrait atteindre un cinquième de la hauteur du profil.

4.2.6. Points d'inflexion

Les points d'inflexion sont donnés par l'annulation de la dérivée seconde du polynôme. Leurs coordonnées sont déterminées à partir de chacune des trois équations qui décrivent les étages cervico-thoracique, thoracique, et thoraco-lombaire, lesquels sont chevauchantes sur plusieurs segments.

A. *Points d'inflexion significatifs*

En dépit de la division du profil en ces trois zones pour le calcul de la régression, certains points donnés par l'équation n'ont pas de valeur descriptive dans la description du profil. Il s'agit de cas de figures déjà rencontrés lors de l'étude des profils impliqués par la morphologie des corps vertébraux: inflexion située à l'extrémité du polynôme, au niveau du dernier segment considéré; ou encore inflexion entourée de deux extrema rapprochés et dont les ordonnées sont peu différentes. Dans ce cas, la courbure reste faible et son inversion correspond à une oscillation autour de la valeur nulle. Les points d'inflexion non significatifs doivent donc être isolés.

Le choix de zones chevauchantes pour le calcul des polynômes permet cependant de ne pas négliger la présence d'inflexions significatives qui se situeraient à l'extrémité d'une des zones décrites. Par exemple, le polynôme décrivant le profil cervico-thoracique correspondant à l'individu 185 (de sexe masculin), décrit une inversion de courbure au niveau du segment T6. Dans un premier temps, celle-ci peut difficilement être envisagée comme une inflexion significative imposée par la morphologie des vertèbres puisque le polynôme de l'étage cervico-thoracique est calculé entre les segments C3 et T7, et que l'inversion se situe donc à l'extrémité de la courbe. Cependant, une inversion en T6 est aussi décrite par le polynôme ajusté à l'étage thoracique, qui est calculé entre T1 et T12. L'inflexion se situe alors au milieu de la zone décrite par l'équation. La présence d'une inversion de courbure en T6 est donc confirmée et les résultats donnés par le polynôme "thoracique" sont préférés pour la description du profil.

B. *Expression de la position de l'inflexion*

Au contraire de la détermination des extrema, celle des points d'inflexion ne nécessite pas une conservation complète de l'ensemble des segments, puisqu'elle s'effectue indépendamment de l'orientation du profil. Il est aussi possible de conclure à une absence de point d'inflexion au niveau des segments cervicaux supérieurs, même lorsque les quadrilatères des derniers segments (C3 à C4) ne sont pas calculables, et cela si aucune diminution de courbure n'est amorcée au niveau des segments situés juste inférieurement. En revanche, afin que les positions des points d'inflexion sur ces profils puissent être comparées à celles des points d'inflexion des profils complets, elles ne peuvent être exprimées en pourcentage de la longueur curviligne totale. La situation des inversions de courbure sur le profil par rapport à sa base (point postérieur du plateau inférieur de L5) sera donc donnée en pourcentage de la longueur curviligne (c'est-à-dire développée) des segments thoracique et lombaire.

La longueur curviligne de l'étage cervical dans les empilements, depuis le plateau inférieur de C7 jusqu'au plateau inférieur de C2 (coté supérieur du quadrilatère représentant l'espace intervertébral de C3) permet de calculer la proportion qu'elle représente par rapport à la longueur

additionnée des étages thoracique et lombaire. Les minimum et maximum sont de 24 à 31 %, avec une moyenne de 26.6 % ($n = 18$, $s = 1.9$ %). Ces valeurs étant peu dispersées, il est possible, à partir de la situation d'un point d'inflexion exprimée en pourcentage de la longueur curviligne thoraco-lombaire, de donner une bonne estimation de cette position relativement à la longueur curviligne totale.

C. Schémas observés

Plusieurs schéma de présence des points d'inflexion sont remarqués (Tableau 18). Deux profils correspondant à des sujets masculins (14 % pour ce sexe) ne possèdent aucune inflexion, le profil dessinant donc une cyphose générale dont la concavité, *en chaque point*, est tournée vers l'avant. Aucun profil féminin ne correspond à ce cas de figure. Il faut cependant compter avec un échantillonnage qui laisse espérer une proportion de 31 % ($\alpha = 0.05$) pour le sexe féminin, et de 44 % pour le sexe masculin. D'autre part, une inflexion déterminant une orientation en lordose au niveau de l'étage cervical peut être présente (50 % du total). Elle est exclusive chez un seul individu, masculin; mais là encore l'échantillonnage ne laisse pas envisager de différence entre les sexes lorsque l'intervalle de confiance est pris en compte. Une inflexion déterminant une orientation en lordose au niveau de l'étage lombaire est très fréquemment présente, chez 79 % des sujets masculins, et chez tous les sujets féminins de l'échantillon. A l'encontre de l'inflexion « cervicale », la présence exclusive de l'inflexion lombaire n'est pas rare (29 % des hommes et 60 % des femmes). Enfin, les

<i>profils...</i>	<i>Total</i>	<i>Masculins</i>	<i>Féminins</i>
<i>...sans aucune inflexion:</i>	2 8 % (1 - 28)	2 14 % (3 - 44)	0 0 % (0 - 31)
<i>...présentant une inflexion cervicale:</i>	12 50 % (30 - 70)	8 57 % (30 - 81)	4 40 % (14 - 73)
<i>...présentant une inflexion lombaire:</i>	21 88 % (67 - 97)	11 79 % (49 - 94)	10 100 % (69 - 100)
<i>...présentant deux inflexions cervicale et lombaire:</i>	11 46 % (26 - 67)	7 50 % (24 - 76)	4 40 % (14 - 73)
<i>...présentant uniquement une inflexion cervicale:</i>	1 4 % (0 - 23)	1 7 % (0 - 36)	0 0 % (0 - 31)
<i>...présentant uniquement une inflexion lombaire:</i>	10 42 % (23 - 63)	4 29 % (10 - 58)	6 60 % (27 - 86)
<i>...sans inflexion cervicale:</i>	12 50 % (30 - 70)	6 43 % (19 - 70)	6 60 % (27 - 86)
<i>...sans inflexion lombaire:</i>	3 13 % (3 - 33)	3 21 % (6 - 51)	0 0 % (0 - 31)

Tableau 18

Fréquences absolues et relatives des points d'inflexion des schémas rencontrés selon le nombre de points d'inflexion présents sur le profil (empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux impliqués par la morphologie osseuse). Fréquences pour l'ensemble des sujets et par sexe. Successivement: Fréquences absolue et relative ; entre parenthèses: intervalle de confiance à 95 % de la fréquence relative (CLOPPER & PEARSON, 1934; DIEM, 1972).

deux inflexions peuvent être simultanément présentes, ce qui correspond à la situation anatomique (l'existence de courbures physiologiques statiques dans le sens de la cyphose a cependant été décrite pour l'étage cervical: GORE *et al.*, 1986; HARRISON *et al.*, 1996). Dans l'échantillon, ce cas est représenté par 50 % des sujets masculins et 40 % des sujets féminins.

Le fait que les intervalles de confiance des proportions ne laissent pas envisager de différence entre les sexes est confirmé par le calcul des tableaux de contingence. La répartition des effectifs ne permet pas de rejeter l'hypothèse d'une distribution au hasard dans le tableau 2×2 : *inflexion*

		<u>Sgt.</u>	<u>n</u>	<u>m</u>	<u>s</u>	<u>Frch.</u>	<u>D</u>	<u>i. T.</u>		
Inflexion lombaire										
<i>quel que soit le schéma</i>	∇	T6-L5	21	30	12	2	51	49	4	56
	M	T6-L5	11	29	14	2	51	49	0	63
	F	T10-L4	10	31	9	22	47	25	9	54
<i>...seule présente</i>	∇	T9-L5	10	30	13	2	47	45	0	62
	M	L1-L5	4	21	14	2	35	32	0	73
	F	T9-L2	6	35	10	23	47	24	7	64
<i>...associée à une inflexion cervicale</i>	∇	T6-L4	11	30	11	14	51	37	4	57
	M	T6-L2	7	34	13	14	51	37	0	69
	F	T10-L4	4	25	2	22	28	5	17	33
Inflexion cervicale										
<i>quel que soit le schéma</i>	∇	C5-T4	12	98	9	81	110	29	78	117
	M	C5-T3	8	98	9	81	110	29	74	121
<i>...seule présente</i>	M	C7	1	101	-	-	-	-	-	-
<i>...associée à une inflexion lombaire</i>	∇	C5-T4	11	97	9	81	110	29	77	118
	M	C5-T3	7	97	10	81	110	29	71	124
	F	C6-T4	4	98	8	89	106	17	70	126

Tableau 19

Position des points d'inflexion de localisation lombaire et cervicale exprimée en pourcentage de la longueur curviligne des étages thoracique et lombaire. Empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux. Statistiques descriptives données selon les différents schémas qui peuvent être rencontrés, quant au nombre de points d'inflexion et selon le sexe (∇: quel que soit le sexe). **Sgt.**, intervalle des segments où ont été localisées des inflexions; **n**, effectif; **m**, moyenne; **s**, écart-type; **Frch.**, fourchette de valeurs (minimum, maximum); **D**, différence ou étendue de la fourchette; **i.T.**, intervalle de tolérance estimé de la population, et contenant 95 % des valeurs. Les moyennes ou les écarts-type qui sont significativement différents quand ils sont comparés deux à deux (tests de Student et de Snedecor) sont identifiés par un signe diacritique (◇, ☒, ☒) - dans le test noté ◇, on a $p = 0.06$. *Nota*: Toutes les inflexions cervicales des profils de sujets féminins sont associées à une inflexion lombaire.

lombaire (présence / absence) versus sexe (masculin / féminin). Il en est de même avec le tableau homologue calculé pour les inflexions cervicales. Dans les deux cas, le test de Fisher donne une probabilité exacte : $p > 0.2$.

Par ailleurs, il n'est pas non plus possible de mettre en évidence une relation statistiquement significative entre les deux points d'inflexion. En effet, le test 2×2 : *inflexion lombaire (présence / absence) versus inflexion cervicale (présence / absence)* ne permet pas de rejeter l'hypothèse du hasard dans les distributions d'effectifs ($p > 0.5$). Aucun lien ne peut donc être mis en évidence entre inversions de courbure au niveau lombaire et au niveau cervical.

D. Points d'inflexion déterminant une lordose lombaire

Les inflexions déterminant une courbure lombaire dans le sens de la lordose peuvent être situées au niveau d'un segment relativement haut de la colonne: jusque T6, sixième vertèbre thoracique (Tableau 19). Cette localisation correspond à 51 % de la longueur curviligne thoraco-lombaire, soit environ 40 % de la longueur curviligne totale. La limite la plus craniale est cependant

située en T9 si l'inflexion lombaire est la seule présente sur le profil, mais la position moyenne de l'inflexion lombaire, quel que soit le nombre d'inflexions présentes, est égale à 30 % de la longueur curviligne thoraco-lombaire ($\approx 23\%$, c'est-à-dire environ **4** de la longueur développée totale). Cette valeur de 30 % reste inchangée si l'on ne considère (indépendamment du sexe) que les profils où l'inflexion lombaire est la seule présente, ou encore ceux où elle est associée à une inflexion déterminant une inversion de courbure cervicale.

Les tests de comparaison de moyennes ne montrent aucune différence significative. Cependant, le seuil $\alpha = 0.05$ est pratiquement atteint dans le test relatif à la position de l'inflexion lombaire et qui oppose les individus féminins possédant seulement une inflexion lombaire à ceux qui possèdent à la fois inflexions lombaire et cervicale ($^{\diamond} p = 0.06$). Autrement dit, il reste très fortement probable que la position plus basse de l'inflexion lombaire qui est observée quand une inflexion cervicale est aussi présente, ne soit pas un biaisage du à l'échantillonnage.

La dispersion des valeurs apparaît toujours plus importante dans le sexe masculin: pour les trois catégories qui ont été faites selon le schéma des inflexions, l'écart-type est toujours supérieur. Cependant, une seule différence significative est notée, lorsque l'inflexion lombaire est associée à une inflexion cervicale ($^{\#} p = 0.006$). Les segments T6 et L2 sont les limites extrêmes qui correspondent à la position de l'inflexion « lombaire » dans le sexe masculin. Le point est plus localisé dans le sexe féminin. Il est situé au niveau des segments thoraciques bas et lombaires, entre T10 et L4. Une autre différence significative apparaît lorsque les schémas sont comparés entre eux: la position de l'inflexion lombaire des profils correspondant à des individus de sexe féminin est moins variable lorsque le profil présente aussi une inflexion déterminant une inversion de courbure cervicale ($^{\square} p = 0.014$).

E. Points d'inflexion déterminant une lordose cervicale

Les points d'inflexion qui déterminent une orientation de l'étage cervical en lordose sont situés entre les vertèbres C5 et T4 (incluses). Cette étendue correspond respectivement aux valeurs de 81 et 110 % de la longueur développée des étages thoracique et lombaire, ce qui donne des estimations égales à 64 et 80 %, c'est-à-dire environ **q** et **t e^{èmes}** de la longueur curviligne totale. La position moyenne de l'inflexion cervicale est à 97 % de la base, soit environ 76.6 % (\approx **w**) en proportion de la longueur totale. L'intervalle de tolérance bilatéral estimé de la population ($\alpha = 0.05$) donne une fourchette plus large que celle de l'étendue. Il est borné par les valeurs de 78 et 117 % de la longueur développée thoraco-lombaire, soit environ 62 % (**s^{èmes}**) et 92 % de la longueur totale. Les paramètres sont très semblables pour les deux sexes, et aucune différence significative n'est mise en évidence. Par ailleurs, l'inflexion cervicale du seul profil où elle est présente exclusivement (sujet masculin) est localisée en C7, et appartient donc à la variation trouvée pour les profils féminins. Cette position correspond à 100.5 % de la longueur thoraco-lombaire, c'est-à-dire à exactement (le profil est complet) à 84.1 % de la longueur développée totale.

F. Étude des points d'inflexion selon les extrema présents

Il est intéressant de considérer les inflexions lombaire et cervicale en regard du nombre d'extrema (sommets de courbure) présents sur le profil (Tableau 20).

Ainsi, les profils de l'échantillon qui ne possèdent qu'un extremum, laissant supposer la présence d'une concavité antérieure unique, présentent tous un point d'inflexion déterminant une inversion de courbure, soit cervicale (un seul cas, déjà décrit), soit lombaire (4 cas complets: 3 masculins et 1 féminin). En revanche, aucun profil n'est rencontré pour lequel un unique extremum

Schémas possibles			Inflexion lombaire					Inflexion cervicale					
Inflexions	Extrema	Sexe	n	m	s	Frch.	i.T.	n	m	s	Frch.	i.T.	
- Quel que soit le schéma des inflexions	- Au moins deux extrema thorac. et lombaire	∇	17	33	✓	11	14 51	10 56	11	97	9	81 110	77 118
		M	8	34		12	14 51	3 65	7	97	10	81 110	71 124
		F	9	32		9	22 47	9 55	4	98	8	89 106	70 126
	- Deux extrema thoracique et lombaire	∇	8	35		8	25 47	14 56	2	98	-	94 101	- -
		M	2	33		2	32 35	- -	1	101	-	- -	- -
		F	6	36		10	25 47	9 63	1	94	-	- -	- -
- Une seule inflexion lombaire ou cervicale	- Un seul extremum thoracique	∇	4	19	*✓	12	2 30	0 61	0				
		M	3	17		14	2 30	- -	1	101	-	- -	- -
		F	1	23		-	- -	- -	0				
	- Deux extrema thoracique et lombaire	∇	6	37	*	8	26 47	14 61	0				
		M	1	35		-	- -	- -	0				
		F	5	38	☒	9	☒ 26 47	10 66	0				
- Deux inflexions lombaire et cervicale	- Deux extrema thoracique et lombaire	∇	2	29		-	25 32	- -	2	98	-	94 101	- -
		M	1	32		-	- -	- -	1	101	-	- -	- -
		F	1	25		-	- -	- -	1	94	-	- -	- -
	- Au moins deux extrema thorac. et lombaire	∇	11	30		11	14 51	4 57	11	97	9	81 110	77 118
		M	7	34		13	14 51	0 69	7	97	10	81 110	71 124
		F	4	25	☒	2	☒ 22 28	17 33	4	98	8	89 106	70 126
- Trois extrema cerv., thorac. et lomb.	∇	4	35		11	22 46	0 75	4	104	2	101 106	96 111	
	M	2	44		-	42 46	- -	2	103	-	101 105	- -	
	F	2	25		-	22 28	- -	2	105	-	103 106	- -	

Tableau 20

Position des points d'inflexion de localisation lombaire et cervicale exprimée en pourcentage de la longueur curviligne des étages thoracique et lombaire. Empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux. Statistiques descriptives données selon les différents schémas rencontrés (extrema et points d'inflexion) et selon le sexe (∇: quel que soit le sexe). *n*, effectif; *m*, moyenne; *s*, écart-type; *Frch.*, fourchette de valeurs (minimum et maximum); *i.T.*, intervalle de tolérance estimé de la population contenant 95 % des valeurs. Les moyennes ou les écarts-type qui sont significativement différents quand ils sont comparés deux à deux (tests de Student et de Snedecor) sont identifiés par un signe diacritique (✓, *, ☒). *Nota*: Plusieurs cas de figure ne sont pas mentionnés pour les raisons suivantes: lorsqu'un seul extremum est présent, il est toujours associé à une inflexion cervicale ou lombaire; quand il n'existe qu'une seule inflexion, elle ne peut, évidemment, être associée à plus de deux extrema; de la même façon, trois extrema impliquent, dans ces cas concrets, la présence de deux inflexions.

serait associé à deux inversions de courbure. L'inflexion lombaire du seul cas féminin de profil ne présentant qu'un seul extremum est située en L2, à 23.3 % de la base relativement à la longueur développée thoraco-lombaire, et à exactement 19.3 % ($\approx 5^{\text{ème}}$), relativement à la longueur développée totale. Les trois cas masculins ont une inflexion lombaire située en moyenne à 17 % de la base, de localisation variable mais correspondant toujours à un segment lombaire: en L1, L3 et L5, soit, respectivement, à 30.1 %, 18.4 % et 2.3 % de la base en proportion de la longueur thoraco-lombaire; et exactement à 25.4 %, 15.4 % et 1.9 % en proportion de la longueur totale.

L'observation combinée des points d'inflexion et des extrema permet de constater que d'autres schémas ne sont pas représentés. Ainsi, les profils ne possédant qu'une inflexion lombaire ne présentent jamais d'extremum cervical, et les profils présentant les inflexions cervicale et lombaire possèdent tous au moins deux extrema thoracique et lombaire, c'est-à-dire ces deux extrema associés ou non avec un extremum cervical en lordose.

Il existe plus de profils masculins que féminins (3:1) qui montrent une inflexion lombaire associée à un seul extremum correspondant à la cyphose, et la proportion est inverse (1:5) lorsque cette inflexion est aussi associée à un extremum lombaire. Cependant, Les faibles effectifs de chaque classe ne permettent pas de confirmer un dimorphisme sexuel des schémas observés (probabilité exacte dans le test de Fisher: $p = 0.19$).

L'inflexion déterminant une lordose lombaire est située en moyenne à 33 % de la base (en proportion thoraco-lombaire, soit environ 27.6 % de la longueur totale) lorsque, quel que soit le nombre d'inflexions, deux ou trois extrema sont présents sur le profil – cette situation, selon les cas de figure représentés, correspond à: un extremum lombaire en lordose et un thoracique en cyphose, avec ou sans extremum cervical (en lordose). Cette position de l'inflexion est, en moyenne, pratiquement égale si l'on ne considère que le sous-groupe des profils présentant deux extrema thoracique et lombaire, et sans extremum cervical: l'inflexion est alors située en moyenne à 35 % (26 % de la longueur totale).

De même, lorsque l'inflexion lombaire est la seule présente et que la lordose qu'elle détermine est assez accentuée pour présenter un sommet (« deux extrema thoracique et lombaire »), sa situation moyenne est encore comparable: à 37 % de la base (env. 29 % de la longueur totale). Cependant, elle est significativement plus basse lorsque l'inversion de courbure lombaire, seule présente, n'est pas associée à un extremum lombaire: 19 %, soit environ 15 % de la longueur totale (tableau 20: ✖). Elle est aussi plus basse que lorsque deux ou trois extrema sont présents, quel que soit le schéma des inflexions (Tableau 20: ✓). Autrement dit, l'inflexion lombaire, si elle n'est pas associée à un *extremum* sur la lordose, est située en moyenne significativement plus bas que lorsqu'un extremum est présent. Cette relation reste vraie, que l'on inclue ou non dans la comparaison les profils qui possèdent une inflexion de courbure au niveau cervical. Les probabilités données par le test de Student sont $\checkmark p = 0.0087$ si l'on inclut dans le test les individus possédant une inflexion cervicale (profils sans extremum lombaire: $n = 4$; avec extremum lombaire: $n = 17$); et $\ast p = 0.014$ s'ils sont exclus du test ($n = 4$ et $n = 6$ respectivement).

Lorsqu'il existe une lordose cervicale et une lordose lombaire associées sur un même profil, les positions moyennes des inflexions correspondantes sont, respectivement, de 29 et 98 % par rapport à la longueur thoraco-lombaire, quand ces profils présentent aussi les deux extrema thoracique et lombaire ($n = 2$). Ces positions correspondent à environ 23 et 77 % de la longueur totale. Lorsque les profils montrent aussi un extremum cervical ($n = 4$), les positions des inflexions deviennent 35 et 104 %, soit 28 et 82 % de la longueur total.

Quant aux comparaisons de moyennes effectuées entre les sexes pour les divers schémas étudiés, elles ne montrent pas de différences immédiates. Une localisation assez basse peut cependant être notée pour les profils correspondant à des sujets féminins et présentant deux inflexions lombaire et cervicale. La valeur moyenne de 25 %, inchangée selon le schéma des extrema, avait déjà été notée (tableau 19). Elle apparaît significativement différente ($\boxtimes p = 0.019$) de celle de 38 % qui est déterminée pour les profils du même sexe possédant deux extrema mais une seule inflexion lombaire. Il en est de même pour le test de comparaison des variances qui révèle une variabilité plus faible de la position de l'inflexion cervicale lorsqu'elle est seule présente ($\boxtimes p = 0.04$).

En d'autres termes: pour les profils correspondant à des sujets féminins, les inflexions lombaires qui déterminent un extremum lombaire ont une localisation plus basse et significativement moins variable s'ils ne sont pas associés à une inflexion cervicale.

G. Flèche à l'extremum de la cyphose selon le schéma des extrema et des inflexions

Des tests supplémentaires ont été effectués dans ce sens, mais en s'intéressant à la valeur de la flèche au niveau de l'extremum thoracique, exprimée en pourcentage de la hauteur du profil. Le but est d'étudier si le nombre et la nature des inflexions et des extrema est susceptible d'influencer le développement de la cyphose. Pour cela, les paramètres de position et de dispersion des valeurs de flèche au niveau de l'extremum de la cyphose ont été calculés pour les configurations qui semblaient

Inflexions	Extrema	Sexe	Flèche à l'extremum de la cyphose									
			<i>n</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	Frch.		<i>D</i>	<i>i. T.</i>			
- Quel que soient les inflexions présentes	- Un seul extremum thoracique	∇	6	11.9	☒	3.2	8.6	16.5	7.9	3.2	20.7	
		M	5	12.6		3.1	8.6	16.5	7.9	3.3	21.9	
		F	1	8.7		-	-	-	-	-	-	
	- Deux extrema thoracique et lombaire	∇	8	7.6	☒	2.6	3.5	10.7	7.2	1.0	14.1	
		M	2	9.2		-	7.7	10.7	3.1	-	-	
		F	6	7.0		2.7	3.5	10.2	6.7	-0.4	14.4	
- Une seule inflexion lombaire	- Quels que soient les extrema	∇	10	9.2	✓	3.5	3.5	16.5	13.0	0.8	17.6	
		M	4	11.4		4.1	7.7	16.5	8.8	-3.2	26.1	
		F	6	7.7	☒	2.4	3.5	10.2	6.7	1.1	14.3	
	- Un seul extremum thoracique	∇	4	11.7	⌘	3.8	8.6	16.5	7.9	-1.9	25.3	
		M	3	12.7		4.0	8.6	16.5	7.9	-	-	
		F	1	8.7		-	-	-	-	-	-	
	- Deux extrema thoracique et lombaire	∇	6	7.5	⌘	2.3	3.5	10.2	6.7	1.0	14.0	
		M	1	7.7		-	-	-	-	-	-	
		F	5	7.5	*	2.6	3.5	10.2	6.7	-0.4	15.5	
	- Deux inflexions lombaire et cervicale	- Quels que soient les extrema	∇	6	4.7	✓	3.3	1.3	10.7	9.4	-4.5	14.0
			M	3	6.0		4.7	1.3	10.7	9.4	-	-
			F	3	3.5	*☒	0.9	2.6	4.4	1.8	-	-

Tableau 21

Flèche maximale de la cyphose exprimée en pourcentage de la hauteur du profil. Empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux. Statistiques descriptives données selon les différents schémas rencontrés (extrema et points d'inflexion) et selon le sexe (∇: quel que soit le sexe). *n*, effectif; *m*, moyenne; *s*, écart-type; *Frch.*, fourchette de valeurs (minimum et maximum); *D*, étendue; *i. T.*, intervalle de tolérance estimé de la population à 95 %. Les moyennes significativement différentes entre elles (tests de Student; $\alpha = 0.05$) sont identifiées par un signe diacritique (*, ☒, ✓, ☒); ⌘, différence significative si $\alpha = 0.06$. *Nota*: Quand une seule inflexion lombaire est présente, la condition « deux extrema thoracique et lombaire » est équivalente à « au moins deux extrema »; pour deux inflexions présentes, la condition « quels que soient les extrema » est aussi équivalente à « au moins deux extrema ».

a priori intéressantes, de présence ou absence d'extremum lombaire et d'inflexions cervicale et lombaire. Les valeurs de flèche à l'extremum sont exprimées en pourcentage de la hauteur du profil. Seul les profils complets sont bien sur pris en considération (tableau 21).

Aucune des comparaisons de variances n'a permis de rejeter l'hypothèse d'égalité, mais plusieurs différences significatives des moyennes qui forment une série de résultats cohérents ont été relevées:

✱ - Les profils correspondant à des sujets *féminins* et présentant un *extremum* sur la lordose *lombaire*, ont une flèche au niveau de l'extremum de cyphose qui est en moyenne plus faible si ces profils présentent une *inflexion* déterminant une lordose *cervicale* (en comparaison de ceux qui n'en présentent pas) - $p = 0.028$.

☒ - *Quelles que soient les inflexions*, la flèche au niveau de l'extremum de cyphose est en moyenne plus faible quand il existe un *extremum* de lordose *lombaire* (*traitement sans distinction des sexes*) - $p = 0.012$.

✓☒ - *Quels que soient les extrema*, la flèche au niveau de l'extremum de cyphose est en moyenne plus faible pour les profils qui présentent une *inflexion cervicale*, en comparaison de ceux qui n'en présentent pas. Ce résultat concerne le traitement *sans distinction des sexes* - $p = 0.022$ - ainsi que les profils correspondant uniquement à des *sujets féminins* - même valeur: $p = 0.022$.

⌘ - Lorsqu'il existe *une seule inflexion lombaire*, la flèche au niveau de l'extremum de cyphose *a tendance à être* en moyenne plus faible lorsque la lordose *lombaire* présente un *extremum*. La différence est significative si le seuil est élevé à $\alpha = 0.06$. $p = 0.028$.

Une lordose lombaire assez développée pour présenter un extremum est donc liée à une cyphose cervicale en moyenne moins accentuée, dans le sens où sa flèche maximale est plus faible. Ce résultat semble pouvoir se discerner dans le sexe féminin quand on ne considère que les profils présentant une lordose lombaire. L'existence d'une inflexion déterminant une lordose cervicale est elle aussi liée à une moindre accentuation de la cyphose thoracique, notamment pour les profils correspondant à des sujets féminins.

H. Points d'inflexions déterminés par la morphologie vertébrale - synthèse

Les corps vertébraux et les espaces intervertébraux impliqués par la seule morphologie osseuse des vertèbres déterminent des profils sagittaux dont la courbure peut s'inverser selon différents schémas. Il peut exister une inflexion qui détermine une lordose au niveau des segments lombaires. Cette inflexion peut être située relativement haut sur le profil, au niveau des vertèbres thoraciques (jusque T6), et déterminer ou non une lordose assez développée pour présenter un extremum de courbure lombaire. Cette inflexion « lombaire » peut être associée avec une seconde inversion de courbure qui détermine une lordose au niveau des segments cervicaux, et qui est située entre les segments C5 et T4 (inclus). Cette lordose est parfois caractérisée par un extremum. Par ailleurs, deux profils complets ont été calculés qui ne présentent aucune inversion de courbure et se caractérisent par une seule cyphose générale. Enfin, un seul profil présente une inflexion « cervicale » qui n'est pas associée avec une inflexion « lombaire ». Ces deux derniers cas de figure correspondent à des sujets de sexe masculin.

L'inflexion cervicale est située, en moyenne, à environ 97 % de la base, en proportion de la longueur des étages thoracique et lombaire, soit à environ **W** de la longueur développée totale. L'inflexion lombaire est située à environ 33 % de la base en proportion de la longueur thoraco-lombaire, soit environ **4** de la longueur développée totale. Elle est cependant significativement plus basse lorsqu'elle n'est pas associée à un *extremum* lombaire (19 % de la longueur thoraco-lombaire, soit 15 % de la longueur totale), et cette différence reste significative, que l'on inclue ou non les profils dans lesquels elle est associée avec une inflexion cervicale.

Aucun dimorphisme sexuel n'a pu être directement mis en évidence, tant du point de vue des schémas de présence ou absence d'inflexions (associées ou non avec des extrema) que de la position quantifiée de ces inflexions, en prenant en compte une fois encore les différents schémas possible. Cependant, l'inflexion lombaire des profils correspondant à des sujets *féminins* est en moyenne toujours plus basse que pour les profils masculins lorsqu'elle est associée à une inflexion cervicale, mais sans différence statistiquement significative entre les sexes. Il existe cependant une différence nettement significative de cette configuration comparée, non pas entre les sexes, mais, pour le même sexe féminin, avec la configuration dans laquelle l'inflexion lombaire est la seule inflexion présente. Elle est dans ce dernier cas située plus cranialement, et sa position est aussi plus variable. Par ailleurs, la flèche maximale moyenne de la cyphose thoracique est significativement plus faible pour les profils présentant un *extremum* lombaire, et pour ceux présentant une inflexion cervicale. Une valeur plus faible de la flèche de cyphose en présence d'une inflexion cervicale est aussi rencontrée pour les profils féminins considérés séparément. Pour ceux-ci, s'ils présentent un *extremum* lombaire, la flèche de cyphose est encore plus faible s'il existe une lordose cervicale.

Ces différences sont cohérente avec celles notées dans l'étude des extrema, où la présence d'un sommet de courbure lombaire est liée à une position plus craniale de l'*extremum* thoracique sur la cyphose, et à une plus faible amplitude de celle-ci (mesurée par la flèche maximale). L'existence d'un point d'inflexion déterminant une lordose à l'étage cervical implique que les segments intervenant dans la détermination de la cyphose devront être, soit moins nombreux, soit « recrutés » parmi les segments situés en direction plus caudale. La présence d'une lordose bien développée - avec *extremum* - est une contrainte supplémentaire, car la marge de variabilité de la morphologie vertébrale reste limitée par les exigences mécaniques de l'ensemble de la colonne. La situation plus caudale du point d'inflexion et le moindre développement de la cyphose thoracique, peuvent donc être compris comme une disposition intermédiaire, permettant la présence à la fois d'un *extremum* lombaire, d'une inflexion cervicale, et de la cyphose thoracique. Il est remarquable que la différence de position de l'inflexion lombaire n'apparaisse que pour le sexe féminin, et qu'elle soit associée, dans la même comparaison, avec une variabilité plus restreinte de l'inflexion lombaire quand l'inflexion cervicale est présente. De même, le groupe féminin est représenté de manière particulière dans les comparaisons portant sur la flèche maximale de cyphose. Les profils déterminés par la morphologie des corps vertébraux ont clairement démontré une différence sexuelle à l'étage lombaire, dont l'explication la plus évidente est son étroite relation avec les fonctions liées à la génération. Sur un plan purement mécanique, des corps vertébraux lombaires déterminant à eux seuls une lordose permettent que celle-ci soit suffisamment développée même si elle ne doit impliquer qu'un moindre nombre de segments vertébraux, cas de figure qui est celui d'une position plus basse du point d'inflexion.

4.2.7. Maxima de courbure

La fonction donnant la courbure du profil en chaque point peut passer, suivant des modalités variables, par un ou plusieurs extrema. Ces points marquent les maxima de courbure du profil en valeur absolue, dans le sens de la cyphose (minima qui sont des maxima dans les négatifs) ou de la lordose (maxima dans les positifs, maxima proprement dits). La forme de chaque concavité du profil est caractérisée par la présence et la position d'un ou deux maxima de courbure.

A. *Description qualitative des schémas rencontrés dans la disposition des maxima de courbure*

(1) Maxima de courbure sur la cyphose

Au niveau de la cyphose, il peut n'exister aucun maximum de courbure, ou bien un seul, ou bien deux maxima.

Le schéma le plus fréquent est celui dans lequel la cyphose n'est caractérisée que par un seul maximum de courbure (19 cas, 79.2 % du total). Celui-ci peut être confondu avec le sommet de la cyphose, les deux points étant localisés au niveau du même élément (c'est le cas de 5 individus masculins: 20.8 %) ; ou pratiquement confondu avec lui, à un élément ou un segment de distance au dessus ou au dessous du sommet (9 cas: 37.5 %, dont 3 sujets masculins et 6 sujets féminins) ; ou encore plus éloigné de lui, de 2 jusqu'à 7 segments de distance (5 cas: 20.8 %, dont 2 sujets masculins, 3 féminins). Lorsque le maximum de courbure est ainsi localisé à une certaine distance du sommet de cyphose, il se trouve toujours au dessus de lui.

Un seul profil (4.2 %) correspondant à un individu masculin ne montre aucun maximum de courbure. Ce profil présente comme autre point remarquable une inflexion déterminant une lordose lombaire qui est situé très bas, en L5, mais qui est significative puisqu'une nette diminution de courbure est amorcée dès L2. Le sommet de cyphose est situé en T10.

Enfin, deux profils (8.3 %) assez distincts correspondant à des sujets masculins montrent deux maxima de courbure qui entourent le sommet de cyphose de manière presque symétrique. Dans le premier cas (n° 495), les deux maxima sont situés respectivement à 4 segments au dessus du sommet et à 3 segments en dessous, et le profil décrit par ailleurs deux inflexions cervicale et lombaire situées respectivement en T3 et en L3. Le second cas (n° 254) est celui du profil qui ne décrit qu'une seule et unique cyphose dont le sommet se situe en T9. Les deux maxima de courbure, en C5 et L4, sont donc à une distance respective de 10 et 7 segments du sommet.

Cette configuration et celle dans laquelle le maximum de courbure est situé à une certaine distance de l'extremum rappellent que le point où le profil est le plus éloigné de son axe n'est pas nécessairement celui où sa courbure est la plus forte. Les maxima de courbure ont donc une valeur descriptive propre et sont nécessaire pour caractériser la forme des profils.

(2) Lordoses lombaire et cervicale

La lordose lombaire présente des extrema de courbure dans seulement 3 cas qui correspondent tous à des individus masculins. Cet effectif correspond à 14.3 % des profils possédant une lordose lombaire et parmi eux à 27.3 % des sujets masculins. Un seul schéma est représenté: celui de deux maxima de courbure entourant un sommet de lordose. Chez un sujet, les maxima sont symétriques

par rapport au sommet de lordose situé en L1 et dont ils sont éloignés d'une distance de 3 segments. Ils sont disposés asymétriquement dans les deux autres cas, avec un maximum de courbure qui est, selon le profil, distant de 4 ou 6 segments au dessus du sommet de lordose, l'autre maximum étant dans les deux cas situé à 1 segment sous ce sommet, lui-même localisé en L3.

Cinq profils qui correspondent tous à des sujets masculins présentent sur la lordose cervicale un maximum de courbure, et un seul. Ce maximum est toujours associé à un extremum qui peut être situé en dessous du maximum de courbure, à une distance de 1 segment (2 cas) ou 2 segments (1 cas), ou bien au dessus de lui à une distance de 1 segment (1 cas). Les deux points peuvent aussi être confondus (1 cas). Parmi les 7 autres profils qui possèdent une lordose cervicale (3 masculins et 4 féminins), cette dernière est caractérisée par la présence d'un extremum pour deux d'entre eux, féminins.

B. Description quantitative

(1) Remarques d'ordre méthodologique

Les schémas rencontrés obligent à décrire de manière séparée la position et les valeurs de courbure pour les maxima de lordose cervicale, les maxima inférieurs ou supérieurs de la lordose lombaire (laquelle présente toujours deux maxima ou aucun), les maxima uniques sur la cyphose, et enfin, les maxima inférieurs et supérieurs de la cyphose lorsqu'elle présente deux maxima de courbure.

La position des maxima de courbure est décrite, de manière qualitative, par les segments au niveau desquels ils se situent, de C3 à L5. De façon quantitative, elle est donnée par leur abscisse curviligne, c'est-à-dire la distance à laquelle ils se situent de la base du profil. Il s'agit donc de la longueur développée entre la base et le maximum de courbure étudié. Cette mesure est rendue comparable si elle est exprimée en proportion (pourcentage) de la totalité ou d'une fraction définie du profil. La longueur développée des étages thoracique et lombaire (l TL), déjà utilisée pour d'autres points remarquables, correspond à une fraction suffisamment importante de la colonne vertébrale (environ 80 %) pour qu'une mesure exprimée proportionnellement à elle puisse s'affranchir de la part de variation due au format. Elle autorise l'expression quantitative de position des maxima de courbure, sans nécessité d'une conservation complète de l'étage cervical. Les bornes pour le calcul de l'intégrale donnant la longueur curviligne des étages thoracique et lombaire sont les abscisses du sommet postéro-inférieur du quadrilatère représentant le corps vertébral de L5 et le sommet postéro-supérieur du quadrilatère représentant l'espace intervertébral de T1.

Les valeurs des courbures au niveau des *extrema de courbure* doivent aussi être exprimées de façon relative. Afin de réaliser une transformation conservatrice pour la forme du profil (homothétie), les courbures sont calculées sur la base des rayons de courbure exprimés en pourcentage de la hauteur (ou longueur en droite ligne) des étages thoracique et lombaire (h TL). Le choix de cette longueur se justifie de la même manière que pour l'expression des positions des maxima. La hauteur ou longueur en droite ligne des étages thoracique et lombaire est donnée par la formule de Pythagore appliquée aux couples de coordonnées des points qui définissent les limites de cette mesure (*Cf. supra*).

Soit R' la valeur du rayon de courbure R exprimée en pourcentage de la hauteur h , C la courbure correspondant à R et C' la valeur de courbure correspondant à R' .

On a: $R' = R/h \cdot 100$ et $C' = 1000 / R'$.

Donc: $C' = h \cdot C / 100$.

L'hypothèse d'ajustement de C' à une distribution normale doit être rejetée au vu des résultats des tests de normalité et du schéma de distribution des résidus qui est très différent de la linéarité théorique. Le test de Kolmogorov-Smirnov donne $p < 0.1$, mais les tables de Lilliefors, dont l'emploi est à préférer puisque moyenne et variance sont estimées à partir de l'échantillon (LILLIEFORS, 1967), donnent $p < 0.01$. Le test du W de Shapiro et Wilk conduit aussi au rejet: $p < 10^{-4}$. En revanche, l'hypothèse de normalité de la transformée logarithmique décimale n'est pas infirmée. Les tests donnent des probabilités non significatives (Kolmogorov-Smirnov: $p > 0.2$ et Lilliefors: $p < 0.15$; W de Shapiro et Wilk: $p < 0.27$) et les résidus sont distribués à proximité et de part et d'autre de la droite théorique.

(2) Maxima de courbure sur la lordose lombaire.

Les maxima de courbure sur la lordose lombaire ont une position peu variable, le maximum inférieur étant situé, chez les trois profils masculins, au niveau du segment L4, et le maximum supérieur en T9, T10 ou T11. Ces profils ont tous trois une position haute de l'inflexion pour la lordose lombaire, respectivement en T6, T7 et T10 (tableaux 22 et 23).

La représentation des maxima de courbure sur la lordose lombaire uniquement chez les sujets masculins laisse présupposer une influence du sexe dans la détermination de cette configuration. On établit pour tester l'hypothèse nulle le tableau de contingence 2×2 : *sexe masculin / féminin* versus *maxima de courbure (présents / absents)*. L'erreur de première espèce donnée par le test des probabilités exactes de Fisher ne permet pas de rejeter l'hypothèse d'homogénéité des effectifs calculés [3,0,8,10]: $p = 0.21$. Aucun déséquilibre des fréquences en relation avec le sexe ne peut donc être mis en évidence.

D'un point de vue quantitatif, la faible variabilité rencontrée dans la position des maxima de courbure est encore présente lorsque leurs abscisses curvilignes sont exprimées en pourcentage de la longueur curviligne thoraco-lombaire. Le maximum de courbure inférieur de la lordose est situé entre les extrêmes de 9.8 et 14.2 % l TL (inclus), en moyenne à 11.9 % l TL ($s = 2.2$ % l TL), et le maximum supérieur entre 46.6 et 57.5 % l TL, en moyenne à 52.2 % l TL ($s = 5.4$ % l TL).

Cette faible variabilité se manifeste sur les 11 à 17 segments qui constituent la lordose, le point d'inflexion qui la limite étant situé entre T6 et T10. La longueur développée de cette lordose, exprimée en pourcentage de celle des étages thoracique et lombaire, varie de 23.9 à 46.1 % l TL. Elle est donc suffisamment importante pour que la faible variabilité dans la position des maxima de courbure ne soit pas imputable à la limitation qu'imposerait un petit nombre de segments impliqués dans le dessin de la lordose. Cet argument est par ailleurs contradictoire avec le fait que deux maxima de courbure sont présents.

Les courbures au niveau des maxima de courbure de la lordose lombaire, lorsqu'elles sont exprimées en pourcentage de la hauteur des étages thoracique et lombaire, apparaissent en moyenne plus élevées au niveau du maximum qui est situé sous le sommet de lordose (maximum inférieur). La moyenne de courbure du maximum supérieur, de 14.0 % h TL, est comprise entre les valeurs

extrêmes de 6.1 et 36.1 % h TL; celle du point supérieur, de 24.9 % h TL, entre les extrêmes de 11.9 et 37.1 % h TL. La dispersion est donc importante. Malgré l'effectif très insuffisant des profils présentant ce schéma ($n = 3$), le test de Student pour les différences couplés (échantillons dépendants) reste indicatif: il ne permet pas de rejeter l'hypothèse d'égalité entre la moyenne des courbures des maxima supérieurs et celle des maxima inférieurs, ceci avec une erreur de première espèce élevée: $p > 0.2$. Exprimée de manière absolue, la courbure au maximum inférieur est en moyenne de $6.5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ (fourchette: 2.8 à $8.8 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$, $s = 3.3 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$). Au maximum supérieur, on trouve $4.3 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ (fourchette: 1.4 à $8.6 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$, $s = 3.8 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$).

(3) Maxima de courbure sur la cyphose

a. Cyphoses à deux maxima

Le profil de l'individu n° 254 est caractérisé par la présence de deux maxima de courbure qui entourent le sommet de cyphose, sans inflexion. Ces maxima sont situés à 11.5 % et 106.6 % de la longueur développée des étages thoracique et lombaire (l TL), et à 9.5 % et 88.6 % de la longueur développée totale du profil (l tot) : du corps vertébral de L5 à l'espace intervertébral de C3 inclus. La différence de 79 % l tot quantifie la distance importante qui les sépare, elle équivaut à 95.1 % l TL. Les courbures au niveau de ces maxima de courbure sont pratiquement égales, avec des valeurs de $-3.1 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ (en L4) et $-3.2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ (en C5). Exprimées en pourcentage de la hauteur des étages thoracique et lombaire, ces valeurs sont égales, respectivement, à -13.5 et -14.0 % h TL (tableaux 22 et 23).

La cyphose de l'individu n° 495 est beaucoup plus réduite, limitée entre deux points d'inflexions qui déterminent une lordose cervicale et une lordose lombaire. Son étendue développée est de 33.4 cm, soit 75 % l TL. Les deux maxima de courbure qui la caractérisent, en L3 et T3, ont des abscisse curvilignes relatives de 30.9 % et 71.2 % l TL. Les courbures en ces points sont là aussi presque égales. Elles ont pour valeurs respectives: -3.6 et $-3.7 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$, soit -14.9 et -15.5 % h TL.

b. Cyphose présentant un maximum unique

Lorsqu'il n'y a qu'un seul maximum de courbure sur la cyphose, celui-ci peut être situé à une position assez variable, de T1 à T10 pour le sexe masculin, et de C7 à T10 pour le sexe féminin. L'individu féminin (n° 142) présente par ailleurs un maximum de courbure unique situé en C5, à une distance importante du sommet de la cyphose (7 segments). Cette dernière configuration est déterminée par des valeurs de courbure régulièrement décroissantes de L5 jusque C5 et passant par la valeur nulle en L1 (inflexion).

Quantitativement, les maxima de courbure sont localisés en moyenne à 74.5 % l TL pour le sexe masculin ($n = 11$) et 83.2 % l TL pour le sexe féminin ($n = 10$), sans différence significative entre ces deux groupes ($p > 0.2$). Pour les profils dont la longueur curviligne totale est calculable, on trouve les moyennes de 62.2 % l tot pour le sexe masculin ($n = 8$) et de 72.3 % l tot pour le sexe féminin ($n = 9$, test de Student: $p > 0.1$).

La distance curviligne (sans signe) entre le maximum de courbure et le sommet de cyphose est faible pour une grande proportion des individus¹: elle est inférieure à 30 mm pour exactement $\frac{3}{4}$ des

¹ En toute rigueur, seuls les profils complets (depuis l'espace intervertébral de S1 jusqu'à l'espace intervertébral de C3) peuvent être considérés pour toute comparaison impliquant le sommet de la cyphose. Cette restriction réduit donc le nombre des profils dont la distance entre sommet et maximum de courbure peut être étudiée.

profils masculins ($n = 6/8$) et \mathbf{q} des profils féminins ($n = 6/9$). Pour ce groupe de 12 profils, la distance moyenne est de 1.2 % l tot dans le sexe masculin (étendue: 0.1 à 2.9 % l tot) et de 2.1 % l tot dans le sexe féminin (étendue: 0.1 à 5.4 % l tot). Pour deux autres profils *masculins*, le maximum est situé à 3 segments au dessus du sommet, correspondant à 63.1 et 83.7 mm de distance, soit respectivement 12.5 % et 15.7 % l tot. Enfin, pour trois profils *féminins*, le maximum est situé au dessus du sommet à une distance à 51.4 mm (3 segments, 11.0 % l tot), 57 mm (2 segments, 11.1 % l tot), et même à 109.4 mm (7 segments, 23.5 % l tot).

Si le sommet de la cyphose correspond le plus souvent à une expression maximale de la courbure du profil, il existe toutefois pour chaque sexe plusieurs cas où le maximum de courbure est situé à une distance conséquente au dessus du sommet, supérieure à 10 % de la longueur curviligne totale.

Au niveau de son maximum, la courbure est en moyenne de -22.0 % h TL pour les profils de sexe masculin et de -13.2 % h TL pour le sexe féminin, mais une comparaison effectuée sur la transformée logarithmique décimale (assumant la normalité) ne permet pas de mettre en évidence une différence significative entre les sexes ($p = 0.055$). Cette transformation permet aussi d'estimer l'intervalle de confiance de la moyenne: celle-ci, égale à -17.8 % h TL pour l'ensemble des profils,

% de la longueur développée T.-L.		<i>Sgt.</i>	<i>n</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>Frch.</i>		<i>i. c.</i>		<i>i. T.</i>		
Lordose cervicale	M	C4-C7	5	108.1	3.8	102.4	112.9	103.4	112.8	96.6	119.7	
	∇	C5-T10	21	78.7	17.3	51.6	111.9	70.8	86.5	41.7	115.6	
	M	T1-T10	11	74.5	15.5	51.6	97.3	64.1	85.0	38.4	110.7	
Cyphose	F	C5-T10	10	83.2	18.8	55.7	111.9	69.7	96.6	38.6	127.8	
	M	<i>sup</i>	T9-T11	3	52.2	5.4	46.6	57.5	-	-	-	-
<i>inf</i>		L4	3	11.9	2.2	9.8	14.2	-	-	-	-	
% de la longueur développée totale		<i>Sgt.</i>	<i>n</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>Frch.</i>		<i>i. c.</i>		<i>i. T.</i>		
Lordose cervicale	M	C4 & C6	2	92.5	-	89.6	95.3	-	-	-	-	
	∇	C5-T10	17	67.5	14.3	46.4	92.2	60.2	74.9	36.3	98.7	
Cyphose	M	T3-T9	8	62.2	11.9	47.8	75.7	52.2	72.1	32.4	92.0	
	F	C5-T10	9	72.3	15.2	46.4	92.2	60.6	84.0	35.2	109.3	
Lordose lombaire	M	<i>sup</i>	T9 & T10	2	45.7	-	42.9	48.5	-	-	-	-
		<i>inf</i>	L4	2	10.0	-	8.0	11.9	-	-	-	-

Tableau 22

Positions des maxima de courbure. Empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux. Les valeurs sont exprimées, d'une part, en pourcentage de la longueur développée des étages thoracique et lombaire, depuis le corps vertébral de L5 jusqu'à l'espace intervertébral de T1 (inclus), d'autre part en pourcentage de la longueur développée "totale" du profil, calculée depuis le corps vertébral de L5 jusqu'à l'espace intervertébral de C3 (inclus). Sont distingués le type de courbure impliqué, le sexe (∇: quel que soit le sexe) et, dans le cas de la lordose lombaire, la position du maximum considéré, supérieur ou inférieur. Les deux cas masculins présentant deux maxima sur la cyphose sont décrits individuellement dans le sexe. *Sgt.*, intervalle des segments où ont été localisées les maxima; *n*, effectif; *m*, moyenne; *s*, écart-type; *Frch.*, fourchette de valeurs (minimum, maximum); *i. c.*, intervalle de confiance de la moyenne ($\alpha = 0.05$); *i. T.*, intervalle de tolérance estimé de la population, et contenant 95 % des valeurs.

est comprise entre les bornes -11.3 et -19.4 % h TL ($\alpha = 0.05$). L'étendue des valeurs est limitée par la fourchette -11.2 à -26.9 % h TL pour le sexe masculin (absolument: -2.6 et $-6.3 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$), et -4 à -29.5 % h TL pour le sexe féminin (absolument: -1 et $-7.1 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$). Hors de ces bornes se trouve la forte valeur de -71.5 % h TL ($-17.0 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$) correspondant au sujet masculin n° 185.

Par ailleurs, qu'il s'agisse du schéma où le maximum de courbure est situé à proximité du sommet de cyphose (moins de 30 mm), ou bien de celui où il existe entre ces points une certaine distance, les valeurs de courbure associées sont du même ordre. La variabilité trouvée pour les courbures aux maxima associées avec le sommet inclut celle des courbures aux maxima séparées du sommet. La courbure au niveau du maximum de courbure est donc indépendante de la situation respective des deux points.

On note aussi que les courbures aux maxima pour les cyphoses qui présentent *deux maxima* sont incluses dans la variabilité de celles de cyphoses à *maxima uniques*.

% de la hauteur T.-L.		<i>n</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>Frch.</i>		<i>i. c.</i>		<i>i. T.</i>		
Lordose cervicale	M	5	91.7	77.2	14.2	213.8	17.9	231.4	2.8	1482.2	
	∇	21	-17.8	13.9	-71.5	-4.0	-19.4	-11.3	-52.1	-4.2	
Cyphose	M	11	-22.0	17.3	-71.5	-11.2	-26.7	-12.9	-65.3	-5.3	
	F	10	-13.2	7.2	-29.5	-4.0	-17.2	-7.7	-43.7	-3.0	
Lordose lombaire	M	sup	3	18.3	15.8	6.1	36.1	-	-	-	-
		inf	3	27.9	13.9	11.9	37.1	-	-	-	-

% de la hauteur totale		<i>n</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>Frch.</i>		<i>i. c.</i>		<i>i. T.</i>		
Lordose cervicale	M	2	132.8	163.1	17.5	248.1	-	-	-	-	
Cyphose	∇	17	-21.0	17.2	-83.0	-7.5	-23.2	-13.5	-56.0	-5.6	
	M	8	-25.7	23.5	-83.0	-13.4	-34.4	-12.7	-93.7	-4.7	
	F	9	-16.7	8.0	-34.5	-7.5	-21.5	-10.9	-44.5	-5.3	
Lordose lombaire	M	sup	2	28.6	18.7	15.4	41.9	-	-	-	-
		inf	2	42.9	0.2	42.8	43.0	-	-	-	-

Tableau 23

Courbures aux maxima de courbure. Empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux. Les valeurs sont exprimées, d'une part, en pourcentage de la hauteur des étages thoracique et lombaire, distance en droite ligne depuis le corps vertébral de L5 jusqu'à l'espace intervertébral de T1 (inclus), d'autre part en pourcentage de la hauteur "totale" du profil, du corps vertébral de L5 à l'espace intervertébral de C3 (inclus). Sont distingués le type de courbure impliqué, le sexe (∇: quel que soit le sexe) et, dans le cas de la lordose lombaire, la position du maximum considéré, supérieur ou inférieur. Les deux cas masculins présentant deux maxima sur la cyphose sont décrits individuellement dans le sexe. *n*, effectif; *m*, moyenne; *s*, écart-type; *Frch.*, fourchette de valeurs (minimum, maximum); *i. c.*, intervalle de confiance de la moyenne ($\alpha = 0.05$); *i. T.*, intervalle de tolérance estimé de la population, et contenant 95 % des valeurs. Les intervalles de confiance et de tolérance sont donnés par l'antilogarithme de ces paramètres calculés sur les données transformées. Ils sont donc asymétriques autour de la moyenne et peuvent être très étendus.

(4) Maxima sur la lordose cervicale

Parmi les 8 profils masculins qui présentent une lordose au niveau de l'étage cervical, cette dernière montre un maximum de courbure pour 5 d'entre eux (62.5 %), localisé en C4, C5, C6 (2 cas) ou C7. Ce n'est le cas pour aucun des 4 profils féminins présentant une lordose cervicale (tableaux 22 et 23).

Pour ces profils, le maximum est associé avec un extremum ou sommet de lordose. Afin de tester l'hypothèse d'une relation entre ces deux points remarquables, on calcule le tableau de contingence 2×2 : *sommet sur la lordose cervicale (présent / absent)* versus *maximum de courbure (présent / absent)*. L'hypothèse d'une distribution des effectifs [5,0,2,5] due au hasard est rejetée. La probabilité exacte bilatérale donnée par le test de Fisher est $p = 0.028$. En dépit des effectifs faibles l'hypothèse d'une relation entre maximum de courbure et sommet sur la lordose cervicale semble pouvoir être retenue. L'explication la plus simple est que la présence d'un sommet de courbure est indicative d'une lordose suffisamment forte pour que sa courbure puisse croître jusqu'à atteindre une valeur maximale et décroître ensuite.

L'influence du sexe dans la distribution des effectifs ne peut être mise en évidence. L'hypothèse d'une distribution homogène n'est pas rejetée pour le tableau de contingence 2×2 : *sexe masculin / féminin* versus *maximum de courbure (présent / absent)*. Les effectifs [5,0,3,4] ont une probabilité exacte $p = 0.08$ d'être la conséquence d'une distribution au hasard.

La position du maximum de courbure est peu variable, en moyenne à 108.1 % l TL, avec un écart-type $s = 3.8$ % l TL. Les positions extrêmes sont 102.4 et 112.9 % l TL. Cette variabilité restreinte serait explicable en partie par le faible développement de la lordose. Sa longueur développée totale est calculable pour deux profils, où elle est de 78.0 mm et de 72.3 mm. Cependant, la lordose des 3 autres profils s'étend sur 9, 10 et même 12 segments.

Les courbures au niveau de ces maxima ont les valeurs les plus fortes et les plus variables, comparées avec celles déterminées sur la cyphose et sur la lordose lombaire. Leur moyenne est de 91.7 % h TL ($s = 77.2$ % h TL). La grande étendue des valeurs, de 199.6 % h TL, est limitée par les bornes 14.2 et 213.8 % h TL. Les valeurs minimale et maximale de courbure sont en absolu de 3.3 et $50.9 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$.

La transformation logarithmique des courbures aux maxima permet de tester l'hypothèse d'égalité des moyennes entre les maxima uniques de la cyphose d'une part, et les maxima de la lordose cervicale d'autre part. Elle est fortement rejetée: $p = 2.36 \cdot 10^{-4}$ (respectivement: $n_1 = 21$ et $n_2 = 5$), mais l'hypothèse d'égalité des variances est conservée ($p = 0.08$).

Afin de respecter plus strictement l'indépendance des échantillons et d'éliminer les effets d'une éventuelle corrélation, le même test est répété en éliminant du calcul de moyenne les courbures aux maxima sur la cyphose dans le cas des profils qui présentent aussi un maximum de courbure sur la lordose cervicale. L'hypothèse d'égalité des moyennes est rejetée plus fortement encore: $p = 6.2 \cdot 10^{-5}$ ($n_1=17$ et $n_2 = 5$). L'hypothèse d'égalité des variances est elle aussi rejetée, avec une probabilité: $p = 0.021$. Les écarts-type avant transformation sont: $s_1 = 6.4$ % h TL pour les courbures aux maxima de la cyphose, et $s_2 = 77.2$ % h TL pour les courbures aux maxima de la lordose cervicale (valeur inchangé par rapport au test précédent).

C. *Maxima de courbure - synthèse*

Chacune des courbures rachidiennes sagittales qui peut être impliquée par la morphologie des vertèbres est susceptible de présenter un ou parfois deux maxima de courbure.

La lordose lombaire est ainsi caractérisée chez trois sujets masculins, où cette lordose est bien développée, par la présence de deux maxima de courbure situés de part et d'autre du sommet. Leur position est peu variable. Bien que cette configuration ne soit représentée que dans le groupe masculin, on ne peut mettre en évidence une relation statistique significative avec le sexe. Le maximum situé en dessous du sommet a une courbure en moyenne plus forte que le maximum situé au dessus, sans différence significative dans la comparaison par paires.

Un profil ne présente aucun maximum de courbure. La cyphose est caractérisée dans deux cas par deux maxima de courbure symétriques par rapport au sommet et dont les courbures sont pratiquement égales. Tous les autres profils possèdent un unique maximum situé le plus fréquemment à très faible distance du sommet et sinon au dessus de lui. La position du maximum et sa valeur de courbure sont assez variables, sans différences significatives dans les comparaisons effectuées entre les sexes et dans les comparaisons qui prennent en compte les différents schémas possibles. La courbure n'est pas non plus différente selon qu'il existe deux maxima ou un seul.

Pour quatre individus féminins la lordose cervicale est caractérisée par un maximum de courbure qui est toujours associé avec un sommet de lordose. La relation entre les deux points est statistiquement significative. L'influence du facteur sexe dans la représentation de cette configuration ne peut être mise en évidence. Les valeurs de courbure aux maxima qui sont trouvées au niveau de la lordose cervicale sont en valeur absolue beaucoup plus élevées que celles déterminées au niveau de la cyphose ou de la lordose lombaire. Elle sont très significativement supérieures à celles du maximum de courbure sur la cyphose, et aussi plus variables. Comme l'indique son association avec un sommet, la présence d'un maximum de courbure semble donc être conditionnée par l'existence d'une lordose suffisamment accentuée. Les fortes valeurs de courbure qui sont trouvées sur la lordose cervicale peuvent être expliquées par la nécessité de développer une convexité antérieure sur une faible longueur de la colonne vertébrale. Cependant la lordose cervicale n'est, d'une part, pas toujours présente et d'autre part, elle ne présente pas toujours un maximum de courbure.

La variabilité des schémas rencontrés oblige à beaucoup de prudence quand il s'agit d'avancer de telles interprétations mécaniques, qui sont aussi des interprétations fonctionnalistes. Du point de vue des descriptions qui peuvent en être faites à partir des maxima de courbure, les courbures sagittales impliquées par la seule morphologie des vertèbres apparaissent d'interprétation difficile. Il reste toutefois intéressant de constater la présence répétée de certains schémas et l'absence de représentation de plusieurs configurations. Ainsi, la lordose lombaire avec un maximum de courbure unique n'est pas représentée. Il en est de même pour le schéma dans lequel la cyphose présenterait un maximum unique situé à distance du sommet et inférieurement à lui, et aussi pour celui d'une lordose cervicale avec deux maxima. L'absence de maximum de courbure sur les lordoses dans le sexe féminin est aussi notable. Une certaine régularité est par ailleurs rencontrée avec, principalement, une position peu variable des maxima de courbure de la lordose lombaire, des valeurs de courbures proches, et comparables à celles des maxima de la cyphose, et une association fréquente des maxima de cyphose avec le sommet. La variabilité dans la position de ces points et celle des courbures qui leurs sont associées a pu aussi être définie. Ces données autorisent donc une certaine caractérisation, la description et la comparaison des profils sagittaux déterminés par la forme des corps vertébraux et celle des espaces intervertébraux impliqués par la morphologie des vertèbres.

4.2.8. Caractérisation des profils par la présence et la localisation des points remarquables, synthèse

Les profils impliqués par la morphologie des corps vertébraux et des espaces intervertébraux déterminés par la morphologie osseuse peuvent donc être caractérisés par la présence, la position et la valeur de trois types de points particulièrement intéressants pour leur description: les *extrema ou sommets de courbure*, les *points d'inflexion*, et les *maxima de courbure*. Le terme « courbure » est, dans le cas des *maxima de courbure*, pris dans son acception la plus stricte, puisqu'il s'agit des points où le profil est le plus courbé: le rayon du cercle tangent passe en ce point par un minimum (figure 45).

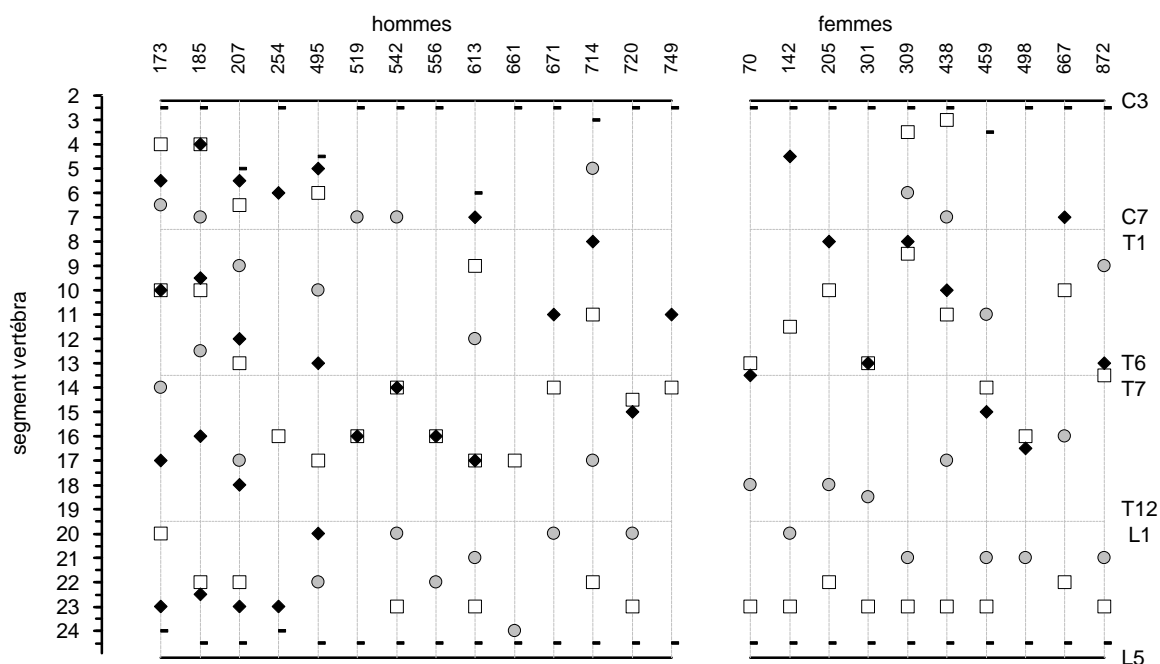


Figure 45

Représentation schématique des profils constitués par l'empilement des corps vertébraux et des espaces intervertébraux, et caractérisés par leurs points remarquables. En abscisses, le numéro d'individu. □, extremum ou sommet de la courbure; ●, point d'inflexion; ◆, maximum de courbure (rayon de courbure minimal); —, limites inférieure et supérieure entre lesquelles l'empilement est calculé. Les demi-graduations correspondent à une situation au niveau de l'espace intervertébral, ex.: l'ordonnée 16.5 correspond à l'espace intervertébral du segment 17, c'est-à-dire T10. *Nota*: Les extrema étant dépendants de l'orientation du profil, la position, voire la présence de ces points (□) ne doivent être considérés que de façon indicative pour les profils incomplets; les profils complets sont calculés de l'espace intervertébral de S1 (ordonnée 24.5) jusqu'à l'espace intervertébral de C3 (ordonnée 2.5).

L'étude des sommets de courbures montre que trois schémas sont possibles: 1/ Un seul extremum correspondant à un sommet de cyphose. 2/ Un sommet de cyphose associé avec un extremum correspondant à un sommet de lordose lombaire. 3/ Trois sommets correspondant aux trois courbures physiologiques: lordose cervicale, cyphose thoracique et lordose lombaire.

Le sommet de lordose lombaire est plus fréquemment présent dans le sexe féminin. Il existe par ailleurs une relation indirecte entre le sexe d'une part et, d'autre part, la conformation des courbures telles qu'elles peuvent être décrites par les extrema. La présence d'un sommet de lordose lombaire est liée à une situation plus craniale du sommet de cyphose et à une valeur plus faible de sa flèche. Or

le groupe féminin se différencie précisément du groupe masculin par un sommet de cyphose significativement plus haut situé, et de flèche plus faible.

Une inversion de la courbure peut exister sans qu'elle soit manifestée par un extremum. Une inflexion déterminant une lordose lombaire est ainsi trouvée dans environ $\frac{9}{10}$ ^{èmes} des cas, où elle est située en moyenne à $\frac{1}{4}$ de la longueur totale du profil, mais pouvant être localisée jusqu'en T6. Elle est seule présente, ou bien, dans près de la moitié des cas, associée avec un point d'inflexion déterminant une lordose cervicale. Celui-ci se situe en moyenne aux $\frac{3}{4}$ de la longueur, entre les segments C5 et T4 inclus. Finalement, un seul profil ne montre aucune inflexion et un autre présente une seule inflexion cervicale.

Les comparaisons montrent que l'inflexion lombaire est plus haut située quand elle détermine un extremum. Il n'y a pas de différence significative directe dans la comparaison des sexes, mais dans le sexe féminin, l'inflexion lombaire est plus craniale et de position plus variable quand elle est seule présente, c'est-à-dire sans inflexion cervicale. Enfin, et d'une manière générale, la présence de courbures lordotiques modifie le développement de la cyphose. Des différences significatives apparaissent sous certaines conditions: la flèche maximale de la cyphose est plus petite quand il existe un extremum de lordose lombaire, et aussi quand il existe une inflexion déterminant une lordose cervicale. Chez les femmes considérées à part, cette différence est encore valable. Présence simultanée d'une inflexion cervicale et d'un extremum de lordose lombaire entraînent aussi dans ce sexe une cyphose de flèche plus courte.

Enfin, chaque « courbure » peut être caractérisée par le fait que la valeur de courbure proprement dite passe par une ou deux valeurs maximales. Au niveau de la lordose lombaire, quatre individus masculins montrent ainsi deux maxima de courbure de part et d'autre du sommet. Au niveau de la cyphose cette configuration se retrouve dans le cas de deux sujets masculins, un profil ne présente aucun maximum, et tous les autres n'en ont qu'un seul, situé à proximité du sommet ou bien au dessus de lui. Sur la lordose cervicale, un maximum est trouvé chez cinq profils masculins qui présentent aussi un sommet sur lordose cervicale.

Les positions des maxima de courbure sont peu variables sur la lordose lombaire, et les courbures aux maxima au dessus et en dessous du sommet sont presque égales. Le fait que seuls des profils masculins présentent des maxima peut être un effet de l'échantillonnage. Les maxima de courbure sur la cyphose ne montrent pas de différences selon le sexe, pour leur position comme pour leur valeur. Que ces maxima soient simples ou présents par paires, proches ou éloignés du sommet, leurs courbures n'apparaissent pas significativement différentes. Quant à la lordose cervicale, sa présence exclusive chez les profils masculins est statistiquement significative d'une relation avec le sexe, de même qu'est significative l'association entre la présence de ce point et celle d'un sommet de lordose cervicale. La courbure qui est associée est plus forte et aussi plus variable que celle trouvée au niveau des maxima de courbure de la cyphose.

4.3. Variabilité générale des profils par sexe

4.3.1. Représentation conjointe des profils par sexe et par étage en mesures réelles

La représentation synoptique des profils obtenus pour chaque sexe permet d'apprécier d'une manière générale, et moins analytique que l'étude des points remarquables, la variabilité rencontrée au niveau de chaque étage.

Au niveau de l'étage cervico-thoracique (figure 47), l'ensemble des profils correspondant aux sujets féminins forme un fuseau étroit, qui s'écarte peu de l'axe C3-T7 et reste dans un intervalle compris entre les ordonnées de -10 mm et + 20 mm. Un seul sujet (n° 205) qui ne présente pas de lordose cervicale montre une flèche de 30 mm au niveau de C7. Seuls deux profils passent dans les valeurs négatives: le profil du sujet n° 498 qui s'éloigne très peu de l'axe (moins de 5 mm) et est pratiquement rectiligne, et le profil correspondant au sujet n° 438 qui présente une lordose cervicale nette.

Le schéma est peu différent pour les profils masculins, toutes les courbes sauf une étant comprises dans le même intervalle de - 10 à + 20 mm. Le profil du sujet n° 185 présente au niveau de T3 une flèche qui surpasse de presque deux fois cette dernière limite, avec une valeur de 38 mm qui, en absolu reste tout à fait « acceptable ». Ce même profil montre la lordose cervicale la plus nette, dont la flèche négative¹ maximale atteint - 10 mm.

Des représentations équivalentes pour les ajustements de polynômes aux étages thoracique bas et lombaire (figure 48) montrent en revanche une différence appréciable entre les sexes. Alors que dans le groupe féminin tous les profils - sauf un - ont la quasi totalité de leurs ordonnées qui sont négatives, celles-ci sont réparties de manière grossièrement symétrique autour de l'axe des abscisses pour les polynômes des sujets masculins. Ces valeurs de y appartiennent dans le sexe féminin à un intervalle compris entre - 40 mm et + 5 mm si l'on fait exception du sujet n° 498 dont la flèche maximale est de pratiquement 20 mm. Les ordonnées dans le sexe masculin sont en revanche compris entre - 40 et + 35 mm.

Lorsque l'étage thoracique est seul considéré (figure 49), une plus grande variabilité est encore appréciée dans le sexe masculin, mais moins accusée que dans la précédente représentation. Pour les deux sexes, pratiquement toutes les courbes sont situées au dessus de l'axe des abscisses, avec des ordonnées maximales proches de + 35 mm. Un profil féminin (n° 309) s'en éloigne légèrement dans les négatifs, avec un point dont l'ordonnée est de -7 mm (espace intervertébral de T10). Il existe dans le sexe masculin un cas comparable (n° 173) présentant une incursion dans les ordonnées négatives maximale en T10, à - 8 mm, tandis que le profil du sujet n° 185 atteint -16 mm au niveau de T9.

4.3.2. Comparaison des régressions générales par sexe et par étage, en pourcentage de la hauteur

De manière similaire au traitement réalisé pour les profils impliqués par la seule morphologie des corps vertébraux, il est possible de calculer pour chaque sexe et pour chaque étage (cervico-thoracique, thoracique et thoraco-lombaire) une régression polynomiale de degré 4 sur l'ensemble des points. Les intervalles de tolérance de cette régression permettent de décrire de manière générale la variabilité rencontrée. Ces derniers sont calculés pour un nombre de points suffisant de valeurs de x de façon à pouvoir ajuster une régression polynomiale qui autorisera une description quantitative du tracé de ces seuils, et particulièrement des éventuelles inversions de courbure. L'interprétation d'une telle régression et des seuils de variabilité qu'elle implique reste soumise aux restrictions déjà signalées. Il s'agit en effet de la variation des valeurs de y pour un x donné sans considération des différents schémas trouvés selon les profils. Elle répond à la question: « quel est, indépendamment des flèches connues pour ce profil à d'autres valeurs de x , la valeur moyenne y de la flèche associée à une hauteur x de l'empilement ? ».

Le degré optimal du polynôme qui devait être ajusté au nuage de points a été déterminé par la procédure pas-à-pas décrite précédemment. Plusieurs régressions sont calculées en augmentant le

¹ Ces profils n'étant pas orientés suivant l'axe général de l'empilement, cette flèche ne correspond pas à celle du sommet de lordose cervicale.

degré du polynôme d'une unité à chaque fois, et la signification du facteur du terme de degré le plus élevé permet de déterminer le degré décrivant de façon optimale la distribution des points. Pour chacun des 6 cas possibles (trois étages et deux sexes) le degré déterminé était le degré trois, lequel autorise une inflexion. Le terme de degré quatre qui pouvait être ajouté ne différait pas significativement de zéro et aurait été susceptible de fausser l'interprétation en imposant aux données des variations de courbure artificielles.

Des ellipses de confiance ont par ailleurs été calculées pour chaque type de points homologues, c'est-à-dire définissant les limites entre les mêmes segments pour différents profils, par exemple: sommet postéro-supérieur du quadrilatère représentant le corps vertébral de T6. Elles décrivent la variabilité de position dans le plan sagittal de ces points, autrement dit la variabilité de la hauteur des segments pour les différents profils (abscisses), et conjointement celle de la flèche (ordonnées) associée. Ces ellipses permettent donc d'interpréter plus précisément la régression générale et de relativiser éventuellement sa signification.

L'étude de la régression globale pour l'ensemble des points ne peut se substituer à la description individuelle des profils caractérisés par leurs points remarquables. Elle reste cependant très informative et donne une description générale de la variabilité, par le biais des seuils de tolérance des y estimés et des ellipses de confiance des coordonnées des points semblables.

A. *Etage cervico-thoracique*

Ainsi, au niveau cervico-thoracique (figure 46 et 47), les tracés de la régression et de ses limites de tolérance pour $\alpha = 0.05$ et $\alpha = 0.01$ montrent dans le sexe masculin une inversion de courbure déterminant une lordose à partir des abscisses 84 à 92 % (selon le seuil considéré). Cette position correspond à celle des ellipses des segments C3 à C7. La lordose ainsi déterminée sur un dixième environ de la hauteur cervico-thoracique est peu étendue. Elle est aussi peu accentuée, la courbure n'excédant pas 1.5 %. Dans le sexe féminin, les tracés décrivent en revanche une cyphose sur toute leur longueur. Elle correspond à un arc de cercle presque parfait puisque la courbure du polynôme est pratiquement constante de la base au sommet, restant comprise entre -3.5 et -3.8 %.

Il faut noter par ailleurs une certaine variabilité qui est trouvée pour le sexe féminin dans la position des différents points sur les hauteurs des profils (abscisses). Les ellipses de confiance ($\alpha = 0.05$) correspondant aux segments adjacents se chevauchent, particulièrement au niveau des segments cervicaux bas et thoraciques hauts. Ces positions variables dans le plan correspondent à des formes elles mêmes variables des quadrilatères qui constituent l'empilement au niveau cervico-thoracique. Un élément pourra donc être situé dans la pile de tel sujet à une distance relative de l'axe, mais aussi à une distance relative de la base de la pile (en pourcentage de la hauteur cervico-thoracique), qui seront différentes de celles de l'élément homologue dans l'empilement correspondant à un autre sujet. Pour le sexe masculin, la variabilité de position des points homologues sur la hauteur (représentée sur les abscisses) est moindre..

Les bandes définies par les limites de tolérance sont tout à fait comparables dans les deux sexes, la distance maximale entre ces limites n'atteint pas 3 unités sur les ordonnées. La seule différence notable entre ces intervalles presque égaux restant l'inflexion peu accentuée remarquée au niveau cervical dans le sexe masculin.

B. *Etage thoraco-lombaire*

A l'étage thoraco-lombaire (figure 48), les régressions présentent dans les deux sexes une courbure dans le sens de la lordose qui se prolonge plus haut dans le sexe féminin, dont le tracé est par ailleurs entièrement compris dans les ordonnées négatives. L'abscisse du point d'inflexion pour ce sexe est de 62 %, ce qui le situe au niveau des ellipses définissant la position de T11, contre 39 % dans le sexe masculin, c'est-à-dire au niveau du corps vertébral de L2.

Les tracés pour la valeur de la courbure de ces régressions (figure 46) montrent une décroissance régulière de celle-ci depuis L5, où elle est supérieure dans le sexe féminin, avec 9.7 %, contre 5.1 % pour le sexe masculin. La lordose lombaire dessinée par la régression calculée pour l'ensemble des points dans le plan est donc plus étendue dans le sexe féminin, mais aussi plus accusée. La différence pour cet étage s'amointrit au niveau de la cyphose. Au sommet de

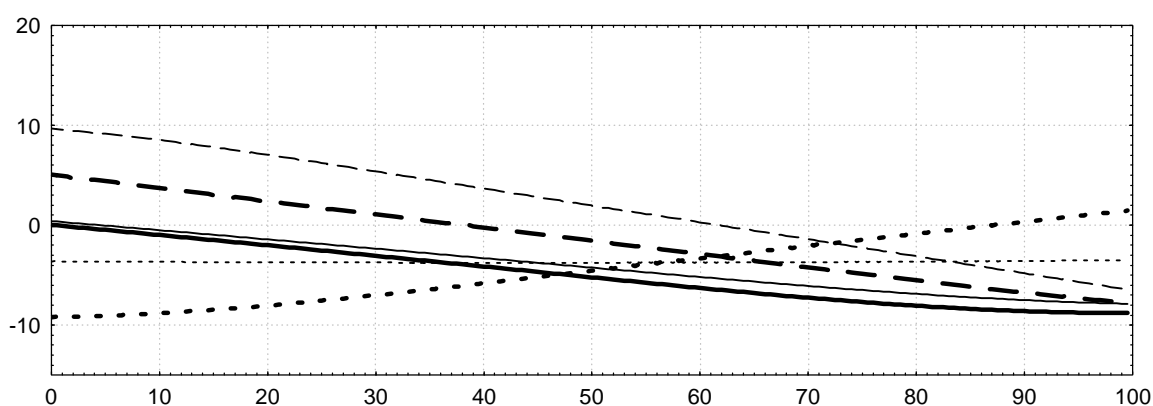


Figure 46
 Courbures des régressions calculées pour l'ensemble des profils à chaque « étage » et pour chaque sexe. ---, étage cervico-thoracique ; — —, étage thoraco-lombaire ; ———, étage thoracique. Lignes épaisses, sexe masculin ; lignes fines, sexe féminin. Calculé à partir des coordonnées des profils exprimées en pourcentage de la hauteur de l'étage: abscisse, hauteur sur l'étage ; ordonnées, courbure. Les ordonnées négatives correspondent anatomiquement à une orientation antérieure de la concavité (cyphose).

l'empilement, à l'abscisse 100 % les valeurs sont en effet de -6.5 % pour le sexe féminin et de -7.8 % pour le sexe masculin.

Il y a naturellement un recoupement très large des ellipses correspondant aux points qui représentent, d'une part, les sommets supérieurs des corps vertébraux et, d'autre part, ceux des espaces intervertébraux qui leurs sont sus-jacents. Cependant, il n'y a pas de chevauchement entre les ellipses de segments adjacents. Cette succession de paires bien distinctes d'ellipses de formes semblables est significative de la faible variabilité dans la hauteur des éléments constituant l'empilement, laquelle reste assez constante d'un profil à l'autre lorsque les coordonnées sont exprimées en pourcentage de la hauteur du profil.

C. Etage thoracique

Enfin, lorsque les points sélectionnés correspondent à l'étage thoracique proprement dit, les régressions et leurs intervalles de tolérance ne dessinent qu'une seule concavité orientée dans le sens de la cyphose, en dépit d'un ajustement polynomiale de degré 3 qui autorise la détermination d'une inflexion. Cette constatation est valide pour les deux sexes, dont les intervalles de tolérance sont pratiquement identiques (figure 49). Le tracé correspondant au sexe masculin est cependant situé « au dessus » de celui du sexe féminin avec des ordonnées qui ne sont pas différentes de plus de 3 unités. La courbure est donc très légèrement plus forte dans le sexe masculin (figure 46), mais dans les deux cas, elle augmente presque linéairement de T12 à T1 (en valeur absolue), depuis zéro jusque -7.9 % pour le sexe féminin et -8.8 % pour le sexe masculin.

Les ellipses décrivent par ailleurs une variabilité légèrement plus forte des flèches dans le sexe masculin: les grands axes de ces ellipses apparaissent plus allongés.

D. Mesures des courbures, restrictions

Il existe une certaine différence entre la mesure de courbure donnée au niveau des segments thoraciques bas entre les deux ajustements à l'étage thoraco-lombaire et à l'étage thoracique. Il en est de même pour les segments thoraciques hauts entre l'ajustement cervico-thoracique et l'ajustement thoracique. En effet, lorsque l'étage thoracique est seul considéré, les extrémités du profil qui sont en T12 et T1 sont positionnées sur l'axe des abscisses. Elles ont dans tous les profils les mêmes coordonnées, respectivement (0, 0) et (100, 0). La situation sera différente pour les ajustements cervico-thoracique et thoraco-lombaire. L'analyse de variabilité des points pour plusieurs profils traités conjointement est nécessairement liée au choix qui doit être fait pour normaliser la représentation des profils et qui permet de les rendre comparables. Dans le cas présent, il a été décidé d'aligner les extrémités des profils sur l'axe à partir de l'origine. Les mesures de courbures ne peuvent donc dans ce cas être considérées comme des mesures intrinsèques de l'échantillon. Leur signification est en partie liée au cadre dans lequel elles sont définies.

E. Synthèse

La régression calculée sur l'ensemble des points de l'étage cervico-thoracique définit donc dans le sexe masculin une lordose cervicale peu accusée tandis qu'elle ne décrit dans le sexe féminin qu'une concavité antérieure à courbure presque constante. Toutefois, les points homologues ont une position très variable dans le groupe masculin. Au niveau des segments thoraco-lombaire, le tracé décrit une lordose lombaire dans les deux sexes, mais plus accusée et plus développée pour le groupe féminin (jusque T11). Les points de l'étage thoracique proprement dit décrivent une cyphose sans inflexion dont la courbure diminue régulièrement dans le sens craniale-caudal (en valeur absolue).

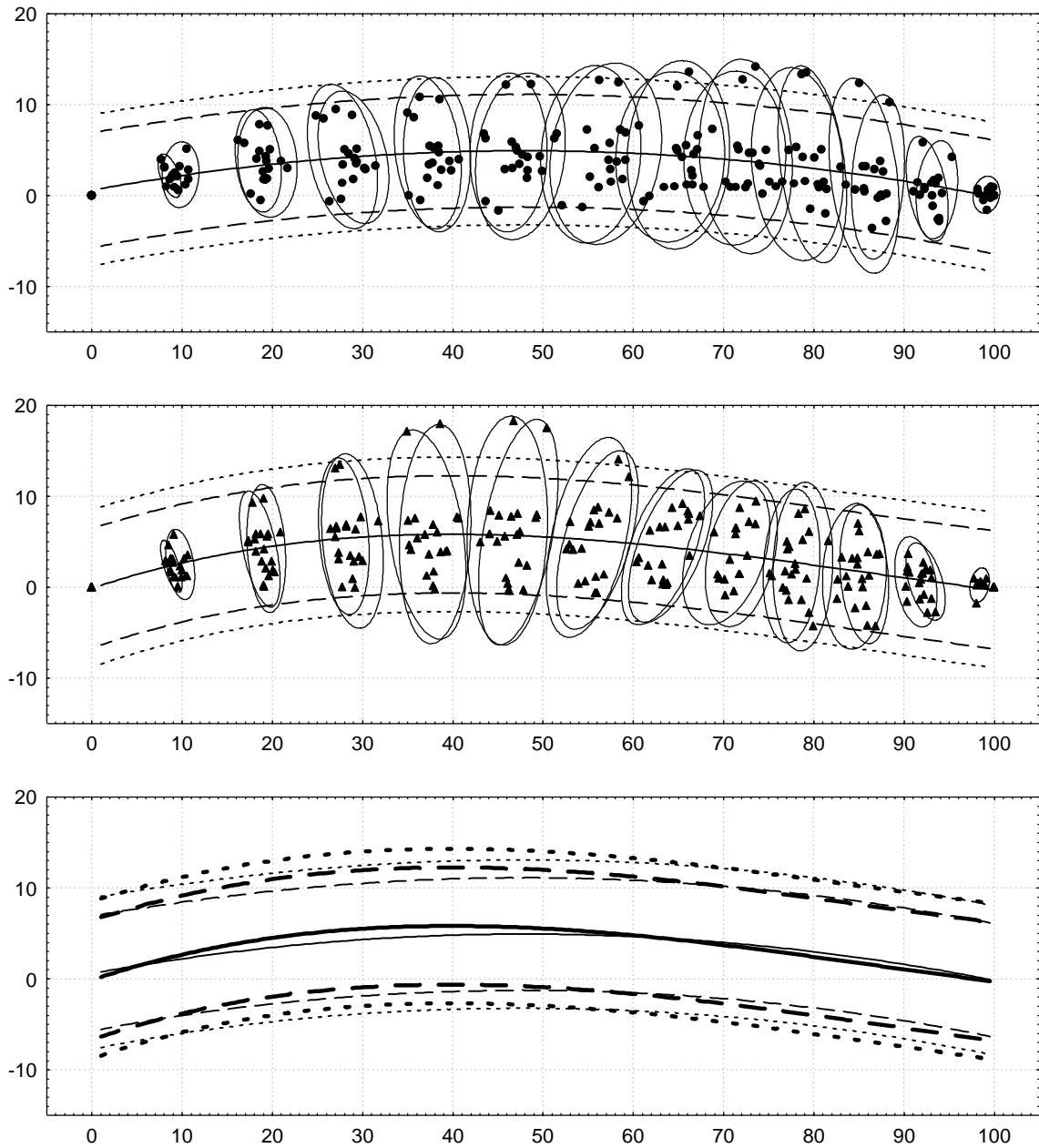


Figure 47

Polynômes pour l'ensemble des profils de l'étage cervico-thoracique et intervalles de tolérance à 95 (—) et 99 % (- - -). Ellipses de confiance à 95 % pour les points homologues, du point inférieur du corps vertébral de T7 (0, 0) au point supérieur de l'espace intervertébral de C3 (100, 0). *a.*, sexe féminin ; *b.*, sexe masculin ; *c.*, comparaison des limites de tolérance entre les deux sexes, les courbes correspondant au sexe masculin sont les plus épaisses. Les coordonnées utilisées sont exprimées en pourcentage de la hauteur cervico-thoracique de chaque empilement. Lecture des ellipses, ex.: la 4^{ème} ellipse à partir de l'origine décrit, dans l'échantillon, la variabilité dans le plan des points postéro-supérieurs des quadrilatères qui représentent, dans les différents empilements, les espaces intervertébraux des segments T6.

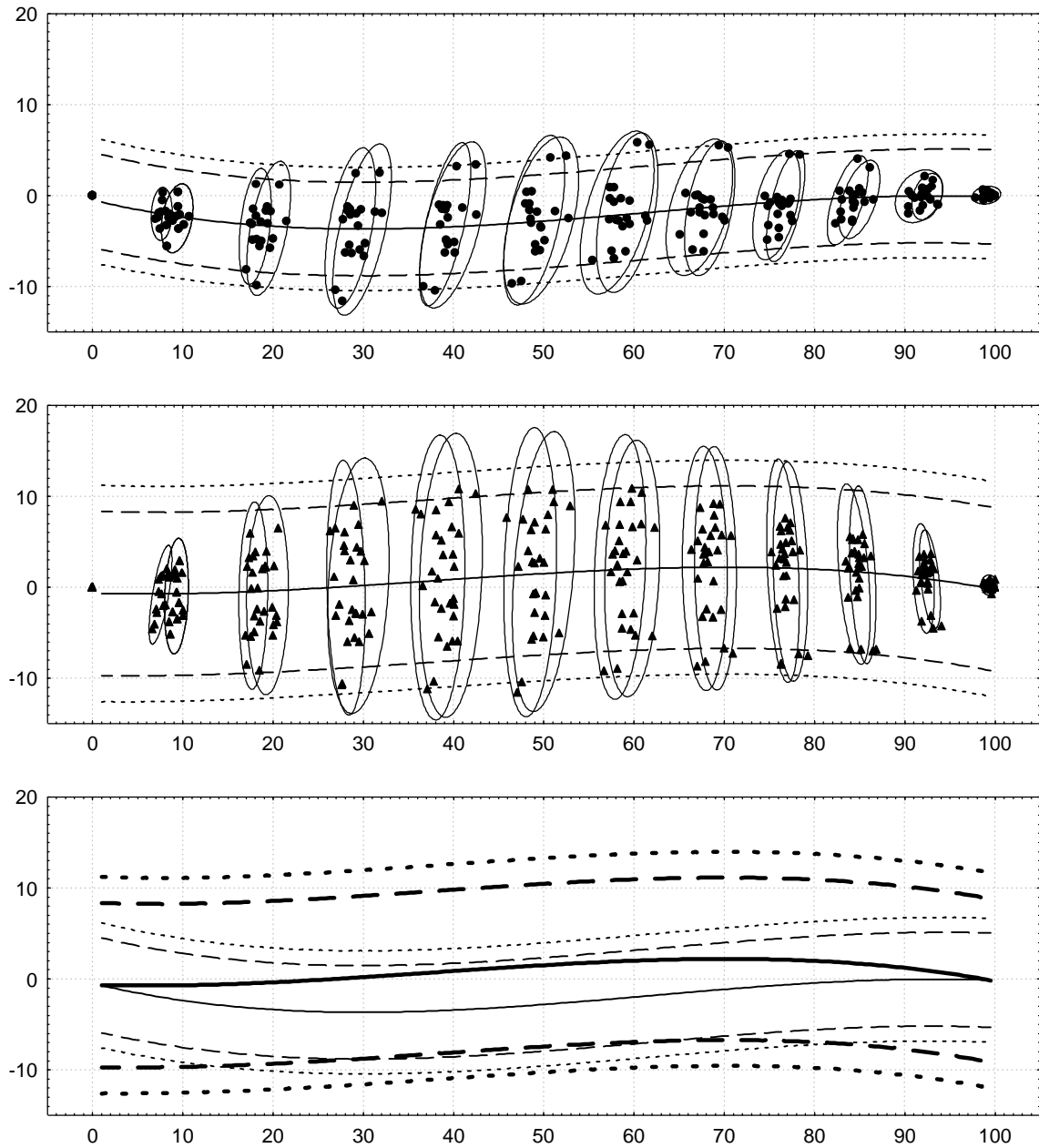


Figure 48

Polynômes pour l'ensemble des profils de l'étage thoraco-lombaire et intervalles de tolérance à 95 (—) et 99 % (- - -). Ellipses de confiance à 95 % pour les points homologues, du point inférieur du corps vertébral de L5 (0, 0) au point supérieur de l'espace intervertébral de T7 (100, 0). *a.*, sexe féminin ; *b.*, sexe masculin ; *c.*, comparaison des limites de tolérance entre les deux sexes, les courbes correspondant au sexe masculin sont les plus épaisses. Les coordonnées utilisées sont exprimées en pourcentage de la hauteur thoraco-lombaire de chaque empilement. Lecture des ellipses, ex.: la 6^{ème} ellipse à partir de l'origine décrit, dans l'échantillon, la variabilité dans le plan des points postéro-supérieurs des quadrilatères qui représentent, dans les différents empilements, les espaces intervertébraux des segments L3.

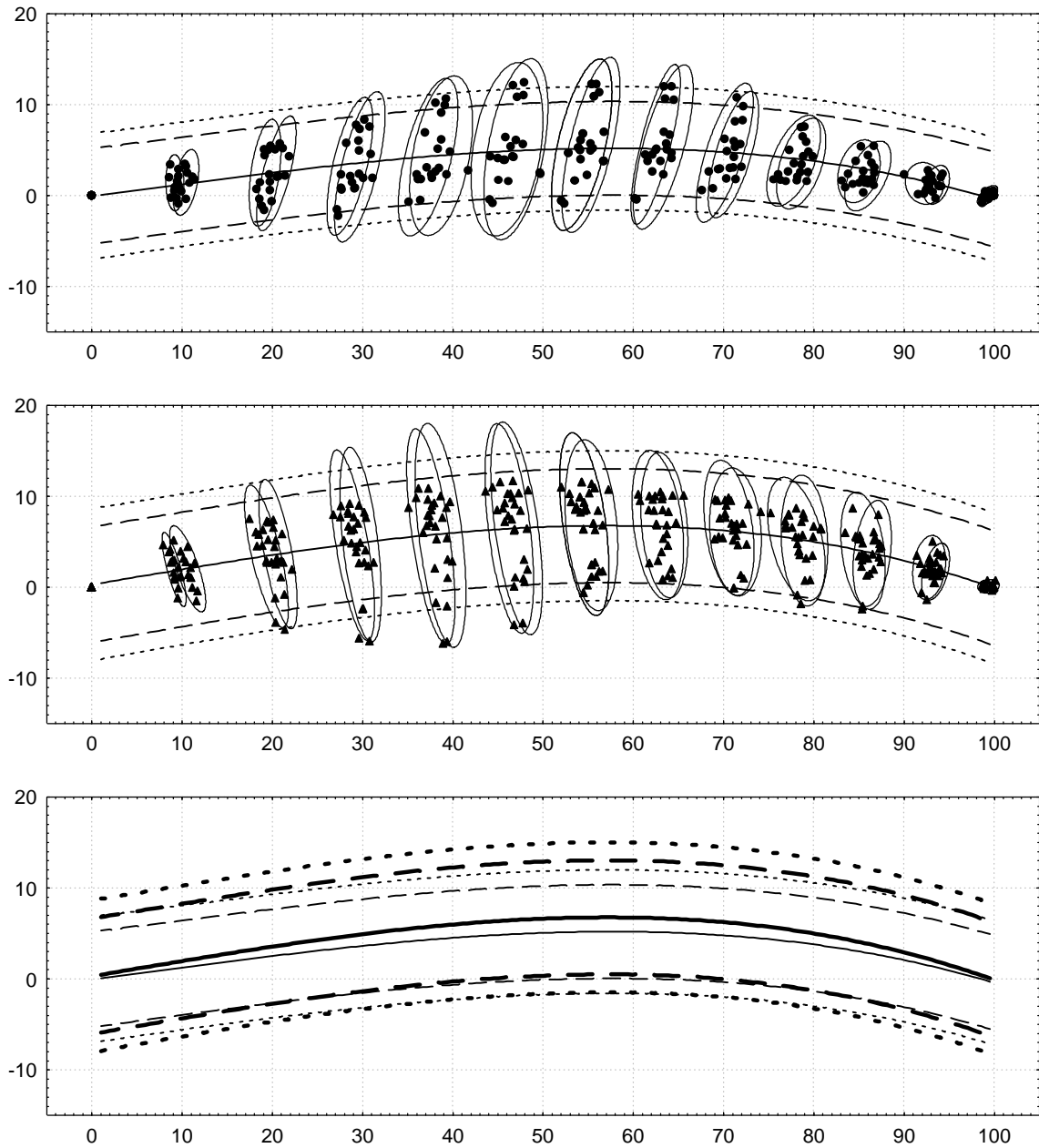


Figure 49

Polynômes pour l'ensemble des profils de l'étage thoracique et intervalles de tolérance à 95 % (---) et 99 % (- - -). Ellipses de confiance à 95 % pour les points homologues, du point inférieur du corps vertébral de T12 (0, 0) au point supérieur de l'espace intervertébral de T1 (100, 0). *a.*, sexe féminin ; *b.*, sexe masculin ; *c.*, comparaison des limites de tolérance entre les deux sexes, les courbes correspondant au sexe masculin sont les plus épaisses. Les coordonnées utilisées sont exprimées en pourcentage de la hauteur de l'étage thoracique de chaque empilement. Lecture des ellipses, ex.: la 7^{ème} ellipse à partir de l'origine décrit, dans l'échantillon, la variabilité dans le plan des points postéro-supérieurs des quadrilatères qui représentent, dans les différents empilements, les corps vertébraux des segments T9.

5. Discussion

5.1. Modalités de participation des corps vertébraux dans la détermination des courbures sagittales:

En dépit de la facilité que constitue la mesure des hauteurs antérieure et postérieure du corps vertébral, un nombre relativement restreint de publications traite de l'angulation entre les plateaux vertébraux aux étages cervical et thoracique sous une approche ostéométrique, ne serait-ce qu'en usant du rapport entre ces deux mesures. Les hauteurs antérieure et postérieure sont parfois données dans le cadre d'études de variabilité qui ont le plus souvent une visée chirurgicale. Dans la plupart des cas, une seule hauteur est rapportée, antérieure (BERRY *et al.*, 1987; WANG *et al.*, 1992; FRANCIS, 1955, PONTIEK, 1972), ou prise au milieu du corps vertébral (TULSI, 1971). La comparaison des hauteurs sagittales antérieure et postérieure selon le segment, lorsqu'elles sont relevées indépendamment (TOMINAGA *et al.*, 1995), ne peut faire abstraction des différences de format. Pourtant, les deux moyennes obtenues pour chaque segment sont parfois comparées comme s'il s'agissait d'échantillons indépendants (AHARINEJAD *et al.*, 1990), démarche qui ne donne qu'une idée très générale de leur rapport à chaque segment et qui masque la possible variabilité de ce rapport pour chaque colonne vertébrale. Ce sont finalement les études radiologiques qui fournissent le plus fréquemment des données susceptibles de comparaison, et un nombre relativement restreint de travaux dans le domaine de la paléanthropologie, lesquels s'intéressent surtout à l'étage lombaire (figure 57, p. 218).

5.1.1. Indice des hauteurs sagittales du corps vertébral

JANKAUSKAS a rapporté la variabilité rencontrée dans les hauteurs antérieure et postérieure des corps vertébraux pour plusieurs populations lithuaniennes des premier et deuxième millénaires de notre ère. L'utilisation de mensurations classiques a permis l'étude d'un grand effectif, supérieur à 100 pour chaque segment. L'indice calculé en rapportant la hauteur postérieure sur la hauteur antérieure permet d'apprécier, en première approximation, la forme des corps vertébraux dans le plan sagittal, leur variabilité, et leur variation selon le segment. La normalité de cet indice a par ailleurs été vérifiée par l'auteur (JANKAUSKAS, 1994).

Ces données montrent que l'indice passe en moyenne le seuil de 100 % entre les segments L2 et L3 chez les femmes, et en L3 chez les hommes (Figure 50). A ces niveaux le rapport des hauteurs change donc - en moyenne - d'une orientation en cyphose à une orientation en lordose. Rappelons qu'accepter l'équivalence entre la variation de l'indice des hauteurs et celle de l'angulation des plateaux présuppose que la forme du corps vertébral peut être approchée de celle d'un trapèze isocèle. Par ailleurs, puisque les données rapportées sont les valeurs moyennes de chaque segment, le passage d'une orientation à l'autre peut en fait s'effectuer au niveau d'un segment plus cranial ou plus caudal selon le sujet. La variabilité des indices est en effet très grande et ils ne sont pas nécessairement significatifs de l'orientation en cyphose ou lordose que l'on espère rencontrer *a priori* selon l'étage considéré, au vu des résultats publiés par certains auteurs¹. Les intervalles de

¹ Afin de déterminer l'angulation des plateaux vertébraux, PANJABI et collaborateurs déterminent, pour chacun de ces plateaux, les coordonnées spatiales d'un nombre de points suffisant pour définir son contour (PANJABI *et al.*, 1991a, 1991b, 1992). Un plan est ajusté à ces points par la méthode des moindres carrés. Les paramètres statistiques décrivant l'angle que forme ce plan avec le plan de la face postérieure du corps vertébral sont rapportés dans trois publications traitant chacune d'un étage vertébral, et basées sur le même échantillon ($n = 12$). Le signe de l'angle n'étant pas rapporté, les auteurs semblent considérer qu'il détermine une orientation des plateaux dans le sens de la cyphose à l'étage thoracique, et sinon dans le sens de la lordose. Ceci conduit à des résultats incohérents. Si l'on

tolérance indiquent d'ailleurs une variabilité telle que l'on peut trouver, à tous les segments et quel que soit le sexe, des valeurs aussi bien dans le sens de la cyphose que dans celui de la lordose, c'est-à-dire supérieures ou inférieures à 100 %, une seule exception étant notée au segment T11 dans le sexe féminin.

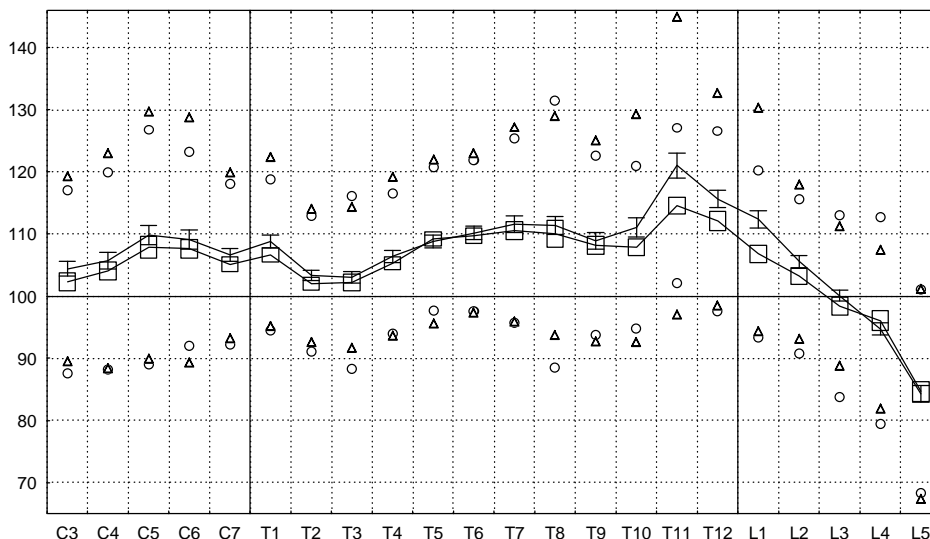


Figure 50
Variation de l'angulation réciproque des plateaux vertébraux selon le segment. Indice de la hauteur postérieure sagittale du corps vertébral rapportée à sa hauteur antérieure, exprimé en pourcentage (JANKAUSKAS, 1994). Moyennes entourées de leur intervalle de confiance à 95 % pour le groupe masculin (■) et le groupe féminin (□). Limites inférieure et supérieure des intervalles de tolérance de la population: ○, sexe féminin; △, sexe masculin.

5.1.2. Transition au niveau thoraco-lombaire

En dépit de cette variabilité, le test d'égalité des moyennes entre segments adjacents comparés deux à deux² montre une réduction significative à très significative ($p << 0.001$) de l'indice dans le sens craniale-caudal à partir de T11, c'est-à-dire à partir de la comparaison entre T11 et T12, depuis la valeur de 121 % dans le sexe masculin et de 114.6 % dans le sexe féminin. L'angulation réciproque des plateaux semble donc évoluer dans le sens de la lordose à partir de ce segment mais n'acquiesce à une orientation lordotique qu'à partir de L3 seulement, lorsque l'indice passe le seuil de 100 %.

affecte d'un signe négatif les moyennes supposées "en cyphose" à l'étage thoracique, on note une discontinuité marquée au niveau des transitions cervico-thoracique et thoraco-lombaire: les seuls intervalles de confiance qui ne se chevauchent pas sont ceux de C7 et T1 d'une part, et ceux de T12 et L1 d'autre part! Les moyennes de chaque étage ne montrent par ailleurs aucune tendance particulière, pas même au niveau lombaire, et leurs intervalles de confiance se chevauchent très amplement. Ceci va à l'encontre des résultats auxquels aboutissent tous les autres travaux et qui décrivent des modifications progressives des moyennes de l'angulation (voir la suite de cette discussion). L'orientation des plateaux semble bien avoir été considérée de façon univoque lors des calculs pour chaque individu, situation qui ne correspond pas à la réalité et a conduit à la publication de valeurs erronées.

²En toute rigueur, la comparaison entre segments adjacents devrait s'effectuer au moyen d'un test pour des échantillons dépendants et vérifier l'hypothèse d'une différence nulle entre la moyenne au segment n et celle au segment $n + 1$. Les données publiées ne permettent pas un tel calcul. L'utilisation d'un test basé sur l'indépendance des échantillons implique une augmentation de l'erreur de deuxième espèce et donc une perte de puissance du test si les données des deux échantillons sont corrélées. Certaines différences réelles peuvent donc ne pas apparaître significatives, mais les différences significatives le sont réellement.

Cependant, si la lordose lombaire commence à un niveau différent selon le sujet, ce que suggère la variabilité des valeurs, une diminution régulière de la moyenne de l'indice est aussi envisageable. En effet, plus le segment considéré sera proche du sacrum, plus le nombre d'individus avec des valeurs négatives décrivant une lordose sera grand, et donc plus la moyenne des indices sera basse. La diminution progressive de l'indice qui est notée ne serait alors qu'un artefact statistique, un déplacement progressif de la moyenne sans valeur descriptive. Toutefois, les résultats obtenus sur la collection *Spitalfields*, en considérant la forme exacte du corps vertébral dans le plan sagittal, montrent que pour la majorité des individus, il existe bien une modification progressive de l'angulation réciproque des plateaux depuis une orientation en cyphose jusqu'à une orientation en lordose (exemple dans le cas de deux individus à la figure 51 *a.*). Une décroissance assez régulière de l'angle est observée chez 22 des 24 sujets (soit 92 %; les deux exceptions sont de sexe féminin). Elle débute le plus souvent entre T11 et L1 (inclus), en T7 dans un cas (féminin) et en L2 dans deux cas (un de chaque sexe). Le changement de signe de l'angle, qui marque le passage de l'orientation en cyphose à l'orientation en lordose s'effectue 1 à 5 segments plus bas que le début de cette décroissance progressive. Cette régularité est surtout frappante si l'on considère la variation importante qui existe pour les segments plus craniaux aux étages thoracique et cervical, et même si cette variation détermine des profils d'allure tout à fait régulière. Ainsi, les profils obtenus pour les deux sujets masculins n° 519 et n° 714 de *Spitalfields*, par exemple, dessinent une courbe tout à fait régulière (figure 51 *b.* et *c.*) tandis que les valeurs d'angles calculées à chaque segment sont très variables (figure 51 *a.*).

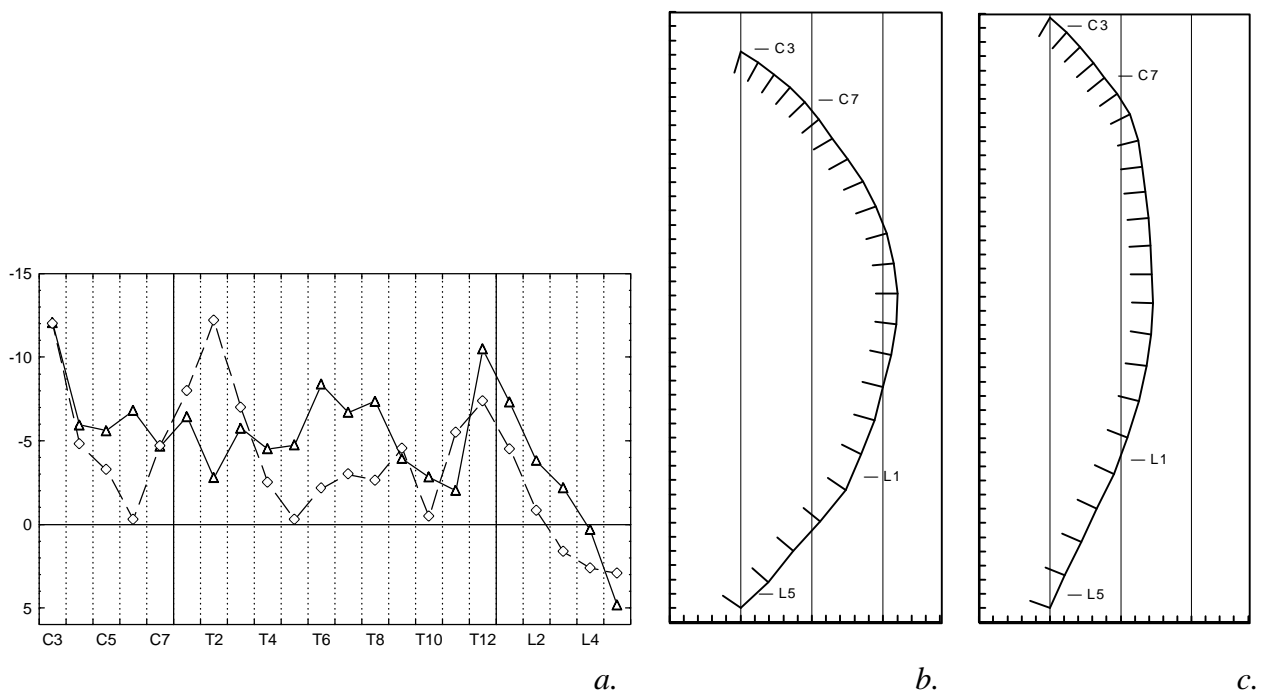


Figure 51

Valeur de l'angulation réciproque entre les plateaux vertébraux inférieur et supérieur à chaque segment et allure des profils impliqués par la morphologie des corps vertébraux. Exemple pour deux individus masculins de la *Christ church* de *Spitalfields*. *a.*, angulation selon le segment, en degré. —△—, sujet 519; —◇—, sujet 714. L'échelle des ordonnées a été inversée pour obtenir une représentation comparable à celles des figures suivantes. *b.* et *c.*, profils constitués par l'empilement des quadrilatères représentant les corps vertébraux (*b.*, 519; *c.*, 714). Une graduation sur l'axe = 10 mm.

Comme l'indique par ailleurs la variabilité de l'indice relevée par JANKAUSKAS, le calcul des angulations des plateaux montre en effet, au niveau thoracique, que la cyphose inclut le plus souvent plusieurs corps vertébraux dont les plateaux supérieur et inférieur forment un angle à sommet postérieur, c'est-à-dire sont orientés dans le sens de la lordose. Le profil correspondant au sujet 556 illustre bien ce phénomène: les plateaux du corps vertébral de T4 forment entre eux un angle de 2° dont le sommet est dirigé postérieurement, tandis que ce segment appartient à une cyphose nettement dessinée. La régression polynomiale donne en effet, en T4, une valeur de courbure dans le sens de la cyphose, de $-1.9 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ (figure 52). Ces valeurs montrent que la forme d'un corps vertébral particulier considéré isolément n'est pas nécessairement significative de la courbure à laquelle il participe. Celle-ci doit être comprise comme la sommation des contributions apportées au niveau de plusieurs segments adjacents dont certains peuvent être orientés à l'opposé de la courbure générale.

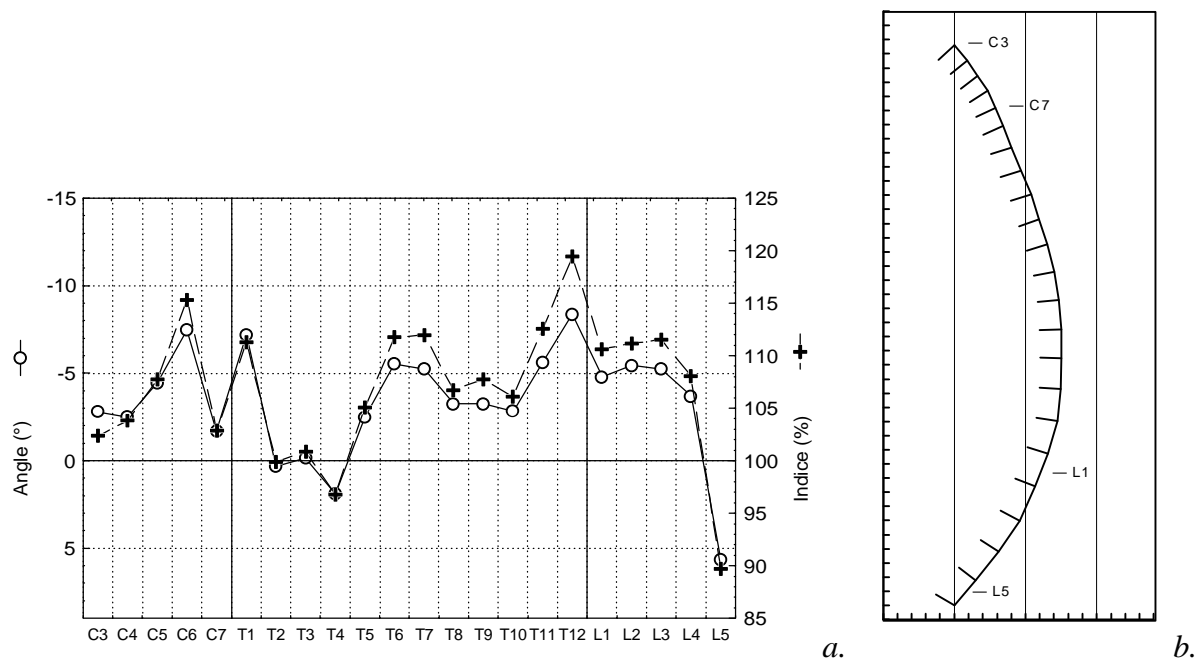


Figure 52
Valeur de l'angulation réciproque entre les plateaux vertébraux inférieur et supérieur à chaque segment et allure du profil impliqué par la morphologie des corps vertébraux. Exemple du sujet masculin n°556 de *Spitalfields*. *a.*, ordonnées: —○—, axe de gauche, angulation en degré; —+—, axe de droite, indice hauteurs sagittales postérieure / antérieure $\times 100$. Les deux axes ont le même rapport de proportion autour du seuil représentant l'inversion de l'angulation (0° ou 100%) mais leurs limites minimales ont été fixées arbitrairement. *b.*, profil constitué par l'empilement des quadrilatères représentant les corps vertébraux. Une graduation sur l'axe = 5 mm. Bien qu'une angulation orientée en lordose soit déterminée en T2 et en T4, ces segments appartiennent à une cyphose nettement dessinée. L'angulation positive de L5 n'est pas suffisante pour déterminer une lordose.

5.1.3. Variation de l'indice des hauteurs et des angulations à l'étage cervical

Au niveau cervical, l'indice des hauteurs de JANKAUSKAS reste en moyenne dans les valeurs positives censées correspondre à une orientation en cyphose. Dans les deux sexes, une diminution régulière de la moyenne des indices est cependant notée pour les trois premiers segments étudiés: de C5 à C3, sans que le seuil des 100 % soit franchi (figure 50). Mais cette décroissance n'apparaît pas significative quand les moyennes sont comparées deux à deux entre segments adjacents. L'indice des hauteurs est à cet étage un mauvais indicateur de l'angulation réciproque entre les plateaux supérieur et inférieur du corps vertébral. La forme de celui-ci ne saurait être assimilée à un trapèze isocèle puisque sa face antérieure est inclinée de haut en bas et d'arrière en avant, par rapport au plan déterminé par sa face postérieure (DELMAS, 1970).

Dans l'échantillon de *Spitalfields*, le calcul de l'angulation des plateaux vertébraux à chaque segment montre que celle-ci change selon des modalités très variables au niveau cervical. Les modalités observées sont les suivantes... 1/ La variation de l'angle, depuis les segments thoraciques hauts jusqu'en C3, peut correspondre à une diminution continue, selon le schéma observé pour l'étage lombaire, l'angle devenant chaque fois de plus en plus fermé avant de changer d'orientation pour déterminer une lordose (1 cas masculin, 4 cas féminins). 2/ Le seuil de zéro degré peut ne pas être franchi, les valeurs restant significative d'une orientation en cyphose, situation qui correspond à celle suggérée par les moyennes des indices de hauteur de JANKAUSKAS. 3/ L'angulation peut encore osciller irrégulièrement jusqu'à passer dans les valeurs de lordose, ou encore rester en cyphose sans déterminer aucune lordose. 4/ Enfin, l'angulation peut devenir lordotique en C3, ou en C4 et C3, sans montrer au préalable aucune variation régulière. La encore, malgré des schémas de variation très différents et qui peuvent être assez irréguliers, les angulations des plateaux vertébraux déterminent des profils cervicaux réguliers.

5.1.4. Différences entre les sexes

La comparaison des moyennes des indices des hauteurs obtenues par JANKAUSKAS pour les deux sexes aux mêmes segments montre, en direction caudale, une différence statistiquement significative à partir du segment T10 ($p = 0.0023$). La moyenne du groupe masculin est toujours supérieure à celle du groupe féminin, de T10 à L3 inclus, mais à partir de L1, cette différence est chaque fois moins forte. La valeur de probabilité du t de Student augmente régulièrement en direction caudale jusqu'à passer le seuil $\alpha = 0.05$ en L4. Elle est inférieure à 0.001 en L1, égale à 0.004 en L2, et à 0.04 en L3. Finalement, l'hypothèse d'égalité entre les sexes ne peut pas être rejetée au niveau des segments les plus inférieurs L3 et L4 (figure 50).

Dans le cas de l'échantillon de *Spitalfields*, la représentation des valeurs moyennes avec leurs intervalles de confiance pour chaque segment permet de visualiser cette tendance. Les statistiques angulaires calculées sur les valeurs d'*angulation réciproque*³ des plateaux ont donné des résultats qui, bien que quelque peu différents, sont tout à fait cohérent avec ceux de JANKAUSKAS. Des différences significatives sont notées entre les deux sexes pour les segments T1, T9, T12, et L2 à L5. Ils correspondent toujours à une inégalité de même sens, l'angle moyen pour le sexe masculin étant inférieur (avec son signe) à l'angle moyen féminin (figure 53). Cette situation correspond à celle rencontrée dans les données de Jankauskas (figure 50) où l'indice est défini de telle façon qu'il est supérieur à 100 % en cyphose, et d'autant plus élevé que l'angle est ouvert (indice: *hauteurs postérieure / antérieure*). En lordose, l'indice est inférieur à 100 % et il est, cette fois ci, d'autant plus faible que l'angle est ouvert. En T1 et T9, les différences qui sont rencontrées entre le

³ Ce terme d' « *angulation réciproque* » est utilisé par STAGNARA (1985).

présent travail et celui de JANKAUSKAS peuvent résulter de différences entre échantillons. En revanche, la conservation de l'hypothèse d'égalité en L1 peut être imputée à un effectif plus faible qui rend le test plus conservateur.

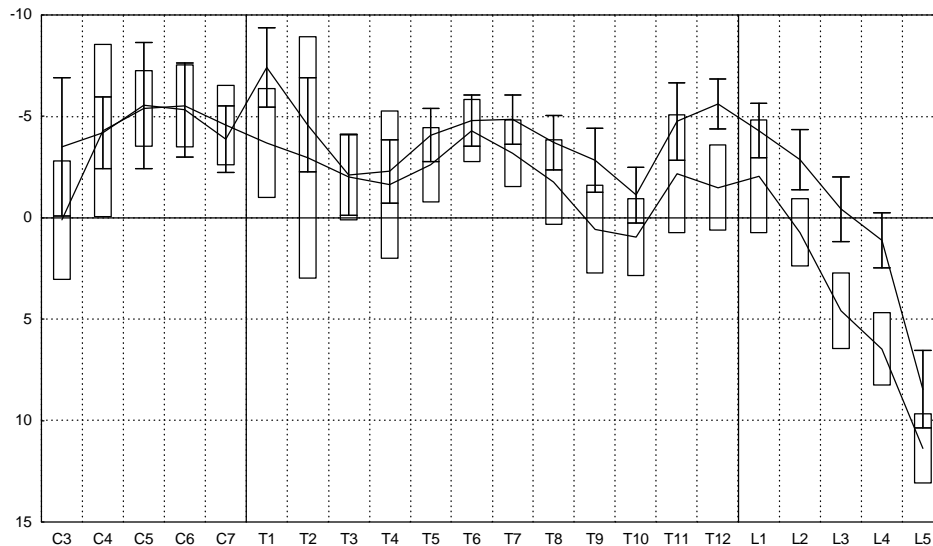


Figure 53
Variation de l'angulation réciproque des plateaux vertébraux selon le segment. Valeurs angulaires calculées à partir des mesures définissant la forme du quadrilatère quelconque, échantillon de *Spitalfields*. Angles moyens et intervalles de confiance des angles moyens à 95 % (statistiques des distributions angulaires: ZAR, 1984) pour le groupe masculin (I) et le groupe féminin (□). L'échelle des ordonnées est inversée afin d'obtenir une représentation directement comparable à celle issue des données d'autres auteurs.

5.1.5. Constance des modèles de variation selon les segments

Il faut souligner par ailleurs que les variations de l'angulation moyenne des plateaux dans l'échantillon de la *Christ Church* suivent avec une grande précision, au signe près, celles qui sont notées pour l'indice des hauteurs dans l'échantillon lithuanien (figure 50, p. 206). Cette grande similitude est d'autant plus remarquable que les méthodes utilisées sont différentes, que les échantillons n'ont pas le même effectif, et enfin qu'ils sont d'époques et de provenances géographiques très différentes.

Les variations observées dans les deux cas sont les suivantes:

Une augmentation de l'angulation dans le sens de la cyphose (en valeur absolu) de C3 à C5 très exactement, une décroissance jusqu'en C7 et une valeur plus forte pour T1 (à *Spitalfields*, chez les hommes seulement, peut-être pour des raisons d'effectif d'échantillon). Après des valeurs faibles en T3 et T4, l'angulation croît à nouveau et atteint un maximum en T6 et T7, elle décroît jusqu'en T9 ou T10, croît pour atteindre un maximum au niveau des derniers segments thoraciques, puis décroît régulièrement jusqu'en L5. Le passage de l'orientation en cyphose à l'orientation en lordose s'effectue en L2 ou L3 (figure 50 et figure 53). Ces variations dessinent donc trois « pics de cyphose thoracique [en T1, en T6 ou T7, et en T11 ou T12] suivis de la lordose lombaire » (LATIMER et WARD, 1993).

La simplification qui consiste à assimiler le corps vertébral, dans le plan sagittal, à un trapèze isocèle, permet en fait une bonne approximation des variations des valeurs d'angle entre les plateaux selon le segment. La variation de l'indice des hauteurs antérieure et postérieure peut être comparée à celle de l'angulation des plateaux au moyen d'échelles qui ont la même proportionnalité par rapport au seuil marquant l'inversion *cyphose / lordose* (0° ou 100%). De cette façon, la signification des variations est respectée (figure 52 a.). Dans l'échantillon de *Spitalfields*, les deux courbes se suivent de très près, alors que l'indice ne prend en compte que deux des cinq mesures utilisées pour le calcul de l'angulation. La figure illustre cette totale concordance des variations pour un individu choisi à titre d'exemple, mais cela est vrai pour toutes les colonnes vertébrales de l'échantillon sans exception. Les variations de ces deux valeurs selon le segment peuvent donc être comparées de façon satisfaisante. Les différences qui sont observées justifient cependant la prise des cinq mesures pour une détermination exacte de la forme du corps vertébral.

La similitude observée dans les *variations* d'angulation des plateaux, lorsque l'échantillon de la *Christ Church* est comparé à l'échantillon lithuanien, apparaît plus surprenante encore si l'on prend en considération la grande *variabilité* qui existe dans ces variations entre les différentes colonnes. Le seul point commun entre les tracés individuels est la décroissance de l'angle entre les plateaux qui débute entre T10 et T12 et continue jusqu'en L5, le sens de l'angulation s'inversant entre L1 et L4 selon les sujets. Au niveau cervical, les plateaux de C3 sont orientés en lordose pour près de la moitié de l'effectif, mais la configuration la plus fréquente (54 % des cas) est une orientation en cyphose. A l'exception de ce segment et des segments lombaires, les plateaux sont toujours réciproquement inclinés dans le sens de la cyphose, bien que pour les trois quarts des colonnes exactement il existe un à trois segments, isolés au milieu de la configuration en cyphose, mais dont les plateaux présentent une angulation en lordose. C'est le cas par exemple de l'individu n° 556 (figure 52)

5.1.6. Etude des variations déterminées dans d'autres échantillons

L'étude des vertèbres thoraciques et lombaires du squelette de l'*Homo erectus* KNM-WT 15000 a conduit LATIMER *et* WARD à considérer l'angulation des plateaux vertébraux selon le segment pour un échantillon constitué de 20 individus âgés de 30 à 35 ans et provenant de la collection ostéologique *Hamann-Todd* (LATIMER *et* WARD, 1993). Les colonnes choisies ne montrent pas de signes de pathologies dégénératives et appartiennent à des sujets qui peuvent être considérés comme physiologiquement adultes, leurs épiphyses étant synostosées. Le calcul de l'angle fait intervenir trois distances (hauteurs antérieure et postérieure, diamètre sagittal supérieur) et la forme du corps vertébral y est implicitement assimilée à celle d'un trapèze isocèle.

D'autres données comparables sont fournies par l'étude d'un échantillon de 100 individus sains (43 féminins et 57 masculins), réalisée par COSTANZO, STAGNARA *et* collaborateurs (STAGNARA, 1985). Les angulations réciproques des plateaux de T4 à L5 ont dans ce cas été mesurées sur le vivant à partir de clichés radiologiques ; la vertèbre T4 constituant le premier segment à partir duquel l'image des plateaux n'est pas masquée par la superposition des plans.

Les valeurs moyennes qui sont obtenues dans ces deux travaux, bien que légèrement différentes, suivent encore le même schéma de variation (figure 55 a.). L'angulation atteint un maximum dans le sens de la cyphose au niveau des segments T6 ou T7, puis passe par un minimum en T9 ou T10, atteint de nouveau une valeur maximale au niveau des deux derniers segments thoraciques, puis décroît régulièrement jusque L5, le sens de l'angulation s'inversant entre L1 et L4 pour acquérir une orientation en lordose au niveau des deux derniers segments. Entre L3 et L4, la décroissance de la courbe montre une irrégularité dans l'échantillon de Latimer, sa pente est moins forte sur ce segment, l'angulation en L4 en lordose étant moins prononcée qu'elle ne devrait être

par rapport à celle de L3 si l'on interpolait la valeur entre L3 et L5. Il est notable que cette même irrégularité, exactement, soit perceptible sur la courbe des moyennes obtenues à partir des sujets de la *Christ Church* et à partir de l'échantillon lithuanien étudié par Jankauskas (figure 50).

Une autre étude basée sur des clichés radiologiques de profil permet de retrouver encore ces variations. Il s'agit du travail publié par OSMAN et qui a pour objectif de quantifier les modifications de forme du corps vertébral dans le plan sagittal qui sont impliqués par les processus pathologiques d'arthrose et d'ostéoporose. Le groupe contrôle non pathologique est constitué de 28 femmes radiographiées à Louvain en Belgique. Les moyennes de l'indice *hauteur antérieure / postérieure* du corps suivent encore la même variation entre les segments thoraciques T4 à T12 pour lesquels elles ont été rapportées: augmentation de l'angle de T4 à T7 où un maximum est atteint, diminution jusqu'à un minimum en T10, angulation supérieure en T11 et à nouveau inférieure en T12 (OSMAN, 1994).

MULLER et collaborateurs (à Amiens) publient des données comparables à partir d'un échantillon basé sur les clichés radiologiques de profil, digitalisés, de 50 hommes et 50 femmes exempts de toute pathologie rachidienne ou extra-rachidienne diagnosticable. L'indice de « cunéisation » qui est calculé permet de mesurer le « pourcentage de réduction de la hauteur antérieure par rapport à la hauteur postérieure »: $(HA - HP) / HP$. Il s'agit donc du même indice à l'unité près, puisqu'il est égal à: $HA / HP - 1$. Les courbes des valeurs moyennes par segment avec leurs écarts-type sont rapportées pour chaque sexe, depuis T4 jusque L5 (MULLER *et al.*, 1992). Les variations observées sont encore: une augmentation de l'angulation dans le sens de la cyphose de T4 à T7-T8, un minimum atteint en T10, puis une brève augmentation jusqu'en L1 chez les hommes et en T11-T12 chez les femmes, suivie d'une "décroissance" continue jusque L5. Le passage de la moyenne par zéro, qui marque l'acquisition d'une angulation en lordose, s'effectue entre L2 et L3 chez les hommes et entre L1 et L2 chez les femmes.

Ces schémas sont donc, encore une fois, cohérents à un segment près: entre eux, et aussi avec ceux déterminés à partir des données de Jankauskas, de Stagnara, de Latimer et Ward, et à partir des angles calculés sur la collection de *Spitalfields*.

Des données comparables sont disponibles pour des collections ostéologiques de populations de Hottentos et Boschimans (DUPARC, 1942).

Le groupe de Boschimans étudié par G. Duparc à l'Institut d'Anthropologie de Genève est constitué de 39 sujets. Les squelettes ont été sexés selon la morphologie du crâne. Nous avons groupé les données des deux sexes en un seul échantillon. L'indice des hauteurs du corps vertébral varie, selon le segment, suivant le même schéma précédemment décrit, à l'exception de l'étage thoracique moyen (figure 54). Il y a augmentation de l'indice de C3 à C5, diminution de C5 à C7, et la valeur en T1 est supérieure à celle de C7 et à celles de T2 et T3. Dans les échantillons mentionnés jusqu'à présent, l'indice augmente à partir de T4, et atteint un maximum en T7. Dans l'échantillon de Boschimans, cette croissance n'existe pas car la valeur en T4 est supérieure à celle en T5. En revanche, pour les régions thoracique basse et lombaire, les variations sont celles déjà mentionnées: des valeurs faibles en T9 et T10, des valeurs très forte en T11 et T12, puis une décroissance continue de T12 à L5. L'angle s'inverse entre L4 et L5.

Le groupe des Hottentos est constitué par 14 colonnes vertébrales. Le schéma de variation de l'indice est encore le même, mais il y a bien, cette fois, passage par un maximum au niveau thoracique. Ce maximum se situe cependant en T5. Il est atteint par une croissance régulière de l'indice, puis une décroissance, moins régulière, conduit à une valeur faible en T10. De T11 à L1, les valeurs sont fortes, puis décroissent continûment jusque L5.

La courbe des 11 colonnes appartenant à des Griquas est comparable à celle des Hottentos, sauf pour les deux premiers segments cervicaux: l'indice en C3 est plus élevé qu'en C4. De plus, la décroissance lombaire ne commence qu'en L2, et la valeur de T12 est faible relativement à celles de T11, L1 et L2. C'est la courbe qui est la plus dissemblable de toutes.

Ces populations du groupe Khoisan (HOWELL, 1979) ont donc des schémas de variation de l'indice des hauteurs quelque peu différents de ceux précédemment décrits. Cela est vrai particulièrement à l'étage thoracique moyen. Mais dans tous les échantillons, on observe, cependant, des valeurs fortes encadrées par des valeurs faibles, au niveau thoracique haut (entre T2 et T4) et au niveau thoracique bas (entre T8 et T11). Dans l'échantillon lithuanien, un maximum est atteint en T7 ou T8, la courbe ayant une allure régulière. Un maximum est atteint en T7 dans l'échantillon de OSMAN, en T7 ou T8 dans celui de MULLER, et en T6 dans l'échantillon de LATIMER. Pour les Boschimans, les valeurs oscillent entre T4 à T7, elles sont environ de 107 % en T4, T6 et T7. Pour les Hottentots, un maximum est très nettement atteint en T5 avec une moyenne de 113 %. Il est atteint en T6 dans l'échantillon des Griquas, où il est de 111 %. A Spitalfields, le maximum est atteint en T6 ou T7 dans le sexe masculin, avec une angulation de 5° environ, et en T6 dans le sexe féminin, avec une angulation de 4°.

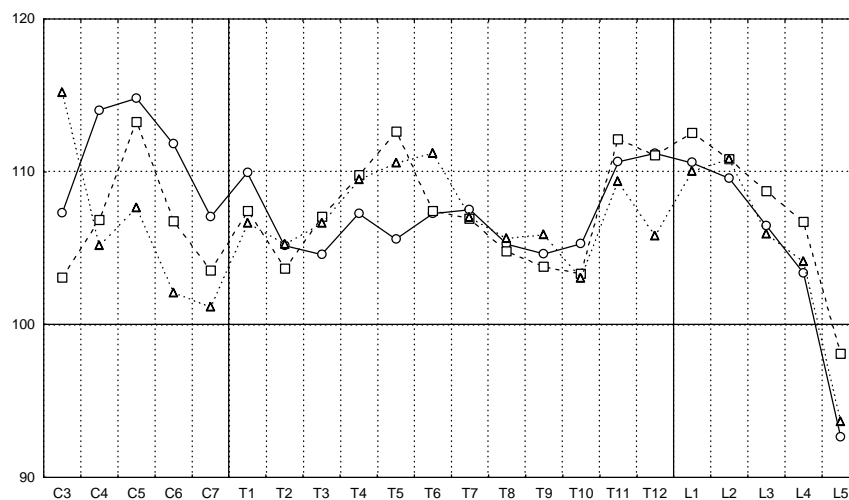


Figure 54

Variations de « l'indice de hauteur du corps » selon le segment, pour trois échantillons de Boschimans, Hottentots et Griquas (DUPARC, 1942). La moyenne pondérée de chaque sexe a été calculée pour les Boschimans et Hottentots afin d'obtenir celle de l'échantillon dans son ensemble (la diagnose sexuelle avait été effectuée par l'auteur à partir du crâne). —○—, Boschimans ($n = 39$) ; - - □ - -, Hottentots ($n = 14$, mais $n = 13$ pour C3 et T3) ; ...△..., Griquas ($n = 11$).

En dépit d'une certaine variabilité, la variation de l'indice des hauteurs du corps vertébral suit un schéma remarquablement constant. Il est donc particulièrement intéressant de remarquer que celui-ci ne se retrouve que partiellement dans le cas de colonnes immatures (figure 55 b.). Un échantillon de 10 sujets âgés de 10 à 14 ans avait été sélectionné par LATIMER et WARD (*ib.*). Le tracé qui leur correspond présente bien un maximum en T7 et une valeur faible au niveau de T10, mais il n'existe pas de maximum au niveau des derniers segments thoraciques et, les valeurs d'angle de L2 à L4 étant pratiquement égales, la décroissance n'est pas significative. La lordose est atteinte seulement en L5 par un saut brusque de la valeur moyenne. Il faut considérer la possibilité qu'un biaisage méthodologique puisse être en partie responsable de ces différences. La soudure du listel vertébral au plateau a lieu, selon les auteurs, entre les 15^{ème} et 17^{ème} années (BIRKNER, 1980), ou dans l'intervalle plus large de 12 à 25 ans (EDELSON et NATHAN, 1988). L'échantillon, étant donné son âge, est donc de toutes les manières susceptible de contenir une majorité de sujets dont les listels vertébraux ne sont pas soudés aux plateaux, ce qui peut modifier la proportionnalité des hauteurs antérieure et

postérieure du corps qui sont mesurées. Toutefois, bien que le listel ne soit pas responsable de la croissance du corps vertébral et que sa soudure ne soit pas significative d'une interruption de celle-ci (BICK et COPEL, 1950; DICKSON et DEACON, 1987), elle reste un des phénomènes de la croissance vertébrale dont rend compte l'allure différente de la courbe de l'échantillon immature.

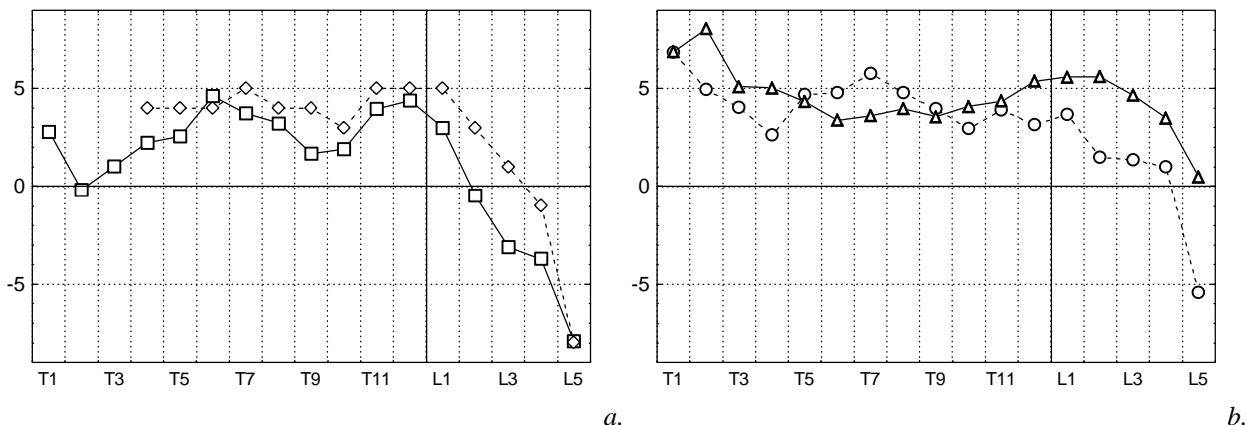


Figure 55

Angulations réciproques moyennes des plateaux vertébraux cranial et caudal de chaque segment. Valeurs en degrés. *a.*, deux échantillons de sujets adultes des deux sexes: —□—, $n = 20$, mesures directes sur l'os sec (LATIMER et WARD, 1993); - - ◊ - -, mesures sur clichés radiographiques, $n = 100$ (STAGNARA, 1985). *b.*, comparaison extra-groupe (LATIMER et WARD, 1993); - - ○ - -, *Homo sapiens sapiens*, immatures de 10 à 14 ans, $n = 12$; —△—, *Pan troglodytes* adultes, $n = 10$.

L'indice des hauteurs du corps vertébral est aussi calculé par Latimer et Ward pour un échantillon de *Pan troglodytes* (5 males et 5 femelles adultes). Les données sont très intéressantes car elles permettent une comparaison *extra-groupe*. La courbe qui est obtenue est tout à fait différente. Des valeurs fortes sont trouvées pour les segments thoraciques hauts. Elles sont plus faibles au niveau des segments moyens, et croissent à partir des segments thoraciques bas. Un maximum est atteint au niveau lombaire haut puis les valeurs décroissent régulièrement sans passer dans les négatifs. Les plateaux vertébraux sont donc toujours orientés, en moyenne, en cyphose.

5.1.7. Variation de l'indice des hauteurs à l'étage lombaire

La décroissance progressive de l'angle entre plateaux au niveau lombaire, chez l'homme, est aussi documentée par ROSE pour les segments L1 à L4 (échantillon d'origine est-africaine). Les segments plus supérieurs (craniaux) ont en moyenne une angulation réciproque des plateaux - « *wedging* » - moins forte que les segments plus inférieurs, mais orientée dans le sens de la cyphose (ROSE, 1975). Une forte variabilité est aussi notée puisqu'il existe toujours, pour chaque segment, un ou plusieurs individus dont le corps vertébral présentera une orientation en lordose. Enfin, une décroissance des valeurs moyennes est aussi rencontrée, de T11 à L5 et pour les deux sexes, dans l'échantillon étudié par SANDERS. Le passage à un indice moyen significatif de la lordose s'effectue, dans son échantillon, en L2 chez les femmes ($n = 20$) et en L3 chez les hommes ($n = 20$). Encore une fois, une très grande variabilité individuelle est trouvée, l'angulation dans le

sens de la lordose pouvant être présente à tous les segments lombaires ou seulement au dernier selon les sujets (SANDERS, 1994, 1995, 1998).

Depuis les travaux de CUNNINGHAM, un grand nombre de publications ont rapporté la variation de l'indice des hauteurs du corps vertébral au niveau lombaire (CUNNINGHAM, 1886; TURNER, 1886; AEBY, 1879; ANDERSON, 1883; HASEBE, 1913; MENDES, 1918; TROTTER, 1926; LANIER, 1939; DUPARC, 1942; MARTIN, 1893, 1959). Les moyennes à chaque segment en sont publiées pour au moins 36 échantillons correspondant à des populations très diverses, issues des cinq continents, et aussi pour quelques sujets isolés (MARTIN, 1956 ; DUPARC, 1942). Si ces travaux sont anciens, il est toutefois particulièrement intéressant d'en considérer ici les résultats, car ils fournissent une base appréciable de discussion. Une observation fine des variations de l'indice moyen permet de dégager des tendances retrouvées très fréquemment entre les échantillons et qui semblent n'avoir jamais été soulignées. La comparaison des valeurs de chaque sexe permet de confirmer définitivement un dimorphisme sexuel des corps vertébraux quant à leur implication dans la courbure lombaire sagittale (figure 57, p. 218).

La tendance la plus constante qui est observée est la décroissance continue de l'indice depuis L1 jusque L5. Elle est rencontrée dans 27 des 36 échantillons (75 %). Une autre tendance est l'accélération de cette décroissance entre les segments L4 et L5. En effet, dans 23 échantillons pour lesquels l'indice décroît sur tout l'étage lombaire ($23 / 27 = 85 \%$), la différence entre les moyennes des segments adjacents L4 et L5 est plus grande que celles calculées entre toutes les autres paires de segments. L'augmentation plus forte de l'angulation entre L4 et L5 a été notée à *Spitalfields* et dans l'échantillon lithuanien, où elle est accompagnée d'une modification moindre de l'angulation entre L3 et L4 qu'entre tous les autres segments lombaires. Ce ralentissement entre L3 et L4 est en effet retrouvée dans 8 autres échantillons ($8 / 27 = 30 \%$). Si l'indice diminue le plus fréquemment dès L1, cette décroissance ne commence qu'en L2 dans le cas de 5 échantillons sur 36 (14 %). Par ailleurs, dans 2 échantillons d'effectifs faibles, l'indice augmente entre L2 et L3 d'une part, et entre L3 et L4 d'autre part. Mais surtout, un vaste échantillon de sujets masculins d'origine africaine (LANIER, 1939) montre en moyenne une faible augmentation de l'indice entre L4 et L5, l'angulation des plateaux vertébraux étant donc pratiquement égale en L4 et en L5, et même légèrement plus faible au niveau du dernier segment lombaire.

Le seuil des 100 % censé correspondre à une inversion du sens de l'angulation des plateaux est franchi, de façon variable, au niveau d'un segment plus ou moins caudal (DUPARC, 1942). Le cas moyen le plus fréquemment rencontré est celui d'une inversion qui a lieu au niveau du dernier segment lombaire seulement. Il correspond à 14 des 36 échantillons (39 %). Par ailleurs, ces échantillons sont si divers qu'il apparaît impossible de dégager aucune tendance populationnelle ou géographique (cette remarque étant d'ailleurs valable pour les autres formes de variabilité décrites). Dans le cas de 12 échantillons (33 %), l'indice passe les 100 % entre les segments L3 et L4; pour 9 échantillons (25 %) le seuil est franchi entre L2 et L3, et pour un échantillon seulement (3 %), correspondant à des squelettes féminins d'origine irlandaise et étudiés par CUNNINGHAM, il est franchi entre L1 et L2.

Dans 10 cas, les auteurs différencient les valeurs déterminées pour chaque sexe. La courbe de l'indice moyen à chaque segment, de L1 à L4, se situe toujours, pour le sexe masculin, au dessus de celle du sexe féminin. En L5, cette relation peut être conservée, mais avec une différence moindre entre les moyennes des deux sexes, que celle observée aux autres segments. La relation peut aussi s'inverser, les valeurs restant là aussi très proches. La constance de la relation entre les indices des deux sexes de L1 à L4 est d'autant plus significative qu'elle est conservée dans plusieurs échantillons d'origine archéologique, en dépit de l'incertitude liée à la détermination ostéologique du sexe. Ces relations sont retrouvées dans l'échantillon lithuanien, l'échantillon nord-américain étudié par SANDERS, ainsi qu'à *Spitalfields*.

Chez les Primates non humains, ROSE, qui n'inclut pas dans son étude la dernière vertèbre lombaire, remarque une décroissance des valeurs d'angulation dans le sens cranio-caudal chez les genres *Colobus*, *Pongo*, *Pan*, et *Gorilla*, les plateaux de L4 étant, pour *Gorilla*, orientés en moyenne dans le sens de la lordose. Cependant, cette décroissance n'est significative qu'entre certains segments non adjacents chez *Colobus* et *Gorilla* (ROSE, 1975). Dans les échantillons de primates étudiés par Sanders (figure 56), la diminution de l'angulation est observée, en moyenne, chez *Hylobates spp.* où elle n'implique pas le dernier segment L5, chez *G. gorilla* et *P. pygmaeus*, uniquement entre les pénultième et dernier segments L3 et L4, et enfin chez *P. troglodytes*, de l'antépénultième au dernier segments: de L2 à L4. Dans tous les cas, la valeur moyenne ne franchit pas le seuil des 100 %, les plateaux vertébraux conservant donc sur toute la série lombaire une angulation orientée dans le sens de la lordose.

Les deux auteurs notent par ailleurs que la variation rencontrée dans une série vertébrale Sts-14 attribuée à *Australopithecus africanus* (ROBINSON, 1972) correspond à celle trouvée chez *Homo sapiens*. Ces vertèbres lombaires montrent, d'une part, une diminution continue de l'angulation des plateaux, et d'autre part son inversion entre les segments L2 et L3. A partir de L3 (inclus), les plateaux sont orientés en lordose.

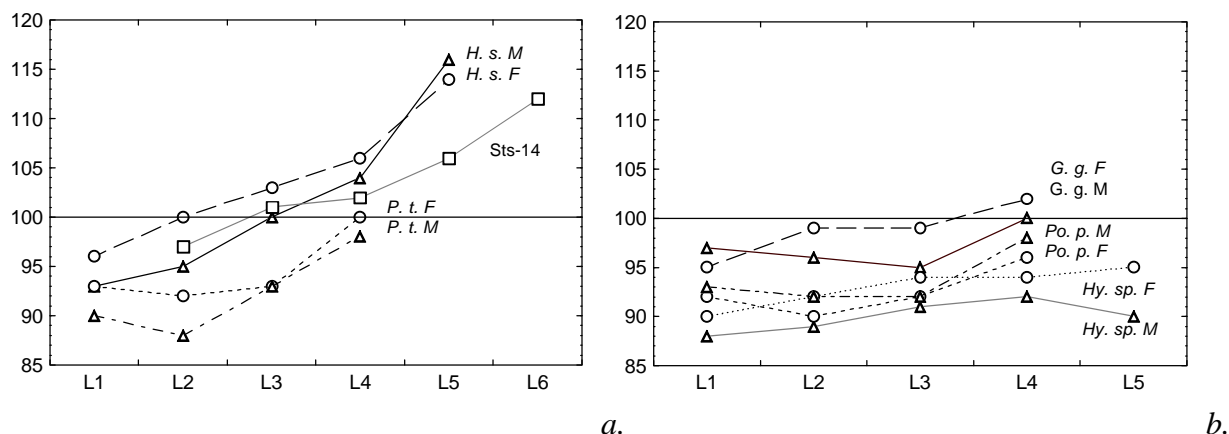


Figure 56

Indice de la hauteur ventrale rapportée à la hauteur dorsale du corps vertébral dans le plan sagittal, à l'étage lombaire et chez différents genres de Primates *Hominoidea*. Valeurs en %. *M*, mâle ; *F*, femelle. *a.*, *Homo sapiens* (*H. s.*): Δ — (M), \circ — (F); *Australopithecus africanus* (*Sts-14*): \square - - - - ; *Pan troglodytes* (*P. t.*): Δ - - - (M), \circ - - - (F). *b.*, *Gorilla gorilla* (*G. g.*): Δ — (M), \circ — (F); *Pongo pygmaeus* (*Po. p.*): Δ - - - - (M), \circ - - - (F); *Hylobates species* (*Hy. sp.*): Δ - - - (M), \circ (F).

Nota: Pour la commodité de la lecture, le numérotation des segments est celle adoptée classiquement et non pas la numérotation adoptée par l'auteur et basée sur les rapports d'homologie des segments (SANDERS, 1994, 1995, 1997). le premier segment lombaire est donc mentionné comme L1.

5.1.8. Dimorphisme sexuel et contraintes mécaniques au niveau des derniers segments lombaires et du sacrum

Chez l'Homme, la lordose déterminée par les corps vertébraux apparaît donc *toujours* à un niveau plus cranial dans le sexe féminin, et ce changement d'orientation des plateaux vertébraux est préparé par une diminution de l'angulation, qui débute elle aussi à un niveau plus cranial⁴. En L5, le dimorphisme sexuel semble disparaître.

Les contraintes mécaniques deviennent certainement pour ce segment le principal facteur déterminant et limitant la variabilité de sa morphologie. L'articulation lombo-sacrée est en effet soumise, dans la bipédie, à des contraintes mécaniques particulièrement importantes d'un point de vue dynamique (FARFAN *et al.*, 1976 ; ANDERSON *et al.*, 1986 ; GREEN *et al.*, 1994). Dans une perspective statique, la résistance de la *pars interarticularis* de L5 est mise en jeu, à la fois par la résistance au glissement antérieur du corps vertébral, à composante essentiellement horizontale (DAVIS, 1961 ; ADAMS et HUTTON, 1983 ; VAN SCHAİK *et al.*⁵, 1985 ; TAYLOR et TWOMEY⁶, 1986 ; KAPANDJI, 1982), et par la transmission des contraintes de compression à composante verticale (ADAMS et HUTTON, 1980 ; PAL et ROTAL, 1987, 1991 ; YANG et KING, 1984 ; ZINDRICK *et al.*, 1987 ; BONNEL, 1993 ; et aussi SCHENDEL *et al.*⁷, 1993). Les 70 %, environ, de la masse corporelle située au dessus des membres inférieurs (⁸ZIHLMAN, 1984) impliquent des efforts proportionnels supportés par les articulations intervertébrales postérieures (HEGGENESS et DOHERTY, 1997 ; TYRRELL *et al.*, 1985 ; ADAMS *et al.*, 1987) qui assument une partie de la transmission des contraintes (PAL et ROTAL, 1986, 1987), et surtout une transmission du poids correspondant par le rachis lombaire inférieur et le sacrum (PAL, 1989). De fait, on estime que 95 % des lésions du rachis lombaire affectent les articulations L4/L5 et L5/S1 (GRAKOVETSKY, 1990). L'arc postérieur de L5 est donc fortement mis en jeu. Il existe une corrélation entre la surface d'une articulation et la magnitude des efforts qu'elle transmet (PAL et ROTAL, 1991). La diminution de surface des plateaux vertébraux et l'augmentation de section des pédicules de L5, significativement plus forte chez l'homme que chez les autres Primates en proportion de la masse corporelle, est donc une traduction anatomique de la magnitude des contraintes et des modalités particulière de leur prise en charge au niveau de la dernière vertèbre lombaire (SHAPIRO, 1993).

La fréquence des spondylolyses "typiques" de L5, bien que le facteur génétique ne puisse être négligé (WILTSE et ROTHMAN, 1995 ; MIYAKE *et al.*, 1996 ; MERBS, 1996), illustre particulièrement l'ampleur de ces efforts mécaniques auxquels est soumis l'isthme vertébral du dernier segment libre de la colonne (ARRIAZA, 1997 ; MERBS, 1989a, 1989b, 1995 ; TURKEL, 1989). C'est aussi le cas des spondilolisthesis dégénératifs dont l'étiologie a été clairement mise en relation avec une orientation trop sagittale des surfaces articulaires postérieures, conformation qui diminue la résistance au glissement antérieur de la vertèbre (GROBLER *et al.*, 1993 ; SHARMA *et al.*, 1995).

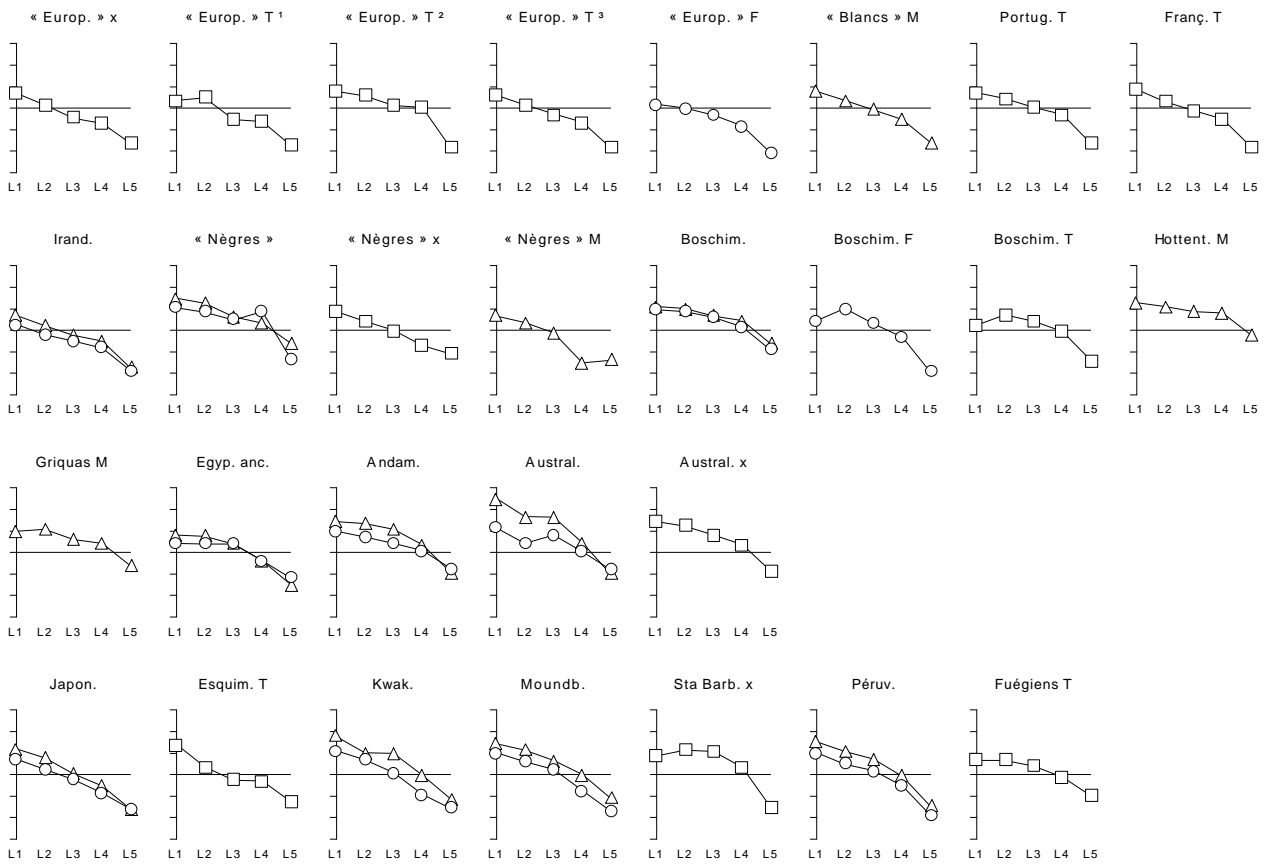
⁴ KNUSSMAN et FINKE (1980) obtiennent les mêmes résultats à partir de profils externes de la colonne vertébrale.

⁵ La corrélation entre l'orientation des processus articulaires inférieurs et celle des lames vertébrales permet de mettre en évidence le rôle de contrefort joué par cette dernière.

⁶ Par une analyse histologique des processus dégénératifs au niveau du cartilage et de l'os sous-chondral, sont démontrées les implications différentielles des zones de la surface articulaire, au niveau lombaire, dans la résistance aux contraintes mécaniques. Voir aussi: MÜLLER-GERBL, 1992.

⁷ Une mise en évidence de la transmission des contraintes par les processus articulaires postérieurs entre L1 et L2.

⁸ SCHULTZ (1962) donne une proportion de 45 % environ de la masse du squelette répartie dans les membres inférieurs. Cette différence entre répartition de la masse totale et de la masse squelettique met encore en évidence la relation entre la masse osseuse, significative des contraintes assumées, et le poids du corps. Elle est étroitement liée aux contraintes mécaniques qui sont imposées aux membres inférieurs dans la station érigée. Cette proportion est supérieure à celle documentée pour tous les autres genres de primates.



Population	référence	n	légende	Population	référence	n	légende		
« Européens »	Turner, 1886	12	« Europ. » x	Hottentots	Duparc, 1942	13 M	Hottent. M		
	Aeby, 1879	20 M & F	« Europ. » T¹		Griquas	Duparc, 1942	11 M	Griquas M	
	Anderson, 1883	30 M & F	« Europ. » T²			Egyp. anc.	Trotter, 1926	17 M & 30 F	Egyp. anc.
	Cunningham, 1886	76 M & F	« Europ. » T³				Andam.	Cunningham, 1886	14 M & 9 F	Andam.
Aeby, 1879	8 F	« Europ. » F	Australiens	Cunningham, 1886		10 M & 4 F		Austral.	
« Blancs »	Lanier, 1939	148 M			« Blancs » M		Turner, 1886	5	Austral. x
Portugais	Mendes, 1918	34 M & F	Portug. T	Japonais	Hasebe, 1913	20 M & 11 F	Japon.		
Français	Cunningham, 1886	26 M & F	Franç. T	Esquimaux	Cunningham, 1886	3 M & F	Esquim. T		
Irlandais	Cunningham, 1886	21 M & 22 F	Irland.	Kwakiutl	Dorsey (Martin, 1959)	17 M & F	Kwak.		
	Cunningham, 1886	7 M & 3 F	« Nègres »	Ind. Moundbuilder	Dorsey (Martin, 1959)	16 M & F	Moundb.		
« Nègres »	Turner, 1886	3	« Nègres » x	Indig. S ^a Barbara	Matiegka (Hasebe, 1913)	4	Sta Barb. x		
	Lanier, 1939	140 M	« Nègres » M	Anciens Péruviens	Dorsey (Martin, 1959)	19 M & F	Péruv.		
Boschimans	Duparc, 1942	24 M & 15 F	Boschim.	Fuégiens	Martin, 1893	5 M & F	Fuégiens T		
	Turner, 1886	4 F *	Boschim. F						
	Turner, 1886	6 M & F	Boschim. T						

Figure 57

Variation de l'indice des hauteurs antérieure et postérieure des corps vertébraux selon le segment lombaire. Valeurs publiées pour des échantillons divers. Tableau descriptif des échantillons, références, et correspondances avec les graphes: Δ, M, sexe masculin ; ○, F, sexe féminin ; □, T, totalité des sujets sans distinction de sexe; x, composition de l'échantillon ignorée quant au sexe. Nota:1/ La terminologie originale a été respectée. Elle a été mise entre guillemets lorsqu'elle nous a semblé imprécise ou obsolète. 2/ * Détail pour les individus féminins de l'échantillon de Boschimans de Turner. 3/ L'échantillon des « Européens » de CUNNINGHAM inclut ceux de Français et Irlandais du même auteur. Il a été représenté car il constitue un effectif important mais il n'est pas considéré dans les décomptes.

La morphologie de la vertèbre L5 semble donc constituer, dans le contexte physiologique où elle est mise en jeu, une situation limite du point de vue de l'intégrité de l'articulation, et même de sa propre résistance biomécanique. Cependant, cette fragilité relative ne semble pas paradoxale dans le contexte biomécanique de la bipédie. La morphologie de la colonne vertébrale doit être le résultat optimal de deux nécessités antagonistes: 1/ la mobilité d'un système dynamique léger, 2/ la résistance aux contraintes mécaniques et la stabilité de l'ensemble, qui impliquent une augmentation de la masse osseuse (DELMAS et PINEAU, 1961, 1984 ; PUTZ et MÜLLER-GERBL, 1996). Une angulation plus importante du corps de L5 augmenterait encore la composante horizontale tendant à la translation antérieure de L5 sur S1 (KUMMER, 1992 ; NÄGERL *et al.*, 1992), donc les forces de tension supportées par les arcs vertébraux. Elle serait par conséquent susceptible de conduire à une déstabilisation de la charnière lombo-sacrée, voire de mettre en jeu la résistance mécanique de l'isthme, mais aussi des pédicules et des lames, aux contraintes importantes qui leur sont appliquées (⁹BONNEL et MOREL, 1990 ; PRIVAT *et al.*, 1990 ; TROISIER, 1992 ; PANJABI *et al.*, 1995 ; ROY-CAMILLE, 1994 ; SAILLANT *et al.*, 1994 ; HANDAL et SELBY, 1995 ; STOKES, 1995 ; HUSSON *et al.*, 1995 ; LAVASTE et ROBIN, 1995). Par conséquent, il apparaît tout à fait vraisemblable que le maintien de l'intégrité mécanique ait, dans une zone anatomique pourtant étroitement liée aux fonctions de reproduction (BUKOVIC *et al.*, 1993), un rôle limitant et antagoniste vis-à-vis de l'expression du dimorphisme sexuel, manifesté par la disparition de la différence d'angulation sagittale du corps de L5.

L'inclinaison du sacrum de haut en bas et d'avant en arrière est étroitement corrélée avec la lordose lombaire (FENDER *et al.*, 1992 ; LEGAYE *et al.*, 1993). La mise en place de l'angle lombo-sacré, qui constitue une mesure à la fois de l'inclinaison sacrée et de la lordose lombaire, est elle même fortement corrélée chez l'enfant avec l'acquisition de la station érigée et de la bipédie (ABITBOL, 1987a). Une augmentation de l'inclinaison du sacrum et l'apparition d'une lordose lombaire ont pu être induits chez des primates quadrupèdes comme conséquence d'une pratique active de la bipédie (PREUSCHOFT *et al.*, 1988; chez *Macaca fuscata*) ou d'une érection forcée du tronc (NATHAN *et al.*, 1964; chez *Papio sp.*). La position plus postérieure de l'extrémité distale du sacrum chez l'homme augmente le moment de la force exercée par le muscle *gluteus maximus*. Celui-ci peut donc relayer l'action des muscles postérieurs de la cuisse (« *hamstrings* »: *Mm. biceps femoris*, *semi-tendinosus* et *semi-membranosus*) qui diminue lorsque leurs insertions inférieures passent sous le *Tuber ischiadicum*, et devient nulle quand le genou se trouve dans l'axe formé par la *Fossa acetabuli* et le *Tuber ischiadicum* (ROBINSON *et al.*, 1972). Ce fonctionnement particulier de l'extension de la cuisse, et dans ce contexte, l'angle lombo-sacré, peuvent donc être considérés comme des conséquences de la position érigée du tronc.

La zone lombo-sacrée est par ailleurs impliquée dans les fonctions de reproduction selon des modalités particulières chez *Homo sapiens*. La position basse du *Facies auricularis* relativement à la *Fossa acetabuli* implique la participation du sacrum dans la constitution du canal pelvi-génital, dont il forme une paroi postérieure osseuse (TAGUE et LOVEJOY, 1986). Le sacrum contribue donc à déterminer un détroit inférieur qui est, relativement aux dimensions crâniennes du fœtus, le plus étroit dans l'ordre des Primates (ROSENBERG, 1992). La cyphose sacrée est donc susceptible de gêner la parturition au point que celle-ci peut entraîner la fracture de son extrémité distale (ABITBOL, 1989). Cette cyphose a été considérée comme résultant de la traction exercée sur

⁹ Ces références passent en revue et discutent le concept de « déstabilisation du rachis ». L'instabilité clinique est définie ainsi par WHITE et PANJABI: « *Loss of the ability of the spine under physiologic conditions to maintain relationship between vertebrae in such a way that there is neither damage nor subsequent irritation to the spinal cord or nerve root and, in addition, there is no development of incapacitating deformity or pain from structural changes.* » (WHITE et PANJABI, 1982, cités par ABITBOL et DOWLING, 1995).

l'extrémité distale du sacrum par les *Ligamenta sacrospinale* et surtout *sacrotuberale* (DON'TIGNY, 1985 cité par ABITBOL, 1989 ; ROCHCONGAR et DUREY, 1987) qui stabilisent le mouvement de nutation antérieure par rapport au *Facies auricularis* (DELMAS, 1970 ; KAPANDJI, 1982). Elle serait en cela une autre conséquence indirecte de la bipédie. L'interprétation obstétrique de la cyphose sacrée (GRAY, 1977) a par ailleurs été sévèrement remise en question (ABITBOL, 1987a, 1989). La présence de la lordose lombaire semble, elle aussi, s'opposer aux contraintes requises par les fonctions reproductrices. Elle diminue durant la grossesse en réponse à la croissance du fœtus et de ses annexes (CARRERA *et al.*, 1997), qui requièrent l'occupation d'un volume plus important dans le *Cavum abdominis*, et déplacent en position plus antérieure le centre de gravité (ABITBOL, 1993). La surcharge pondérale et la disparition de la lordose sont fréquemment la source de lombalgies, comme conséquence des altérations qu'elles imposent à la mécanique de l'étage lombo-sacré (BUKOVIC *et al.*, 1993).

Les contraintes liées à la bipédie au niveau lombo-sacré ont précédé dans la phylogénie (LEAKEY et HAY, 1979 ; BEHRENSMEYER et LAPORTE, 1981 ; CHARTERIS *et al.*, 1981 ; JUNGERS, 1982 ; MCHENRY et CORRUCINI, 1976 ; WHITE, 1980 ; TOBIAS, 1983) celles impliquées par la parturition d'un fœtus dont les diamètres crâniens sont élevés relativement aux diamètres des détroits pelviens (JORDAAN, 1976 ; MCHENRY, 1975 ; LOVEJOY, 1981 ; ABITBOL, 1987c, 1988a, 1991 ; ¹⁰BERGE, 1984 ; CONROY *et al.*, 1998). L'antagonisme des adaptations requises par les deux fonctions de locomotion et de reproduction chez *Homo sapiens* se manifeste particulièrement dans les atteintes qui sont portées par cette dernière à l'intégrité du canal pelvien. Si la morphologie lombo-sacrée reste un compromis par rapport aux contraintes de la gestation et de la parturition, par le biais de la pression de sélection qu'elles exercent (ROSENBERG, 1992), elle semble cependant, dans les termes de ABITBOL (1987a) « mieux expliquée » par les implications biomécaniques de la station érigée et de la bipédie. L'absence de dimorphisme sexuel dans l'angulation du sacrum (ABITBOL¹¹, 1995) et les limitations que sa situation et sa morphologie imposent au canal pelvien (TAGUE et LOVEJOY, 1986) reflètent la prévalence des contraintes de la bipédie, déjà notable en L5 où le dimorphisme sexuel dans la détermination de la lordose lombaire par le corps vertébral a déjà disparu.

5.1.9. Conclusion

La variabilité, entre sujets, des schémas de variation de la forme des corps vertébraux selon le segment, relativise la portée des observations qui peuvent être faites sur des individus isolés, et plus encore sur des segments isolés. Il n'empêche que si ces *variations* dans l'angulation, au long de la colonne, sont très *variables* d'un sujet à l'autre, les profils obtenus présentent pour chacun des allures tout à fait régulières quand les quadrilatères représentant les corps vertébraux sont empilés. Cette variabilité va de paire avec une grande irrégularité des variations individuelles de l'angulation sur la colonne. Elle est telle que chez pratiquement tous les sujets, on détermine au moins un segment dont les plateaux possèdent une angulation de sens opposé à celui de la courbure à laquelle

¹⁰ Le même auteur formule cependant l'hypothèse de l'établissement précoce, dès le genre *Australopithecus*, des modalités de la parturition trouvées chez *Homo sapiens* (BERGE *et al.*, 1984).

¹¹ La « sacrose » mesurée par ABITBOL (1987a, 1995), est l'angle complémentaire de l'angle du promontoire sacré. Sa valeur est donc aisément comparable à celle de l'angulation du corps vertébral de L5. La lordose est mesurée par l'auteur entre le plateau supérieur de L3 et celui de S1. Pour ces deux mesures comme pour leur somme (angle lombo-sacré), aucune différence significative n'est mise en évidence entre les sexes. Ces mesures sont difficilement comparables à celles obtenues à partir de profils externes par KNUSSMAN et FINKE (1980). Ceux-ci mettent en évidence une différence entre les sexes pour l'angle que forme la face postérieure du sacrum (et les tissus mous qui la recouvrent!) avec la verticale, ainsi que pour un indicateur de la courbure sacrée (la dérivée seconde du polynôme, qui ne donne pas directement la courbure).

ils participent. Les courbures sagittales impliquées par les corps vertébraux résultent donc de la sommation des contributions apportées par plusieurs segments adjacents et il sera très aléatoire d'induire la courbure générale à partir de un ou deux segments conservés.

Il existe pourtant une grande constance du schéma de variation de l'angulation selon le segment, quand les valeurs *moyennes* sont comparées pour des échantillons de provenances très diverses. Cela est vrai tant pour les mesures d'angle que pour les indices des hauteurs antérieure et postérieure du corps vertébral.

Ce schéma moyen montre une croissance de l'angulation de C3 à C5, une valeur faible en C7, relativement à ces segments et au segment T1. Les 2ème et 3ème segments thoraciques ont ensuite une angulation faible, puis l'angulation croît jusqu'à une valeur maximale atteinte au niveau thoracique moyen. Au niveau thoracique bas, l'angulation redevient faible, mais atteint brusquement des valeurs fortes à partir du pénultième ou du dernier segment thoracique. Il y a ensuite une décroissance progressive de l'angulation, qui est le plus souvent continue, mais de pente plus faible entre L3 et L4. Elle peut commencer dès T11 ou seulement en L2. L'inversion d'orientation des plateaux est variable quant à sa position: elle peut s'effectuer dès L1 ou seulement au niveau du dernier segment lombaire.

La comparaison des valeurs obtenues dans chaque sexe montre une position toujours plus haute de la courbe correspondant au sexe masculin. L'angulation dans le sens de la cyphose est donc en moyenne plus forte pour ce sexe, mais la différence n'apparaît significative qu'à partir de l'avant-dernier ou du dernier segment thoracique, et lorsque débute la phase de décroissance de la courbe. Ceci implique une détermination plus caudale de la lordose dans le sexe masculin, et des valeurs d'angulation en lordose qui sont en moyenne plus faible. Ce dimorphisme se résout en L5, où la position relative des courbes peut même être inversée.

Ce schéma moyen est remarquablement constant, en dépit d'une variabilité individuelle beaucoup plus importante. Il admet cependant quelques exceptions: valeur forte en C3 (échantillon de Griquas) ; absence de maximum nettement atteint au niveau thoracique moyen (échantillon des Boschimans) ; décroissance de l'angulation en lordose entre L4 et L5 (échantillon de « nègres » - *sic* - de Lanier).

Les données publiées ne permettent de mettre en évidence aucune relation entre la *variabilité* du schéma de *variation* de l'angulation des plateaux vertébraux, et d'éventuelles divisions entre groupes de populations.

En revanche, le schéma général diffère notablement dans le cas d'un échantillon correspondant à des sujets immatures et dans celui de grands singes anthropoïdes pratiquant des modes de locomotion diverses. Ces variations de l'angulation moyenne des plateaux au long de la colonne sont donc déterminées par deux facteurs liés entre eux: d'une part, par l'acquisition d'une morphologie vertébrale adulte ; d'autre part, par la pratique d'une locomotion bipède.

La biomécanique rachidienne apparaît donc susceptible de tolérer entre certaines limites des vertèbres de formes assez variables pour qu'une morphologie particulière du corps dans le plan sagittal ne soit pas assignable à un segment précis. Les compensations entre segments permettent une configuration générale suffisamment régulière, qui restera fonctionnelle vis à vis des contraintes mises en jeu. La conservation d'un même schéma moyen de variation de l'angulation, entre des populations très différentes, permet d'avancer que ce schéma moyen est probablement proche d'un schéma optimal pour la biomécanique de la colonne vertébrale.

5.2. Implication de la morphologie vertébrale dans le déterminisme des courbures physiologiques, et problèmes d'interprétation

5.2.1. Angulations réciproques des vertèbres - données radiographiques détaillées (STAGNARA, 1985)

Dans le but de définir les variations non-pathologiques des courbures sagittales de la colonne vertébrale, COSTANZO et collaborateurs (STAGNARA, 1985) calculent sur des radiographies la totalité des angles qui peuvent être définis entre plateaux vertébraux, depuis le plateau supérieur de T4 jusqu'à celui de S1. Lors de l'examen, les sujets sont positionnés debout, les mains appuyées sur un support antérieur situé au niveau des crêtes iliaques, afin de pallier, à la fois, le manque de lisibilité qu'entraîne la projection de l'humérus dans les clichés de profil, et aussi l'augmentation de la lordose lombaire qu'induirait une projection en avant des membres supérieurs. La conservation des courbures étant contrôlée par l'opérateur, le profil de la colonne vertébrale qui est obtenu est donc celui de la position anatomique de référence. L'échantillon est constitué de 100 individus sains de 20 à 29 ans (43 sujets féminins et 57 sujets masculins). Une matrice présente les paramètres des 120 angulations mesurables. On y lit, en prenant par exemple comme référence le segment L5, la valeur de l'angle entre les plateaux supérieur et inférieur de L5, puis entre ceux, respectivement, de L5 et L4, puis de L5 et L3, et ainsi de suite jusqu'à l'angle L5-T4. Afin d'apprécier la variabilité des valeurs angulaires physiologiques entre segments vertébraux, nous avons calculé à partir de ces données les intervalles de tolérance estimés de la population à 95%, en assumant une normalité de la distribution. La validité de cet intervalle est confirmée par l'observation des valeurs extrêmes de l'échantillon (minimum et maximum). Celles-ci sont situées à l'extérieur de l'intervalle et suivent ses limites avec une grande régularité: c'est ce qui est à espérer pour un échantillon d'effectif $n = 100$, et un intervalle qui est censé contenir 95 % des valeurs pour chaque mesure.

Ainsi décrite, la variabilité rencontrée est très importante. Les intervalles de tolérance ont une amplitude de 10° à 20° si un seul segment est considéré (angulation des plateaux supérieur et inférieur du corps vertébral considéré), et elle atteint plus de 45° quand au moins 11 segments sont considérés (angle entre T7 et L5 par exemple). La variabilité de la mesure augmente avec le nombre de segments pris en compte: l'amplitude de l'intervalle de tolérance et le nombre de segments impliqués sont corrélés $r = 0.89$ ($n = 120$, $p < 0.001$). Les valeurs moyennes s'ajustent au schéma attendu de localisation de la cyphose et de la lordose: les plus fortes valeurs de cyphose sont trouvées pour les angles qui définissent le mieux l'étage thoracique. La moyenne la plus élevée en cyphose est trouvée en effet pour l'angle T4-L1 (37°), suivie, par ordre décroissant, de l'angle T4-T12 (36°), puis de T4-T11 (34°), T4-L2 (33°), T5-L1 (32°), T5-T12 (32°), et T4 T10 (31°). D'une façon similaire, les lordoses les plus élevées sont trouvées pour les angles définis entre des segments correspondant aux limites de l'étage lombaire. Les huit angles les plus ouverts ont pour limite inférieure S1. Leur limite supérieure oscille autour de celle correspondant au passage entre colonne thoracique et colonne lombaire: L1 (-56°), puis T12 (-55°), L2 (-54°), T11 (-53°), T10 (-51°), T9 (-48°), et L3 (-47°).

Si l'on considère les angulations prises entre les plateaux supérieur et inférieur d'un même corps vertébral, on observe que celles-ci sont lordotiques à partir de L4 (-1°). Les valeurs de L3 et L4 (1°) entourent donc la valeur nulle. Ces deux segments L3 et L4 correspondent donc, en termes de moyennes, aux vertèbres intermédiaires. L'auteur indique pourtant que la limite entre lordose lombaire et cyphose thoracique peut se situer entre T9 et L3, la localisation la plus fréquente correspondant à L1 (33%). D'autre part, l'échantillon lui-même montre, par les valeurs minimales qui sont rencontrées, ou par les limites inférieures des intervalles de tolérance, que des angles orientés dans le sens de la lordose peuvent être rencontrés pour tous les segments considérés, depuis T4 jusque S1. Ces données issues de clichés radiologiques indiquent donc la très grande variabilité qui

est rencontrée dans les angulations entre plateaux vertébraux et qui est soulignée par l'auteur lui-même. Un segment vertébral ne peut être considéré isolément.

5.2.2. Problèmes d'interprétation des mesures d'angulation

A. *Variation des valeurs d'angulation selon le segment*

Il est intéressant d'étudier ces données en fonction du nombre de segments qui sont inclus dans la mesure de l'angle (figure 58). Lorsque l'angulation correspond à deux segments adjacents, les valeurs moyennes décrivent une orientation de l'angle dans le sens de la lordose à partir de l'angle L2-L3 (angles à sinus antérieur, c'est-à-dire à sommet postérieur, et affectés du signe moins). Pour 3 segments, les angles deviennent négatifs à partir de L1-L3; pour 4 segments, à partir de T12-L3; on trouve ensuite T11-L3 (5 segments), T10-L3 (6), T10-L4 (7), T9-L4 (8), T8-L4 (9), T7-L4 (10), T7-L5 (11), T6-L5 (12), T5-L5 (13), et T4-L5 (14). Enfin, lorsque tous les segments sont impliqués dans la mesure, c'est-à-dire pour l'angle T4-L5, la valeur moyenne correspond encore à une lordose, et la limite supérieure de l'intervalle de tolérance est très proche de zéro: 0.9° .

Ce schéma, qui implique jusqu'au segment T4 dans la détermination d'un angle à sinus antérieur, est - en apparence - contradictoire avec celui classiquement décrit d'une lordose lombaire et d'une cyphose "thoracique".

Considérons maintenant, à partir d'un segment de référence en direction caudale, la valeur que prendra l'angle défini à partir de ce segment s'il inclut, chaque fois, un segment de plus en direction craniale. Cette situation correspond à chaque division de la figure 58. Lorsque le segment inférieur appartient à l'étage lombaire, le schéma est le suivant: les valeurs, avec leur signe, décroissent jusqu'à atteindre un minimum négatif (l'angle est donc maximum dans le sens de la lordose), puis augmentent à nouveau. Ceci se répète quel que soit le segment inférieur de référence qui est choisi, mais les moyennes ne franchissent le seuil des valeurs positives que si la limite inférieure de l'angle est L4 ou un segment plus cranial (3^{ème} division de la figure 58). Ce schéma de décroissance et croissance avec présence d'un minimum est d'autant plus décalé vers les valeurs positives que le segment qui définit le côté inférieur de l'angle est plus cranial. La partie décroissante de la courbe est cependant chaque fois moins importante, en amplitude et en nombre de segments impliqués, et disparaît à partir du moment où L1 ou un segment thoracique est choisi comme limite inférieure de l'angle.

Si l'on considère, par exemple, le plateau inférieur de L5 et l'angle qu'il forme avec les plateaux supérieurs des vertèbres L5, puis L4, L3, L2, et ainsi de suite jusque T4, on note une décroissance de la valeur de cet angle jusqu'en L1, où elle est de -42° . Elle croît ensuite et atteint -10° pour L5-T4, l'angle étant toujours orienté dans le sens de la lordose. En prenant cette fois L4 comme limite inférieure, on note que la valeur décroît jusque L4-L1 où elle atteint -21° dans le sens de la lordose. Elle croît ensuite et passe dans les valeurs positives correspondant à une orientation en cyphose au niveau de T6, la valeur moyenne pour L4-T6 étant de $+2^\circ$.

Il semble donc exister une certaine contradiction entre les variations de courbure telles que les décrivent les valeurs d'angulation, et le schéma attendu d'une vertèbre transitionnelle située à proximité de la limite anatomique L1/T12 entre les étages lombaire et thoracique. Pourtant, la mesure de l'angle de Cobb (COBB, 1948) appliquée à la description du profil sagittal, est implicitement ou explicitement considérée comme une mesure de courbure, au point que ce dernier terme, considéré comme synonyme, lui soit substitué sans justification particulière (POLLY *et al.*, 1996; STAGNARA *et al.*, 1985).

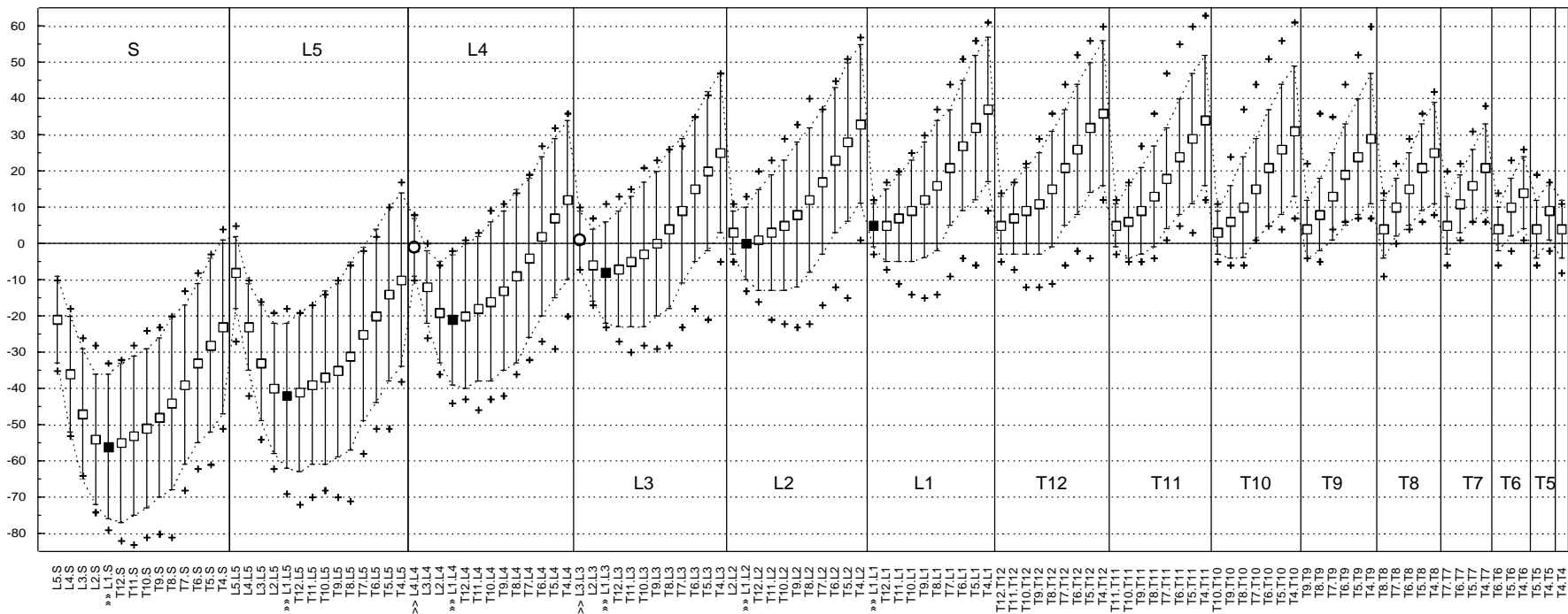


Figure 58

Angulations entre plateaux vertébraux mesurées sur clichés radiologiques (Stagnara, 1985). En abscisses, sont mentionnés les segments vertébraux entre lesquels l'angle est mesuré, ces segments étant inclus dans la mesure. Moyennes (\square), intervalles de tolérance à 95% (I) et valeurs extrêmes de l'échantillon (+). Les données sont ordonnées selon le segment vertébral caudal qui définit le côté inférieur de l'angle, puis selon le segment cranial qui définit son côté supérieur. On peut ainsi apprécier la variation de l'angle quand à partir d'une même vertèbre caudale, celui-ci inclut chaque fois un segment supplémentaire: angulation γ . Les angles définis à partir du segment L1 correspondent toujours au passage par un minimum ($\gg \blacksquare$), mais l'angulation entre plateaux vertébraux d'un même segment change de sens entre L3 et L4 ($\gg \circ$). Axe des ordonnées gradué en degrés.

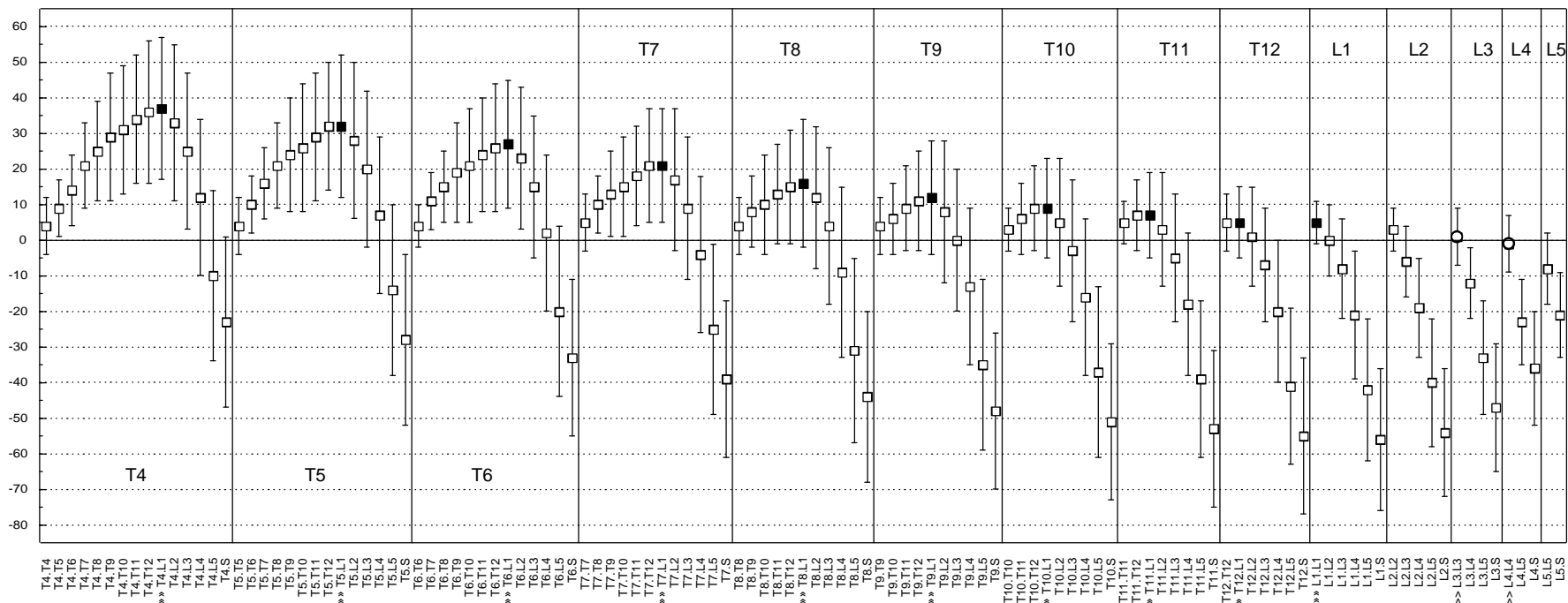


Figure 59

Angulations entre plateaux vertébraux mesurées sur clichés radiologiques (Stagnara, 1985). En abscisses, sont mentionnés les segments vertébraux entre lesquels l'angle est mesuré, ces segments étant inclus dans la mesure. Moyennes (□) et intervalles de tolérance à 95% (I). Les données sont ordonnées selon le segment vertébral cranial qui définit le côté supérieur de l'angle puis selon le segment caudal qui définit son côté inférieur. On peut ainsi apprécier la variation de l'angle quand à partir d'une même vertèbre craniale, celui-ci inclut chaque fois un segment supplémentaire: angulation γ . Les valeurs passent par un maximum chaque fois que le côté inférieur de l'angle est défini en L1 (» ■). L'angulation entre plateaux vertébraux d'un même segment change de sens entre L3 et L4 (>> ○). Axe des ordonnées gradué en degrés.

B. Relation entre angulation et courbure

Il est en fait aisément démontrable que cette mesure ne peut être considérée comme une estimation immédiate de la courbure.

Dans le cadre d'une étude d'un modèle de description de la courbure cervicale statique, HARRISON, JANIK et collaborateurs utilisent implicitement un modèle simplifié de la géométrie du corps vertébral (HARRISON *et al.*, 1996). Les angulations entre les *faces postérieures* des corps vertébraux adjacents dans le plan sagittal sont dans un premier temps mesurées à partir de clichés radiographiques. Les valeurs pour chaque paire de segments contigus sont sommées, de C2 à C7, pour obtenir « l'angle absolu de rotation » – selon la nomenclature d'ingénierie mécanique adoptée par ces auteurs. Cet angle total est supposé par les auteurs égal à celui défini par les plateaux supérieur et inférieur de C2 et C7, respectivement. Il est donc assumé implicitement, pour chaque paire de segments adjacents, que la face postérieure du corps vertébral et le plateau considéré forment un angle droit. Les résultats obtenus sur la base d'une représentation en quadrilatères quelconques montrent, comme d'ailleurs les descriptions anatomiques classiques (PATURET, 1951; DELMAS, 1970), qu'il ne peut s'agir que d'une hypothèse de travail. Elle est cependant, comme telle, suffisante pour discuter la validité de l'angle de Cobb pour la description des courbures sagittales, et elle sera adoptée dans la discussion présente.

Un polynôme étant ajusté aux cotés postérieurs des quadrilatères représentant les éléments de la colonne vertébrale, considérons donc le cas idéal, proche de la réalité, dans lequel les plateaux vertébraux sont orientés perpendiculairement à la courbe de cette fonction calculée pour décrire le profil (figure 60). La pente α de cette courbe en chaque point est l'angle que forme la tangente à la courbe avec les abscisses. Elle est égale à la cotangente de la dérivée¹. Elle a donc le même comportement qu'elle de croissance et décroissance, et passe par la valeur nulle au même point. La perpendiculaire à cette tangente, à laquelle est assimilée dans le présent modèle la position des plateaux vertébraux, forme donc avec l'axe des abscisses un angle β tel que $\beta = 90^\circ - \alpha$. L'angle β est donc, arithmétiquement, complémentaire de α , si α est affecté d'un signe négatif lorsque la tangente est située au dessus de la courbe (cas des point M_o et M_q sur la figure). La courbe donnant β en fonction de x est donc symétrique à celle de α , par rapport un axe horizontal d'équation: $y = (\beta + \alpha) / 2$ (figure 61). Lorsque la pente est nulle (sommet de courbe), l'angulation de la perpendiculaire à la tangente est égale à 90° , situation qui correspond dans l'hypothèse idéale choisie, et en orientation anatomique, à un plateau vertébral qui serait orienté exactement dans un plan transversal. Lorsque la pente est minimale ou maximale, β passe donc, respectivement, par un maximum ou un minimum. Par ailleurs, l'angle γ formé entre la perpendiculaire à la courbe en un point quelconque et la perpendiculaire à la courbe à l'origine (point M_o de la figure), est égal à la différence entre la valeur de β à l'origine et celle de β au point choisi. Sur la figure, on a: $\gamma_q = \beta_o - \beta_q$ et $\gamma_p = \beta_o - \beta_p$. La courbe représentant γ est donc la symétrique, par rapport à l'axe des abscisses, de la translation de la courbe de β passant par l'origine. Si l'on se situe à nouveau dans le cadre de l'hypothèse initiale où les plateaux vertébraux sont supposés perpendiculaires au profil de la colonne vertébrale, alors γ correspond à l'angle défini entre un plateau vertébral quelconque et le plateau vertébral situé à la base du profil ou tout autre plateau vertébral choisi comme référence.

Quant à la valeur de la courbure *stricto sensu* en chaque point, elle est un rapport des dérivées première et seconde, la dérivée seconde étant au numérateur. Au point d'inflexion, la courbure est donc nulle, et la fonction possède une pente extrême: maximale ou minimale. L'angulation γ est donc elle aussi extrême, et, respectivement: minimale ou maximale. En revanche, γ peut avoir une valeur quelconque lorsque la courbure passe par un extremum.

¹ La pente de la courbe en un point est l'angle que forme avec l'axe des abscisses la tangente à cette courbe en ce point. On a donc $\tan \alpha = dy / dx = f'(x)$, donc $\alpha = \cotan [f'(x)]$.

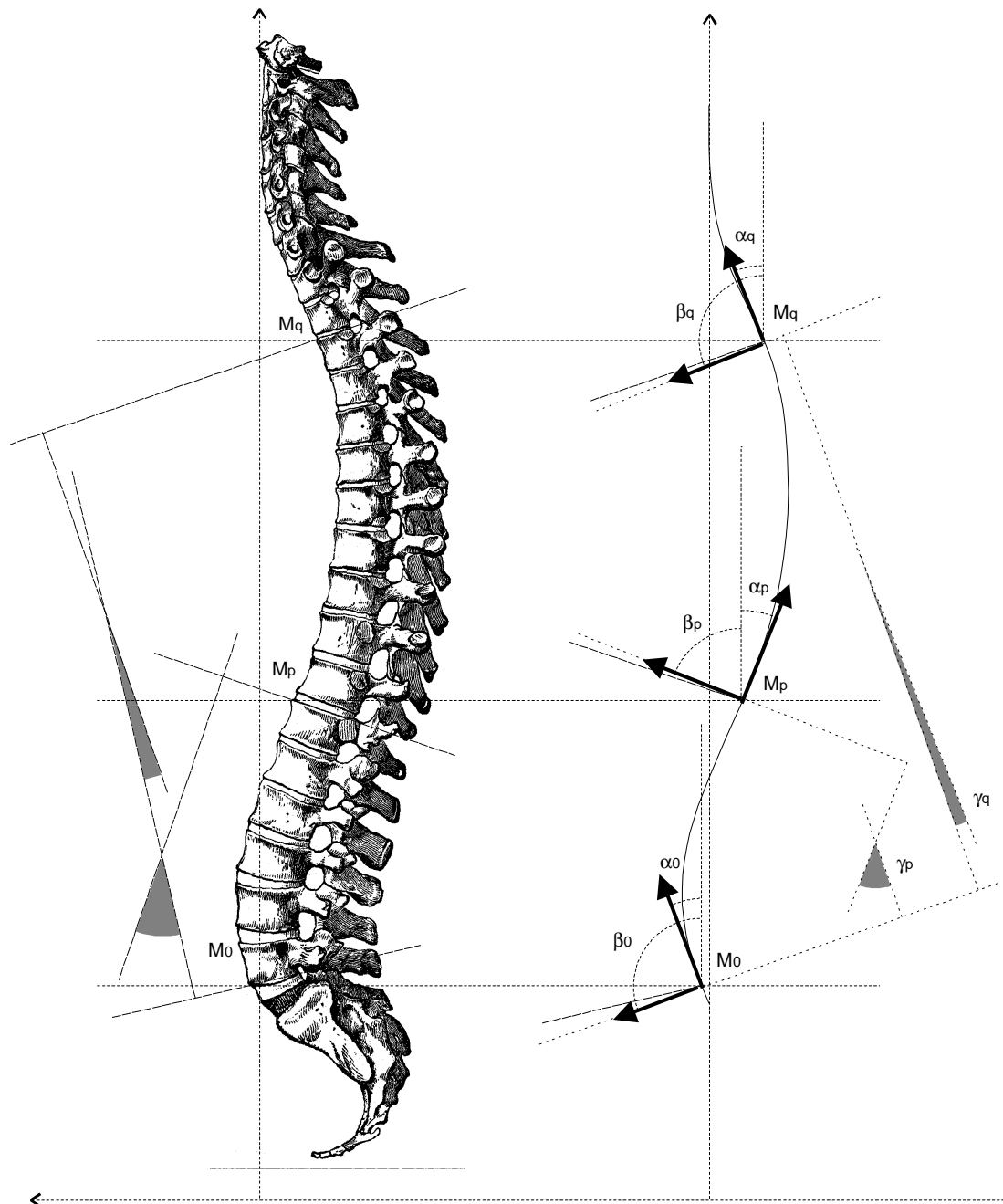


Figure 60

Pentes et “angles de courbure” du profil sagittal. L’axe des abscisses est représenté verticalement afin d’obtenir une représentation proche de la situation anatomique. **A gauche:** Angles de Cobb dans le plan sagittal tels qu’ils peuvent être mesurés sur cliché radiographique. Exemple pour trois points quelconques: le plateau inférieur de L5 choisi comme référence (M_0), le plateau supérieur de T12 (M_p) et le plateau supérieur de T3 (M_q). L’ “angle de courbure” ($^\circ$) est défini par l’angulation existant entre les segments passant par les points antérieur et postérieur des plateaux choisis (-----). Les perpendiculaires à ces segments sont tracées afin de reporter la mesure d’angle à proximité du profil. **A droite:** Fonction polynomiale ajustée au profil. Au niveau des trois points M_0 , M_p et M_q , sont tracées les tangentes à la courbe (\blackrightarrow) qui définissent la pente de celle-ci en chacun des points (α_0 , α_p et α_q). Dans l’exemple, $\alpha_0 < 0$ et $\alpha_q < 0$. La perpendiculaire (\blackrightarrow) à la tangente forme avec les abscisses un angle β qui, si l’on tient compte du signe de α , en est complémentaire. L’inclinaison de la perpendiculaire ($\cdot\cdot\cdot$) est différente de celle du plateau vertébral (-----). Les valeurs γ_p et γ_q donnent les angulations ($^\circ$) des perpendiculaires en M_p et M_q , par rapport à la perpendiculaire en M_0 . Dessin de colonne vertébrale d’après GRAY (1977), modifié.

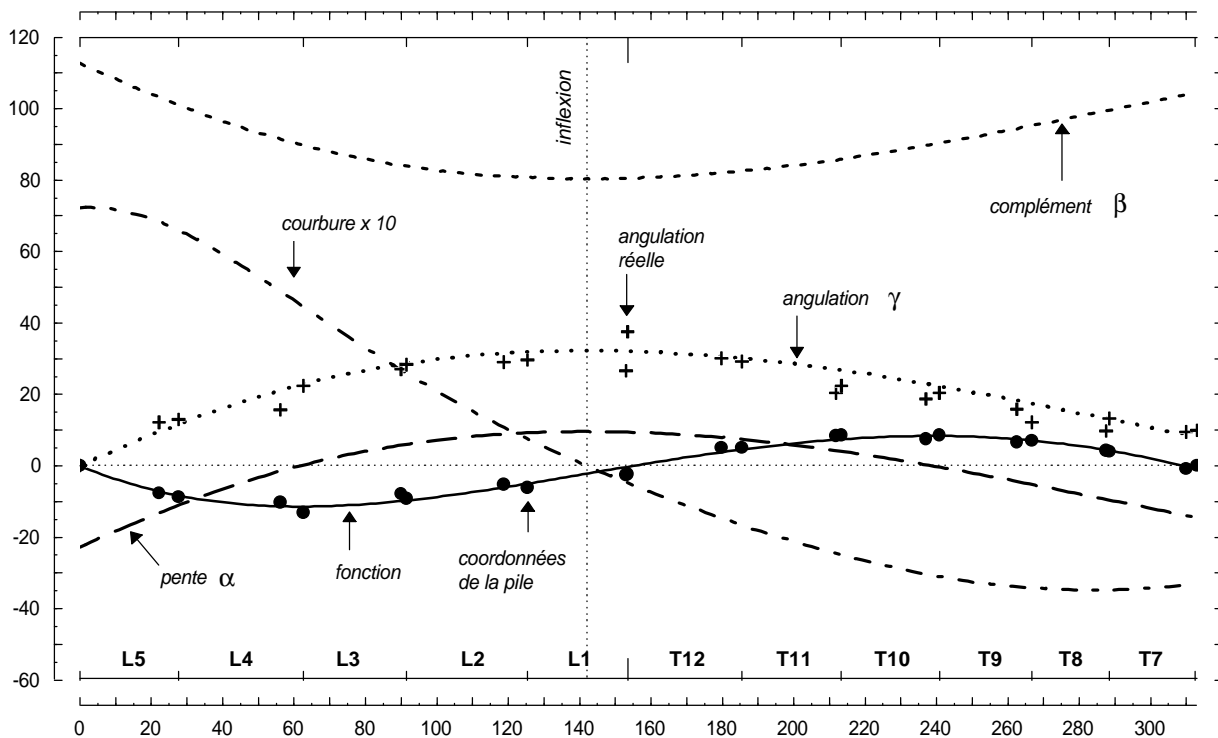


Figure 61

Pente, angulation et courbure, exemple de l'individu n° 542. Empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux de L5 (0;0) à T7 (313;0). Pour une fonction polynomiale de degré 4 (—) ajustée à la pile des quadrilatères (●) : comportement des valeurs de la pente α en degrés (— —); de l'inclinaison de la perpendiculaire à la courbe β , complément de la pente, en degrés (- - - -); de l'angulation γ entre cette perpendiculaire et la perpendiculaire en zéro (.....). La valeur de la courbure (- - -) augmentée d'un facteur 10 est comparée à ces tracés. Les valeurs réelles des angulations des quadrilatères dans la pile par rapport à la base de cette pile en L5 (+), sont comparées à la courbe de γ , reposant sur l'hypothèse de plateaux vertébraux perpendiculaires au tracé de la fonction. L'angulation γ passe par un extremum au niveau du point d'inflexion du polynôme. Les axes horizontaux sont gradués en mm selon les abscisses du profil et selon les segments vertébraux qui leur correspondent (corps vertébral et espace intervertébral sus-jacent). Les unités de l'axe vertical correspondent, selon les points et les courbes, à des mm, à des mm^{-1} (courbure: multiplier par 10^{-4}) ou à des degrés d'angle.

Du point de vue de la valeur descriptive de γ , le comportement de la courbure peut être déduit de manière immédiate uniquement lorsque celle-ci passe par un extremum. En ce point, elle sera nulle et changera de signe: c'est un point d'inflexion. Les variations de l'angulation γ ne peuvent donc absolument pas être assimilées à celles de la valeur de courbure, et seule la présence d'un extremum permettra de passer d'un concept à l'autre.

Situons nous à nouveau dans le cas pratique d'une colonne vertébrale, et plus précisément des valeurs angulaires mesurées par Stagnara, censées décrire les "courbures" de la colonne vertébrale. Choisissons L5 comme limite inférieure pour la mesure radiologique de l'angulation L5 (deuxième division sur la figure 58). Il s'agit du cas particulier représenté schématiquement pour la démonstration où M_0 est situé en L5 (figure 60 a.). Les données de Stagnara montrent que l'angulation γ passe en moyenne par un minimum en L1, c'est-à-dire quand l'angle mesuré est

L1-L5. Si γ passe par un extremum, on peut dans ce cas prédire le comportement de la courbure dont la valeur sera nulle, ou proche de zéro dans la réalité: il s'agit du point d'inflexion.

C. Angulation et courbure, exemple

Le comportement de ces variables peut encore être illustré à partir des calculs effectués sur la collection de *Spitalfields*. Considérons par exemple l'empilement alterné des quadrilatères représentant les corps vertébraux et les espaces intervertébraux pour le sujet n° 542. Une fonction est obtenue par un ajustement polynomial aux points correspondant à l'étage thoraco-lombaire (T7 à L5). Selon les conventions que nous avons adoptées, l'origine est placée au plateau inférieur de L5, et le profil est ajusté sur l'axe des abscisses. Le point correspondant au bord postérieur du plateau supérieur de T7 est donc situé lui aussi sur l'axe des abscisses. Le graphe indique que la pente α exprimée en degrés d'angle apparait maximale au niveau du passage de la lordose à la cyphose qui a lieu en L1 (pour $x = 142$ mm), tandis que la perpendiculaire à la courbe forme en ce point un angle β minimum avec l'axe horizontal (figure 61). L'angulation γ entre la perpendiculaire à la courbe en L1 et la perpendiculaire à la courbe à l'origine, en L5, suit le même tracé que α mais passe par zéro.

Excepté ce point, il n'est pas possible, pour le modèle idéal dans lequel les plateaux vertébraux sont assimilés à des perpendiculaires au polynôme, de passer de la notion d'angulation à celle de courbure. Cela restera vrai, et à plus forte raison, dans le cas *réel* de profils radiographiques ou de profils déterminés par la morphologie osseuse des vertèbres. C'est ce qu'illustrent, dans ce même exemple, les valeurs réelles de γ (signe $+$ dans la figure 61). Celles-ci sont bien estimées par la courbe théorique, ce qui valide l'hypothèse initiale selon laquelle, en première approximation, les plateaux vertébraux peuvent être considérés perpendiculaires au profil de la colonne.

Il n'est donc pas possible, bien que le même terme général de *courbure* soit parfois employé, d'assimiler les variations de l'angulation réciproque des plateaux vertébraux telle qu'elle est mesurée en radiologie, aux variations de la courbure "mathématique", égale à l'inverse du rayon du cercle tangent à la courbe. Mais le passage de l'angulation par un extremum permet de localiser l'inversion de courbure.

5.2.3. Angulation et courbure, interprétation des mesures radiographiques

Sur cette base, les données de Stagnara permettent de noter que les angulations entre plateaux vertébraux mesurées à partir d'une vertèbre de référence caudale, et en incluant chaque fois un segment supplémentaire en direction craniale, (angulation γ), passent par un minimum chaque fois que l'angle est défini, du côté cranial, par le segment L1 (■ sur la figure 58). Cela reste vrai quel que soit le segment caudal qui est pris pour référence comme côté inférieur de l'angle. A partir du moment où L1 n'est plus inclus dans la mesure d'angle, c'est-à-dire lorsque la vertèbre de référence devient T12, les moyennes ne passent plus par un minimum. La représentation de ces mêmes valeurs, ordonnées de telle façon que c'est T4 qui est cette fois pris comme référence, et qu'à partir de ce segment, un segment plus caudal est chaque fois ajouté à la définition de l'angle, conduit à des résultats exactement concordants: les valeurs passent par un maximum quand la limite inférieure de l'angle est L1 (figure 59).

Le point d'inflexion se situe donc pour cet échantillon, *en moyenne*, en L1. Or, ce résultat diffère de celui qui est obtenu à partir des mêmes données lorsque seulement l'angulation entre plateaux supérieur et inférieur *d'un même corps vertébral* est considérée. La moyenne de l'angle L3-L3 est positive tandis que celle de l'angle L4-L4 est négative, ce qui localise l'inversion de courbure entre L3 et L4 (○ sur les figures 58 et 59). L'inversion de courbure physiologique, c'est-à-dire lorsque les disques intervertébraux sont pris en considération dans la mesure, et quand les sujets

sont positionnés debout, dans la position décrite par les auteurs pour la prise de cliché, est donc située en L1, à un niveau plus cranial que celui auquel les plateaux vertébraux passent d'une angulation dans le sens de cyphose à une angulation dans le sens de la lordose.

A partir d'un autre échantillon de mesures effectuées sur radiographies latérales ($n = 102$ sujets sains; S^t Louis, Missouri), l'angulation entre les faces postérieurs de deux corps vertébraux adjacents, qui est aussi une mesure physiologique puisqu'elle prend en compte l'espace intervertébral, amène à une localisation identique de l'inflexion thoraco-lombaire: l'angle entre T12 et L1 est de 1° en cyphose, l'angle entre L1 et L2, de -4° en lordose (BERNHARDT et BRIDWELL, 1989).

Selon la formulation de A. DELMAS, « les corps vertébraux présentent [...] sur une coupe sagittale une forme de coin, d'autant plus marquée que la vertèbre est plus près d'un sommet de courbure, et d'autant moins que l'on se trouve au niveau d'une région de transition » (DELMAS, 1951). Bien qu'elle satisfasse totalement la logique d'une interprétation fonctionnaliste, cette hypothèse n'est pas vérifiée. La seule variabilité des courbures sagittales selon la posture statique (FICK, 1934 ; DELMAS, 1951 ; ADAMS *et al.*, 1987) et le rôle essentiel des disques intervertébraux dans leur détermination laissent déjà entrevoir une relation beaucoup moins directement définie entre forme du corps vertébral et courbure sagittale.

L'inversion de courbure physiologique, en moyenne en L1, est donc plus craniale que l'inversion d'angulation des plateaux vertébraux qui a lieu en L3-L4.

5.2.4. Comparaison des angulations dans les profils déterminés par la seule morphologie vertébrale et dans les profils physiologiques en radiographie

L'angulation réciproque entre deux segments est aisément calculable à partir des empilements alternés des corps vertébraux et des espaces intervertébraux, dans l'échantillon de *Spitalfields*. En effet, le calcul des piles fait intervenir l'angle δ_n que forme la base de chaque quadrilatère N avec l'axe horizontal du repère mathématique. L'angulation réciproque γ_n que fait le plateau d'un segment quelconque avec le plateau d'un segment de référence situé en position plus caudale est donnée par la différence: $\gamma_n = \delta_n - \delta_r$; δ_r étant l'angle que fait le plateau de référence avec l'axe horizontal, dans le repère où s'effectue l'empilement.

Choisissons comme référence le plateau inférieur de L5, qui définira donc le côté inférieur de l'angle. Les angulations que forme avec ce plateau les plateaux supérieurs de tous les corps vertébraux sont donc calculées (figure 62). Les statistiques angulaires donnent l'angle moyen et ses intervalles de confiance pour chaque segment. Un polynôme de degré cinq ajusté aux points représentant les angles moyens permet de décrire comment varie cette angulation au long de la colonne. La courbe passe par deux maxima situés en L1 et en C4. Le premier a une valeur de $+21^\circ$, et est donc orienté dans le sens de la lordose, le second, en C4, à une valeur de -13° et est orienté dans le sens de la cyphose. Il est remarquable de constater qu'entre L5 et T4, où les données sont comparables, l'angulation moyenne au long de la colonne suit les mêmes variations que les valeurs rapportées par STAGNARA (deuxième division de la figure 58). Les deux graphes, au signe près en raison des conventions adoptées, sont pratiquement équivalents. Surtout, l'extremum est situé dans les deux cas en L1. Autrement dit, dans les deux échantillons, un point d'inflexion est déterminé en L1 lorsque, à la fois, les corps vertébraux et les espaces intervertébraux sont pris en compte. Dans le cas des mesures radiographiques, il s'agit de l'espace intervertébral "physiologique" du sujet lorsqu'il est positionné debout, les mains reposant sur un support situé en avant au niveau des crêtes iliaques ; dans le cas de l'échantillon de *Spitalfields*, il s'agit de l'espace intervertébral "ostéologique" déterminé uniquement par la morphologie des vertèbres. En T4, la valeur moyenne de 10° des radiographies est assez proche de celle de 7.4° obtenue pour *Spitalfields*, la limite de

confiance supérieure de cette dernière outrepassant largement ces 10°. En revanche, en L1, au niveau de l'extremum, l'angulation physiologique, de 42°, est environ le double de l'angulation "ostéologique" qui est en moyenne de 21°.

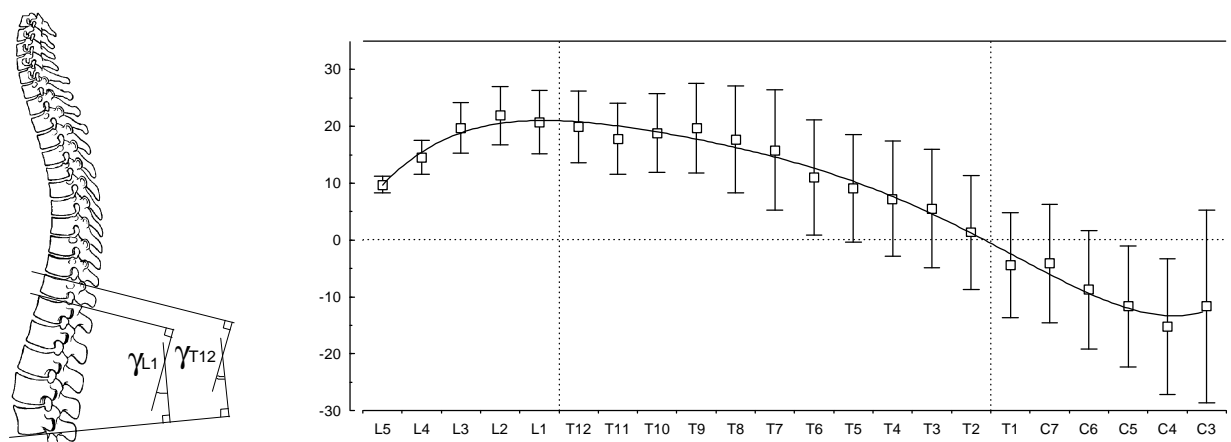


Figure 62

Angulations réciproques des éléments vertébraux par rapport à L5, calculées dans les empilements alternés des corps vertébraux et des espaces intervertébraux. Echantillon de Spitalfields: $n = 23$, sauf C5 où $n = 22$, C3 où $n = 20$, et C3 où $n = 19$. L'angle est celui existant entre le plateau inférieur de L5 et le plateau supérieur de l'élément considéré. Angle moyen pour l'ensemble des individus (\square) entouré de son intervalle de confiance à 95% (I). —, régression polynomiale de degré 5 calculée sur les angles moyens, $r = 0.99$; limites entre les étages vertébraux et seuil de 0° marquant le changement de sens de l'angulation. A gauche: schéma de principe pour les angulations de L1 et T12.

A. Espace intervertébral physiologique mesuré sur radiographies

Sur la base des mesures radiographiques il est possible d'étudier plus en détail les variations de l'angulation physiologique mesurée à partir de L5 et particulièrement le rôle des espaces intervertébraux. La publication de STAGNARA rapporte les valeurs de tous les angles mesurables entre le plateau supérieur d'un segment quelconque en position cranial et le plateau inférieur d'un segment plus caudal, ainsi que l'angulation entre les plateaux du même segment. Il est donc aisé de déduire, à chaque niveau, l'angle formé entre le plateau supérieur d'un segment et le plateau inférieur du segment immédiatement sus-jacent. Cet espace est, dans le cas de mesures radiographiques, l'espace intervertébral physiologique occupé par le disque.

Soit ω_{cn} l'angle entre les plateaux supérieur et inférieur du corps vertébral du segment n ; ω_{cn-1} l'angle équivalent pour le segment immédiatement sus-jacent; ω_{en} l'angle de l'espace intervertébral du segment n ; et $\omega_{n,n-1}$ l'angle entre plateaux, respectivement, supérieur et inférieur des segments $n-1$ et n , alors: $\omega_{en} = \omega_{n,n-1} - \omega_{cn} - \omega_{cn-1}$. L'angulation de chaque espace intervertébral est donc déduite. La somme des moyennes étant égale à la moyenne des sommes, la valeur calculée pour chaque espace intervertébral à partir des moyennes publiées est bien sa moyenne réelle dans l'échantillon.

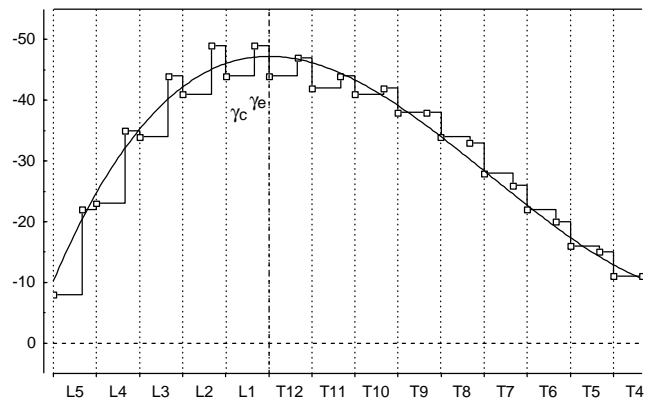
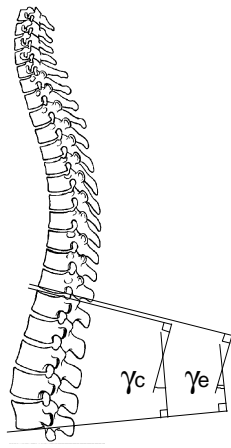


Figure 63

Angulations réciproques des éléments vertébraux par rapport au plateau inférieur de L5. Mesures sur radiographies (STAGNARA, 1985). Les divisions en pointillés séparent les segments adjacents (corps vertébral et espace intervertébral). Les traits interrompus (- - -) marquent les limites entre étages vertébraux, ainsi que le seuil 0° correspondant à un changement de sens de l'angle. L'échelle des ordonnées est inversée afin de faciliter les comparaisons. La taille du graphe est ajustée pour que ses échelles correspondent à celles de la figure 64 (voir schéma de principe sur cette dernière). Sur le schéma de gauche sont exemplifiées les angulations calculées en L1, pour le corps vertébral (γ_c) et pour l'espace intervertébral (γ_e); les positions des valeurs correspondantes sont reportées sur le graphe. Afin de faciliter la lecture, les segments représentant les valeurs des corps vertébraux sont doubles de ceux correspondant aux espaces intervertébraux.

Le graphe cumulé des angles de chaque élément à partir de L5 permet de mettre en évidence la participation des espaces intervertébraux dans la détermination de la courbure *lato sensu* (figure 63). La représentation en escaliers montre que, pour la plupart des segments, l'inclusion de l'espace intervertébral dans la mesure augmente de façon très forte l'angulation en lordose, de telle manière que la valeur obtenue surpasse à la fois l'angle mesuré au niveau du corps vertébral du segment considéré, et au niveau du segment sus-jacent. Lorsque la seule morphologie osseuse des vertèbres est prise en considération, cette allure des valeurs "en créneaux" est retrouvée de manière très semblable. A *Spitalfields*, pour les deux sexes, et de manière plus constante dans le sexe masculin, la prise en compte de l'espace intervertébral impliqué par la morphologie vertébrale augmente l'angle mesuré par rapport à L5, de telle façon que la valeur qui est atteinte est supérieure à celle qui implique le corps vertébral sus-jacent. Dans les deux séries de données, ce phénomène est moins net au niveau lombaire bas où la progression est plus régulière.

A l'étage lombaire précisément, et sur les données radiographiques, l'augmentation de l'angulation physiologique est la plus forte lorsqu'un espace intervertébral est ajouté : les valeurs passent de 8° de lordose en L5, à 22° lorsque l'espace intervertébral de ce segment est ajouté, soit une augmentation de 175 %²; et de 23° (5 %) au niveau du plateau supérieur de L4, à 35° (52 %) au niveau du plateau inférieur de L3, c'est-à-dire lorsque l'espace intervertébral L4 est pris en compte (figure 63). Cette augmentation n'est retrouvée que partiellement pour les profils impliqués par la morphologie vertébrale (figure 64). Dans le sexe masculin (Δ), l'incrément apporté à l'angulation par l'ajout d'un espace intervertébral est en effet plus fort que celui correspondant à l'ajout d'un corps vertébral, mais dans une proportion qui reste plus faible que celle trouvée pour les données radiologiques. La prise en compte de l'espace intervertébral de L5 fait passer l'angulation de 8° à 11°, soit une progression de 38 % ; si le corps vertébral L4 sus-jacent est considéré,

²Ce pourcentage est l'accélération de l'angulation, il est simplement égal à l'incrément obtenu rapporté à la valeur initiale. Dans ce cas précis, on a $(22^\circ - 8^\circ) / 8^\circ \cdot 100 = 175\%$.

l'angulation devient 12° (9 %) ; mais avec l'espace intervertébral de L4, l'angulation passe à 17° , soit 42 % d'augmentation. Dans le sexe féminin (\circ) la tendance est inverse de L5 à L2 inclus, la prise en compte de la forme d'un corps vertébral entraînant un accroissement de l'angle dans une proportion supérieure à celle qui est obtenue pour l'inclusion d'un espace intervertébral. L'ajout de l'espace intervertébral de L5 n'augmente pas l'angulation (11°) ; avec le corps vertébral de L4, l'angle passe à 17° (55 %), puis à 19° seulement avec l'espace intervertébral L4 (12%) ; avec le corps vertébral de L3 l'angle est de 24° (26 %), puis à partir de l'espace intervertébral de L3, la progression est régulière: 25° , 26° , 27° (4 % dans chaque cas). Au dessus de ce segment, c'est l'espace intervertébral qui contribue plus fortement à l'augmentation de l'angulation (figure 64). Enfin, si l'on considère l'ensemble des sujets indépendamment du sexe, de façon comparable aux résultats publiés par STAGNARA, la participation de l'espace intervertébral apparait plus importante que celle du corps vertébral dans l'augmentation de l'angulation à partir de l'espace intervertébral du segment L4. En effet, l'ajout de l'espace intervertébral L5 provoque une augmentation de l'angle de 10° à 11° (10 %) ; avec le corps vertébral de L4, cet angle est de 15° (soit 36 % d'augmentation) ; de 18° avec l'espace intervertébral correspondant (20%) ; puis de 20° avec le corps de L3 (11 %), et 22° avec son espace intervertébral (15%). La configuration "en créneaux", autrement dit, le fait que l'angle mesuré en incluant l'espace intervertébral d'un segment n soit plus fort que l'angle qui inclut le corps vertébral sus-jacent, appartenant au segment $n-1$, n'est présente qu'à partir du segment L3, ceci d'une manière totalement similaire à ce qui est observé en radiographie pour des courbures physiologiques.

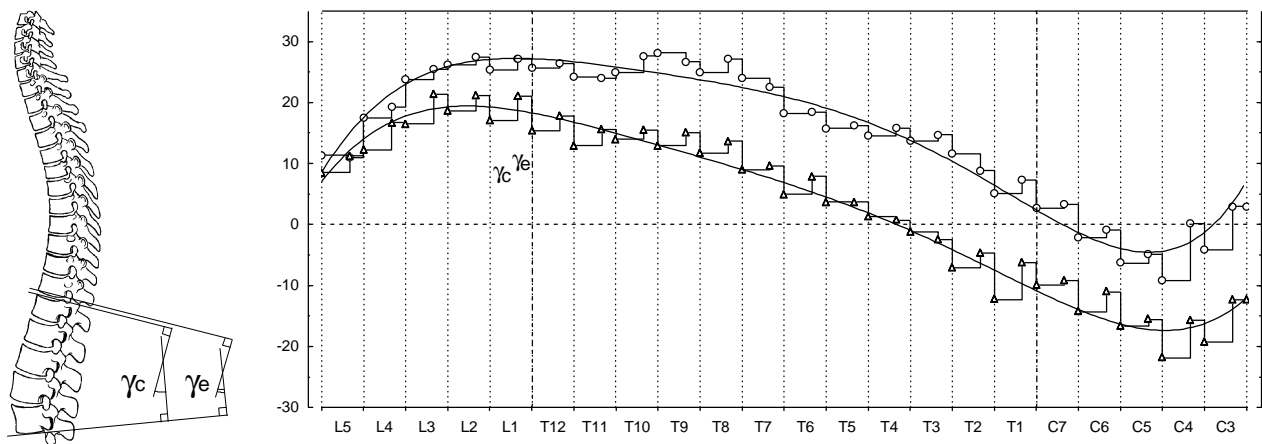


Figure 64

Angulations réciproques des éléments vertébraux par rapport au plateau inférieur de L5. Angles moyens déterminés pour chaque sexe: \circ , sexe féminin ; Δ , sexe masculin. Régressions polynomiales: sexe masculin: degré 5, $r = 0.97$; sexe féminin: degré 6, $r = 0.97$. Les divisions en pointillés séparent les segments adjacents (corps vertébral et espace intervertébral). Les traits interrompus (---) marquent les limites entre étages vertébraux, ainsi que le seuil 0° correspondant à un changement de sens de l'angle. Sur le schéma de gauche sont exemplifiées les angulations calculées en L1, pour le corps vertébral (γ_c) et pour l'espace intervertébral (γ_e) ; les positions des valeurs correspondantes sont reportées sur le graphe. Afin de faciliter la lecture, les segments représentant les valeurs des corps vertébraux sont doubles de ceux correspondant aux espaces intervertébraux.

Les espaces intervertébraux impliqués par la morphologie vertébrale participent donc, en moyenne, à la détermination des courbures *lato sensu* selon des modalités très similaires à celles qui sont mises en jeu pour les espaces intervertébraux physiologiques, mais avec une différence

d'amplitude qui est telle que l'angulation maximale, atteinte dans les deux cas en L1, est environ de 50 % inférieure à l'angulation maximale physiologique.

B. Participation conjointe de chaque type d'élément et des différents segments

S'il existe une grande similarité des courbes cumulatives de l'angulation, on ne retrouve qu'une même tendance entre valeurs physiologiques et valeurs ostéologiques, quand les angulations moyennes de chaque élément sont représentées. Les valeurs d'angulation ostéologique (figure 65 *b.*) ne présentent pas la croissance continue observée en radiographie (figure 65 *a.*). Dans ce dernier cas, l'angulation des espaces intervertébraux suit les mêmes variations que celle des corps vertébraux mais, le signe de l'angle étant pris en compte, elle lui est toujours inférieure. On note ainsi en L5 une angulation de -8° en lordose pour le corps vertébral, mais de -22° pour l'espace intervertébral correspondant. Jusque T4, le sens de l'inégalité est conservé, de telle sorte que si l'angulation des plateaux vertébraux s'inverse entre L4 et L3, celle des espaces intervertébraux ne devient nulle qu'en T9 (figure 65 *a.*: ●). Jusqu'à ce segment, les espaces intervertébraux restent donc orientés dans le sens de la lordose. Cet antagonisme conduit, lorsque ces deux types d'éléments sont considérés, et comme le met en évidence la localisation du maximum atteint par l'angulation "réciproque" entre segments, à une inversion de l'angulation physiologique localisée en L1 (Cf. *supra*, et particulièrement figure 58).

L'implication des espaces intervertébraux dans le déterminisme des courbures en position anatomique de référence apparaît donc difficilement dissociable de celle des corps vertébraux. Même dans le cas de courbures physiologiques, le sens de l'angulation des espaces intervertébraux n'est pas nécessairement celui qui est attendu en considération, d'une part, de la localisation de l'inflexion thoraco-lombaire physiologique et, d'autre part, du niveau auquel s'effectue l'acquisition d'une angulation orientée dans le sens de la cyphose entre les plateaux supérieur et inférieur du corps vertébral.

Il faut donc distinguer précisément dans la détermination de la lordose lombaire et le changement de "courbure" *lato sensu* deux phénomènes différents: 1/ le changement de sens de l'angulation des plateaux du corps vertébral et 2/ le changement de sens de la courbure *stricto sensu*. Ce dernier est mis en évidence par un extremum dans les valeurs de l'angulation réciproque, c'est à dire de l'angulation de chaque segment mesurée par rapport à un segment de référence inchangé.

Ce sont donc à la fois la forme des corps vertébraux dans le plan sagittal, et celle des espaces intervertébraux, qui concourent à déterminer la courbure et surtout les modalités de ses variations au long de la colonne. Cette participation conjointe des deux types d'éléments ne s'effectue pas, dans la position anatomique de référence, d'une manière additive simple, puisque l'angulation des corps vertébraux peut être opposée à celle des espaces intervertébraux. Ce phénomène de compensation, qui s'exprime avec une certaine régularité sur les valeurs moyennes d'un grand échantillon, est mis en évidence au niveau individuel par une très grande variabilité des angulations. En effet, il existe toujours, à chaque segment, au moins un sujet pour lequel l'angulation réciproque est de sens opposé à celui de la courbure mathématique (figure 58 et figure 52).

Le fait que la similitude observée entre les courbes cumulatives des deux types de données (radiographiques et ostéologiques) ne se retrouve que partiellement dans les tracés des valeurs par segment, montre encore la nécessité de considérer la participation de plusieurs éléments et plusieurs segments dans l'analyse des courbures. La différence est particulièrement notable au niveau de l'espace intervertébral du segment L5, qui ne présente qu'une faible angulation dans le sens de la lordose quand la seule morphologie des vertèbres est prise en considération. L'angulation déterminée au niveau des espaces intervertébraux, en moyenne, est faible, mais la régression décrit une croissance significative de l'ensemble des valeurs de L5 à T4 (figure 65 *b.*).

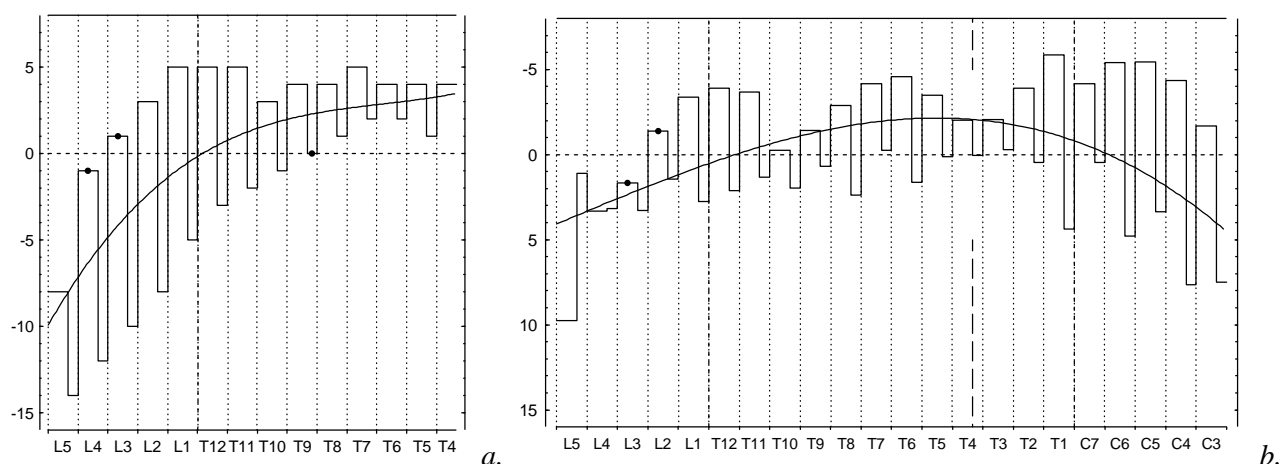


Figure 65

Angulations moyennes des éléments vertébraux: corps vertébraux et espaces intervertébraux. *a.*, données radiographiques ($n = 100$) où les angulations des espaces intervertébraux sont physiologiques (STAGNARA, 1985); *b.*, résultats obtenus à *Spitalfields* quand sont calculés les espaces intervertébraux impliqués par la morphologie osseuse ($n = 24$). Les divisions en pointillés (.....) séparent les segments adjacents. - - -, limites entre étages et seuil 0° marquant le changement de sens; — —, limite craniale des résultats obtenus sur radiographies (en *b.*); ●, segments pour lesquels l'angulation passe d'une orientation en lordose à une orientation en cyphose. La courbe est une régression polynomiale de degré 3: $r = 0.68$ et $p < 0.003$ en *a.*; $r = 0.49$ et $p < 0.02$ en *b.* (—). Les valeurs des corps vertébraux sont arbitrairement représentés avec une abscisse double de celle des espaces intervertébraux afin de faciliter la lecture. L'échelle des ordonnées est inversée en *b.* afin d'obtenir des graphes comparables.

La forte mobilité de la colonne lombaire dans le plan sagittal, lorsqu'elle est considérée en rapport du nombre de segments mis en jeu (ENSINK *et al.*, 1996; SAUR *et al.*, 1996; KAPANDJI, 1982; STOKES *et al.*, 1987; PLAMONDON *et al.*, 1988;³), implique qu'il doit exister une certaine laxité dans la relation entre la morphologie des segments vertébraux en articulation, et leur positionnement physiologique relatif. Cette relation entre la morphologie des vertèbres contiguës et leur position respective quand elles sont articulées est définie plus strictement d'un point de vue *dynamique*, puisque la vertèbre, par sa forme, doit permettre de préserver l'intégrité de la colonne vertébrale et des structures qu'elle protège et/ou qu'elle supporte. Les processus articulaires doivent donc limiter l'amplitude des mouvements (PUTZ et MÜLLER-GERBL, 1996). Leur rôle dans la résistance au déplacement relatif des segments dans le plan des plateaux vertébraux a en effet été mis en évidence (MÜLLER-GERBEL, 1992), de même que l'augmentation croissante de cette résistance avec la flexion (EL-BOHY *et al.*, 1989). La transmission des contraintes par contact des processus articulaires inférieurs avec les lames de la vertèbre sous-jacente (ADAMS et HUTTON, 1980; YANG et KING, 1984) démontre par ailleurs le rôle limitant de la morphologie vertébrale lombaire en extension (ADAMS et HUTTON, 1983). La morphologie vertébrale assume ainsi un rôle de restriction de l'amplitude dans les mouvements de flexion et d'extension. Mais d'un point de vue *statique*, et dans la position anatomique de référence, qui situe la colonne lombaire largement comprise dans l'amplitude sagittale des positions qu'elle peut acquérir, cette amplitude elle-même implique que la morphologie des processus articulaires peut ne pas déterminer de façon stricte la

³ Une relation a été récemment démontrée entre le vieillissement des échantillons de colonnes vertébrales fraîches et l'amplitude des mouvements qu'elles pouvaient subir (WILKE *et al.*, 1998). Ces travaux invalident partiellement l'utilisation de mesures *in vitro* sur des segments vertébraux issus de dissections cadavériques, comme références de mobilité rachidienne.

position relative des éléments en articulation. La différence entre les distances “interapophysaires” des processus inférieurs d’un segment et celle des processus supérieurs du segment sous-jacent, par exemple, est plus forte à l’étage lombaire (PANJABI *et al.*, 1993⁴). Cet espace, occupé par le cartilage et la cavité interarticulaire, permet une articulation plus mobile qui implique que le rapport des deux vertèbres soit déterminé de façon beaucoup moins étroite. De fait, il n’y a pas un ajustement précis entre la surface articulaire inférieure et la surface supérieure de la vertèbre sous-jacentes avec laquelle elle s’articule. Elles déterminent deux portions de cylindres emboîtés, mais tels que la convexité définie par l’articulation inférieure de la vertèbre sus-jacente est d’un rayon bien inférieur à celui de la concavité de l’articulaire supérieur qui lui correspond (KUBEIN-MEESBURG *et al.*, 1991a ; NÄGERL *et al.*, 1992). Les rayons de courbure sont rétablis par le cartilage et la présence d’inclusions méniscales, plis fibreux ou fibro-adipeux issus de la membrane synoviale, et qui peuvent diviser en deux l’espace interarticulaire (SINGER *et al.*, 1990).

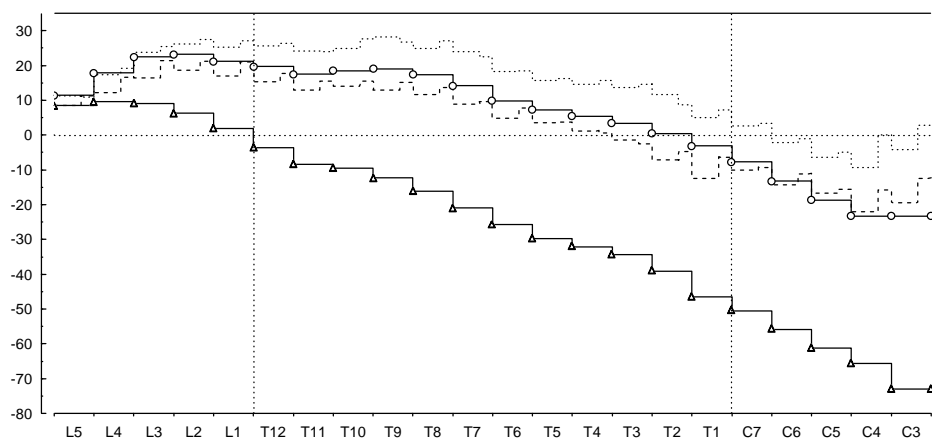


Figure 66

Angulations réciproques des éléments vertébraux par rapport au plateau inférieur de L5, calculées dans les empilements des quadrilatères représentant les *corps vertébraux - uniquement*. Echantillon de *Spitafields*. Il s’agit donc de l’angulation déterminée seulement par la forme des corps vertébraux dans le plan sagittal. Angles moyens déterminés pour chaque sexe: ○, sexe féminin ; Δ, sexe masculin. Les tracés correspondant aux empilements alternés sont rappelés: , sexe féminin ; - - - - , sexe masculin (voir figure 64). Les lignes pointillées (.....) marquent les limites entre étages vertébraux, ainsi que le seuil 0° correspondant à un changement de sens de l’angle.

Si la morphologie vertébrale définit de façon moins précise les espaces intervertébraux, particulièrement au niveau lombaire, les graphiques cumulés de leur angulation et de celle des corps vertébraux montrent, pourtant, une courbe qui est tout à fait comparable à celle qui fait intervenir l’espace intervertébral physiologique tel qu’il est mesuré en radiographie. L’angulation maximale qui est décrite est cependant moins forte, ce qui suggère que la morphologie vertébrale ne fait que

⁴ PANJABI et collaborateurs rapportent dans leur publication les distances entre surfaces articulaires postérieures droite et gauche, pour les facettes supérieures et pour les facettes inférieures de chaque segment. La différence entre la distance interarticulaire mesurée au niveau des facettes supérieures d’un segment et celle mesurée au niveau des facettes inférieures du segment sus-jacent peut être déduite. La moyenne des différences étant égale dans ce cas à la différence des moyennes, la valeur calculée est donc la moyenne réelle de cette différence dans l’échantillon.

De T10 à L4 inclus, cette différence croît de façon continue et atteint 2.3 mm en L4, tandis que de C3 à T10, la moyenne oscille dans une fourchette de 0 ± 0.5 mm - PANJABI, OXLAND, TAKATA, GOEL, DURANCEAU et KRAG (1993). *Spine* 18 (10):1298-1310.

favoriser l'expression de courbures qui seront accentuées quand les segments seront mis en jeu dans leur environnement physiologique.

C. *Dimorphisme sexuel*

La différence qui a été remarquée entre les sexes, du point de vue de cette participation de l'espace intervertébral défini par la morphologie osseuse (figure 64), montrait que celle-ci semble moins forte dans le sexe féminin que dans le sexe masculin, relativement à celle des corps vertébraux. La configuration "en créneaux" est en effet moins accentuée sur la courbe du sexe féminin où elle n'apparaît qu'à partir de L2. Les graphiques cumulés équivalents, mais déterminés sur les angulations des empilements des corps vertébraux uniquement, reproduisent une différence similaire entre les sexes (figure 66). La valeur maximale qui est atteinte est plus forte dans le sexe féminin, où elle est de 23° contre 9,5° pour le sexe masculin. Elle est aussi atteinte au niveau d'un segment plus cranial dans le sexe féminin, en L2, au lieu de L3 ou L4 dans le sexe masculin. Mais surtout, si les courbes cumulatives obtenues pour les empilements des corps vertébraux uniquement sont comparées à celles des empilements alternés des corps vertébraux et des espaces intervertébraux, la différence entre les deux types de tracés apparaît beaucoup plus forte pour le sexe masculin. En L1, par exemple, l'écart est de 15° pour ce sexe contre seulement 4° pour le sexe féminin, et tandis que cette différence reste assez constante quand on progresse vers les segments plus craniaux dans le sexe féminin, elle augmente entre les courbes du sexe masculin. Autrement dit, la morphologie des corps vertébraux contribue plus fortement à la détermination des courbures dans le sexe féminin, comme l'avaient mis en évidence les résultats obtenus sur les empilements des corps vertébraux uniquement (se reporter en particulier, à la figure 31). Cela est vrai en absolu, car les angles que déterminent les corps vertébraux sont plus ouverts pour ce sexe; mais aussi relativement à la participation des espaces intervertébraux, car le dimorphisme déterminé à la fois par la forme des corps vertébraux et par celle des espaces intervertébraux est plus faible que celui impliqué uniquement par les corps vertébraux.

Les corps vertébraux sont donc responsables de la plus grande part du dimorphisme sexuel. Les espaces intervertébraux réduisent donc le dimorphisme sexuel des corps vertébraux mais ne l'annulent pas, et ceci tout en rétablissant dans les deux sexes l'expression des courbures physiologiques, puisque les courbes des empilements alternés se situent pour chaque sexe au dessus des courbes des empilements des corps vertébraux.

L'incrément apporté aux angulations par les espaces intervertébraux est tel que les intervalles de confiance de l'angulation impliquée par les corps vertébraux seuls, et ceux de l'angulation impliquée par à la fois par les corps vertébraux et les espaces intervertébraux, cessent de se chevaucher dès L2 (figure 67).

5.2.5. Implication de la morphologie vertébrale dans la détermination des courbures, résumé

Une étude fine des résultats obtenus à *Spitalfields* a été faite quant à l'implication respective des corps vertébraux et des espaces intervertébraux "ostéologiques" dans le déterminisme des courbures sagittales. Elle a été confrontée à des séries de données publiées, complètes et rigoureuses, qui permettent de quantifier précisément les courbures physiologiques mesurées *in vivo* sur radiographies. Des problèmes méthodologiques ont tout d'abord été mis en évidence. Bien qu'ils semblent ne jamais être évoqués de façon explicite, ils rendent pourtant impossible, s'ils sont négligés, toute comparaison entre les différentes voies d'approches qui sont suivies dans l'étude des courbures sagittales rachidiennes. Finalement, l'implication des éléments vertébraux dans la détermination des courbures sagittales a pu être comprise de façon plus précise.

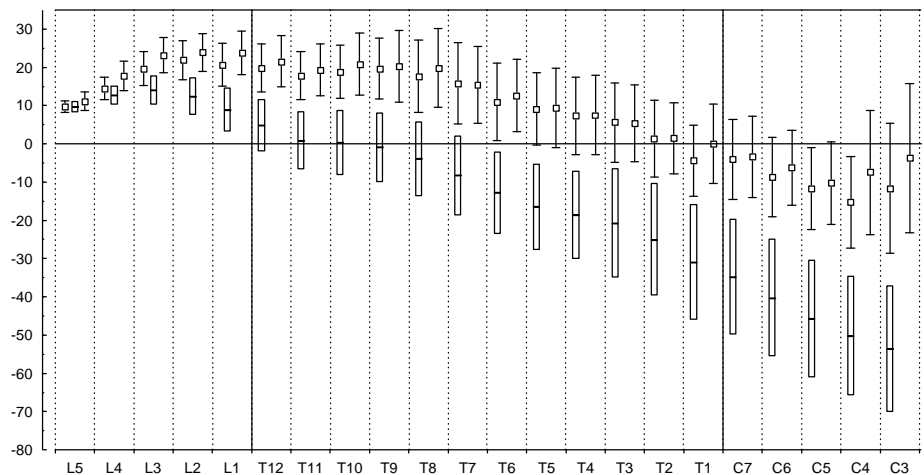


Figure 67

Angulations réciproques des éléments vertébraux par rapport au plateau inférieur de L5. Angles moyens entourés de leur intervalle de confiance à 95 %. Echantillon de *Spitalfields*. \bar{O} , intervalle de confiance obtenu dans les empilements des corps vertébraux seulement ; \bar{I} , intervalle dans les empilements alternés des corps vertébraux et des espaces intervertébraux ; la valeur centrale est l'angle moyen. Pour les empilements alternés sont rapportées deux valeurs à chaque segment: 1/ les angles mesurés au niveau du plateau supérieur du corps vertébral considéré, 2/ les angles incluant l'espace intervertébral du segment considéré c'est-à-dire mesurés au niveau du plateau inférieur du corps vertébral sus-jacent.

- Les angulations de la colonne vertébrale ne permettent pas de discuter directement des variations de ses courbures.
- Cependant, lorsque la courbure s'infléchit, l'angulation passe par un extremum.
- En dépit de la grande variabilité rencontrée dans les deux cas, la courbe de l'angulation moyenne à Spitalfields est tout à fait comparable à celle qui est obtenue à partir de radiographies pour l'angulation physiologique (comparaison de L5 à T4).
- L'angulation maximale, en L1, est moins forte pour les données ostéologiques.
- Les deux séries - radiographique et ostéologique - montrent que l'inflexion thoraco-lombaire a lieu en L1 tandis que l'inversion d'angulation des corps vertébraux a lieu, en moyenne dans cet échantillon, entre L3 et L4.
- Une inflexion moyenne est déterminée par la morphologie vertébrale en C4.
- Il est nécessaire de considérer la participation conjointe de plusieurs éléments - corps vertébraux et espaces intervertébraux - au niveau de plusieurs segments adjacents, pour pouvoir considérer leur implication dans le déterminisme des courbures sagittales.
- Les espaces intervertébraux participent fortement au déterminisme des courbures sagittales.
- La participation des espaces intervertébraux est plus forte dans les courbures *in vivo*, en position anatomique, que dans les courbures impliquées par la seule morphologie des vertèbres.
- Le dimorphisme sexuel impliqué par la morphologie des corps vertébraux est plus grand que celui observé quand les espaces intervertébraux sont pris aussi en considération, par une participation plus forte des corps vertébraux au déterminisme des courbures dans le sexe féminin.
- La morphologie vertébrale détermine donc l'expression de courbures sagittales qui seront amplifiées dans l'attitude physiologique.

Le concept de la “vertèbre charnière” qui correspond, avec une certaine variabilité, à T12, avait été précisément défini par PATURET d’un point de vue anatomique comme la zone de transition entre les étages cervico-thoracique et lombaire. Au niveau de ce segment, les vertèbres acquièrent les caractères morphologiques propres de l’étage lombaire. Ces modifications correspondent aussi à la fonction mécanique de « centre d’inflexion », qui se manifeste en particulier par une division corrélative des trajets musculaires responsables de la mobilité du tronc (PATURET, 1951). La division cranio-caudale des fonctions mécaniques, avec des rôles de support et/ou de direction qui sont assignés essentiellement aux organes antérieurs de l’organisme, tandis que la propulsion est assurée principalement par les organes postérieurs, a une signification phylogénétique profonde et précède l’apparition même de la quadrupédie (KUMMER, 1991). La dévolution *exclusive* des fonctions locomotrice et de support aux membres “inférieurs” chez l’Homme, et la mise en place concomitante de la lordose lombaire (KUMMER, 1968), sont sous cette perspective un phénomène récent de l’évolution (parmi un grand nombre de références: McHENRY, 1976 ; DAY, 1978 ; LOVEJOY, 1978 ; ZIHLMAN, 1978 ; LEAKEY et HAY, 1979 ; WHITE, 1980 ; CHARTERIS *et al.*, 1981 ; JUNGERS, 1982 ; WHITE et SUWA, 1987). La lordose lombaire (ABITBOL, 1987a) et la présence d’une discontinuité dans la courbure lombo-sacrée au niveau du promontoire sacré (SCHULTZ, 1961 ; ABITBOL, 1987a), qui sont étroitement liés à ce processus (KUMMER, 1965, 1968, 1975, 1991 ; McHENRY, 1991), sont déjà présents à un degré moindre en association avec des modes de locomotion non bipèdes. Il y a donc eu recrutement de structures anatomiques pour des fonctions mécaniques nouvelles, différentes de celles pour lesquelles elles servaient initialement (GOULD, 1997). Ce processus apparait une explication parcimonieuse du décalage qui existe, au sein de la colonne vertébrale, entre l’acquisition des caractères anatomiques lombaires, qui a lieu dès T12, et l’inversion d’angulation des plateaux qui s’effectue toujours à un niveau plus caudal. La variabilité même du segment où a lieu l’inversion d’angulation⁵ est un indice supplémentaire de la relation lâche qui lie la forme des corps vertébraux dans le plan sagittal, et la détermination de la lordose lombaire. Cette variabilité est un argument non négligeable contre une interprétation uniquement fonctionnaliste⁶.

⁵ Cf. *supra*: « Modalités de participation des corps vertébraux dans la détermination des courbures sagittales ».

⁶ La sensibilité de la charnière thoraco-lombaire peut être un autre argument en défaveur d’une interprétation fonctionnaliste, la fréquence des lésions en T12 (PANJABI *et al.*, 1994, 1995 ; ABITBOL et DOWLING, 1995) pouvant être envisagée comme une conséquence du décalage entre l’inversion de courbure thoraco-lombaire, et l’inversion d’angulation des corps vertébraux, l’interprétation étant plutôt d’ordre évolutif. Ce “décalage” devrait alors se sommer aux indices d’une adaptation imparfaite de la colonne vertébrale à la bipédie. La seule étude de variabilité des courbures sagittales ne peut de toutes les façons être décisive pour une interprétation d’ordre biomécanique.

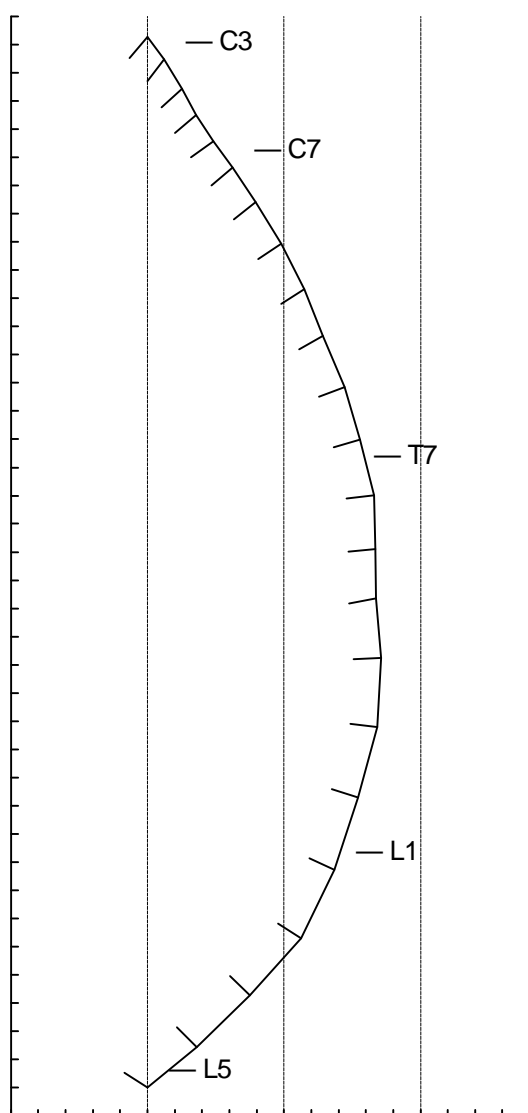
6. Application de la méthodologie aux profils vertébraux de Néandertaliens. Résultats et discussion.

6.1. Empilements

6.1.1. Kébara 2

A. Empilement des corps vertébraux

La pile des quadrilatères représentant la forme des corps vertébraux dans le plan sagittal pour le squelette de Kébara 2 dessine une seule concavité générale d'aspect régulier (figure 68).



La seule représentation graphique permet d'apprécier la valeur absolue de sa flèche maximale, laquelle est de 80 mm environ, ainsi que sa position au niveau de l'étage thoracique moyen. Le profil est donc tout à fait semblable à ceux qui ont pu être obtenu pour l'échantillon de comparaison et, en particulier, il est largement compris dans la variabilité trouvée pour le sexe masculin (figure 38 a.). Pour celui-ci en effet, tous les profils déterminés par la forme des corps vertébraux ne dessinaient, selon le même schéma, qu'une seule concavité générale avec une flèche maximale comprise, en valeurs arrondies, entre +40 et +110 mm. Dans le sexe féminin en revanche, approximativement la moitié des profils présentaient une convexité antérieure (lordose) sur une portion plus ou moins développée, et la flèche maximale était comprise entre environ -20 mm et +70 mm.

Figure 68

Empilement des corps vertébraux du squelette de Kébara 2, de L5 à C3. Quadrilatères ajustés sur leur côté postérieur. Le profil est aligné sur l'axe joignant les extrémités de la pile: le sommet postéro-inférieur de L5 et celui postéro-supérieur de C3. Sur la base des valeurs d'angulation des plateaux vertébraux, la face postérieure de C4 a été reconstituée par le calcul et celle de T9 a été corrigée (voir chap. matériel). Echelle: une division = 10 mm; espacement des repères verticaux, 50 mm.

B. Angles interceptant la pile des corps vertébraux

Les deux segments qui limitent l'empilement des corps vertébraux et correspondent au plateau inférieur de L5 à la base, et au plateau supérieur de C3 au sommet, définissent dans le plan sagittal

un angle de Cobb (COBB, 1948) à sommet antérieur. Sa valeur est de -80° . Tous les profils des individus masculin de l'échantillon de *Spitalfields* définissent de la même façon un angle à sommet antérieur qui est en moyenne de -73° . Sa variabilité est assez forte, avec des valeurs comprises entre -109° et -30° , et une dispersion angulaire $s = 22^\circ$. La valeur déterminée pour Kébara est donc largement comprise dans la variabilité de l'échantillon ($\tau = -22\%$), et appartient même à l'intervalle de confiance de l'angle moyen (figure 69).

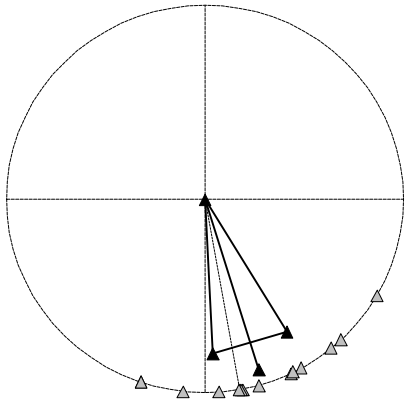


Figure 69
Angles interceptant la pile des quadrilatères représentant les corps vertébraux, dans l'échantillon masculin de *Spitalfields*. Les valeurs de la colonne vertébrale de l'individu de Kébara sont comparées à cet échantillon. *Spitalfields*: \blacktriangle , valeurs individuelles; \triangle , angle moyen de l'échantillon masculin entouré de son intervalle de confiance à 95%. $\ddot{\triangle}$ $\ddot{\triangle}$, Kébara. Les valeurs négatives correspondent à des angles à sommet antérieur. La longueur du segment représentant l'angle moyen est égale à r ($0 \leq r \leq 1$) qui est une mesure de la concentration des données.

L'angle correspondant à chaque étage vertébral a été calculé dans l'empilement des corps vertébraux. Au niveau cervical, il est défini entre le côté supérieur du quadrilatère représentant le corps vertébral de C3 et le côté inférieur du quadrilatère représentant le corps vertébral de C7; de même, au niveau thoracique entre T1 et T12, et au niveau lombaire entre L1 et L5.

Les corps vertébraux cervicaux de Kébara forment un angle de -9° dont le sommet est orienté antérieurement. L'échantillon de *Spitalfields* a montré l'absence de différence sexuelle pour cette mesure, avec un angle moyen de -23° pour le sexe masculin (par rapport à ce sexe: $\tau_{\text{Kébara}} = 68\%$) et de -20° pour le sexe féminin ($\tau_{\text{Kébara}} = 56\%$). Kébara se situe dans la variabilité ainsi décrite, avec une valeur qui est "au dessus" des intervalles de confiance (figure 70 a.), c'est-à-dire que l'angle cervical, en cyphose, est plutôt faible.

L'angle interceptant les corps vertébraux thoraciques est de -57° . Il correspond à une cyphose assez marquée. En effet, si les variabilités se recoupent, les intervalles de tolérance des angles moyens ont montré qu'il existe un dimorphisme sexuel, en ce sens que les deux moyennes sont significativement différentes; la cyphose déterminée par la morphologie des corps vertébraux étant moins accentuée dans le sexe féminin (-24° en moyenne) que dans le sexe masculin (-51° en moyenne). Kébara se place donc dans les valeurs plutôt fortes de la variabilité masculine ($\tau_{\text{Kébara}} = -33\%$), et éloignées de la moyenne de l'échantillon féminin ($\tau_{\text{Kébara}} = -90\%$). Des valeurs aussi élevées sont uniquement représentées par des individus du sexe masculin dans l'échantillon (figure 70 b.).

Enfin, la mesure obtenue pour l'étage lombaire est particulièrement intéressante. L'angle déterminé pour Kébara est de -14° , donc avec un sommet antérieur, c'est-à-dire dans le sens de la cyphose. Le dimorphisme sexuel correspondant à cette mesure, tel qu'il peut être apprécié au moyen des intervalles de confiance des moyennes des deux sexes, est comparable à celui mis en évidence à l'étage thoracique. Mais il est qualitativement très différent puisque 100 % des sujets féminins (intervalle de confiance de la proportion: $69\% \leftrightarrow 100\%$) ont un angle à sommet postérieur, c'est-à-dire décrivant une lordose, tandis que les valeurs masculines se répartissent autour de zéro, décrivant aussi bien une orientation en lordose qu'en cyphose. Or l'angle de Kébara se situe dans les

extrêmes de la variabilité masculine, étant même égal au maximum observé dans le sens de la cyphose, et parmi des valeurs qui ne sont représentées que par des sujets masculins. Les taux d'éloignement permettent de quantifier la position de Kébara. On a $\tau = -85.1\%$ par rapport au sexe masculin, et $\tau = 99.6\%$ par rapport au sexe féminin. L'hypothèse d'appartenance à ce dernier est donc rejetée avec une erreur de première espèce $p = 4 \cdot 10^{-3}$.

L'étude du pelvis de Kébara 2 a souligné la morphologie néandertalienne particulière du coxal, au niveau de l'os pubien (Mc COWN et KEITH, 1939 ; STEWART, 1960, 1963 ; ENDO et KIMURA, 1970 ; TRINKAUS, 1976, 1983 ; HEIM, 1982). L'analyse bivariée de la longueur et de la hauteur de la branche supérieure du pubis a en effet montré que la morphologie néandertalienne outrepassa la variabilité actuelle du sexe féminin (RAK et ARENSBURG, 1987 ; RAK, 1991). Si donc il pouvait subsister, du point de vue de l'utilisation de l'os coxal, un certain doute dans l'attribution du sexe masculin au squelette de Kébara 2, la morphologie lombaire des corps vertébraux appuie totalement cette détermination.

La pile des quadrilatères des corps vertébraux de Kébara décrit donc des angulations qui se situent dans la variabilité de l'échantillon de référence. Ces angulations appartiennent nettement à la variabilité masculine pour l'angle thoracique. Elles se différencient très significativement de la variabilité féminine pour l'angle lombaire, et correspondent aux valeurs en cyphose les plus fortes qui sont rencontrées dans l'échantillon masculin.

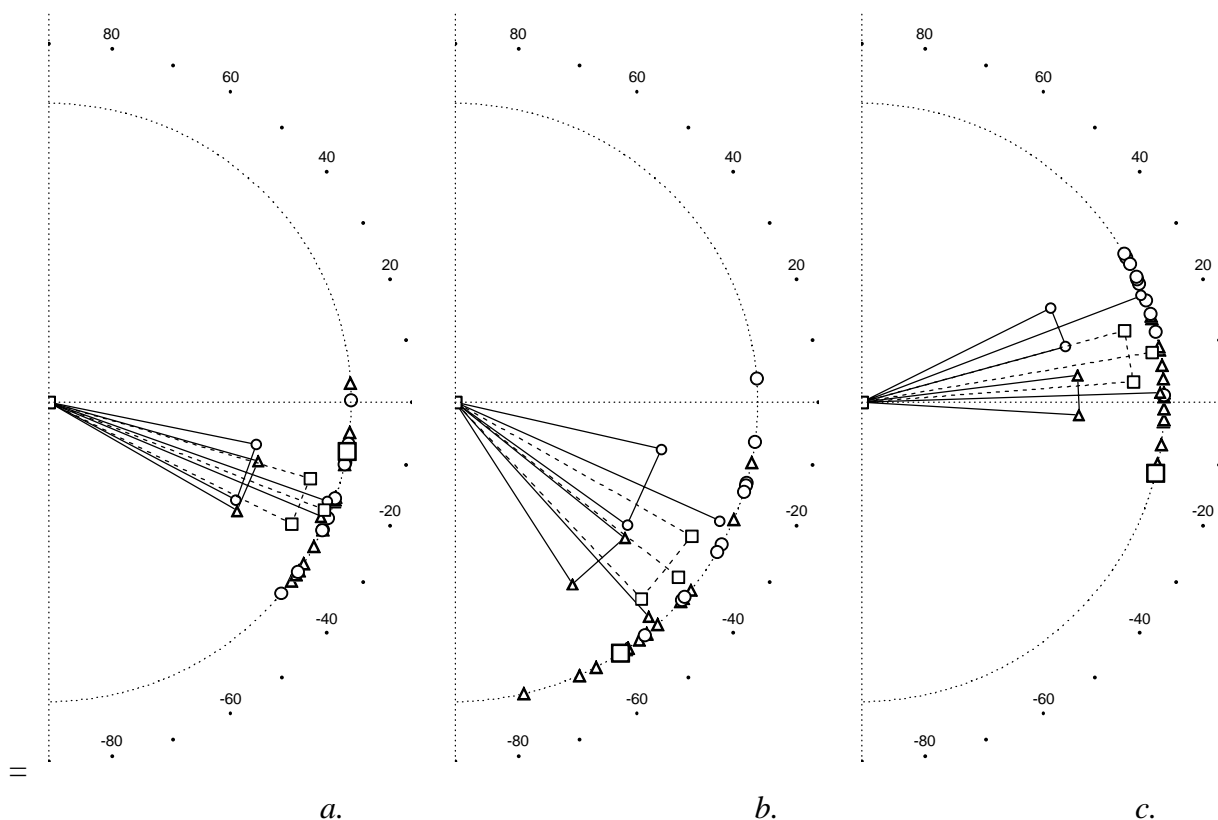


Figure 70

Angles interceptant les étages cervical, thoracique et lombaire de la pile des quadrilatères représentant les **corps vertébraux**. Situation des valeurs de **Kébara** par rapport à l'échantillon de *Spitalfields*. Segments cervical (a.), thoracique (b.) et lombaire (c.). Δ , hommes ; \circ , femmes ; — Δ — & — \circ —, angle moyen entouré de son intervalle de confiance à 95% pour les sujets de sexe masculin et féminin, respectivement ; - - \square - -, angle moyen et intervalle de confiance pour l'ensemble des individus ; \square , valeurs pour Kébara. Les valeurs négatives correspondent à des angles à sommet antérieur. La longueur du segment représentant l'angle moyen est égale à r ($0 \leq r \leq 1$), mesure de la concentration des données. Graduation en degrés.

C. Régression polynomiale et points remarquables

Une régression polynomiale de degré 4 est ajustée à l'empilement. L'ajustement est très bon, avec un coefficient de corrélation multiple $R = 0.999$ et une erreur type de l'estimation de 1.66 mm.

Son équation avec quatre chiffres significatifs est:

$$y = 1.0081 + 1.3009 \cdot x - 6.4714 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 + 1.2611 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 1.2529 \cdot 10^{-8} \cdot x^4$$

La hauteur de l'empilement, ou longueur en projection, est de 373 mm, et la longueur développée ou curviligne de la courbe de $x = 0$ à $x = 373$ est de 424 mm. La hauteur de l'empilement est donc faible, le taux d'éloignement de Kébara pour cette variable et par rapport à l'échantillon masculin de référence est $\tau = -90\%$ (le signe négatif indiquant que la valeur pour Kébara est inférieure à la moyenne de l'échantillon). Donc seulement 10 % des empilements de la population, estimée sur la base de l'échantillon, sont plus petits que Kébara. La longueur développée est en revanche plus largement incluse dans les valeurs de l'échantillon avec $\tau = -71\%$.

L'indice "de courbure" est donc égal à 87.9 %. Ceci situe le profil, pour ce paramètre, dans les valeurs faibles de la variabilité de l'échantillon ($m = 93.5\%$, $s = 4.41$ et $\tau = -81\%$) et de celle des sujets masculins ($m = 91.5\%$, $s = 3.91$ et $\tau = -61\%$).

Extremum	— T10		
<i>Abscisse</i>	159	mm	43 %
<i>Abscisse curviligne</i>	188	mm	44 % <i>l.d.</i>
<i>Flèche</i>	87	mm	23 %
Point d'inflexion	Néant		
Maximum de courbure:	— L1		
<i>Abscisse</i>	97	mm	26 %
<i>Abscisse curviligne</i>	125	mm	29 % <i>l.d.</i>
<i>Ordonnée</i>	77	mm	21 %
<i>Courbure au maximum</i>	-5.9	$\cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$	—
<i>Rayon de courbure</i>	-170	mm	-46 %

Tableau 24

Squelette de Kébara, empilement des corps vertébraux. Paramètres des points remarquables déterminés par le polynôme de degré 4 ajusté à l'empilement. Valeurs absolues en mm, et relatives en pourcentage de la hauteur du profil (373 mm) et en pourcentage de sa longueur développée (*l.d.*) totale (424 mm) pour les abscisses curvilignes. Le segment mentionné est celui au niveau duquel le point est situé.

L'étude des points remarquables du polynôme permet de caractériser précisément le profil (tableau 24):

Extremum

L'*extremum* de la concavité, ou sommet de la cyphose, est situé au niveau de la 10^{ème} vertèbre thoracique à 16 cm de la base de la pile, soit environ aux $e^{èmes}$ de la hauteur. Cette distance mesurée sur la longueur développée du profil est de 19 cm environ à partir de la base, soit 44 % de la longueur développée totale. Cet *extremum* définit une flèche maximale de près de 9 cm qui, exprimée relativement en proportion de la hauteur de la pile, correspond à environ **4** de celle-ci.

La position relative de l'*extremum* pour Kébara (43 %) peut être comparée à la variabilité de la population estimée à partir de l'échantillon de référence de sexe masculin. La distribution de la

variable n'y est pas significativement différente de la normalité ($p > 0.2$ dans le test de Kolmogorov-Smirnov, résidus alignés sur la droite théorique). Le taux d'éloignement de Kébara par rapport à l'échantillon est $\tau = -97\%$. C'est-à-dire que seulement 3 % des profils de la population ont un extremum situé plus bas que ce n'est le cas chez Kébara. Au seuil $\alpha = 0.05$ classiquement utilisé, il y a donc un rejet significatif: Kébara apparaît comme un *outlier* par rapport à l'échantillon. Les sommets de la cyphose sont en effet situés dans l'échantillon masculin, entre les segments T6 et T9 (inclus), et pour 85 % d'entre eux ($n = 13$, intervalle de confiance de la proportion¹: $54\% \leftrightarrow 97\%$), en T7 ou T8 (figure 33). Par rapport aux profils de sujets féminins qui ne présentent qu'une seule courbure en cyphose, comme c'est le cas de Kébara, l'extremum est situé dans la variabilité: $\tau = -77\%$. Ceci diminue le taux d'éloignement par rapport à tous les profils décrivant cette configuration, quel que soit le sexe: $\tau = -92\%$.

La flèche², en revanche, est largement comprise dans la variabilité masculine ($\tau = 53\%$). Elle est plus éloignée de la moyenne des profils féminins à une seule courbure cyphotique ($\tau = 88\%$), et donc de l'ensemble des profils de ce type indépendamment du sexe ($\tau = 66\%$).

Inflexion

Le polynôme ne définit aucun point d'inflexion sur le profil. Cette situation est le cas de 29 % des profils pour le sexe masculin, l'inversion de courbure étant située, le cas échéant, entre L2 et L4, et parfois accompagnée d'une inflexion définissant une lordose cervicale (figure 33).

Maximum de courbure

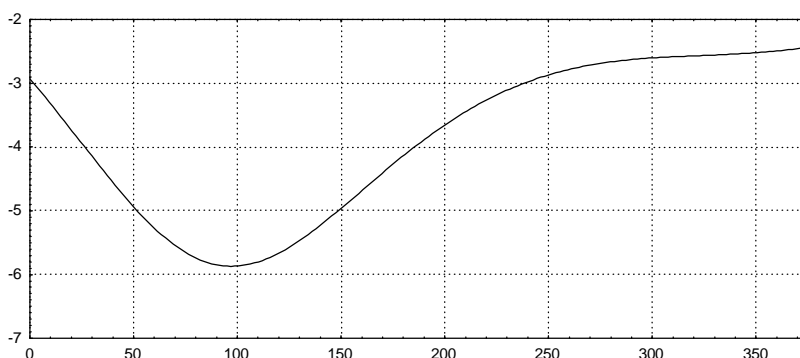


Figure 71

Valeur de la courbure sur le profil déterminé par l'empilement des corps vertébraux de Kébara 2. Abscisses: hauteur par rapport à la base du profil en mm ($x = 0$). Ordonnées: courbure (inverse du rayon de courbure), exprimée en 10^{-3}mm^{-1} (c'est-à-dire que la valeur de courbure est multipliée par 1000 pour obtenir un ordre de grandeur satisfaisant).

Le profil de Kébara est caractérisé par la présence d'un seul maximum de courbure situé à environ 4 de la hauteur totale par rapport à la base, ou 10 cm. Cette position correspond à 12.5 cm sur la longueur développée, soit $3/10^{\text{èmes}}$ de celle-ci dans sa totalité. Ce maximum est donc distant de plus de 8 cm de l'axe C3-L5 (5^{ème} en proportion de la hauteur). Enfin, le rayon de courbure - minimal - est de 17 cm en valeur absolue, soit 46 %; ce qui correspond à une courbure de $6 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$.

La variation de la courbure au long du profil suit un schéma simple. Elle est toujours comprise dans les négatifs (cyphose, pas de point d'inflexion). Elle augmente, en valeur absolue, depuis L5

¹ Limites inférieure et supérieure de l'intervalle de confiance bilatéral de la proportion pour $\alpha = 0.05$ (CLOPPER et PEARSON, 1934 ; DIEM, 1972). L'intervalle est d'autant plus asymétrique que la proportion est proche de 0 % ou 100 %.

² La valeur de la flèche exprimée en pourcentage de la hauteur totale assume une distribution normale dans l'échantillon. Kolmogorov-Smirnov et LILLIEFORS (1967): $p > 0.2$; Shapiro-Wilk W (SHAPIRO et WILK, 1968 ; ROYSTON, 1982): $p < 0.86$.

où elle est de $-3 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$, jusqu'à l'unique maximum en L1, à 10 cm de la base. Elle décroît ensuite de façon presque linéaire jusqu'à 25 cm environ, c'est-à-dire près de T6, et se stabilise progressivement, avec une valeur presque constante et assez faible pour les étages thoracique haut et cervical: $\approx -2.5 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$.

Dans l'échantillon masculin, 6 profils ($n = 13$; proportion: 46 %, intervalle de confiance: 20 % \leftrightarrow 74 %) ne montrent qu'un unique maximum de courbure, les autres profils possédant tous deux maxima. Chez deux sujets (15 % du total: 3 % \leftrightarrow 46 %), cet unique maximum est situé en position basse, sous le sommet de cyphose, en T11 ou T12. Enfin, seulement dans le cas d'un seul profil est retrouvée la configuration: « absence d'inflexion et un seul maximum de courbure en position basse ». Il s'agit du sujet n° 556, pour lequel le maximum de courbure est situé en T12, à 30 % de la base de l'empilement.

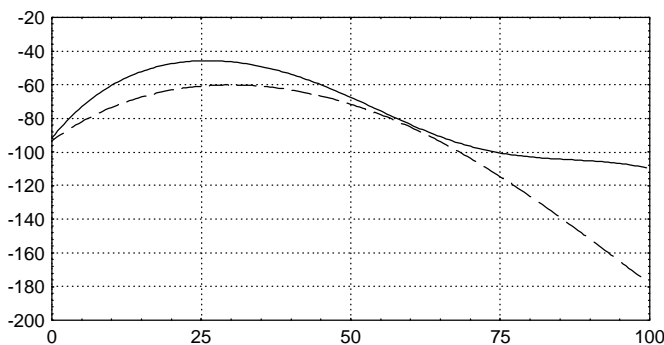


Figure 72

Rayon de courbure exprimé en pourcentage de la hauteur de l'empilement des corps vertébraux pour Kébara (—) et pour le sujet masculin n°556 (- - -). Abscisses: hauteur par rapport à la base du profil ($x = 0$) en %. Ordonnées: rayon de courbure (inverse de la courbure).

La présence, la position et la valeur des maxima de courbure sont difficiles à caractériser sans tenir compte des autres points remarquables, et particulièrement du point d'inflexion où, par définition, la courbure est nulle. Il est donc difficile de situer statistiquement Kébara par rapport à l'échantillon. On note toutefois que les variations de la courbure du sujet n° 556 sont tout à fait comparables à celles de Kébara, avec une légère différence d'amplitude. Ceci s'apprécie mieux encore pour le rayon de courbure, qui peut être exprimée en proportion de la hauteur totale et est ainsi directement comparable (figure 72). Celui-ci est à la base de -93 pour le sujet 556, et de -91 pour Kébara. Il décroît en valeur absolue jusqu'à un minimum (c'est-à-dire une courbure maximale) de -61 pour le sujet 556 et -46 pour Kébara. Ce minimum est situé dans les deux cas à environ 30 % de la hauteur, qui correspondent à T12 pour 556 et L1 pour Kébara. Le rayon de courbure croît ensuite (toujours en valeur absolue) jusqu'à atteindre -180 et -110 respectivement. La différence de 70 en C3 semble être essentiellement le résultat de la stabilisation des valeurs dans le dernier quart supérieur de l'empilement chez Kébara, laquelle n'est pas observée chez le sujet 556.

Quant à la distance qui sépare le maximum de courbure du sommet de la cyphose, elle est de 3 segments vertébraux. Elle est égale à 17 % en proportion de la hauteur, ou 15 % en pourcentage de la longueur développée. Dans le cas du sujet n° 556, cette distance est aussi de trois segments, et est égale à 15 % de la hauteur et 14 % de la longueur développée. Ces valeurs sont très proches.

D. Comparaison à l'échantillon de référence

La comparaison directe du profil de Kébara avec ceux calculés pour les sujets de sexe masculin permet de le situer, *de visu*, par rapport à un échantillon de la variabilité masculin actuelle. La courbe apparaît largement comprise dans le faisceau des profils de référence (figure 73). Sa hauteur (ici représentée sur l'horizontale: abscisses), comme il a été constaté précédemment, est plutôt faible. Les points correspondant aux segments L2 à L5 se situent juste à l'extérieur du faisceau. La transformation homothétique des empilements et des polynômes de telle manière qu'ils s'ajustent sur une même hauteur de 100 % permet de les comparer (PINEAU *et al.*, 1983). Le tracé des ellipses

d'équiprobabilité pour les coordonnées des points homologues (figure 74) confirme alors la situation des interlignes L5/L4, L4/L3 et L3/L2 qui se trouvent à la limite de la variabilité de l'échantillon pour $\alpha = 0.05$, et légèrement à l'extérieur de celle-ci. Il faut toutefois compter avec la variabilité estimée de la population qui pour l'effectif utilisé est plus ample que celle décrite par les ellipses de l'échantillon (CLEUVENOT, 1993). Les coordonnées de l'empilement sont en effet compris dans les bandes de confiance de la régression polynomiale établie sur l'ensemble des points ($\alpha = 0.05$).

Cette situation de seuil des coordonnées de l'empilement au niveau lombaire est liée au déplacement en direction caudale du sommet de la cyphose noté dans la description des points remarquables. Elle doit être mise en relation avec la forte angulation des plateaux vertébraux à l'étage lombaire qui détermine un angle lombaire total à la limite de la variabilité de l'échantillon masculin (figure 70 c.).

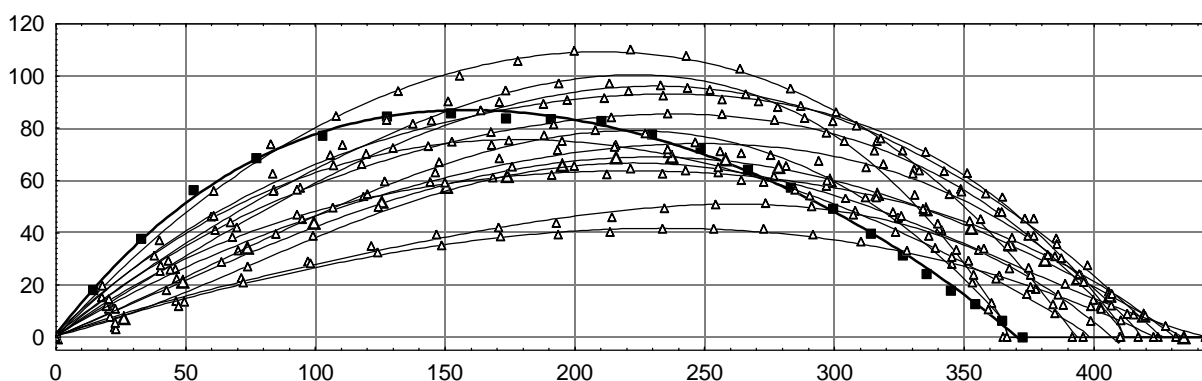


Figure 73

Profil sagittal impliqué par la morphologie des corps vertébraux. Comparaison de la colonne de Kébara 2 à l'échantillon de référence masculin. Coordonnées des quadrilatères dans les empilements exprimées en mm. ■, corps vertébraux de Kébara. Δ, sujets masculins de l'échantillon de comparaison; $\hat{\Delta}\hat{\Delta}\hat{\Delta}$, régression polynomiale pour chaque pile. La base de l'empilement définie par la plateau inférieur de L5 est située à l'origine (0;0), le sommet, au plateau supérieur de C3, à l'abscisse maximale de l'individu.

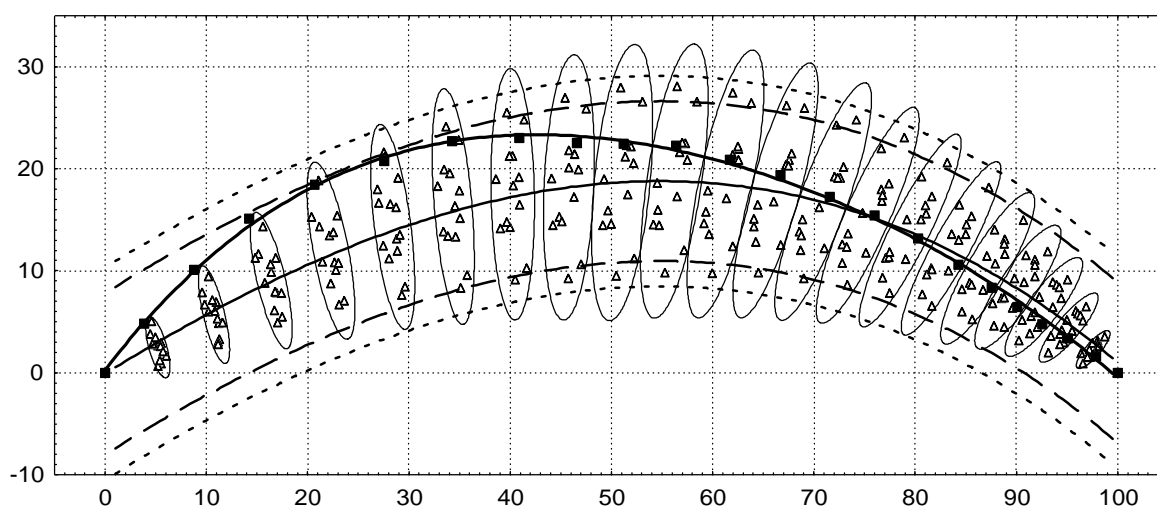


Figure 74

Profil sagittal impliqué par la morphologie des corps vertébraux. Comparaison de la colonne de Kébara 2 à l'échantillon de référence masculin. Coordonnées des quadrilatères dans les empilements, en pourcentage de la hauteur. ■, corps vertébraux de Kébara. Δ, sujets masculins de l'échantillon de comparaison; $\hat{\Delta}\hat{\Delta}\hat{\Delta}$, régression polynomiale générale pour l'ensemble des points, entourée de ses intervalles de tolérance à $\alpha = 0.05$ et $\alpha = 0.01$ (voir figure 39). La base de l'empilement définie par la plateau inférieur de L5 est située à l'origine (0;0); le sommet, au plateau supérieur de C3, au point (100;0).

Essentiellement, la comparaison de l'empilement des corps vertébraux de Kébara à l'échantillon masculin, en coordonnées relatives, montre donc que Kébara appartient à la variabilité de l'échantillon de référence. Les coordonnées de la pile sont inclus dans l'intervalle de tolérance à 95 % de la régression générale.

E. Profil impliqué par les corps vertébraux et par les espaces intervertébraux déterminés par la morphologie vertébrale

L'empilement alterné des quadrilatères représentant les corps vertébraux et de ceux représentant les espaces intervertébraux déterminés par la morphologie des vertèbres adjacentes est calculable en continuité depuis l'espace intervertébral de S1 jusqu'à celui de T4. Il dessine nettement deux courbures opposées et est sécant à l'axe du profil au niveau de l'espace intervertébral de L4. Les deux premiers segments déterminent donc une flèche orientée dans le sens de la lordose (figure 75).

L'empilement montre plusieurs "décrochements" de 2 à 3 mm au niveau des bords postérieurs de certains espaces intervertébraux, en particulier T6 et T7. Les points de mesure sont définis pour que les segments forment des quadrilatères fermés et ont donc une certaine indépendance vis-à-vis des repères morphologiques. Il est probable que l'état de conservation des plateaux inférieurs de T5 et T6 ait conduit dans les deux cas à définir, pour le point postéro-inférieur du quadrilatère du corps vertébral sus-jacent, une position anatomique relativement plus ventrale, en comparaison avec le point postéro-supérieur du corps vertébral sous-jacent. Ce décrochement n'affecte pas la position relative des éléments et, au contraire, corrige l'allure de la pile (figure 77). L'introduction

systématique entre les surfaces articulaires postérieures d'un espace de seulement 0.5 mm peut être une autre cause de ces décrochements. Elle correspond à l'option qui a été choisie de ne pas imposer de valeurs physiologiques *a priori* et de se restreindre strictement à la morphologie vertébrale osseuse.

L'ajustement polynomial optimal à cet empilement est de degré 4. Il présente une corrélation très élevée ($r = 0.990$) et une erreur type de l'estimation qui est faible, égale à 1.4 mm.

Le profil n'étant pas complet, il n'est pas possible de déterminer la position de ses deux extrema d'une manière qui puisse permettre de comparer leurs positions et leurs flèches. Celles-ci dépendent en effet de l'orientation de l'axe, donc du nombre des segments représentés. Par conséquent ces données seront seulement indicatives. Un extremum en lordose est présent au niveau de l'interligne

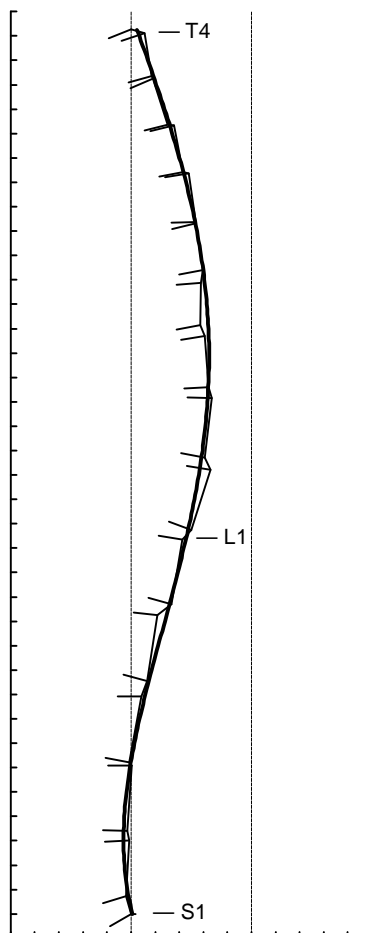


Figure 75
Kébara. Empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux déterminés par la morphologie vertébrale. Depuis l'espace intervertébral S1 à l'espace intervertébral T4. Quadrilatères ajustés sur leurs côtés postérieurs. La régression polynomiale de degré quatre est superposée à l'empilement (trait gras). Une graduation = 10 mm.

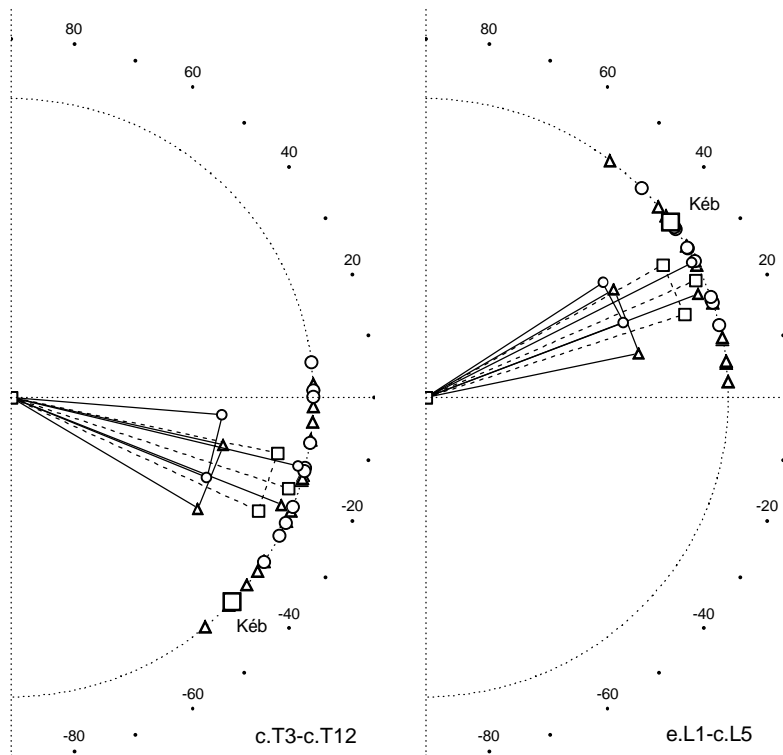


Figure 76

Angles interceptant les empilements **alternés** des corps vertébraux et des espaces intervertébraux. Comparaison des valeurs calculables pour les étages thoracique et lombaire de **Kébara** avec l'échantillon de *Spitalfields*. Etage thoracique: depuis le corps vertébral de T12 jusqu'au corps vertébral de T3 inclus ; étage lombaire complet, depuis le corps vertébral de L5 jusqu'à l'espace intervertébral de L1 inclus. Δ , hommes ; \circ , femmes, valeurs individuelles, angles moyens et intervalles de confiance ; - - \square -, *idem* pour l'ensemble des individus ; \square **Kéb**, Kébara. Valeurs négatives: angles à sommet antérieur. La longueur du segment représentant l'angle moyen est égale à r ($0 \leq r \leq 1$). Graduation: 10° . Les intervalles de confiance de chaque sexe ne sont pas représentés lorsqu'ils diffèrent peu.

L4/L5, à 3 cm de la base, espace intervertébral de S1 inclus, et éloigne le profil de 3 mm par rapport à son axe. L'autre extrémité, en T10, définit le sommet de la cyphose à 23 cm de la base et à 3 cm de l'axe (figure 78).

Afin d'obtenir un polynôme qui permette la comparaison des paramètres, l'empilement thoracolumbaire a été calculé. Il correspond en effet à une des divisions utilisées lors de l'analyse de l'échantillon de référence pour obtenir un ajustement plus précis, et est réalisé depuis le corps vertébral de L5, à la base de la pile, jusqu'à l'espace intervertébral de T7, placé au sommet.

Le polynôme de degré 4 permet un bon ajustement à la pile d'éléments, avec une corrélation $r = 0.972$ et une erreur type de l'estimation de 2 mm. Les quatre coefficients sont significativement différents de la valeur nulle (probabilité de l'hypothèse de nullité du coefficient du terme de degré 4: $p_{B4} = 0.007$). L'empilement a une "hauteur" ou longueur en projection légèrement inférieure à 30 cm, tandis que sa longueur développée est un peu supérieure à cette valeur (tableau 25), ce qui donne un indice général de courbure assez élevé, de 98.7 %.

D'un point de vue qualitatif, le profil aligné sur l'axe allant du côté inférieur du corps vertébral de L5 jusqu'au côté supérieur de l'espace intervertébral de T7 est caractérisé par la présence d'une inflexion située en L2. Chacune des deux "courbures" est caractérisée par un sommet (*extremum*), localisé en L4 sur la lordose lombaire et en T11 sur la cyphose thoracique. Cette dernière présente un *maximum de courbure* pratiquement confondu avec le sommet et situé au niveau du même segment. Parmi les empilements thoraco-lombaires homologues dans l'échantillon de référence, le schéma de présence simultanée de deux extrema lombaire et thoracique est représenté dans l'échantillon de référence *uniquement* dans le sexe masculin. Il s'agit de trois individus (intervalle

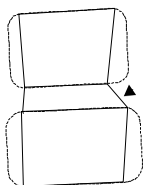


Figure 77

Illustration schématique de l'effet que produit, sur la forme du quadrilatère de l'espace intervertébral, une définition anatomiquement plus ventrale du point postéro-inférieur au niveau du quadrilatère du corps vertébral sus-jacent. Un décrochement apparaîtra dans le profil (flèche). Il n'affecte pas la position relative des éléments, comme le montrent leurs tracés en pointillés.

de confiance de la proportion: 6 % ↔ 51 %): les sujets n^{os} 542, 613 et 671. L'extremum lombaire se situe en L4 ou en L5, l'extremum thoracique en T10 ou en T11, et l'inflexion est localisée en L1 ou en L2. L'absence de représentation dans l'échantillon féminin n'implique pas, cependant, que ce schéma ne puisse pas être représenté dans la population féminine puisque l'intervalle de confiance de la proportion donne une limite à droite de 31 % au seuil $\alpha = 0.05$. Deux de ces trois profils possèdent aussi un *maximum de courbure* sur la cyphose thoracique (n^{os} 542 et 613), qui se situe à proximité de l'extremum, en T7 et en T10 respectivement.

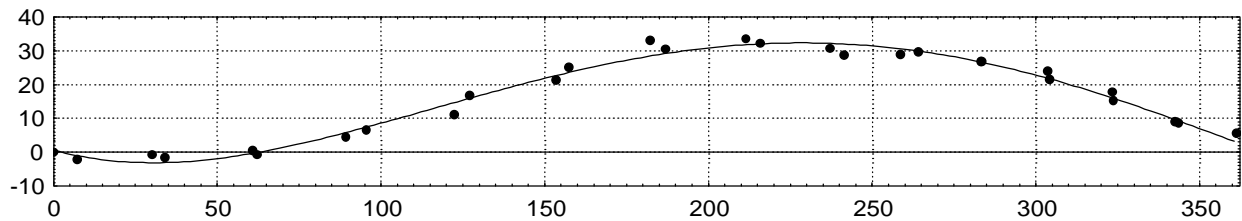


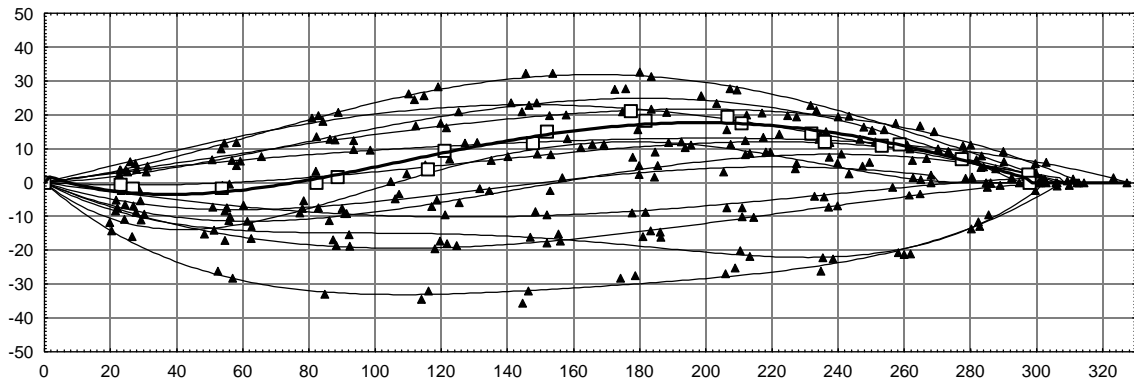
Figure 78

Kébara. Empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux impliqués par la morphologie vertébrale. Points représentant les extrémités postérieures des quadrilatères dans la pile et ajustement polynomial de degré 4. Axes gradués en mm. En (0;0), côté inférieur du quadrilatère représentant l'espace intervertébral S1. En (370;0), sommet de la pile: côté supérieur du quadrilatère représentant l'espace intervertébral T4. Les ordonnées positives correspondent à une flèche en direction postérieure par rapport à l'axe de la pile.

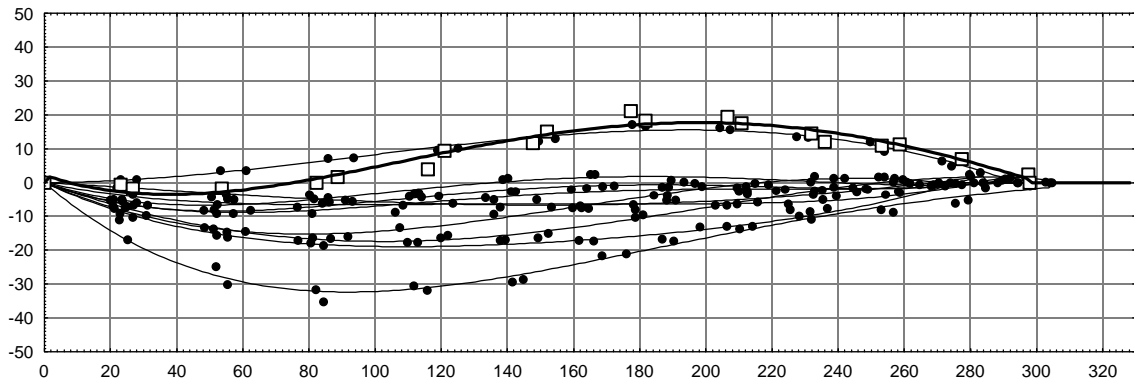
<i>Dimensions</i>	<i>Hauteur</i>	<i>L. développée</i>	<i>Indice</i>
<i>Empilement thoraco-lombaire</i>	298	302	98.7 %
<i>Etage lombaire</i>	153	154	99.1 %
<i>Points remarquables</i>	<i>absolu</i>	<i>relatif</i>	
Extrema			
Lombaire			
	— L4		
<i>Abscisse</i>	38 mm	.....	13 %
<i>Abscisse curviligne</i>	39 mm	.....	13 % l.d.
<i>Flèche</i>	-3 mm	.....	-1 %
Thoracique			
	— T11		
<i>Abscisse</i>	198 mm	.....	66 %
<i>Abscisse curviligne</i>	200 mm	.....	67 % l.d.
<i>Flèche</i>	18 mm	.....	6 %
Point d'inflexion			
	— L2		
<i>Abscisse</i>	107 mm	.....	36 %
<i>Abscisse curviligne</i>	109 mm	.....	36 % l.d.
Maximum de courbure			
	— T11		
<i>Abscisse</i>	210 mm	.....	70 %
<i>Abscisse curviligne</i>	212 mm	.....	71 % l.d.
<i>Ordonnée</i>	77 mm	.....	6 %
<i>Courbure au maximum</i>	-4 ·10 ⁻³ mm ⁻¹	.....	-
<i>Rayon de courbure</i>	-275 mm	.....	-92 %

Tableau 25

Kébara 2, empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux. Dimensions de l'empilement thoraco-lombaire, depuis le corps vertébral L5 jusqu'à l'espace intervertébral T7, et de l'étage lombaire, jusqu'à l'espace intervertébral L1. Paramètres des points remarquables déterminés par le polynôme de degré 4 ajusté à l'empilement thoraco-lombaire. Valeurs absolues en mm, et relatives en pourcentage de la hauteur du profil (298 mm), et de sa longueur développée (l.d.) totale (302 mm) dans le cas des abscisses curvilignes. Le segment mentionné est celui où se situe le point remarquable.



a.



b.

Figure 79

Profil sagittal impliqué par la morphologie des corps vertébraux et des espaces intervertébraux. Comparaison de Kébara 2 (□) à l'échantillon masculin (a.,▲) et féminin (b.,●). Empilements thoracolumbaires, depuis le corps vertébral de L5 (0;0) jusqu'à l'espace intervertébral de T7 inclus (y = hauteur de la pile;0). Coordonnées en mm.

F. Profil impliqué par les corps vertébraux et par les espaces intervertébraux à l'étage cervical

La totalité du profil cervical ne peut pas être déduite pour Kébara. L'empilement est calculable depuis le corps vertébral de C7 jusqu'à celui de C4. La mauvaise conservation des restes, et particulièrement des pédicules, est telle que l'empilement cervical ne doit être considéré que comme une estimation.

L'empilement a une hauteur de 47.4 mm. Il dessine une nette convexité antérieure qui s'éloigne d'une flèche maximale de 1 cm environ par rapport à l'axe de la pile (figure 81, a.). Le profil montre une certaine irrégularité, avec des décrochements au niveau des espaces intervertébraux, qui sont dus à la morphologie particulière des vertèbres cervicales (figure 77).

L'angle qui sous-tend les plateaux inférieur de C7 et supérieur de C4, tels qu'ils sont orientés dans l'empilement, a un sommet postérieur et sa valeur est de + 29.7 °. Ceci le situe parmi les valeurs les plus hautes de la variabilité rencontrée dans l'échantillon (figure 94).

Le polynôme qui donne un ajustement optimal est de degré 2 (figure 81, b.). Il présente une corrélation élevée $r = 0.95$ et une erreur-type de l'estimation de 0.96 mm. Le coefficient du terme de degré 2 est très significativement différent de zéro, avec $p = 0.0012$ (si un ajustement polynomial de degré 3 est calculé, l'hypothèse nulle n'est pas rejetée pour le coefficient du terme de degré 3: $p > 0.5$). L'équation du polynôme est: $y = 0.1719 - 0.5172 \cdot x - 0.01077 \cdot x^2$

La longueur curviligne calculée au moyen de ce polynôme, depuis $x = 0$ jusque $x = 47.4$ mm (sommet de la pile) est de 49.4 mm, ce qui détermine un indice de courbure de 96 %. La flèche maximale se situe au niveau de l'espace intervertébral C6, elle a une valeur de -6 mm à l'abscisse 24 mm.

Le rayon de courbure et, de façon plus parlante, la courbure, sont les paramètres qui permettent la comparaison car ils sont indépendants du fait que le profil soit complet ou non. La courbure croît à partir d'une valeur de $15 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ au niveau de la base de C7, jusqu'à un maximum de $21 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ confondu avec la position de la flèche maximale, au niveau de l'espace intervertébral C6. Elle décroît ensuite jusqu'au sommet de la pile où elle retrouve une valeur de $15 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$. Le profil ne passe donc pas par un minimum de courbure.

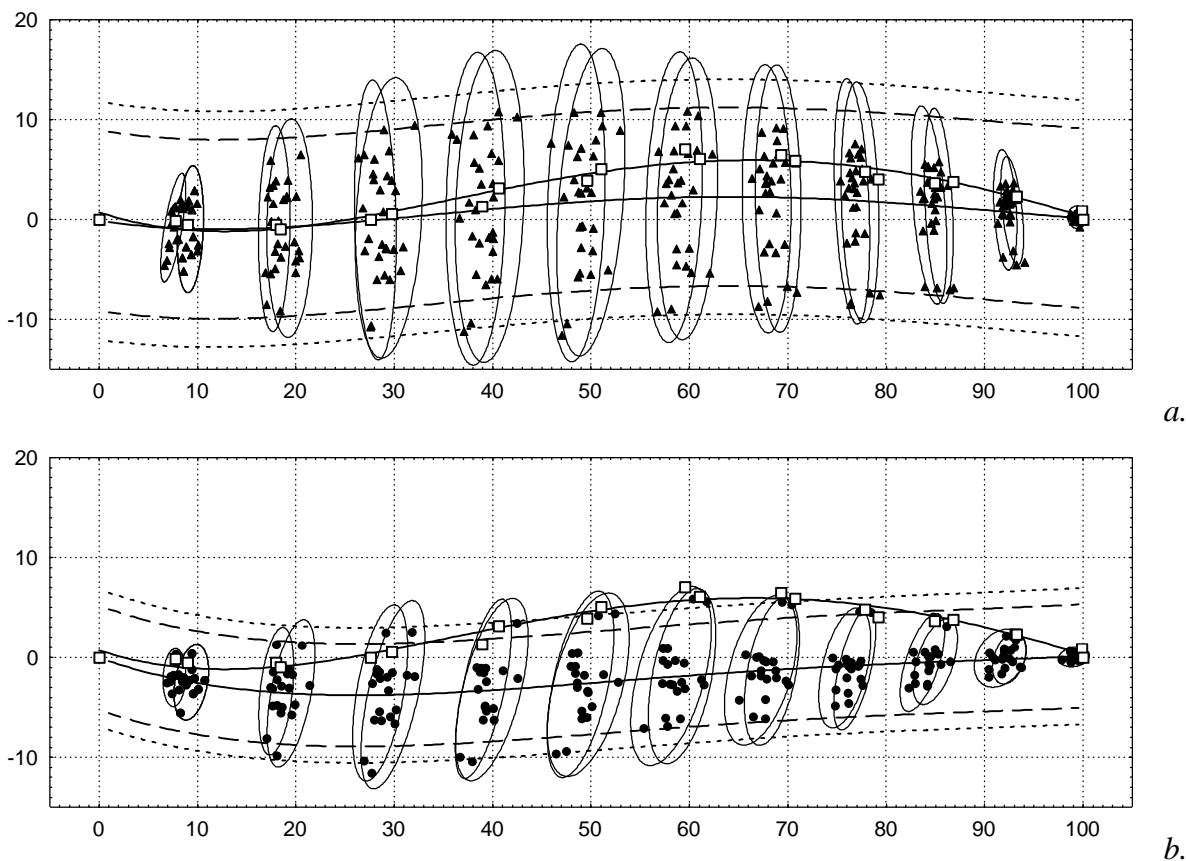


Figure 80

Profil sagittal impliqué par la morphologie des corps vertébraux et espaces intervertébraux. Comparaison de Kébara 2 (\square) à l'échantillon masculin (*a.*, \blacktriangle) et féminin (*b.*, \bullet). Empilements thoraco-lombaires, depuis le corps vertébral de L5 (0;0) jusqu'à l'espace intervertébral de T7 inclus (100;0). Coordonnées en % de la hauteur. $\ddot{A}\ddot{A}$, polynôme pour l'ensemble, ses intervalles de tolérance à $\alpha = 0.05$ (---) et $\alpha = 0.01$ (- - -).

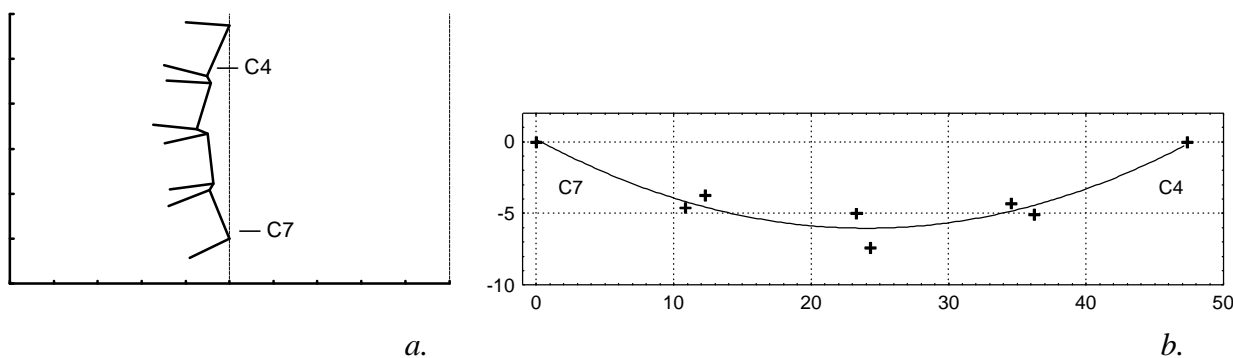


Figure 81

Kébara. Empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux impliqués par la morphologie vertébrale au niveau cervical. *a.*, Empilement calculable, depuis le corps vertébral de C7 jusqu'au corps vertébral de C4, échelle: une graduation = 10 mm ; *b.*, Régression polynomiale de degré 2 ajustée aux coordonnées de l'empilement.

6.1.2. Régourdou

A. Corps vertébraux de l'étage cervical

Les corps vertébraux de Régourdou déterminent au niveau cervical, de C3 à C6 inclus, un profil pratiquement rectiligne de 47 mm de hauteur (c'est-à-dire de longueur en projection). Il faut cependant prendre en considération le fait que ce profil correspond à un nombre faible de segments et ne peut donc développer des courbures très accentuées (figure 82 *a.*).

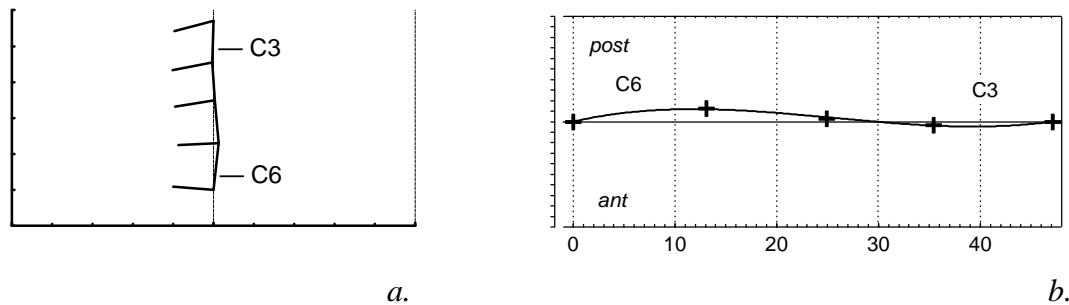


Figure 82
a., Empilement des corps vertébraux du squelette de Régourdou. Etage cervical, de C6 jusque C3 inclus. Echelle: une graduation = 10 mm. *b.*, Coordonnées de l'empilement et ajustement polynomial de degré 3. Une graduation = 1 mm.

L'angle déterminé par l'inclinaison entre les plateaux supérieur de C3 et inférieur de C6 dans la pile est à sommet antérieur, c'est-à-dire dans le sens de la cyphose, et d'une valeur de -22° . Cette valeur est largement incluse dans la variabilité de l'échantillon de référence (figure 91).

Une régression polynomiale de degré 3 semble donner un bon ajustement aux coordonnées de l'empilement, avec une corrélation de 0.99 et une erreur type de l'estimation égale à 0.16 mm (figure 82 *b.*). La fonction ajustée permet de calculer une longueur développée du profil égale à 47 mm, donc un coefficient de courbure de 99.7 %. Elle détermine un point d'inflexion à 25 mm de la base, ce qui le situerait à la limite entre les corps vertébraux de C4 et de C5. L'équation de cette fonction est:

$$y = 0.0149 + 0.22171 \cdot x - 0.012202 \cdot x^2 + 1.591 \cdot 10^{-4} \cdot x^3$$

Cependant, le polynôme s'écarte de moins de 2 mm de son axe. L'analyse de variance donne une probabilité $p < 0.16$ pour le rapport des carrés moyens de la régression et des résidus, alors que cette probabilité est toujours inférieure à 10^{-5} dans l'échantillon de référence. Le test de signification du coefficient du terme de degré 3 renvoie une probabilité non significative $p = 0.104$. Le coefficient $1.591 \cdot 10^{-4}$ n'est donc pas significativement différent de la valeur nulle. La procédure pas à pas de test du degré du polynôme conduit à une conclusion dans ce même sens pour les degrés 1 à 5. Afin de vérifier si un ajustement linéaire est susceptible de décrire l'empilement, celui-ci a été recalculé avec une inclinaison du segment de base de 45° , sans ajustement sur l'axe vertical. De cette façon, l'hypothèse d'une pente non nulle peut-être testée, ce qui n'aurait pas de sens si l'empilement était ajusté sur l'axe. L'hypothèse de nullité du coefficient de la régression linéaire pour cette pile inclinée est rejetée très significativement avec $p = 9.6 \cdot 10^{-5}$. En revanche, l'hypothèse de nullité du coefficient du terme de degré 2 dans la régression de même ordre ne peut être rejetée: $p = 0.5$. C'est donc seulement la régression linéaire qui est significative.

Par conséquent, il n'est pas possible de considérer que la morphologie des corps vertébraux cervicaux conservés du squelette du Régourdou détermine une courbure cervicale. Le profil de l'empilement de C6 à C3 peut être assimilé à une droite.

Cette conclusion souligne l'opposition qui peut apparaître entre la description des courbures donnée par une mesure d'angle, un ajustement polynomial, ou le seul "indice de courbure", qui est un indice des longueurs développées et en projection. Ce dernier permettait aussi de conclure à une absence de courbure. En revanche la cyphose apparemment décrite par la mesure d'angle donnait une image erronée de la courbure. Les méthodes sont donc complémentaires, mais en tous les cas et particulièrement au niveau cervical, une description précise et significative ne peut être donnée par la seule mesure angulaire. L'ajustement polynomial doit par ailleurs être calculé avec soin, en déterminant précisément le degré du polynôme de telle manière que ce dernier donne une description significative du profil.

B. Autres corps vertébraux

Il n'est pas possible de calculer d'autres empilements pour Régourdou. Les trois corps vertébraux T1, T12 et L2 ne peuvent être considérés qu'isolément, avec les restrictions que cela implique. Les représentations des quadrilatères correspondants montrent que les plateaux vertébraux de chaque segment définissent entre eux une angulation orientée dans le sens de la cyphose. Les valeurs de l'angulation entre les plateaux sont très variables. Au niveau lombaire, l'inversion d'orientation vers une angulation peut n'affecter que le dernier segment. La configuration rencontrée chez Régourdou pour le corps vertébral de L2 n'est donc pas exceptionnelle.

Les valeurs des angulations entre plateaux sont -3.7° pour T1, -8.4° pour T12, et -8.6° pour L2. Les segments thoraciques entrent dans la variabilité de l'échantillon de *Spitalfields*. Les taux d'éloignement correspondants par rapport à l'ensemble des valeurs sont: $\tau_{T1} = -37.5\%$ et $\tau_{T12} = 79.8\%$. Le segment L2 se situe hors des limites au seuil $\alpha = 0.05$ avec un taux d'éloignement $\tau_{L2} = 96.3\%$. Par rapport à la variabilité de l'échantillon de COSTANZO (STAGNARA, 1985), l'angulation de L2 est encore située dans les valeurs hautes mais cette fois en deça du seuil de tolérance, avec un taux $\tau_{L2/Costanzo} = 93.1\%$. En comparaison avec ce dernier échantillon, on a $\tau_{T12/Costanzo} = 60.1\%$.

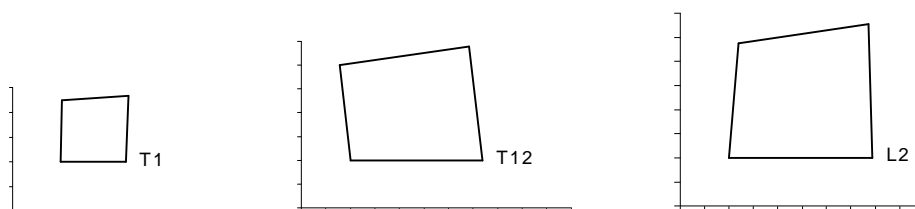


Figure 83
Régourdou. Quadrilatères représentant les corps vertébraux T1, T12 et L2. Une graduation égale 5 mm.

C. Empilement alterné

L'empilement des segments cervicaux C6 à C3 peut être réalisé en intercalant les espaces intervertébraux. Le profil obtenu (figure 84, a.) est assez irrégulier, l'espace intervertébral de C4 déterminant un angle assez ouvert dans le sens de la lordose, de 23°. La hauteur de la pile est de 54 mm. Elle s'écarte de son axe d'une flèche maximale de 3.4 mm, de telle manière qu'elle dessine une légère lordose. L'angle qu'elle détermine entre les plateaux supérieur de C3 et inférieur de C6 est faible et dans le sens de la lordose, de + 2.6°, ce qui le situe à l'intérieur de l'intervalle de confiance de la moyenne de l'échantillon de *Spitalfields* (figure 94).

Le seul ajustement polynomial décrivant significativement le profil est de degré 3 (Figure 84, b.). Il présente une corrélation élevée ($r = 0.92$), une erreur-type de l'estimation basse, égale à 0.86 mm, et le coefficient du terme de degré 3 est significativement différent de la valeur nulle au seuil de 5%, avec $p = 0.046$.

L'équation de la régression est:

$$y = -0.0565 + 0.118 \cdot x - 0.01314 \cdot x^2 + 2.026 \cdot 10^{-4} \cdot x^3$$

La longueur développée du polynôme est de 54.6 mm, l'indice de courbure étant par conséquent de 98.8 %. Il décrit une inflexion située à 22 mm de la base du profil, ce qui le localise au niveau du corps vertébral de C5, à peu près au milieu de celui-ci.

La courbure en chaque point, calculée à partir de l'équation du polynôme, montre une croissance pratiquement constante depuis une valeur négative de $-25 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ à la base en C6 jusqu'à la valeur positive de $+29 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ au sommet en C3. L'équation détermine un maximum de courbure en C3, à 4 mm du sommet de la pile. L'ajustement du polynôme sur un faible nombre de segments semble dans ce cas biaiser le calcul du rayon de courbure qui ne peut être considéré comme fiable au niveau de la base et du sommet du profil. Entre les deux points qui limitent le corps vertébral de C6 (côté supérieur et côté inférieur), le polynôme définit une courbure qui est plus que doublée en absolu, passant de $-10 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ à $-25 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$. La valeur déterminée au niveau du côté supérieur de C3 est de même excessivement élevée. La forme du polynôme au niveau des extrémités d'un profil est conditionnée de façon asymétrique, sans compensation bilatérale de segments adjacents. Ceci est susceptible d'imposer à la courbe des modifications rapides et artificielles de son allure lorsque le faible nombre de points ne permet pas une compensation d'ensemble. Les courbures élevées qui sont atteintes aux extrémités, en l'espace d'un seul segment, n'ont donc pas ici de valeur descriptive et doivent être considérées comme des *artefact* imposés par le modèle.

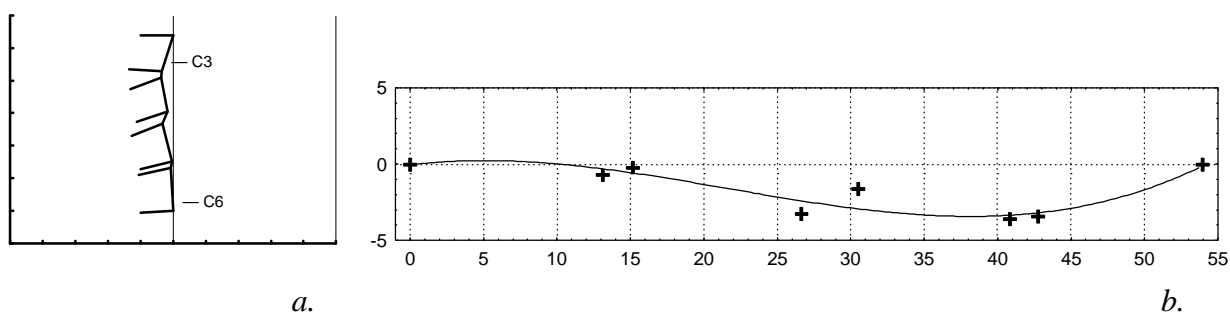


Figure 84

Segments vertébraux de Régourdou. Empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux, depuis le corps vertébral de C6 jusqu'au corps vertébral de C3 inclus. a., Empilement: une graduation = 10 mm. b., Coordonnées de l'empilement et ajustement polynomial de degré 3. En abscisses, hauteur de la pile ; en ordonnées, déviation par rapport à l'axe.

6.1.3. Shanidar 2

A. Corps vertébraux

Les quatre corps vertébraux C6 à C3 peuvent être empilés pour Shanidar 2. Leur morphologie détermine un profil de 48 mm de hauteur qui dessine une légère cyphose, dont la flèche maximale n'excède pas 2 mm. L'angle qui soutient les plateaux inférieur de C6 et supérieur de C3 tels qu'il sont orientés dans l'empilement est de -20.6° , et diffère donc très peu de la moyenne déterminée pour l'ensemble des profils de l'échantillon de référence, laquelle est égale à -17.3° (figure 91).

C'est une régression polynomiale de degré 2 qui décrit de manière optimale l'empilement. En dépit de la très faible convexité du profil, le coefficient du terme de degré 2 est très significatif: $p = 0.0046$. L'ajout d'un terme de degré 3 n'augmenterait pas la valeur descriptive de l'ajustement: $p = 0.16$.

La régression polynomiale quadratique s'ajuste parfaitement, avec une corrélation très haute $r = 0.9997$ et une erreur-type de l'estimation très faible, de 0.037 mm.

Son équation est:

$$y = -0.0412 + 0.137 \cdot x - 0.0029 \cdot x^2$$

La longueur développée du profil est de 48 mm, ce qui implique un indice de courbure très élevé de 99.8 %.

La variation de la courbure est symétrique autour du sommet de l'empilement, où elle atteint une valeur extrême de $-5.8 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. A la base et au sommet de l'empilement, elle est de $-5.6 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. Elle est donc, en définitive, très constante tout au long du profil. Ces valeurs la situent à l'extrême de la variabilité observée de l'échantillon dans le sens de la cyphose, mais à l'intérieur de l'intervalle de tolérance estimé de la population (figure 95).

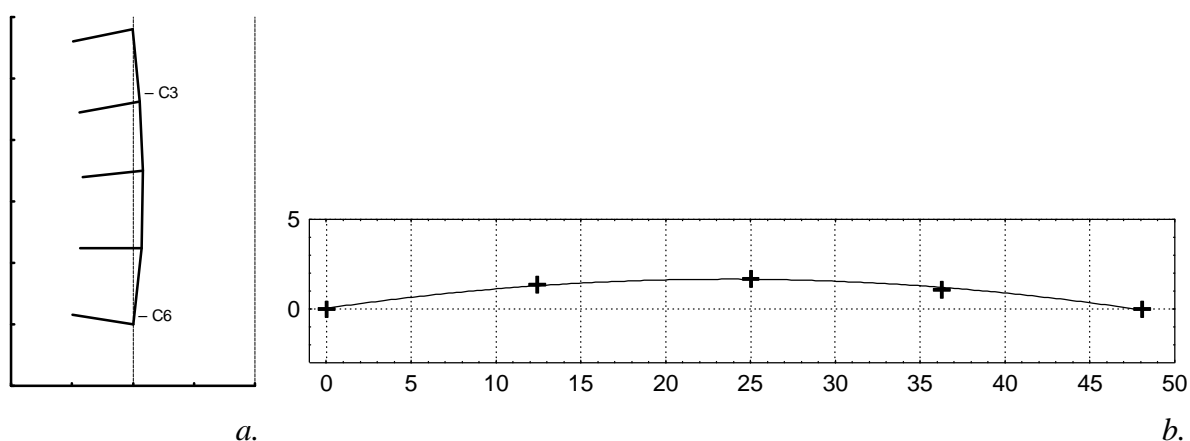


Figure 85

a., Empilement des corps vertébraux cervicaux du squelette de Shanidar 2, de C6 jusqu'à C3 inclus. Echelle: une graduation = 10 mm. b., Coordonnées de l'empilement et ajustement polynomial de degré 2. Une graduation = 1 mm.

B. Corps vertébral et espace intervertébral de C3

Le seul espace intervertébral qui peut être déduit à partir des restes vertébraux de Shanidar 2 est celui situé entre l'axis et C3. L'information qui peut en être déduite est donc très limitée. Lorsqu'il est superposé au corps vertébral de C3, les deux éléments ont une hauteur en projection de 15 mm, dont 11.8 mm correspondent au corps vertébral et 3.2 mm à l'espace intervertébral en projection (figure 86).

Calculer un ajustement sur ces trois points n'aurait aucun sens. L'angulation déterminée par ces éléments est de -13.5° . La moyenne de l'échantillon est de 6.3° , c'est-à-dire dans le sens de la lordose, mais la valeur de Shanidar est incluse dans la variabilité (figure 94).

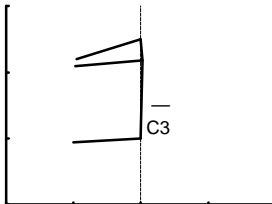


Figure 86

Shanidar 2. Empilement de l'espace intervertébral et du corps vertébral de C3. Echelle: une graduation = 10 mm. Rappel: La longueur des segments représentant les côtés supérieur et inférieur des quadrilatères et permettant de visualiser leur orientation est arbitraire.

6.1.4. La Chapelle-aux-Saints

A. Corps vertébraux

Les quadrilatères représentant les corps vertébraux de La Chapelle-aux-Saints peuvent être calculés pour l'étage cervical à partir de C4 dans le sens cranio-caudal. A l'étage thoracique, la forme des deux premiers segments est aussi conservée.

L'empilement des corps vertébraux de T2 à C4 a une hauteur de 81.8 mm (figure 87). Il dessine dans l'ensemble une cyphose, dont la flèche maximale, située au niveau de C6, est de 5 mm. L'angulation entre la base et le sommet de cet empilement est de -24.3° , la moyenne de l'échantillon étant de -21.4° , sans différence significative entre les sexes. Ceci situerait La Chapelle-aux-Saints dans la variabilité actuelle (figure 91).

Il faut noter sur le profil ce qui pourrait être l'amorce d'une inversion de courbure en C4 ou C5, mais dont il n'est pas possible d'affirmer qu'elle soit significative.

Une régression quadratique permet en effet un ajustement optimal à l'empilement. L'hypothèse nulle pour le coefficient du terme de degré deux y est très significativement rejetée ($p = 1.04 \cdot 10^{-3}$), tandis qu'elle ne peut l'être pour le coefficient du terme de degré 3 dans le polynôme du même ordre ($p = 0.43$).

L'équation de la régression est :
$$y = -0.1096 + 0.2501 \cdot x - 0.003025 \cdot x^2$$

Elle donne un ajustement précis, avec $r = 0.973$, et une erreur-type de l'estimation de 0.6 mm. Elle permet de calculer une longueur développée de 0 à 81.8 (hauteur du profil) qui est égale à 82.6 mm, soit un indice de courbure de 99 %.

La courbure, symétrique autour de l'extremum de la cyphose, est pratiquement constante, comprise entre $-5.5 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$, valeur aux extrémités de l'empilement (T2 et C4), et $-6 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$, valeur au niveau du sommet de la cyphose, situé en C7, à 40 mm de la base. Ces valeurs sont pratiquement identiques à celles qui ont été déterminées pour Shanidar 2 au niveau des segments C3 à C6. Elles sont encore, pour les segments C7 à T2, comprises dans la variabilité de la population estimée à partir de celle de l'échantillon de référence, bien que situées (si l'on excepte le cas d'un seul profil de l'échantillon qui présente de valeurs plus fortes en cyphose) à la limite de la variabilité observée dans ce dernier (figure 95).

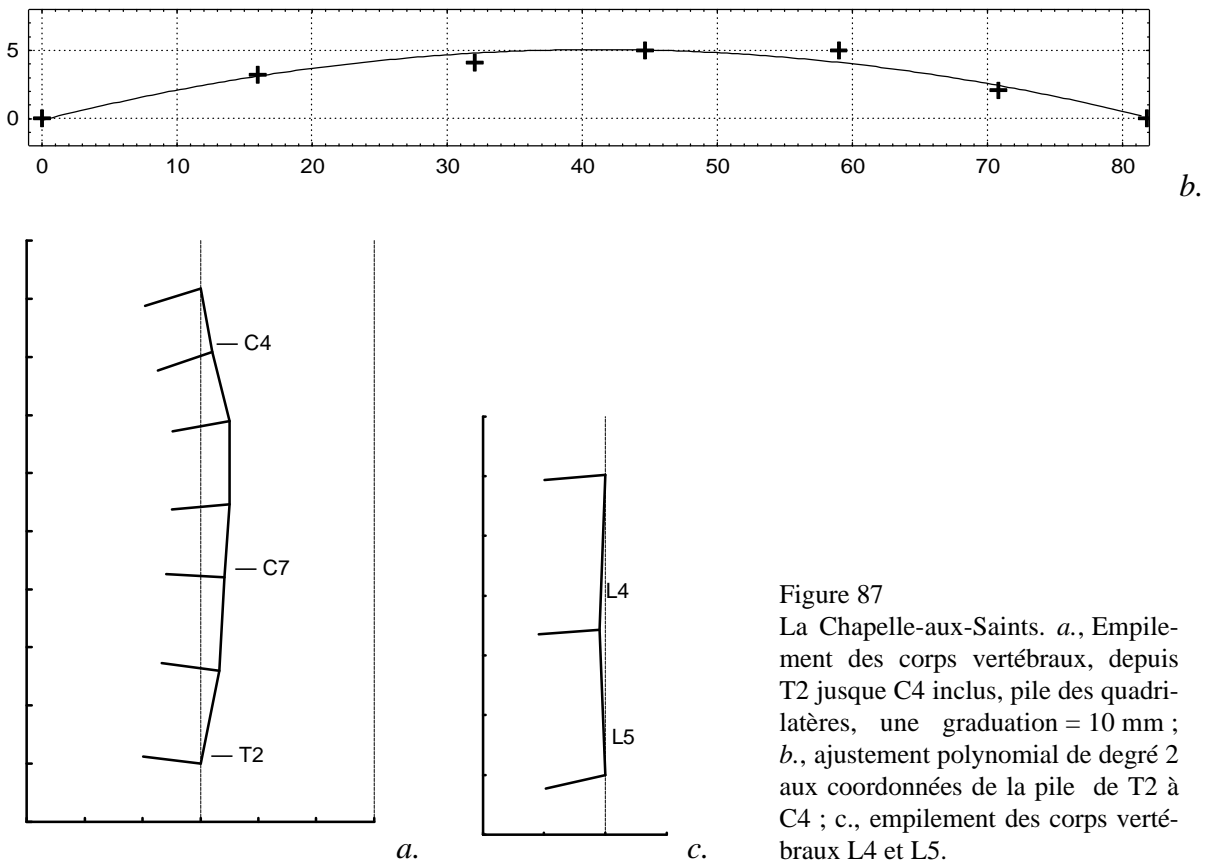


Figure 87
La Chapelle-aux-Saints. *a.*, Empilement des corps vertébraux, depuis T2 jusque C4 inclus, pile des quadrilatères, une graduation = 10 mm ; *b.*, ajustement polynomial de degré 2 aux coordonnées de la pile de T2 à C4 ; *c.*, empilement des corps vertébraux L4 et L5.

Il est encore possible de calculer les quadrilatères de L4 et L5 et de les superposer. La hauteur de ces deux éléments empilés est de 50 mm. Le calcul d'un ajustement polynomial n'aurait pas de sens, et c'est dans ce cas la mesure d'angle qui reste la plus informative. Elle lordotique, avec une valeur de $+ 8.2^\circ$. La lordose est en fait déterminée uniquement par L5 dont les plateaux soutiennent un angle de $+ 8.6^\circ$. Les plateaux de L4 sont donc pratiquement parallèles, l'angle mesuré est de -0.3° . L'angulation entre L4 et L5 pour La Chapelle-aux-Saints est comprise dans l'intervalle de confiance de l'angle moyen du sexe masculin.

B. Empilements alternés

Les espaces intervertébraux compris entre C4 et T2 peuvent être déduits. L'empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux depuis le corps vertébral de T2 jusqu'à celui de C4 peut donc être calculé (figure 88).

La hauteur de la pile des quadrilatères est de 89.9 mm. Elle dessine nettement une lordose et s'écarte de 10.4 mm. Le profil montre une certaine irrégularité avec des espaces intervertébraux C6 et C7 nettement lordotiques. Il faut prendre en considération le remaniement important de plusieurs surfaces articulaires postérieures par des processus dégénératifs. La modification de la morphologie articulaire et l'importante ostéophytose sont susceptibles d'avoir affecté en particulier la forme des espaces intervertébraux C5, T1 et T2.

Les plateaux supérieurs du corps vertébral de C4 et inférieur du corps vertébral de T2 forment entre eux un angle à sommet postérieur (lordose) de $+15.7^\circ$. Cette valeur, comparée à celles calculées dans l'échantillon pour la même section T2-C4, située La Chapelle-aux-Saints dans les plus

fortes angulations de lordose (figure 94). Le taux d'éloignement par rapport à l'échantillon masculin est $\tau = 88 \%$, et par rapport à l'ensemble des profils, $\tau = 95 \%$ ³.

La recherche du degré optimal de l'ajustement polynomial a amené à calculer une régression quadratique pour décrire de manière quantitative l'allure du profil. L'hypothèse de nullité du coefficient du terme de degré 2 y est en effet nettement rejetée: $p = 3.2 \cdot 10^{-5}$. Dans la régression cubique, le terme de degré 3 n'est pas significativement différent de zéro: $p = 0.19$.

La régression quadratique montre une bonne qualité d'ajustement, avec un coefficient de corrélation $r = 0.931$, et une erreur-type de l'estimation de 1.54 mm. Le résidu maximal (en valeur absolue) est cependant de -2 mm.

L'équation de la fonction ajustée est:
$$y = 1.643 - 0.459 \cdot x - 0.005 \cdot x^2$$

La longueur développée du profil calculée au moyen de cette fonction est de 92.6 mm, soit un indice de courbure égal à 97 %.

La fonction définissant la valeur de courbure est symétrique autour de l'extremum. La courbure est comprise entre $+7.6 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ au niveau de la base de T2, et $+9.9 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ à 47 mm de la base, au niveau du corps vertébral de C7 qui marque un extremum de courbure. Au niveau des deux segments thoracique, cela situe La Chapelle-aux-Saints au niveau du seuil de tolérance à 95 % de l'échantillon (figure 96). La variabilité de l'échantillon étant plus importante à l'étage cervical, elle y inclut les valeurs de courbure de La Chapelle-aux-Saints.

Il est encore possible de calculer l'espace intervertébral du segment assigné à T8 ou plus probablement T9. Superposé au corps vertébral sous-jacent, les deux éléments déterminent une angulation, dans le sens de la lordose, de $+1.8^\circ$. La moyenne de l'échantillon est -0.7° . La valeur de La Chapelle-aux-Saints correspond à un taux d'éloignement $\tau = 8\%$.

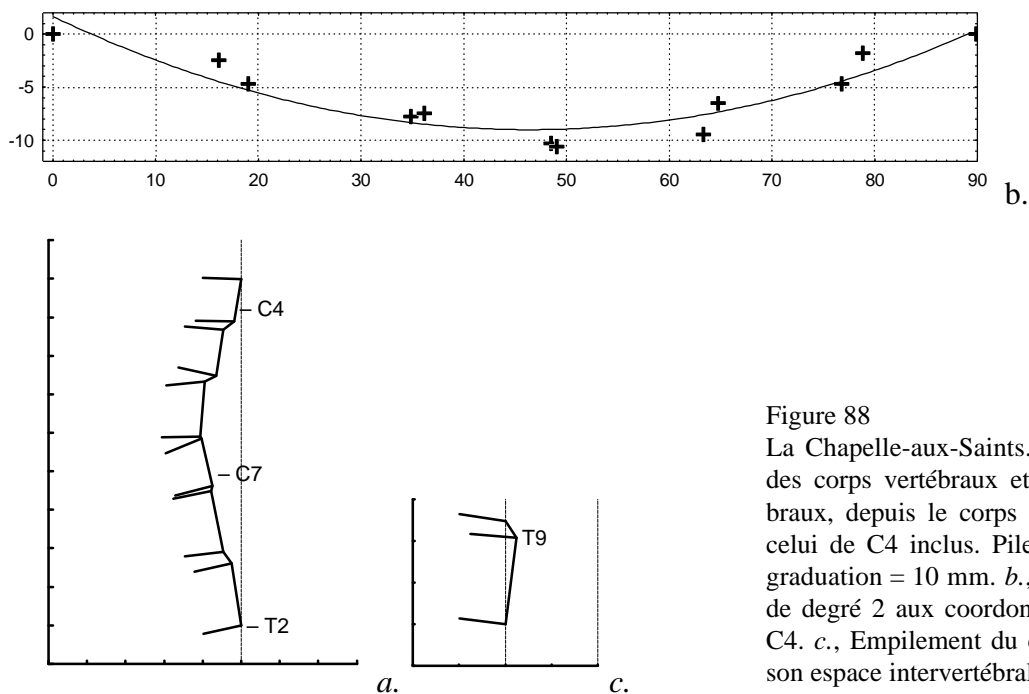


Figure 88
La Chapelle-aux-Saints. *a.*, Empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux, depuis le corps vertébral de T2 jusqu'à celui de C4 inclus. Pile des quadrilatères. Une graduation = 10 mm. *b.*, Ajustement polynomial de degré 2 aux coordonnées de la pile de T2 à C4. *c.*, Empilement du corps vertébral T9 et de son espace intervertébral.

³ Rappel, taux d'éloignement: $\tau = 1 - p_{t,v,2} \left(\frac{|x - m|}{s \cdot \sqrt{1 + 1/n}} \right)$

6.1.5. La Ferrassie 1

A. Corps vertébraux

Comme pour Régourdou et Shanidar 2, les corps vertébraux C6 à C3 du squelette de La Ferrassie 1 forment une série conservée continue qui permet de calculer le profil déterminé par leur morphologie.

L'empilement a une hauteur de 48.4 mm, et est pratiquement rectiligne. Le point le plus éloigné de l'axe est celui marquant la limite C3-C4, son abscisse est de -1.4 mm seulement.

Cependant, l'angle mesuré entre C3 et C6 est de -4.1° , c'est-à-dire légèrement cyphotique. Cette valeur inclut La Ferrassie 1 dans la variabilité de l'échantillon, à l'intérieur même de l'intervalle de confiance de l'angle moyen, et avec un taux d'éloignement de 75 % par rapport à la moyenne qui, à -17.3° , est cependant nettement cyphotique.

La détermination du degré optimal de l'ajustement doit s'effectuer sans qu'une linéarité éventuelle n'introduise un biais dans le test de signification pour le coefficient du terme de degré maximal. Comme dans le cas de Régourdou, l'empilement a donc été recalculé en imposant une angulation arbitraire de 45° à la base de C6, et sans effectuer la rotation secondaire qui permet normalement l'ajustement sur l'axe.

Une régression cubique, déterminant une inflexion au niveau de C5, serait susceptible de s'ajuster à cet empilement, avec un résidu maximal de 0.5 mm et un coefficient de corrélation $r = 0.999$. Cependant, la valeur du coefficient du terme de degré 3 n'y apparaît pas significativement différente de la valeur nulle ($p = 0.28$). Il en est de même pour le coefficient du terme de degré 2 dans la régression quadratique ($p = 0.6$). La régression linéaire est donc bien la seule qui semble propre à s'ajuster à l'empilement, avec un coefficient qui est, évidemment, très significativement différent de zéro: $p = 9 \cdot 10^{-5}$.

Le corps vertébral de T2 est par ailleurs conservé, mais étant isolé dans la série vertébrale, la seule information qui peut en être tirée est l'angulation réciproque de ses plateaux. Elle est orientée dans le sens de la cyphose et égale à -5.8° . Cette valeur est très proche de celle de la moyenne de l'échantillon, qui est de -3.9° . Le taux d'éloignement de La Ferrassie est de -22 %.

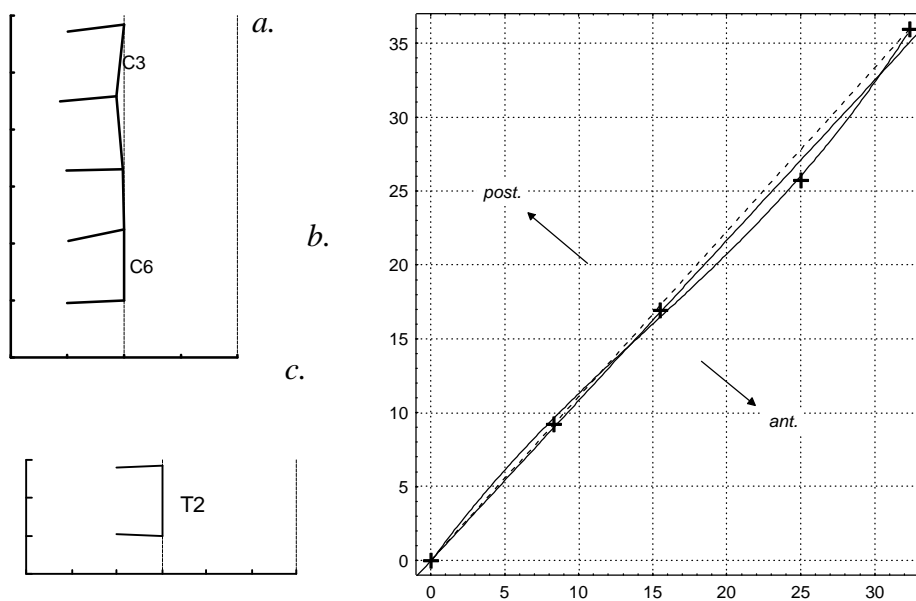


Figure 89

La Ferrassie 1.

a., Empilement des corps vertébraux de C6 à C3. Une graduation = 10 mm.

b., Coordonnées de l'empilement lorsqu'une angulation de 45° est imposée au côté inférieur de C6, base de la pile. La ligne discontinue est l'axe de la pile qui joint le sommet postéro-inférieur de C6 au sommet postéro-supérieur de C3; la courbe continue représente la régression cubique; la droite continue la régression linéaire, seule significative. c., Corps vertébral T2, orientation de ses plateaux.

B. Empilements alternés

Il n'est malheureusement pas possible d'établir entre C6 et C3 une série continue alternant les quadrilatères représentant les corps vertébraux et ceux représentant les espaces intervertébraux. Un premier empilement est calculable qui comprend le corps vertébral C6, son espace intervertébral, et le corps vertébral C5. Un autre empilement comprend les corps vertébraux C4 et C3 et les espaces intervertébraux correspondants.

L'empilement de C5 à C6 a une hauteur de 27.9 mm. Il est pratiquement linéaire, avec une abscisse maximale de -0.6 mm. Sur quatre points le calcul d'un modèle d'ajustement n'aurait pas de sens et il faut considérer que les trois éléments ne déterminent, à eux seuls, aucune courbure. L'angulation entre la base et le sommet de la pile indique cependant une valeur en lordose de + 6.2°. Par rapport aux moyennes masculine et féminine de l'échantillon, en cyphose, respectivement de -3.3° et -9.7°, l'angle déterminé par l'empilement se situe encore dans la variabilité, mais à sa limite pour ce qui est du sexe féminin, avec des taux d'éloignement $\tau_{\text{sexe M}} = 42\%$ et $\tau_{\text{sexe F}} = 93\%$, soit, par rapport à l'ensemble, un taux $\tau = 63\%$.

L'empilement depuis le corps vertébral de C4 jusqu'à l'espace intervertébral de C3 a une hauteur de 27.6 mm. La flèche maximale est de -2.3 mm. Il décrit donc une lordose, mais l'angle qu'il détermine est cependant légèrement cyphotique, égal à -7°. Il est inclus largement dans la variabilité de l'échantillon, avec un taux $\tau = -57\%$.

La régression quadratique semble s'ajuster très correctement au profil, mais elle doit être considérée avec réserve car le coefficient du terme de degré 2 n'est pas significatif au seuil $\alpha = 0.05$, puisque $p = 0.16$. Le coefficient de corrélation est faible: $r = 0.838$. L'erreur-type de l'estimation est faible cependant, égale à 0.77 mm.

L'équation de la régression est:

$$y = 0.036 - 0.254 \cdot x - 0.008 \cdot x^2$$

Elle détermine une longueur curviligne de 27.9 mm, soit un indice de courbure de 99.2 %.

La courbure varie peu, elle est de $15 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ à la base du profil, passe par une valeur maximale de $17 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ au niveau du corps vertébral de C3 à l'abscisse 16 mm, et retombe à $16 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ au sommet du profil. Ces valeurs situent La Ferrassie dans l'intervalle de tolérance de l'échantillon (figure 96).

Il est enfin possible de calculer l'espace intervertébral du segment T2 et de le superposer au quadrilatère représentant le corps vertébral correspondant. Les deux éléments déterminent un angle en cyphose de -9.1°, la moyenne de l'échantillon pour ces deux éléments étant de -3.5°. Cette valeur d'angle est largement comprise dans la variabilité, avec un taux d'éloignement $\tau = -47\%$.

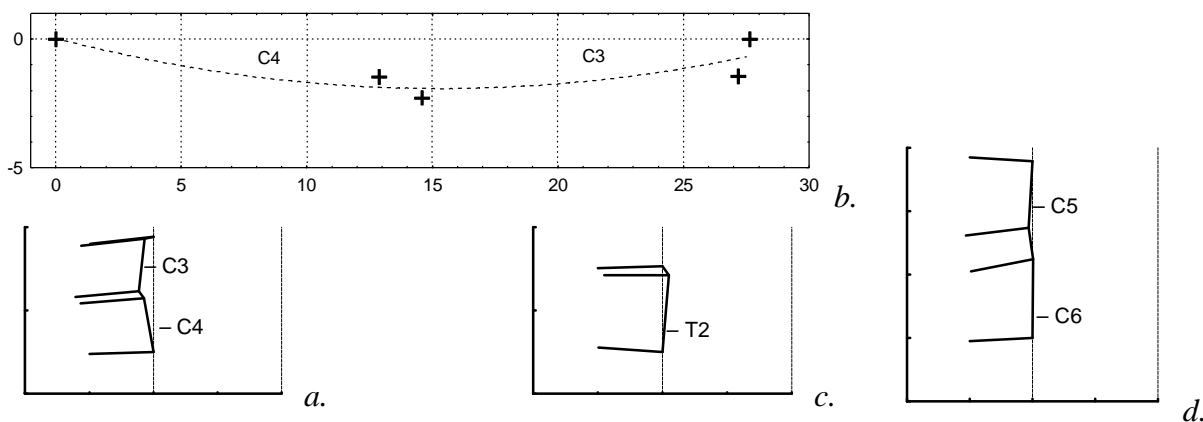


Figure 90

Empilements alternés pour La Ferrassie. a., Empilement depuis le corps vertébral de C4 jusqu'à l'espace intervertébral de C3. b., Coordonnées de l'empilement de C4 à C3 et tracé de la régression quadratique. c., Empilement depuis le corps vertébral de C6 jusqu'à celui de C5. d., Empilement du corps vertébral de T2 et de son espace intervertébral.

6.2. Comparaison des angulations, entre néandertaliens et par rapport à la variabilité actuelle

6.2.1. Empilements des corps vertébraux

A. Angulations des empilements calculables

Au niveau des segments les plus crâniens de l'étage cervical, la pile des corps vertébraux C3 à C6 (inclus) peut être calculée pour quatre néandertaliens: La Ferrassie 1, Kébara, Shanidar 2, et Régourdou. L'angulation mesurée entre la base et le sommet de l'empilement est respectivement, pour ces fossiles, de: -4.1° , -13.6° , -20.6° , -21.8° (figure 91). Ces valeurs faiblement ou franchement cyphotiques sont largement incluses dans la variabilité de l'échantillon, dont l'étendue est comprise entre $+4.5^\circ$ et -32.4° , et dont la moyenne est de -17.3° (intervalle de confiance: $\pm 4.7^\circ$).

Cette constatation est encore valable quand l'élément C3 est retiré de la mesure pour permettre la comparaison de La Chapelle-aux-Saints. De C4 à C6 donc, on note encore la faible valeur trouvée pour La Ferrassie 1 (-2.6°), et la concentration de celles des autres sujets: La Chapelle-aux-Saints (-12.2°), Kébara (-16.7°), Régourdou (-17.6°), Shanidar 2 (-19.2°). L'angle moyen n'est pratiquement pas différent de celui déterminé en incluant le segment C3: il est de -15.8° .

La charnière cervico-thoracique définie de C4 à T2 est la série la plus complète qui peut être calculée pour La Chapelle-aux-Saints. La valeur de son angulation peut être confrontée à celle de Kébara. Cette dernière, aussi dans le sens de la cyphose, est un peu plus faible, de -19.1° contre -24.3° pour La Chapelle-aux-Saints. Elles sont toutes les deux largement comprises dans la variabilité actuelle, telle que peut la représenter l'échantillon, dont l'étendue pour ces valeurs est comprise entre -6.3° et -63.9° . L'angle moyen pour l'ensemble est très proche de la valeur de La Chapelle-aux-Saints: -29° .

Au niveau thoracique, plusieurs corps vertébraux isolés sont conservés. La valeur de leur comparaison est limitée. L'angulation réciproque des plateaux de T1 est de -2.5° pour Kébara et de -4.7° pour La Chapelle-aux-Saints, valeurs pratiquement égales à la moyenne, en cyphose, de -5.8° .

Le corps vertébral T2 de La Chapelle-aux-Saints décrit un angle légèrement lordotique ($+0.6^\circ$), ce qui ne l'exclut pas de la variabilité observée de l'échantillon dont l'angle moyen est de -3.9° , avec un intervalle de confiance compris entre -1.2° et -6.6° .

Enfin, le dernier segment thoracique apparaît situé, pour Kébara comme pour Régourdou, à l'extrémité de la variation observée, avec des valeurs fortes en cyphose, de -11.3° et -8.4° respectivement, contre un maximum observé, dans ce sens, de -10.5° pour l'échantillon, et une moyenne de -3.9° . Cette mesure calculée à partir de radiographies a une valeur maximale de -14° dans un échantillon de 100 sujets sains (STAGNARA, 1985).

Les angulations des segments lombaires préservés de La Chapelle-aux-Saints peuvent enfin être comparées à celles déterminées pour Kébara (figure 92). Comme au niveau du dernier segment thoracique, l'angulation des plateaux de la deuxième lombaire, pour les deux fossiles dans le sens de la cyphose, appartient à l'extrémité de la variabilité observée. Elle est de -5.7° pour La Chapelle-aux-Saints et de -8.2° pour Kébara, tandis que dans l'échantillon, un certain nombre de sujets (surtout féminins) ont à ce niveau une angulation lordotique, avec un maximum de $+3.4^\circ$, et un minimum de -8.4° pour la cyphose (maximum dans ce sens). L'angle moyen est de -1.4° . L'échantillon radiologique déjà cité présente au niveau de ce segment une valeur maximale en cyphose de -11° .

L'angle défini par l'empilement des deux derniers segments lombaires définit pour ces mêmes sujets une angulation en lordose pratiquement égale à la moyenne du groupe masculin ($+13^\circ$), et incluse dans son intervalle de confiance (de $+6.8^\circ$ à $+12.3^\circ$). L'angulation de Kébara est de $+10.8^\circ$, et celle de La Chapelle-aux-Saints de $+8.2^\circ$. Dans l'échantillon, cette angulation présente une différence sexuelle significative, l'intervalle de confiance du sexe féminin ($+15.2^\circ$ à $+20.4^\circ$) ne recoupant pas celui du sexe masculin.

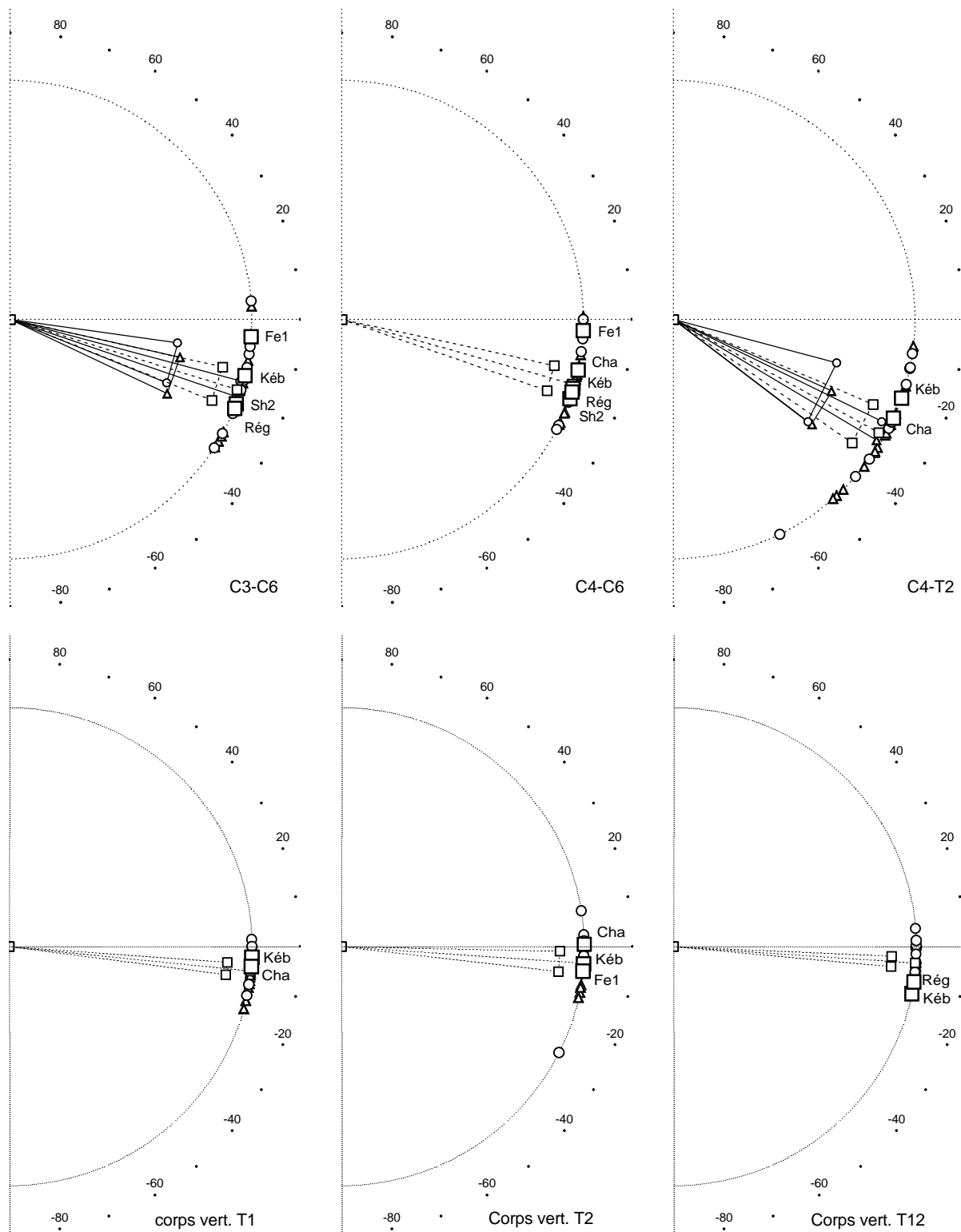


Figure 91

Angles interceptant les empilements des **corps vertébraux**. Comparaison des valeurs des **néandertaliens** à *Spitalfields*. Les angles représentés sont ceux calculables et ceux permettant la comparaison de plusieurs individus: de C3 à C6, de C4 à C6, de C4 à T2, corps vertébraux de T1, T2 et T12. Δ , hommes ; \circ , femmes, valeurs individuelles, angles moyens et intervalles de confiance ; - -□- -, *idem* pour l'ensemble des individus ; □, valeurs des néandertaliens: **Fe1**, La Férrassie 1 ; **Cha**, La Chapelle-aux-Saints ; **Rég**, Le régourdou ; **Sh2**, Shanidar 2 ; **Kéb**, Kébara. Valeurs négatives: angles à sommet antérieur. La longueur du segment représentant l'angle moyen est égale à r ($0 \leq r \leq 1$). Graduation: 10° . Les intervalles de confiance de chaque sexe ne sont pas représentés lorsqu'ils diffèrent peu.

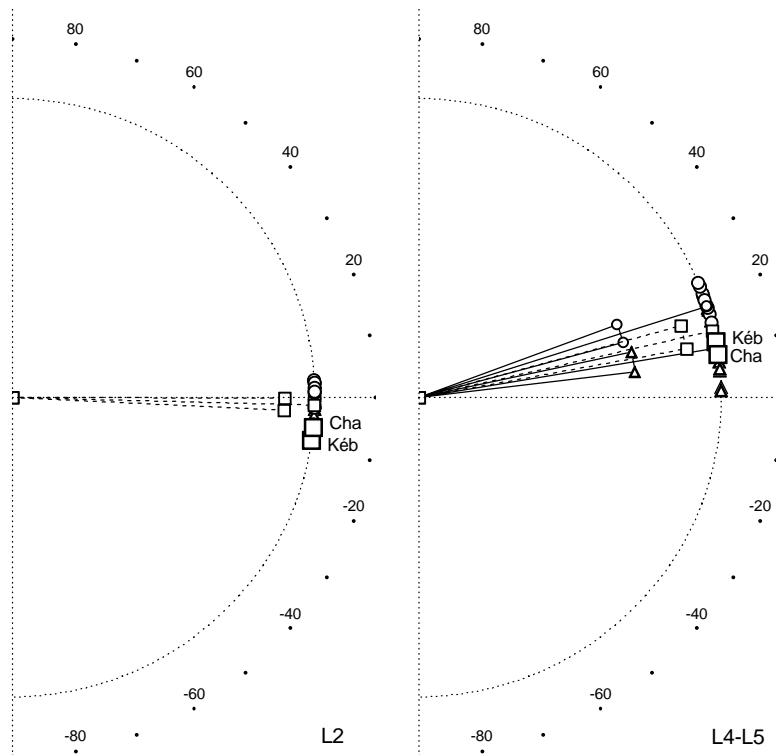


Figure 92

Angles interceptant les empilements des **corps vertébraux**. Comparaison des valeurs des **néandertaliens** à *Spitalfields*. Les angles représentés sont ceux calculables et ceux permettant la comparaison de plusieurs individus: corps vertébral de L2 et empilement des corps vertébraux L4 et L5. Δ , hommes ; \circ , femmes, valeurs individuelles, angles moyens et intervalles de confiance ; - \square -, *idem* pour l'ensemble des individus ; \square , valeurs pour La Chapelle-aux-Saints (**Cha**) et pour Kébara (**Kéb**). Valeurs négatives: angles à sommet antérieur. La longueur du segment représentant l'angle moyen est égale à r ($0 \leq r \leq 1$). Graduation: 10° . Les intervalles de confiance de chaque sexe ne sont pas représentés pour L2 car ils se superposent presque.

B. Angulation des corps vertébraux de Kébara

Les mesures des angles impliqués par un ensemble de segments adjacents (tels que les angles lombaire, thoracique ou cervical) ont montré que Kébara se situait à l'intérieur de la variabilité de l'échantillon de référence masculin. S'il est apparu que de telles valeurs étaient plus informatives que les angulations individuelles de chaque segment, il est cependant intéressant de situer ces dernières par rapport à la variabilité actuelle, et particulièrement du point de vue de leurs modalités de variation au long de la colonne.

La confrontation des angulations des corps vertébraux trouvées pour Kébara avec la variabilité déterminée dans l'échantillon masculin de *Spitalfields* montre que celle-ci comprend largement les valeurs du néandertalien pour la majorité des segments (figure 93 a.). Il faut toutefois exclure de cette remarque les segments C7 et T9 dont l'angulation est à sommet postérieur tandis l'échantillon montre en moyenne une angulation à sommet antérieur, mais avec une variabilité à cheval sur la valeur nulle (limite inférieur de l'intervalle de tolérance et valeur minimale). A l'opposé, les segments T10, T12 et L3 ont des valeurs qui se situent dans la partie haute de la variabilité, excédant à la fois les maxima observés et le seuil de tolérance à 95 %.

Les angulations mesurées de T4 à L5 par COSTANZO et collaborateurs (STAGNARA, 1985), pour 100 individus des deux sexes, et sur des radiographies de profil, donnent des valeurs très proches de celles déterminées sur l'échantillon de *Spitalfields*. Les moyennes ne diffèrent pas de plus de 1.9° , valeur atteinte en T10 et qui correspond au seul segment montrant une différence significative des moyennes: $p = 0.03$. A l'exception des segments T11 et L2, l'échantillon de Costanzo décrit cependant une variabilité légèrement supérieure. L'amplitude des intervalles de tolérance est plus grande en moyenne de 3.5° et la différence atteint 5.9° en T7. Au niveau de plusieurs segments, l'hypothèse d'égalité des variances est rejetée: T5, T7, T8, T12 et L4 ($\alpha = 0.05$).

Par rapport à l'échantillon de Costanzo, les angulations de Kébara ne se trouvent à l'extérieur de la variabilité que pour deux segments: T9 et L3 (figure 93 b.). La valeur en T9 s'écarte du

minimum, et du seuil inférieur à $\alpha = 0.05$, de seulement 2° , tandis que les minima observés dans l'échantillon lui-même peuvent s'en écarter de 9° (en T8), et les maxima de 10° par rapport au seuil supérieur (en T9 précisément). En L3, la différence entre Kébara et le maximum est de 0.5° et 1.5° avec le seuil supérieur.

L'hypothèse d'une déformation taphonomique de l'angulation du corps vertébral de T9 ne peut être écartée, d'autant plus que la morphologie du plateau supérieur est altérée. Mais cette altération ne semble pas avoir affecté l'orientation du plateau supérieur. Les variations irrégulières qui sont rencontrées dans les valeurs de Kébara au niveau thoracique sont tout à fait comparables à celles observées pour *Spitalfields* et le changement de signe des valeurs pour un ou deux segments, c'est-à-dire l'inversion du sens de l'angulation, est retrouvé chez les **W** des sujets masculins (par exemple figure 52). Ces variations se manifestent sur des profils dont l'aspect général est cependant régulier. Ceci suggère fortement l'existence de compensations intervenant entre les différents segments, et préservant dans l'ensemble l'allure du profil déterminé par la pile des corps vertébraux. Les implications mécaniques fondamentales des corps dans la limitation des mouvements, la résistance aux contraintes et leur transmission (BONNEL et MOREL, 1990 ; PRIVAT *et al.*, 1990 ; TROISIER, 1992 ; PANJABI *et al.*, 1995 ; ROY-CAMILLE, 1994 ; SAILLANT *et al.*, 1994 ; HANDAL et SELBY, 1995 ; STOKES, 1995 ; HUSSON *et al.*, 1995 ; LAVASTE et ROBIN, 1995), sont des arguments de poids pour appuyer cette hypothèse. Elles sont susceptibles d'expliquer la nécessité de maintenir la variabilité des courbures impliquées par les corps vertébraux dans des limites physiologiques susceptibles de préserver la stabilité rachidienne (*Cf. discussions précédentes au chapitre Modalités de participation des corps vertébraux dans la détermination des courbures sagittales*). Dans le cas de la colonne de Kébara, il est intéressant de noter que si T9 se trouve légèrement hors de la variabilité mais du côté "inférieur" de celle-ci, les segments directement adjacents en direction caudale: T10, T11 et T12, se situent au niveau de ses limites supérieures. Si des problèmes de déformation taphonomique peuvent encore être invoqués pour T10, cela n'est pas le cas de T11 et T12. Les angles interceptant l'étage thoracique dans l'empilement des corps vertébraux ont par ailleurs montré que Kébara se situait dans les valeurs fortes de cyphose par rapport à la variabilité de l'échantillon, montrant par là que l'incursion de T9 dans les valeurs lordotiques est effectivement largement compensée pour l'ensemble de l'étage thoracique (figure 70 b.).

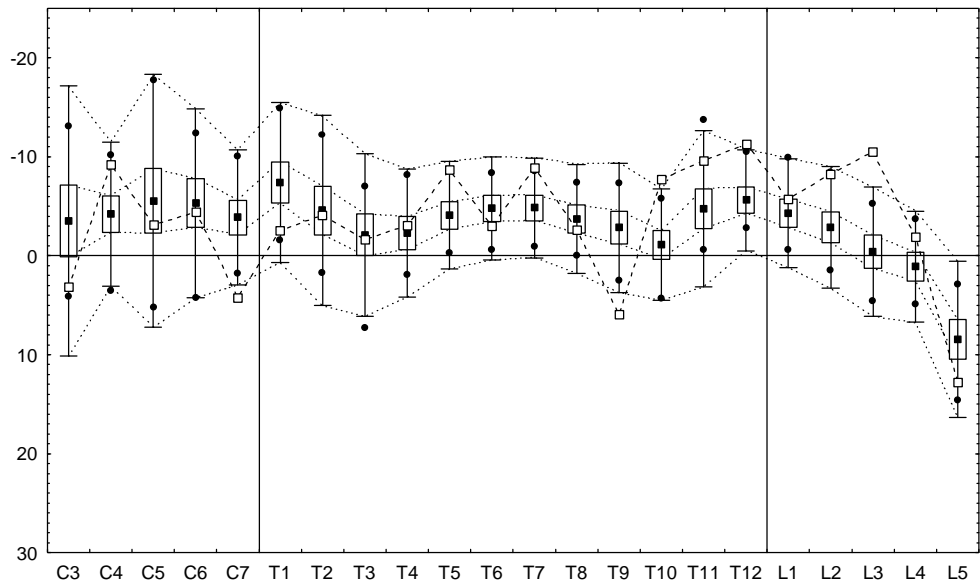
Les écarts rencontrés dans les variations d'angulation chez Kébara au niveau thoracique peuvent donc être en partie le résultat de déformations plastiques *post-mortem*. Cependant, il y a très probablement au niveau de T9 un phénomène physiologique de compensation de l'angulation des corps vertébraux. Le passage par une angulation extrême et opposée est compensé essentiellement par les segments sous-jacents. Cette configuration est d'ailleurs rencontrée dans l'échantillon de référence masculin. En tous les cas, la valeur de T9 n'est pas suffisante pour rejeter l'hypothèse d'égalité et conclure à une différence significative.

La décroissance régulière de l'angle à l'étage lombaire est présente dans tous les échantillons modernes rapportés dans la littérature (CUNNINGHAM, 1886; TURNER, 1886; AEBY, 1879; ANDERSON, 1883; HASEBE, 1913; MENDES, 1918; TROTTER, 1926; LANIER, 1939; DUPARC, 1942; MARTIN, 1893, 1959 ; ROSE, 1975 ; LATIMER et WARD, 1993 ; STAGNARA, 1985), où elle est notée le plus souvent sur la base de l'indice des hauteurs (*Cf. Chap. Variation de l'indice des hauteurs à l'étage lombaire*). Elle est variable quant au segment à partir duquel elle se manifeste, et aussi de celui au niveau duquel l'orientation de l'angle passe de la cyphose à la lordose. Dans le cas de Kébara, après une croissance continue de L1 à L3, la décroissance de l'angle s'amorce clairement en L3, et seul le dernier segment L5 possède une orientation en lordose. La décroissance commence aussi en L3 chez deux sujets masculins de *Spitalfields*, la présence d'une angulation en lordose en L5 seulement, se trouve chez trois sujets, et l'ensemble de la configuration "décroissance à partir de L3 et passage par zéro entre L4 et L5" se trouve chez un sujet. Le schéma de variation de l'angulation lombaire de Kébara existe donc dans l'échantillon, mais l'amplitude de la décroissance apparaît exceptionnelle pour Kébara. Elle est de 23° sur seulement 3 segments. Elle est le résultat

d'une forte valeur en cyphose de L3, égale à 20° , située à l'extérieur de la variabilité ($\tau = 99.5\%$ par rapport à l'échantillon masculin de *Spitalfields* et $\tau = 98.0\%$ par rapport à l'échantillon de Costanzo), et d'une angulation en L5 qui appartient au contraire à la partie inférieure de la variabilité et correspond donc à un angle relativement ouvert dans le sens de la lordose, de 13° ($\tau = -73.9\%$ par rapport à l'échantillon masculin de *Spitalfields* et $\tau = 65.2\%$ par rapport à l'échantillon de Costanzo). Cette amplitude de 23° est de fait égale à celle qui sépare, dans l'échantillon masculin de *Spitalfields*, le seuil de tolérance supérieur en L3 et celui inférieur en L5. Dans ce dernier échantillon, l'ensemble de la décroissance, qui peut s'amorcer dès T11, c'est-à-dire qui se développe sur 7 segments au lieu de 3 pour Kébara, reste inférieure à 22° .

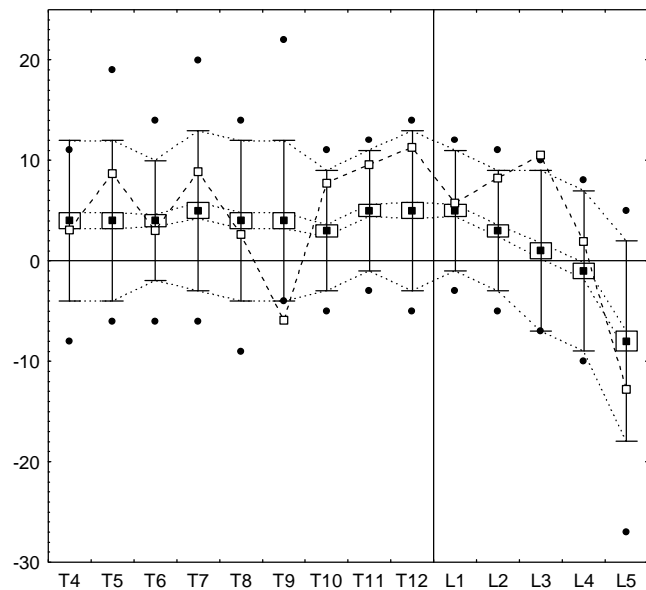
La possibilité d'une déformation plastique de ces segments peut être rejetée: la relation de contiguïté des éléments est particulièrement bien préservée dans ce secteur du squelette, l'espace physiologique laissé par le disque intervertébral L3 ayant même été fossilisé avec une bonne précision (ARENSBURG, 1991). Les corps vertébraux sont de plus parfaitement préservés.

L'hypothèse d'une configuration particulière de la morphologie vertébrale lombaire de Kébara, quant à sa participation à la détermination de la courbure sagittale à cet étage, doit donc être envisagée.



a.

Figure 93
 Angulation entre les plateaux supérieur et inférieur de chaque corps vertébral. Comparaison des valeurs calculées pour Kébara à celles de deux échantillons de référence: a., *Spitalfields*, sujets masculins, calcul à partir des mesures sur l'os sec, de C3 à L5; b., mesures sur radiographies de profil par COSTANZO et collaborateurs (STAGNARA, 1985), échantillon de 100 sujets sans affection pathologique vertébrale identifiée, de T4 à L5. Moyenne (■) entourée de son intervalle de confiance à $\alpha = 0.05$ (), de l'intervalle de tolérance estimé de la population au même seuil (), et des limites de l'étendue de l'échantillon, minimum et maximum (●). Les valeurs trouvées pour Kébara sont superposées (- - □ - -). Ordonnées: angles en degrés, échelle inversée en a. pour obtenir des représentations comparables.



b.

6.2.2. Empilements alternés

Si l'on excepte, dans le cas de la colonne vertébrale de Kébara, les étages thoracique (partiellement calculable) et lombaire, l'état de conservation des restes vertébraux des néandertaliens ne permettent pas de constituer un profil complet de chaque étage. Il faut donc comparer les angles interceptant les empilements calculables chez les néandertaliens aux mesures équivalentes dans l'échantillon de référence.

Les valeurs individuelles de ces angles, ainsi que les paramètres de statistiques angulaires ont donc été calculés dans l'échantillon de *Spitalfields*. Des angles plus partiels mais calculables pour plusieurs néandertaliens ont aussi été pris en compte. De cette manière, l'apparente redondance des résultats permet en fait la comparaison simultanée de plusieurs néandertaliens à l'échantillon de référence. Les portions d'empilements alternés considérés sont donc les suivantes (les éléments cités sont inclus :

- *Etage cervical:*
 - Le corps vertébral de C3 et son espace intervertébral.
 - Du corps vertébral de C4 au corps vertébral de C3.
 - Du corps vertébral de C5 au corps vertébral de C3.
 - Du corps vertébral de C6 au corps vertébral de C4.
 - Du corps vertébral de C7 au corps vertébral de C4.
 - Du corps vertébral de C6 au corps vertébral de C5.
- *Charnière cervico-thoracique:*
 - Du corps vertébral de T2 au corps vertébral de C4.
- *Etage thoracique:*
 - Le corps vertébral de T2 et son espace intervertébral.
 - Le corps vertébral de T9 et son espace intervertébral.
- *Pour Kébara seulement:*
 - Du corps vertébral de T12 au corps vertébral de T3.
 - Du corps vertébral de L5 à l'espace intervertébral de L1.

Les mêmes éléments sont donc repris plusieurs fois dans différents empilements afin d'exploiter de façon maximale celle apportée par les restes fossiles. Chacun de ces empilements partiels peut donc être calculé pour au moins un néandertalien.

- ✓ La troisième vertèbre cervicale et son espace intervertébral:

A *Spitalfields*, les moyennes des hommes et des femmes sont pratiquement confondues, elles sont légèrement positives (Figure 94) et les valeurs individuelles sont réparties de chaque côté de la valeur nulle (moyenne générale: + 6.3°). L'angulation de La Ferrassie est pratiquement nulle (-1.4°), celle de Shanidar 2 est légèrement cyphotique (-13.5°), les deux sont largement incluses dans la variabilité (étendue: -21° à 35°).

- ✓ Du corps de la troisième au corps de la quatrième vertèbre cervicale:

Les valeurs se distribuent autour de zéro, elles sont assez concentrées, $s = 9^\circ$ pour l'ensemble des individus (Figure 94). La variabilité féminine est légèrement plus forte: $s = 10^\circ$ contre $s = 8^\circ$ pour le sexe masculin. Le Régourdou présente une angulation en lordose (+ 17.6°) qui est proche du maximum observé (+ 22°).

✓ Du corps vertébral de C3 à celui de C6:

Une valeur masculine très élevée en lordose (+ 60°) augmente les paramètres de variabilité de l'ensemble (Figure 94). Ceux-ci sont cependant pratiquement égaux pour les deux sexes, et $s = 20^\circ$ pour l'ensemble. L'angle moyen est aussi très semblable, légèrement cyphotique, égal à -3° pour l'ensemble. Régourdou présente une angulation très faible dans le sens de la lordose, égale à $+2.6^\circ$.

✓ Du corps vertébral de C4 à celui de C6:

Les angles moyens sont négatifs et peu différentes entre les deux sexes, de -4.7° pour les hommes et de -12.6 pour les femmes (Figure 94). La Chapelle-aux-Saints montre une angulation pratiquement nulle en lordose de $+3.4^\circ$. Le régourdou présente une angulation, en cyphose cette fois, de -16.6° . Ce sujet illustre la compensation qui peut exister entre segments, puisque l'angle entre C3 et C4 est orienté dans le sens de la lordose, ce qui détermine un angle entre C3 et C6 pratiquement nul. La considération d'un trop petit nombre de segments, et plus encore la description métrique individuelle des vertèbres, conduit donc à des conclusions de portée limitée. Quant à Kébara, il décrit une angulation en lordose de $+12.4^\circ$ qui n'est outrepassée, mais fortement, que par un sujet déjà rencontré décrivant une lordose cervicale accusée ($+43.2^\circ$). Cette angulation est aussi plus forte que celle de La Chapelle-aux-Saints.

✓ Du corps vertébral de C4 à celui de C7:

Bien que les deux extrêmes de la variabilités soient représentés par un sujet de chaque sexe, un sujet féminin avec une cyphose de -52° et un sujet masculin avec une lordose de $+43^\circ$, les angles moyens diffèrent très peu (Figure 94). La moyenne pour l'ensemble des empilements est de -12.6° . La variabilité masculine apparaît en revanche légèrement plus forte, avec une dispersion $s = 22$ contre $s = 15$ pour les femmes.

Pour Kébara, c'est l'angle incluant le plus grand nombre de segments qui soit susceptible d'être calculé à l'étage cervical, il est de 29.7° . On peut de plus lui comparer celui de La Chapelle-aux-Saints, qui est de 16.9° . Les deux valeurs sont donc nettement lordotiques, situées au delà du seuil de confiance supérieur de l'angle moyen pour le sexe masculin, qui est de 5.4° , et outrepassées uniquement du point de vue de la variabilité observée de l'échantillon, par l'individu déjà signalé, qui a un angle de 43.3° .

✓ Du corps vertébral de C5 à celui de C6:

Cet angle permet de détailler le comportement de l'empilement de Régourdou qui avait montré des compensations importantes au niveau cervical supérieur, et surtout de comparer La Ferrassie (Figure 94). Les valeurs en lordose de Kébara ($+11.2^\circ$), La Chapelle-aux-Saints (5.1°) et La Ferrassie (6.2°) sont outrepassées par deux sujets de l'échantillon. La valeur de Régourdou, en cyphose, reste pratiquement inchangée (-17.8°) par rapport à c.C4-c.C6 (-16.6°). Par ailleurs, on note que quatre individus masculins ont des valeurs positives, dont deux sont supérieures à 20° , mais les angles moyens négatifs montrent déjà une la tendance au développement de la cyphose thoracique. La variabilité du groupe féminin est plus faible que celle du groupe masculin (respectivement: $s = 7^\circ$ contre $s = 15^\circ$).

✓ Du corps vertébral de C4 à celui de T2:

Pour cet angle de la charnière cervico-thoracique, encore une fois, aucune différence sexuelle significative ne peut être mise en évidence (Figure 94). Les angles moyens sont pratiquement identiques, en cyphose, et de -23.8° pour le sexe féminin et de -19.2° pour le sexe masculin, avec donc une légère déviation des valeurs masculins vers la lordose. C'est l'angle impliquant le plus grand nombre de segments qui puisse être calculé pour La Chapelle-aux-Saints, il est pour ce sujet de $+15.7^\circ$, c'est-à-dire nettement lordotique bien qu'incluant déjà deux segments thoraciques. Un sujet de l'échantillon a pour le même angle une valeur de $+18.9^\circ$, légèrement plus accentuée dans ce

sens. Le fait que l'angle soit lordotique ne signifie pas que la courbure *stricto sensu* soit orientée dans ce même sens sur toute la longueur du profil (Cf. dans la discussion « Problèmes d'interprétation des mesures d'angulation »).

✓ Le corps vertébral de T2 et son espace intervertébral:

La plus grande partie des valeurs sont négatives mais 6 sujets masculins et un féminin décrivent pour ce segments considéré isolément des angulations dans le sens de la lordose (Figure 94). L'angle moyen est cyphotique, à -3.5° . La Chapelle-aux-Saints décrit pour ce segment une faible angulation en lordose de 6.3° . Pour La Ferrassie, l'angle est dans le sens de la cyphose, avec une valeur de -9.4° .

✓ Le corps vertébral de T9 et son espace intervertébral:

L'angle moyen est très légèrement négatif, à -0.7° . Huit sujets décrivent une angulation positive (Figure 94). C'est aussi le cas de La Chapelle-aux-Saints avec un angle de $+1.8^\circ$. A titre de comparaison, Kébara décrit pour ce segment un angle légèrement négatif, c'est-à-dire en cyphose, de -1.8° . Les deux valeurs sont incluses largement dans la variabilité, puisqu'elles se situent à l'intérieur des bornes de l'intervalle de confiance de l'angle moyen: -3.7° et $+2.2^\circ$.

Les angulations de portions des empilements cervicaux permettent de constater que les valeurs sont en majorité dans le sens de la lordose au niveau de C3, et que l'angle moyen se déplace progressivement vers les négatifs (cyphose) quand des éléments plus caudaux sont ajoutés. Cet angle moyen donne assez peu d'information sur la variabilité s'il est le seul paramètre considéré car les valeurs de chaque signe se compensent.

Les néandertaliens appartiennent bien à la variabilité de l'échantillon. La morphologie vertébrale détermine pour le segment C3 de Shanidar 2 une angulation en cyphose. Il en est de même pour les segments cervicaux craniaux de La Ferrassie, de C3 à C4. La Chapelle-aux-Saints présente une lordose cervicale nette, mesurable de C4 à C7. Pour Régourdou, les compensations entre segments ont pour résultante une angulation pratiquement nulle lorsqu'elle est mesurée entre C3 et C6. Enfin, Kébara présente une lordose cervicale forte, mesurable de C4 à C7, avec une angulation appartenant à la partie supérieure de la variabilité.

La lordose de La Chapelle-aux-Saints est assez étendue en direction caudale car l'angle incluant la charnière cervico-thoracique, de C4 à T2, est encore orienté dans le sens de la lordose, à l'extrémité de la variation observée.

Les deux vertèbres thoraciques qui ont été isolées avec leur espace intervertébral respectif montrent une faible variabilité, avec un angle moyen très peu déplacé vers les valeurs négatives. Les représentations graphiques des empilements de la totalité des quadrilatères ont montré en effet que l'allure de la cyphose thoracique est très variable selon les individus. Les angulations indiquent que l'effet cumulatif de la morphologie des corps vertébraux et des espaces intervertébraux dans le dessin de la convexité postérieure, réalisée sur plus de dix segments (soit 20 éléments), semble difficilement réductible à l'échelle d'un seul corps vertébral et de son espace intervertébral à partir desquels il ne peut pas être estimé.

6.3. Comparaison des valeurs de courbure

Les statistiques descriptives des valeurs de courbure au niveau de chaque segment ont été calculées. De la même manière que pour le traitement conjoint des coordonnées des profils dans le plan, ce type d'analyse masque le schéma de variation au long des segments qui est associé à chaque colonne vertébrale, autrement dit le tracé de la fonction donnant la courbure en chaque point. La valeur de la courbure permet cependant une bonne description de l'allure du profil, et de façon assez indépendante du nombre d'éléments conservés.

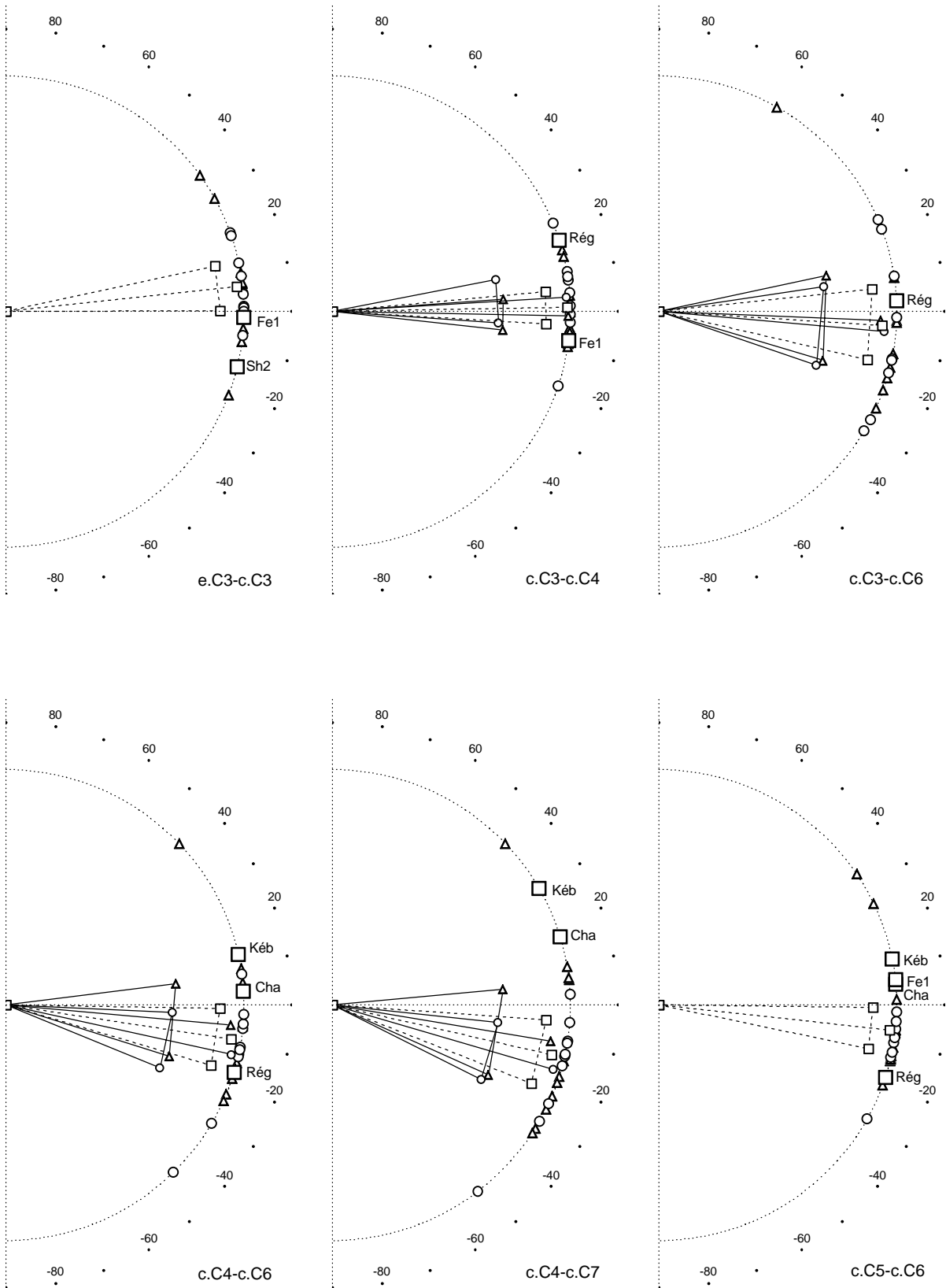
Les profils partiels ou complets obtenus pour les néandertaliens peuvent de cette manière être comparés à l'échantillon de référence. Leur taux d'éloignement a de plus été calculé afin de donner une description quantitative de la situation des néandertaliens. En effet, l'hypothèse de normalité de distribution de la courbure n'a pas été rejetée (Cf. « Calcul de la courbure »).

6.3.1. Courbures dans les empilements des corps vertébraux

Les profils obtenus par l'empilement des quadrilatères représentant les corps vertébraux donnent une distribution assez homogène des valeurs de courbure à chaque segment (figure 95 a.). Les points dessinent une bande plus large vers les extrémités, avec une étendue de $15 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ environ au niveau de la base de L5 et de $10 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ au niveau du côté supérieur de C3. L'étendue est plus réduite au niveau thoracique, égale à environ $5 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ au niveau de T9. Comme l'analyse des inflexions l'a mis en évidence, un grand nombre de points sont situés dans les valeurs positives (lordose) à l'étage lombaire, et même, cranialement, jusque T10. Le schéma d'ensemble est donc celui d'une décroissance, depuis des valeurs lombaires déplacées vers les ordonnées positives, et jusqu'au niveau thoracique moyen où toutes les valeurs sont négatives, puis d'une faible croissance définie surtout par le passage de plusieurs points dans les positifs.

Un des profils atteint des valeurs en cyphose plus fortes que le reste des empilements, avec un maximum, en valeur absolue, de $-11.2 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ en T3, tandis que la plus forte valeur observée dans ce sens au même niveau est de $-6.2 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ pour le reste des points. Il s'agit du sujet féminin n°438, « femme au foyer » décédée à l'âge de 56 ans. Les restes vertébraux présentent un parfait état de conservation et semblent exempts de pathologie. Aucune cunéiformisation des corps vertébraux n'a été observée. Les segments T1, T3, et particulièrement T2 ont une hauteur postérieure du corps vertébral élevée, en ce sens que la régularité de la croissance de cette mesure, depuis l'étage cervical inférieur jusqu'à l'étage lombaire supérieur, est rompue au niveau de ces trois segments. On a : $T2 > T3 > T4$. La hauteur antérieure au contraire montre une croissance régulière, ce qui indique qu'il ne s'agit pas d'une cunéiformisation du corps vertébral. Par conséquent, il n'y a pas lieu d'écarter cet individu comme pathologique d'autant que l'empilement alterné des corps vertébraux et des espaces intervertébraux détermine, par ailleurs, des courbures qui s'incluent largement dans la variabilité des autres profils de l'échantillon. Il faut considérer la morphologie de cette colonne, avec une forte hauteur postérieure de trois corps vertébraux adjacents, comme une variation qui est compensée par la forme des espaces intervertébraux.

Les valeurs de courbure calculées pour Shanidar 2 à l'étage cervical, bien qu'excédant de peu le minimum observé au niveau de la limite de C3, se situent à l'intérieur de l'intervalle de tolérance estimé de la population. Les taux d'éloignement par rapport à la moyenne de l'échantillon sont compris entre -78 %, valeur au niveau du côté inférieur de C6, et -85 %, au niveau des côtés inférieur et supérieur de C4. La limite de tolérance inférieure à 95 % de l'échantillon est à peu près constante de C3 à C6, entre $-7.3 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ et $-7.6 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$, tandis que la courbure de Shanidar est comprise entre $-5.6 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ et $-5.8 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. La morphologie des corps vertébraux détermine donc pour Shanidar 2, à l'étage cervical, une cyphose accentuée qui se situe parmi les valeurs fortes de la variabilité déterminée à partir de l'échantillon.



(Figure 94. Suite et légende page suivante)

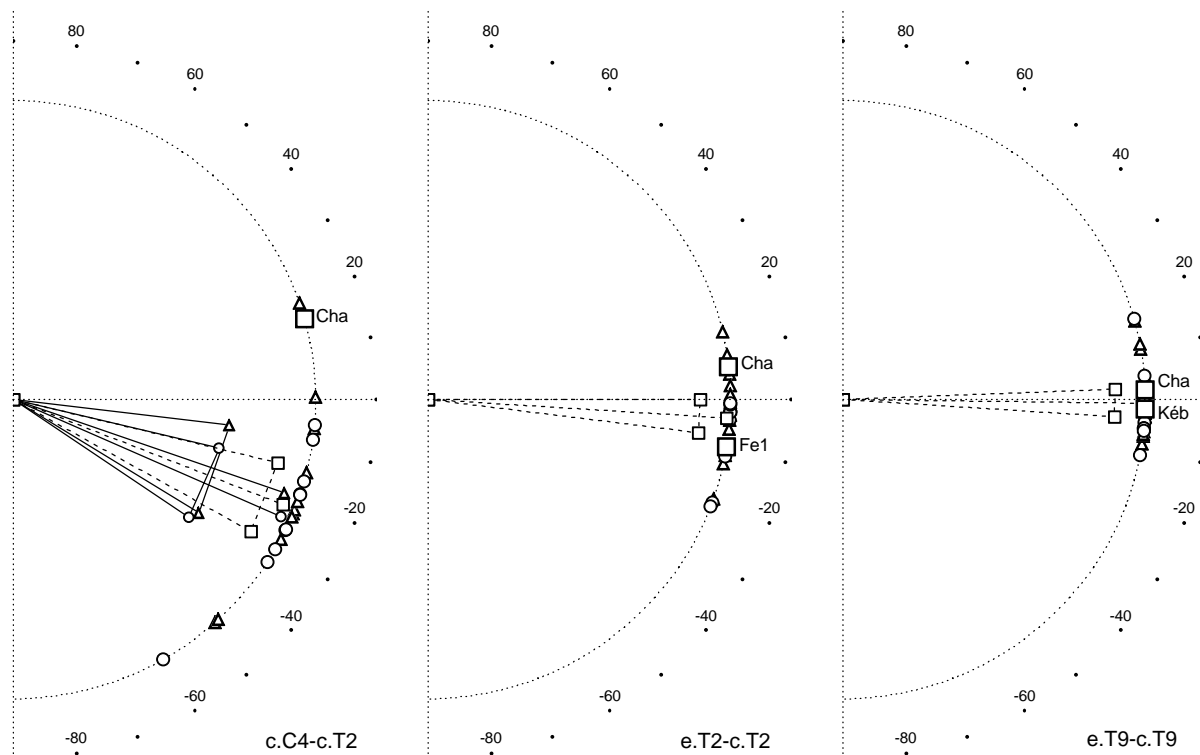
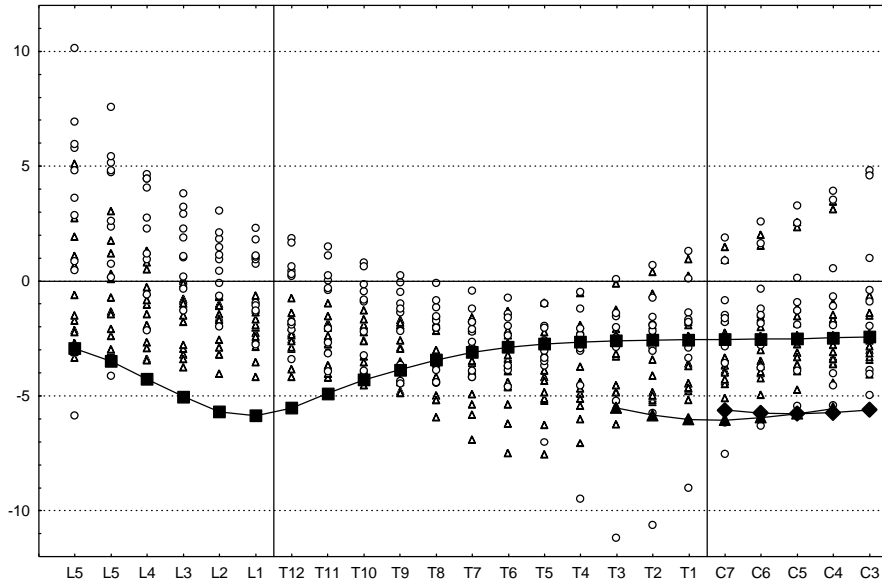


Figure 94

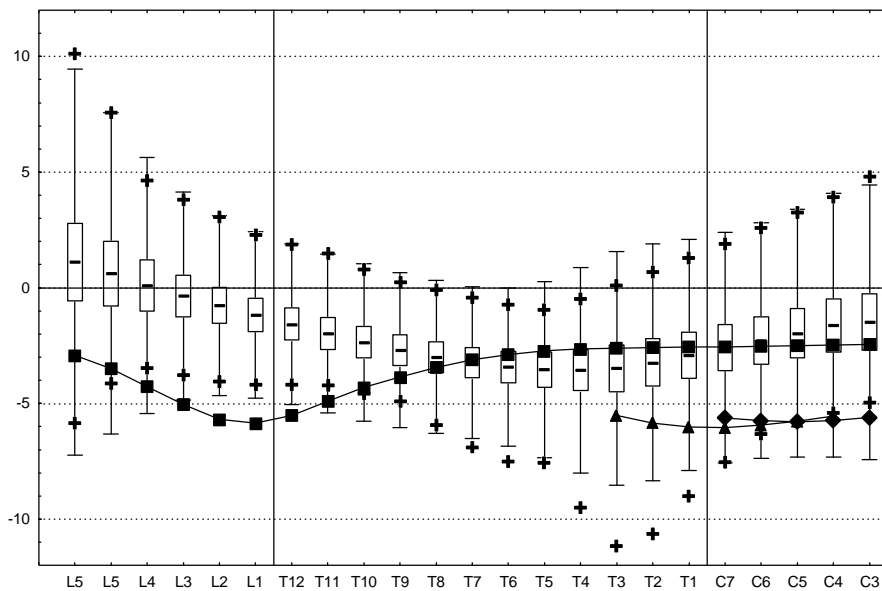
Angles interceptant les empilements **alternés** des corps vertébraux et des espaces intervertébraux. Comparaison des valeurs des **néandertaliens** à *Spitalfields*. L'angle mesuré est noté en bas à droite de chaque figure. Exemples pour la notation: e.C3-c.C3, angle mesuré entre l'espace intervertébral de C3 et le corps vertébral de C3 ; c.C3-c.C4, angles mesurés entre le corps vertébral de C3 et le corps vertébral de C4 inclus, c'est-à-dire interceptant 3 éléments puisque l'espace intervertébral de C4 est compris dans la mesure. Δ , hommes ; \circ , femmes, valeurs individuelles, angles moyens et intervalles de confiance ; - \square -, *idem* pour l'ensemble des individus ; \square , valeurs des néandertaliens: **Fe1**, La Ferrassie 1 ; **Cha**, La Chapelle-aux-Saints ; **Rég**, Le régourdou ; **Sh2**, Shanidar 2 ; **Kéb**, Kébara. Valeurs négatives: angles à sommet antérieur. La longueur du segment représentant l'angle moyen est égale à r ($0 \leq r \leq 1$). Graduation: 10° . Les intervalles de confiance de chaque sexe ne sont pas représentés lorsqu'ils diffèrent peu.

Les courbures du profil de La Chapelle-aux-Saints sont presque égales à celles de Shanidar 2, et, de T2 à C4 elles sont comprises dans la variabilité de l'échantillon. La limite de tolérance inférieure estimée de la population au niveau de la base de T2 est de $-8.5 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ tandis que les courbures de La Chapelle-aux-Saints sont comprises entre $-5.5 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ en T2 et $-6 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ en C7. Le taux d'éloignement est minimal au niveau de la base de T2, à -59% , et maximal au niveau de C6, à -86% . La courbure sagittale déterminée par la morphologie des corps vertébraux de La Chapelle-aux-Saints se situe donc très largement dans la variabilité actuelle (telle qu'elle peut être décrite par l'échantillon étudié) au niveau des corps vertébraux T1 et T2. A l'étage cervical, elle est encore incluse dans cette variabilité mais se situe dans les valeurs fortes de cyphose.

La courbe des valeurs de courbure de Kébara (figure 71) a montré que celles-ci sont toujours négatives. La courbure croît, en valeur absolue, depuis L5 où elle est de $-2.9 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ jusque L1 où elle présente un maximum à $-5.9 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. Elle décroît à nouveau pour se stabiliser, à partir de T5 environ, en approchant asymptotiquement en direction craniale la valeur de $-5.4 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ (figure 95).



a.



b.

Figure 95

Valeur de la courbure au niveau de chaque élément dans les profils issus des empilements des corps vertébraux. *a.*, Valeurs individuelles de l'échantillon et valeurs des néandertaliens. Δ , sujets masculins ; \circ , sujets féminins. *b.*, Statistiques descriptives et valeurs des néandertaliens. \square , moyenne et son intervalle de confiance à 95 % ; I , intervalle de tolérance estimé de la population à 95 % ; +, valeurs minimale et maximale observées dans l'échantillon. Chaque division correspond à un segment: L5 au niveau du côté inférieur du quadrilatère, L5 au niveau du côté supérieur du quadrilatère, L4 au niveau du côté supérieur du quadrilatère etc. jusqu'à C3. Superposition des valeurs des néandertaliens: \blacksquare , Kébara ; \blacktriangle , La Chapelle-aux-Saints; \circ , Shanidar 2. Unité: $\times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$.

La situation de ces valeurs par rapport à la variabilité de l'échantillon est différente selon les segments considérés. De T8 à C3, la courbure du profil de Kébara appartient à l'intervalle de confiance, avec un taux d'éloignement compris entre -26 % (valeur minimale rencontrée en C3) et + 33 % (valeur en T3). De T8 à L1, les valeurs de Kébara s'éloignent de plus en plus de la moyenne, elles sortent de la variabilité observée en T11, et de l'intervalle de tolérance en T12. L'éloignement

est maximal en L1, avec $\tau = -99\%$. En direction caudale, les valeurs s'approchent à nouveau de la moyenne et passent la limite de tolérance en L4. On a $\tau = -67\%$ en L5.

La forte cyphose déterminée à l'étage lombaire supérieur par les corps vertébraux de Kébara est difficile à interpréter car elle s'oppose aux résultats donnés par les valeurs du rayon de courbure (*Cf. supra*). Tandis que la valeur de courbure sort nettement de la variabilité, le schéma de variation du rayon de courbure exprimé en pourcentage de la hauteur du profil, n'apparaît pas différent de celui qui peut être trouvé parmi les individus actuels étudiés (figure 72). La courbure, exprimée cette fois sans effectuer de transformation qui prenne en compte le format, permet la comparaison individuelle même pour des profils incomplets. Mais des profils de petites dimensions auront des rayons de courbure petits, c'est-à-dire des courbures élevées. Or il a été noté que la colonne vertébrale de Kébara est, de fait, de petite dimension, la hauteur du profil se plaçant dans les valeurs faibles de la variabilité, à $\tau = -90\%$. La situation de Kébara, pour ses courbures, est donc en partie le résultat d'une différence de format. Toutefois, ces données vont dans le sens de celles obtenues en comparant les coordonnées du profil, exprimées cette fois relativement au format (figure 74), et qui situaient Kébara aux limites de la variabilité pour les segments lombaires supérieurs, par rapport à l'intervalle de tolérance de la régression générale, et pour les segments lombaires inférieurs, par rapport à la variabilité des coordonnées de points décrite par les ellipses équiprobables. Elles vont aussi dans le sens de la différence significative dans la position de la flèche maximale, située particulièrement bas chez Kébara par rapport au sexe masculin ($\tau = -97\%$).

6.3.2. Courbures dans les empilements alternés

A. *Etage cervical*

Dans les empilements alternés, les statistiques de la valeur de courbure ont été détaillées au niveau du côté supérieur du quadrilatère représentant le corps vertébral et au niveau du côté supérieur de celui représentant l'espace intervertébral. Pour tous les segments, l'intervalle de tolérance et l'étendue des valeurs chevauchent largement l'axe horizontal, puisqu'il a été noté que la localisation des inversions de courbure était très variable selon les profils. Cela n'est pas l'équivalent du chevauchement de la valeur nulle qui est rencontré pour tous les segments dans le cas de la mesure d'angulation (STAGNARA, 1985). Il faut noter toutefois que la moyenne se déplace vers les courbures positives de L5 à L3. Elle est pratiquement nulle en L2 et L1, toujours située dans les valeurs négatives, bien que faibles, au niveau thoracique, et enfin pratiquement nulle à l'étage cervical. Quant à la variabilité, elle est relativement importante au niveau lombaire bas, se réduit au niveau thoracique bas et moyen, augmente au niveau thoracique supérieur, et est très importante à l'étage cervical. Cette très forte variabilité résulte de deux phénomènes. La lordose cervicale, d'une part, n'est pas présente pour tous les profils: des valeurs positives coexistent donc pour chaque segment avec des valeurs négatives; d'autre part, elle se développe, lorsqu'elle existe, sur une faible longueur développée, la courbure atteint donc des valeurs positives très élevées relativement aux autres segments.

Les valeurs déterminés dans les profils alternés des néandertaliens ont été comparées à celles de l'échantillon.

A l'étage cervical, la courbure du profil de La Chapelle-aux-Saints, lordotique, est largement comprise dans la variabilité (figure 96 ▲). Elle est d'environ $+10 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ de C7 à C4 tandis que la limite de tolérance supérieure croît de $13 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ en C7, à $25 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ en C4. Le taux d'éloignement de La Chapelle-aux-Saints décroît donc de C7 vers C4, de 87% à 46% respectivement. Le profil se situe donc, pour les segments cervicaux inférieurs, dans les valeurs fortes de lordose.

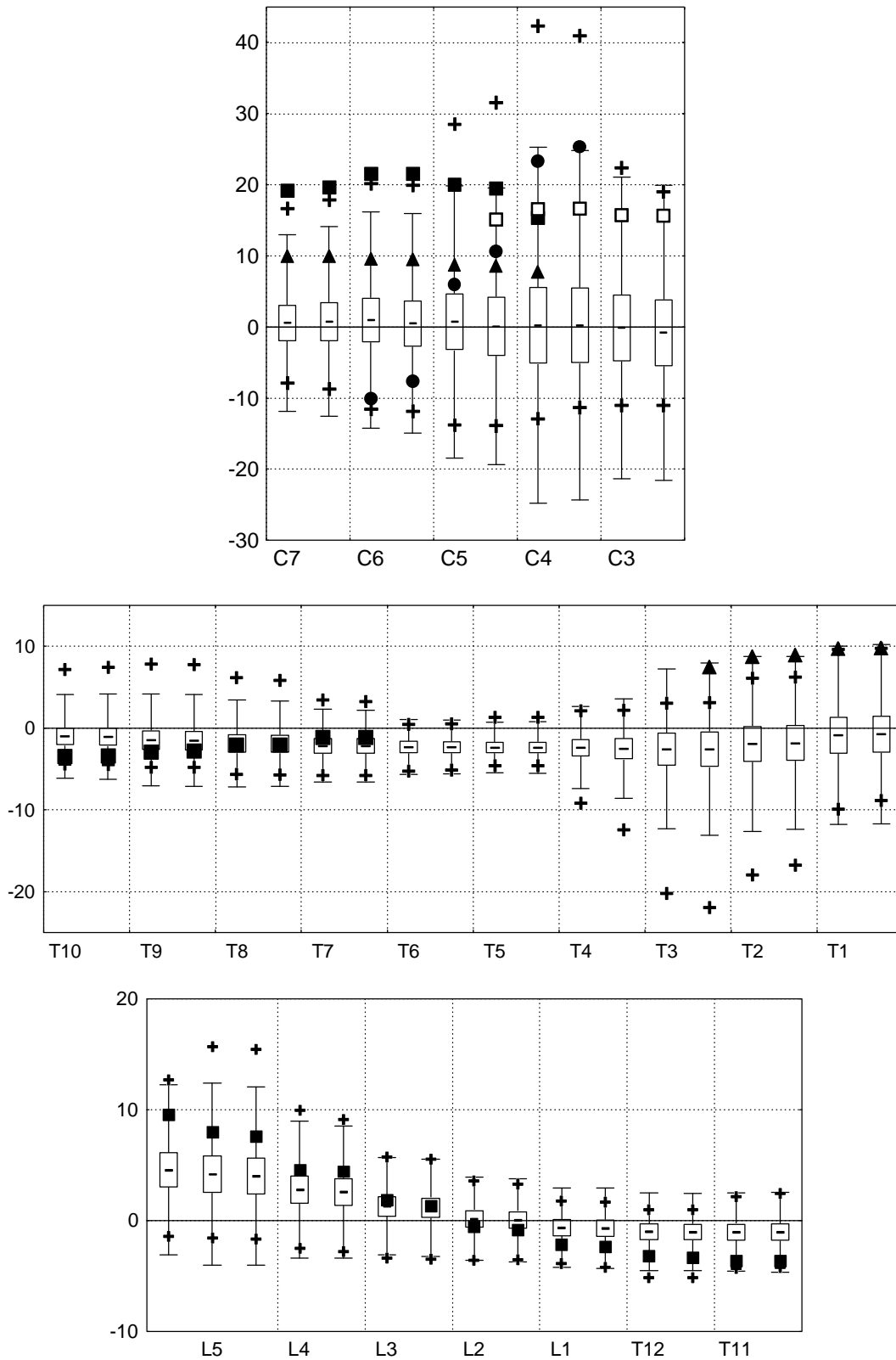


Figure 96

Valeur de la courbure au niveau de chaque élément dans les profils issus des empilements alternés des corps vertébraux et des espaces intervertébraux. \square , moyenne et son intervalle de confiance à 95 % ; I , intervalle de tolérance estimé de la population à 95 % ; +, valeurs minimale et maximale observées dans l'échantillon. Chaque division correspond à un segment, successivement: au niveau du corps vertébral et de l'espace intervertébral sus-jacent. Superposition des valeurs des néandertaliens: \blacksquare , Kébara ; \bullet , Régourdou ; \square , La Ferrassie 1 ; \blacktriangle , La Chapelle-aux-Saints. Unité: $\times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$.

La courbure du profil de La Ferrassie 1, pour C3 et C4, est elle aussi assez constante ($\approx 16 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$) et, comprise dans la variabilité, elle se situe dans les valeurs fortes de lordose (figure 96 □). Pour ces segments, les limites de tolérance décroissent de $25 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ à $20 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. Le taux d'éloignement de La Ferrassie est compris entre 81 et 88 %.

La situation du profil de Régourdou de C6 à C4 est particulière (figure 96 ●). Sa courbure franchit l'axe des abscisses entre C5 et C6 (point d'inflexion), en passant d'un extrême à l'autre de la variabilité. La courbure est de $-10 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ en C6, et de $+25 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ en C4. Le taux d'éloignement est de -85 % en C6 et de 95 % en C4. Cette amplitude de $35 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ sur l'espace de 3 segments n'est pas rencontrée pour d'autres profils de l'échantillon, à quelque étage que ce soit. Elle peut être interprétée de deux manières. Ou bien il s'agit une configuration réellement différente de ce qui est rencontré dans la variabilité actuelle ; ou bien la régression, calculée sur un faible nombre de segments, détermine un polynôme qui s'ajuste de façon trop précise à l'empilement et décrit des variations non significatives. Les remarques déjà faites quant aux valeurs de courbure déterminées aux extrémités du profil, et le fait que l'angulation définie par la pile des quadrilatères (23°) s'inclue parfaitement dans la variabilité, appuient la dernière interprétation. Pourtant, si l'inversion réelle de courbure en C5 peut être douteuse, le profil cervical de Régourdou décrit de toute évidence une lordose de C5 à C3 (figure 84). La régression quadratique ajustée à ces 6 éléments, en éliminant le corps vertébral C6, est significative (test de l'hypothèse nulle pour le coefficient du terme de degré 2: $p = 0.037$). Elle définit une courbure maximale de $14.2 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ au niveau de C4, et de $12 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ aux extrémités. Ces valeurs, peu différentes de celles qui avaient été déterminées au niveau de C5 à partir de la régression cubique, situeraient Régourdou dans la variabilité de l'échantillon. Elle sont très vraisemblablement de meilleures estimations de la courbure du profil. La confirmation d'une inflexion localisée en C5 nécessiterait la présence d'au moins un segment sous-jacent.

Les courbures calculées pour les éléments cervicaux conservés de Kébara donnent des valeurs très fortes de lordose (figure 96 ■). Au sommet du profil, au niveau du côté supérieur du corps vertébral de C4, la courbure est de $15.3 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ et entre dans la variabilité estimée de la population: $\tau = 78$ %. Pour les deux points inférieurs, la valeur se situe au niveau du seuil de tolérance supérieur ; avec des courbures de $19 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ et $20 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$, le taux d'éloignement est de 95 % dans les deux cas. Enfin, au niveau des segments C6 et C7, la courbure est à peu près égale au maximum observé et supérieure au seuil de tolérance, lequel décroît faiblement de 16 à $13 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. Les valeurs de Kébara sont comprises entre 19.2 et $21.5 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$, avec des taux d'éloignement de 99 à 99.5 %.

La proximité des valeurs de Kébara avec celles des *maxima* observés en C6 et C7 permet difficilement de considérer, sans réserve, que sa lordose cervicale outrepassa la variabilité actuelle. La grande variation rencontrée dans les profils de l'échantillon, et la situation de valeurs extrêmes à l'extérieur de l'intervalle de tolérance de la population, laissent envisager que l'estimation de ce dernier à partir de l'échantillon étudié puisse être trop étroite. Par ailleurs, l'orientation des surfaces articulaires postérieures cervicales doit être considérée comme une approximation de leur orientation réelle car les pédicules sont fragmentaires. Les espaces intervertébraux sont donc aussi, par conséquent, des estimations.

Il est toutefois significatif que tous les espaces intervertébraux cervicaux qui peuvent être déduits définissent une angulation à sommet postérieur. Or, une orientation trop erronée de l'arc vertébral lors de la reconstruction, dans le sens de la détermination d'une angulation en lordose de l'espace intervertébral sus-jacent orienterait, à l'inverse, les articulations inférieures de la vertèbre dans le sens de la détermination d'un espace intervertébral à angulation cyphotique, puisque les rapports anatomiques de la *pars interarticularis* sont conservés.

Si la situation exacte des valeurs de courbure cervicales de Kébara, par rapport à la variabilité inférée de la population, est discutable, les corps vertébraux et les espaces intervertébraux de ce fossile déterminent donc, de toute évidence, une lordose cervicale accusée.

B. Etage thoracique supérieur

Les seuls restes vertébraux néandertaliens qui permettent de discuter de la courbure impliquée par les empilements alternés à l'étage thoracique supérieur sont ceux de La Chapelle-aux-Saints. Ils forment une série continue avec les restes cervicaux. De T1 à T2, la courbure décroît faiblement, de $9.7 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ à $7.4 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. Ces valeurs sont pratiquement confondues avec celles de la limite de tolérance supérieure, le taux d'éloignement restant inférieur à 95 %.

Les restes vertébraux thoraciques de La Chapelle-aux-Saints déterminent donc, par leur morphologie, des valeurs de courbure qui sont encore lordotiques et élevées au niveau des deux premiers segments thoraciques. La lordose cervicale de La Chapelle-aux-Saints impliquée par la morphologie vertébrale est donc non seulement prononcée, mais aussi étendue jusqu'à l'étage thoracique supérieur.

C. Etages thoracique inférieur et lombaire

La moitié inférieure de la colonne vertébrale n'est représentée que par les restes du squelette de Kébara, de T7 à L5. La courbure que leur profil détermine est négative (cyphose) jusqu'à la base du corps vertébral de L2. Au sommet de la pile, en T7, elle est de $-1.1 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. Elle décroît faiblement jusqu'en T1 où elle atteint un maximum dans le sens de la cyphose, de $-3.6 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. La lordose lombaire, développée de L3 à L5, est caractérisée par une augmentation croissante et rapide de la courbure qui atteint la valeur de $+9.6 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ au niveau de la base de L5. La courbure est toujours contenue dans la variabilité observée de l'échantillon et estimée de la population. Les variations du taux d'éloignement suivent celles de la courbure. Il est de -31 % en T7, augmente pour atteindre une valeur absolue maximale en T11 de -86 %. Il devient positif en L3 où, à partir d'une valeur de +6.4 %, il croît jusqu'à atteindre 81 % en L5.

La courbure du profil de Kébara, au niveau thoracique inférieur et lombaire, apparaît donc toujours comprise dans la variabilité actuelle telle que peut la décrire l'échantillon étudié. Elle atteint au niveau de son maximum en cyphose des valeurs fortes de courbure. La lordose lombaire est elle fortement courbée, et en comparaison avec l'échantillon, elle l'est d'autant plus que le segment est plus caudal.

7. Conclusions

La méthodologie mise en œuvre a permis de donner tout d'abord chez l'homme actuel, une description de la participation de la morphologie vertébrale à la détermination des courbures sagittales.

Certains problèmes méthodologiques parfois négligés dans l'étude des courbures vertébrales ont pu être soulignés.

La mesure de l'angle interceptant plusieurs segments vertébraux ou angle de COBB (1948), utilisée par les radiologistes, n'est pas assimilable, en dépit de l'équivalence des termes qui est souvent rencontrée, à une mesure de courbure. L'angulation cumulative définie à partir d'un segment vertébral de base et en incorporant chaque fois un segment supplémentaire du profil en direction craniale a, dans l'hypothèse de plateaux vertébraux orientés perpendiculairement à la courbe ajustée au profil, le comportement de la dérivée de cette courbe, avec une valeur nulle à l'origine. La courbure, inverse du rayon de courbure, est un rapport de la dérivée à la dérivée seconde. La valeur de l'angulation ne donne donc pas une information directe de celle de la courbure. En revanche, la courbure est nulle lorsque l'angulation cumulée passe par un extremum.

La courbure, inverse du rayon de courbure (BOOKSTEIN, 1947), est apparue une mesure plus intéressante que ce dernier qui est utilisé dans des études précédentes (PINEAU *et al.*, 1983 ; DELMAS et PINEAU, 1986). Au point d'inflexion, la valeur du rayon de courbure passe d'un infini à un autre de signe opposé. Elle varie donc de plusieurs ordres de grandeur sur l'ensemble du profil, rendant l'interprétation et la comparaison très difficiles. L'hypothèse de normalité de distribution de la courbure dans l'échantillon n'a pas été rejetée, tandis que celle du rayon de courbure l'est significativement. L'utilisation de la courbure permet donc l'usage de statistiques paramétriques pour une description de sa variabilité au niveau de chaque segment vertébral.

Les empilements ont été décrits dans un premier temps par la mesure des angles interceptant les étages vertébraux. Les profils obtenus grâce à un ajustement polynomial ont été caractérisés par leurs longueurs projetée et développée, leur indice de courbure, et la présence, la position et la valeur de plusieurs points particuliers: 1/ Coordonnées de l'extremum (ou des extrema) de la courbe qui correspond au sommet du profil et dont l'ordonnée donne la flèche maximale ; 2/ absence ou présence de un ou plusieurs points d'inflexion, dont la localisation marque le lieu exact d'inversion de la courbure ; 3/ absence ou présence de un ou plusieurs maxima de courbure, leur position et la valeur de courbure qu'ils définissent.

La position de chacun de ces points a été exprimée par son abscisse, c'est-à-dire la hauteur à laquelle il se situe dans l'empilement, son abscisse curviligne, c'est-à-dire sa position sur la longueur développée du profil, et aussi par le numéro du segment vertébral au niveau duquel il était localisé. Lorsque cela était possible, les abscisses ont été exprimées en pourcentage de la hauteur du profil afin de permettre la comparaison. La caractérisation individuelle de chaque profil a ensuite permis de considérer la variabilité de chaque type de point remarquable, pour sa position et sa valeur (flèche maximale et maximum de courbure). Enfin, une comparaison d'ensemble, indépendante de la forme individuelle de chaque profil a porté sur la variabilité des coordonnées des empilements dans le plan, et la valeur de courbure calculée au niveau de chaque segment.

Les conclusions suivantes ont pu être tirées quant à l'implication de la forme des corps vertébraux dans le dessin des courbures sagittales :

Les corps vertébraux cervicaux définissent une angulation de cet étage qui est nulle ou cyphotique, avec un angle moyen de -22° , et sans différence entre les sexes. L'angulation thoracique est nulle à cyphotique, avec un angle moyen de -40° . L'angle thoracique du groupe masculin est plus élevé que celui du groupe féminin, avec une différence très significative (-51° contre -24°). L'angle lombaire est pratiquement nul en moyenne dans le sexe masculin (1°), et lordotique dans le groupe féminin (21°). La différence est très significative.

Ces différences sexuelles ne sont pas retrouvées dans le calcul des indices. Les longueurs en projection (≈ 41 cm en moyenne) et développées (≈ 44 cm en moyenne) des profils ne montrent pas non plus de dimorphisme.

Aucun profil ne possède un extremum qui définirait une lordose cervicale. Dans le sexe masculin, la morphologie des corps vertébraux ne détermine pas de lordose lombaire suffisamment accentuée pour qu'elle puisse être caractérisée par un sommet de courbure; mais la moitié des profils du sexe féminin sont caractérisés par ce point. Sans distinction des sexes, la présence d'un sommet de lordose lombaire diminue la flèche maximale de la cyphose cervico-thoracique. Celle-ci se situe environ à la moitié de la hauteur du profil, mais, en relation avec l'expression de la lordose lombaire, sa position est plus variable dans le sexe féminin.

Deux individus masculins et un individu féminin présentent une inflexion définissant une lordose cervicale. Elle est située de manière peu variable, à environ 90 % de la longueur curviligne totale du profil, ce qui correspond à une localisation en C5 ou C7.

Si aucun sujet masculin ne montre de sommet de lordose lombaire, certains en revanche possèdent bien une inversion de la courbure à ce niveau, et si quelques profils féminins seulement présentent un sommet de lordose lombaire, tous sont caractérisés par un point d'inflexion. Une lordose lombaire existe donc chez 7 sujets masculins sur 10, l'inversion de courbure ayant lieu entre L2 et L4 (inclus). Chez les sujets féminins, le point d'inflexion peut être situé relativement haut au niveau thoracique (jusque T8). La limite inférieure de sa localisation est L3. La localisation est donc significativement plus haute et plus variable que dans le sexe féminin. Ce développement de la lordose lombaire permet dans ce sexe l'expression d'un extremum.

Les maxima de courbure doivent être considérés en relation avec les autres points remarquables, extrema et points d'inflexion:

1. Les lordoses cervicales ne possèdent pas de maximum de courbure.
2. Il n'existe pas de différence sexuelle pour les localisations des maxima de courbure sur les cyphoses et pour les valeurs de courbure correspondantes si les maxima cervico-thoraciques et thoraco-lombaires sont confrontés.
3. Il existe une différence sexuelle quant au nombre et à la nature des maxima de courbure car d'une part:
 - a) aucune femme ne possède plus d'un maximum au niveau de la cyphose;
 - b) quand deux maxima sont présents chez un individu, ils se situent de part et d'autre de la zone thoracique moyenne, à une position significativement différente de celle des maxima uniques dont la position moyenne est intermédiaire, mais très variable;
 - c) seuls les individus féminins possèdent un maximum de courbure au niveau de la lordose lombaire.D'autre part, et il s'agit donc de différences sexuelles indirectes:
 - d) les courbures aux maxima au niveau des lordoses lombaires sont plus variables que celles des maxima au niveau des cyphoses;
 - e) la valeur de la courbure n'est pas significativement différente selon la localisation et le type de maximum;
 - f) quand une cyphose est caractérisée par deux maxima, leurs courbures sont semblables.

Le calcul des valeurs de courbure au niveau de chaque segment confirme le dimorphisme sexuel. La lordose lombaire est plus étendue dans le sexe féminin et, au niveau d'un même segment vertébral, sa courbure moyenne est toujours plus forte. Cette différence devient significative au dessus du segment L4. Au niveau de la cyphose, la courbure est plus variable dans le sexe féminin, et significativement à l'étage thoracique haut et à l'étage cervical. En moyenne, elle est toujours plus faible chez les femmes à l'étage thoracique pour un même segment, et la différence est significative à l'étage thoracique moyen. A l'étage cervical, les courbures moyennes sont identiques.

Deux relations ont par ailleurs été notées entre des types de points différents:

- La présence d'un maximum de courbure sur la lordose lombaire est liée à une localisation thoracique (c'est-à-dire haute) de l'inflexion qui définit le début de la lordose correspondante.
- De la même manière, la présence d'un sommet de lordose lombaire est liée à une localisation haute du point d'inflexion thoraco-lombaire.

L'ensemble de ces données explicite en particulier la limitation qui est imposée à la variabilité des segments vertébraux, par la nécessité de maintenir une conformation de l'ensemble du profil qui soit en adéquation avec la préservation de la stabilité rachidienne.

La seule forme des corps vertébraux peut donc contribuer à déterminer les courbures "secondaires" lordotiques de la colonne vertébrale. C'est le cas, pour la lordose lombaire, d'une manière constante dans le sexe féminin et fréquente dans le sexe masculin. Cependant, cela reste rare pour la lordose cervicale dans chaque sexe.

Lorsque la forme des espaces intervertébraux déterminés par la morphologie des vertèbres est considérée conjointement à la forme des corps vertébraux dans le plan sagittal, les résultats permettent de tirer les conclusions suivantes:

La morphologie des seuls éléments osseux des segments rachidiens, c'est-à-dire la forme du corps vertébral, et la position relative des surfaces articulaires postérieures, ne contribue que partiellement à déterminer les courbures physiologiques de la colonne vertébrale. La forte variabilité rencontrée dans l'allure des profils, en particulier au niveau lombaire, est tout à fait comparable avec les résultats qualitatifs (ZOGHBI, 1940) et quantitatifs (STAGNARA, 1985) obtenus dans des études antérieures.

L'angulation cervicale est très variable et peut être en cyphose ou en lordose. Dans ce dernier cas le segment vertébral C3 est responsable de la plus grande part de la lordose. Aucune différence sexuelle n'apparaît. L'angle thoracique est nul ou en cyphose, sans différence sexuelle, et en moyenne de -23.5° . L'angulation lombaire est nulle ou bien en lordose, en moyenne de 24° , sans différence sexuelle. D'une manière générale, la variabilité est plus restreinte dans le sexe féminin. La lordose lombaire et la cyphose thoracique définies par la morphologie vertébrale sont donc moins accusées et plus variables que les courbures physiologiques correspondantes.

La longueur de l'étage thoracique représente plus de la moitié de la longueur totale de C3 à L5, contre **11**^{èmes} pour l'étage lombaire et **7**^{ème} pour l'étage cervical. Ces proportions sont plus variables dans le sexe féminin. L'étage thoracique est significativement plus long dans le sexe masculin, entraînant une différence significative des longueurs et hauteurs totales. L'indice de courbure est semblable dans les deux sexes, égal à 97 %.

Les profils peuvent présenter trois sommets, deux sommets thoracique et lombaire, ou un seul sommet thoracique. Le sommet de lordose lombaire est plus fréquent dans le sexe féminin. L'extremum cervical est peu marqué et situé pratiquement au sommet de l'empilement. La localisation de l'extremum thoracique est très variable et plus craniale, et de flèche plus courte quand le profil présente un sommet de lordose lombaire. Les sujets féminins ont donc un sommet de cyphose qui est moins accusé et localisé plus haut sur l'empilement. Les données quantitatives en revanche ne permettent pas de distinguer de différences sexuelles.

La majorité des profils présente une seule inflexion lombaire ou deux inflexions cervicale et lombaire. Les cas de figure ou l'empilement ne décrit aucune inflexion ou seulement une courte inversion au niveau cervical sont aussi possibles, ils ont été rencontrés dans le sexe masculin. La position de l'inflexion est variable: de C5 à T4 pour la lordose cervicale, soit environ **w** de la longueur développée totale. La lordose lombaire peut débuter dès T6, mais se situe en moyenne à environ **4** de la longueur développée totale. La présence d'un sommet de lordose lombaire est liée à un commencement plus cranial de celle-ci.

Aucune différence sexuelle n'a été directement mise en évidence, tant du point de vue des schémas de présence ou absence d'inflexions (associées ou non avec des extrema) que de la position de ces inflexions, en prenant en compte une fois encore les différents schémas possibles. Mais l'inflexion lombaire dans le sexe féminin est en moyenne plus basse que pour le sexe masculin si elle est associée à une inflexion cervicale, sans différence significative cependant. Dans le sexe féminin, l'inflexion lombaire est significativement plus basse et moins variable si elle est associée avec une inflexion cervicale.

En confrontant les schémas des inflexions avec les caractéristiques des extrema, on détermine que la flèche maximale de la cyphose thoracique est significativement plus faible pour les profils possédant un extremum lombaire, et pour ceux présentant une inflexion cervicale. Cette dernière relation est encore vraie quand le sexe féminin est considéré séparément, et est plus nette encore s'il existe aussi une inflexion cervicale.

La présence d'une lordose cervicale ou lombaire développée implique une expression de la cyphose sur un nombre plus réduit de segments vertébraux. L'amplitude de celle-ci est alors restreinte.

La représentation particulière du sexe féminin, et la différence sexuelle démontrée pour la morphologie des corps vertébraux en relation avec la lordose lombaire, vont dans le sens d'une valeur adaptative du dimorphisme des vertèbres libres en relation avec les fonctions de reproduction et nuancent donc l'opinion de ABITBOL (1987a, 1987b, 1987c, 1988, 1989, 1991).

La plupart des cyphoses sont caractérisées par la présence d'un seul maximum de courbure, souvent situé à proximité du sommet, et sinon au niveau thoracique supérieur. Mais la courbure peut aussi être plus faible au niveau du sommet de cyphose, qui est alors entouré de 2 maxima. Il est aussi possible que la courbure ne passe pas par un maximum. Les comparaisons entre sexes, et celles considérant ces différents schémas ne révèlent pas de différences significatives.

Pour trois profils masculins, la courbure de la lordose lombaire atteint des valeurs maximales sur la lordose lombaire de chaque côté de son sommet.

Dans le sexe féminin, la lordose cervicale atteint une valeur de courbure maximale quand elle est caractérisée par un sommet, et de façon statistiquement significative, mais sans possibilité de mettre en évidence l'influence du facteur sexe. Les courbures au niveau de ces maxima sont beaucoup plus élevées mais aussi plus variables qu'au niveau de la cyphose thoracique (de manière significative) et de la lordose lombaire. La présence d'un maximum de courbure est donc liée à celle d'une lordose cervicale suffisamment accentuée, qui s'exprime pourtant sur un faible nombre de segments.

Plusieurs schémas ne sont pas représentés dans l'échantillon: un seul maximum sur la lordose lombaire ; un seul maximum au niveau thoracique bas sur la cyphose ; ou encore deux maxima sur la

lordose cervicale. Dans le sexe féminin, aucune lordose n'est caractérisée par un maximum de courbure.

Neuf fois sur 10, il existe une lordose lombaire. Dans environ la moitié des cas, elle est associée avec une lordose cervicale, débutant aux $\frac{3}{4}$ de la longueur du profil. La lordose lombaire n'est donc pas toujours caractérisée par un sommet (extremum), mais lorsque c'est le cas, elle débute plus cranialement. Les courbures sont donc corrélées: une lordose lombaire plus développée réduit l'expression de la cyphose sus-jacente, et de même s'il existe une lordose cervicale.

La distribution des fréquences a montré une relation significative entre sexe masculin et détermination d'une lordose cervicale, ainsi qu'entre inflexion cervicale et sommet de lordose cervicale.

Dans ce même sens, la répartition des points correspondant à l'ensemble des empilements cervico-thoraciques et la régression qui leur est ajustée a montré que ceux correspondant au sexe masculins sont déplacés, au niveau cervical, vers des ordonnées plus faibles, mais avec une forte variabilité du nuage correspondant à chaque segment. Pour les empilements thoraco-lombaires, ce déplacement est noté au niveau lombaire dans le sexe féminin.

Il y donc une forte variabilité des schémas rencontrés dans les profils impliqués par la forme des corps vertébraux et des espaces intervertébraux déterminés par la morphologie vertébrale. Cette variabilité est en accord avec celle qui est rencontrée dans les courbures physiologiques. Elle est telle qu'elle ne permet pas une définition précise et univoque entre normalité et pathologie (STAGNARA, 1980 ; FAUCHET et STAGNARA, 1980 ; DIMEGLIO *et al.*, 1990). Dans l'échantillon étudié, elle réduit la représentation numérique de chaque cas de figure et ne permet que des remarques assez générales. La forme des vertèbres ne contribue que partiellement à l'expression des courbures physiologiques. Les courbures sont plus faibles et toutes ne sont pas nécessairement présentes.

Les restes vertébraux des néandertaliens auxquels la méthodologie a été appliquée ont permis de mettre en évidence au niveau individuel les implications de la morphologie vertébrale dans le dessin des profils sagittaux.

A l'étage cervical et au niveau de la charnière cervico-thoracique:

Les corps vertébraux cervicaux de Régourdou (C3-C6) déterminent une angulation cyphotique nette de -22° , mais un profil qui ne montre pas de courbure significative. Lorsque les espaces intervertébraux sont considérés, une lordose significative se dessine entre C3 et C5, définie par un angle de $+13^\circ$, et une courbure dont la valeur se situe autour de $13.5 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$.

Les corps vertébraux de Shanidar 2 (C3-C6) déterminent une cyphose de -20.6° et dont la courbure est pratiquement constante, de $-6 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ en valeur arrondie, et passe par un maximum légèrement plus élevé au niveau du sommet, à la limite entre C5 et C6. Seul l'espace intervertébral supérieur à C3 peut être déduit, il détermine avec le corps sous-jacent une angulation en cyphose de -13.5° .

Les corps vertébraux de La Chapelle-aux-Saints sont utilisables de C4 à T2. Ils définissent une cyphose de -24.3° , dont la courbure, de $-6 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$, est presque constante et passe par un maximum au niveau de C7. L'ajout des espaces intervertébraux conduit à la détermination d'une lordose d'ensemble, de $+15.7^\circ$. Sa courbure varie peu, elle atteint pratiquement $8 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ aux extrémités, et $10 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ au niveau d'un maximum situé en C7.

Les corps vertébraux du squelette de La Ferrassie 1, de C3 à C6, définissent une angulation très faible en cyphose, égale à -4° . De fait, le profil qu'implique leur forme dans le plan sagittal ne montre pas de courbure significative. Les espaces intervertébraux C3 et C4, avec les corps vertébraux des mêmes segments, déterminent une portion de courbure lordotique dont la valeur est assez forte, de $16 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ environ. En revanche, l'espace intervertébral C6, avec les corps vertébraux qui l'entourent, ne définissent aucune courbure significative mais une angulation légèrement lordotique de $+6.2^\circ$.

L'empilement résultant de la forme des corps vertébraux cervicaux C3 à C7 de Kébara définit une angulation en cyphose de -9° . La courbure est sur toute la longueur cervicale pratiquement constante à la décimale près, égale à $-2.5 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. Une estimation probablement assez bonne des espaces intervertébraux peut être faite pour les segments C5 à C7. L'empilement alterné depuis le corps vertébral de C4 jusqu'à celui de C7 définit alors une lordose prononcée, de $+29.7^\circ$ et dont la courbure passe, à partir d'une valeur de $15 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ aux extrémités, par un maximum égal à $21 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ dont la position est confondu avec celle de la flèche maximale, au niveau de l'espace intervertébral C6.

Colonne vertébrale de Kébara, étages thoracique et lombaire:

L'ensemble des corps vertébraux de Kébara détermine un profil qui dessine une seule cyphose sans inflexion, d'un angle de -80° et un indice de courbure de 88 %. Le sommet est situé aux $4/10^{\text{èmes}}$ de la hauteur et correspond à une flèche maximale égale à 23 % de la hauteur. La courbure en chaque point, de $-3 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ au niveau de L5, passe par un maximum en valeur absolue de $-6 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ au niveau du segment L1, à environ 4 de la hauteur totale, et se stabilise à partir de T6 pour tendre vers une valeur de $-2.5 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ au sommet du profil. La valeur du rayon de courbure exprimée en pourcentage de la hauteur permet de retrouver parmi l'échantillon un schéma de variation très semblable chez un sujet masculin, et avec des grandeurs peu différentes.

Les angulations des segments thoracique (-57°) et lombaire (-14°) appartiennent à la variabilité de l'échantillon. L'angle thoracique est situé du côté cyphotique de la variabilité masculine, et surtout, l'angle lombaire est "hyper-masculin", situé parmi les valeurs les plus cyphotiques. L'angle défini par les plateaux vertébraux de chaque segment appartient à la variabilité actuelle.

Les coordonnées de l'empilement se placent dans la variabilité masculine, mais la position de l'extremum au niveau d'un segment relativement caudal (T10) situe les coordonnées de L1 à la limite de la variabilité des profils de ce sexe, et de celle décrite par l'intervalle de tolérance de la régression générale.

Les espaces intervertébraux peuvent être calculés depuis T4 jusque S1, à l'exception de T6 (substitué par un espace intervertébral adjacent pour permettre le calcul). Afin d'obtenir des valeurs comparables, l'empilement alterné a été recalculé depuis le corps vertébral L5 jusqu'à l'espace intervertébral T7.

L'angulation de l'étage thoracique (corps vertébral de T3 - corps vertébral de T12) place Kébara parmi les valeurs les plus fortes (-43°). Pour l'étage lombaire, l'angulation est aussi parmi les valeurs fortes de lordose ($+36^\circ$), mais dans les deux cas elle appartient à la variabilité observée.

Le profil montre donc deux courbures nettement dessinées: une cyphose thoracique et une lordose lombaire. Les sommets sont situés respectivement en T11 et en L4, à 66 et 13 % de la base de la pile. La courbure s'inverse en L2, à 36 %. La flèche maximale thoracique est de 6 %, celle lombaire est faible (-1%). L'ensemble du profil mesure 30 cm, dont 15 cm correspondant à l'étage lombaire. Un seul maximum de courbure caractérise la cyphose thoracique, pratiquement au niveau de son sommet, avec une valeur de $-4 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$. Cette courbure est faible et peu variable sur tout l'étage thoracique; elle diminue cranialement, et après l'inflexion pour la lordose lombaire, elle augmente régulièrement en direction caudale jusqu'à atteindre $+8 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ en L5.

Du point de vue des points remarquables qui le caractérisent, le profil de Kébara se situe parfaitement dans la variabilité actuelle. Par ailleurs, la présence simultanée de deux courbures opposées suffisamment développées pour déterminer deux extrema apparaît comme une disposition uniquement masculine dans l'échantillon. La comparaison globale des profils place en effet Kébara au milieu de la variabilité de ce sexe, et à la limite de celle du sexe féminin. Il en est de même pour les coordonnées de l'empilement.

Comparaison générale des profils des néandertaliens:

Une comparaison d'ensemble des néandertaliens a montré que les valeurs angulaires définies par les corps vertébraux cervicaux sont toujours comprises dans la variabilité de l'échantillon. La valeur de La Ferrassie est particulièrement faible. Il en est de même pour les deux premiers segments thoraciques. L'inclinaison des plateaux du dernier segment thoracique de Régourdou et de celui de Kébara est forte et, dans les deux cas, elle est orientée dans le sens de la cyphose. En L2, La Chapelle-aux-Saints et Kébara ont aussi des valeurs fortes en cyphose. L'angle défini par la pile des deux derniers segments lombaires présente, comme pour l'angle lombaire total, une différence sexuelle. Les valeurs de Kébara et de La Chapelle-aux-Saints pour ces deux segments appartiennent à l'intervalle de confiance masculin. Pour l'empilement alterné, la mesure angulaire a souligné essentiellement les fortes lordoses de Kébara et de La Chapelle-aux-Saints.

Les valeurs de courbure en chaque segment ont aussi été confrontées à la variabilité rencontrée dans l'échantillon. Lorsque la seule morphologie des corps vertébraux est considérée, les courbures déterminées à l'étage cervical pour Shanidar 2 et La Chapelle-aux-Saints sont situées dans les valeurs très fortes de cyphose. La valeur de Kébara appartient toujours à l'intervalle de confiance. Au niveau de la charnière thoraco-lombaire, la courbure de Kébara, en cyphose, sort de la variabilité observée de l'échantillon, et de celle estimée de la population. Si les espaces intervertébraux sont aussi pris en compte, les courbures cervicales néandertaliennes sont plutôt fortes mais entrent dans la variabilité, à l'exception de celles de Kébara. La situation de Kébara est relativisée par le fait que ses espaces intervertébraux cervicaux sont des estimations, mais de toute manière, la lordose cervicale de Kébara est très probablement fortement accusée. Au niveau des deux premiers segments thoraciques, La Chapelle-aux-Saints décrit des courbures en lordose situées à la limite de la variabilité estimée de la population. Aux étages thoracique et lombaire, la courbure de Kébara appartient à la variabilité, elle est forte au niveau du maximum de courbure de la cyphose, et forte aussi, en lordose, au niveau de L5.

Il faut donc souligner en particulier l'angulation nettement lordotique imposée par les corps vertébraux lombaires de Kébara et les corps vertébraux L4 et L5 de La Chapelle-aux-Saints, et l'expression très franche d'une lordose impliquée par l'ensemble de la morphologie vertébrale.

La seule morphologie des vertèbres peut donc déterminer des lordoses cervicale et lombaire chez les néandertaliens, ce qui n'est pas toujours vrai chez l'homme actuel. Plus que par simple rejet d'une interprétation morpho-pathologique erronée (STRAUSS et CAVE, 1957 ; TRINKAUS, 1985) ou par identité anatomique entre segments de même rang considérés isolément (ARAMBOURG, 1955 ; STEWART, 1962 ; PIVETEAU, 1963-1965), les éléments osseux de la colonne vertébrale néandertalienne sont susceptibles de définir - *positivement* - des inversions de courbure telles que celles observées dans un échantillon de la variabilité actuelle.

La forte variabilité métrique des vertèbres et surtout des courbures sagittales de la colonne se reflète dans l'échantillon étudié. Les résultats donnés par les néandertaliens indiquent, certes, que la morphologie vertébrale participe à la détermination des courbures sagittales dans ce groupe, d'une manière qui n'apparaît pas différente de ce qui est rencontré dans la variabilité actuelle. Mais cette

variabilité, parce qu'elle est forte, semble, sans l'infirmier, enlever de sa pertinence à cette conclusion. De plus, certains paramètres comme les valeurs de courbure en chaque point se situent à la limite de la variabilité, et en particulier, dans le cas de Kébara, pour les coordonnées de l'empilement et les valeurs de courbures en chaque point au niveau de la charnière thoraco-lombaire.

S'il est donc indiscutable que la morphologie vertébrale de *Homo sapiens neanderthalensis* est susceptible de déterminer, comme chez *Homo sapiens sapiens*, des inversions de courbure cervicale et lombaire, ces résultats posent la question de la participation des segments, en particulier au niveau de la transition thoraco-lombaire. La morphologie crânienne particulière de *H. s. neanderthalensis*, la projection de la face et l'extension de l'arrière crâne, laissent supposer des contraintes biomécaniques différentes dans le maintien de la tête en équilibre instable. C'est de fait ce que suggère la morphologie de la région mastoïdienne, pour le mouvement spécifique de flexion du cou à partir d'une extension forcée. L'intime relation existant entre les courbures successives et, finalement, avec l'inclinaison sacrée, suffirait à expliquer la répercussion de ce facteur essentiel sur l'ensemble de la colonne vertébrale. Mais la robustesse générale du squelette et ses insertions musculaires marquées sont aussi l'indice de contraintes très probablement fortes, en relation avec la transmission de la masse corporelle à l'axe lombaire vers la ceinture pelvienne et les membres inférieurs; et aussi, par conséquent, en relation avec les forces de réaction générées lors de la locomotion.

Des modalités particulières de fonctionnement de la charnière thoraco-lombaire pourraient donc être envisagées. Sa fragilité mécanique est impliquée par le passage d'une structure relativement rigide en flexion, à un axe plus flexible qui devient la zone principale de transmission du poids du tronc (WILLEN *et al.*, 1984 ; BERNHARDT et BRIDWELL, 1989 ; STAGNARA, 1985 ; PANJABI *et al.*, 1994 ; HEGENESS *et al.*, 1997). Par ailleurs, son anatomie "transitionnelle" semble relativement peu strictement définie par les processus de développement, puisqu'elle est excessivement variable, en particulier au niveau de surfaces articulaires postérieures (LEDOUBLE, 1912 ; SHINOHARA, 1997). Il est donc possible de considérer la zone de transition thoraco-lombaire comme un point particulièrement faible dans l'adaptation de la colonne vertébrale à la bipédie. Des contraintes différentes à l'extrémité supérieure de la colonne vertébrale néandertalienne, entraînées par une morphologie particulière du crâne et du tronc, peuvent donc avoir conduit à une modification de sa stabilité générale, avec des répercussions sur la forme des corps vertébraux, principaux conducteurs des contraintes verticales au niveau de cette zone particulièrement sensible.

Plus largement et d'un point de vue évolutif la question des modalités d'implication de la morphologie vertébrale dans le déterminisme des courbures sagittales chez d'autres groupes, reste donc ouverte. Dans la lignée des travaux de NATHAN et coll. (1964), PREUSCHOFT et coll. (1988) et TARDIEU (1991), son étude chez les grands singes, en relation avec leur mode locomoteur, serait particulièrement intéressante, puisque les données physiologiques sont accessibles et que les paramètres discutés, en particulier l'équilibre du crâne, diffèrent plus encore. Chez les fossiles, des informations précieuses pourraient être apportées, en particulier, par les restes vertébraux Sts 14 pour *Australopithecus africanus* (BROOM *et al.*, 1950), et KNMWT 15000 pour *Homo erectus* (BROWN *et al.*, 1985, LATIMER et WARD, 1993). Si les hauteurs des corps vertébraux ont permis de conclure pour ce dernier que la séquence cranio-caudale des valeurs d'indice était semblable à celle rencontrée chez *Homo sapiens* (LATIMER et WARD, 1993), une étude fine de l'orientation relative des surfaces articulaires postérieures et de la morphologie des corps vertébraux, sans hypothèse *a priori* de régularité géométrique, permettrait sans doute de dégager des modalités particulières de détermination des courbures sagittales.

Modalités de la biomécanique rachidienne:

Reprenant les résultats obtenus dans plusieurs travaux portant sur la dynamique de la colonne vertébrale durant la marche, GRACOVETSKY avançait la validité de la théorie du « *spinal engine* » dans la description et la compréhension de la marche humaine (GRACOVETSKY, 1990). Les données qui sont reprises concernent particulièrement les moments de torsion mis en jeu par les étages thoracique et lombaire ainsi que leur distribution au niveau des articulations postérieures et du disque intervertébral. Elles montrent une bonne cohérence avec le modèle discuté. Celui-ci est basé sur un principe simple de mécanique énoncé par l'auteur: « *Any homogeneous rod bent in the horizontal plane, while an axial torque is applied, induces another motion off the horizontal plane* »; ou encore: « Une rotation axiale en présence d'une courbure latérale induit un mouvement de flexion/extension dans le plan sagittal ». Le modèle élaboré confère un rôle moteur prédominant à la rotation de la ceinture pelvienne. Le mode d'action de la colonne vertébrale dans la génération du mouvement est résumé de la façon suivante. Par l'action principalement des muscles *iliocostalis*, *longissimus* et *psaos*, la colonne lombaire est courbée latéralement en préparation de la phase d'impact du pied. Lors de celle-ci, cette courbure latérale peut alors être accentuée avec force. Le principe du mouvement couplé (PANJABI *et al.*, 1989, 1993, 1994), entraîne, grâce à la présence de la lordose lombaire une conversion de cette « force latérale » en moment de rotation axiale. Le bassin tourne et les membres inférieurs, qui sont considérés ici de manière presque passive « amplifient » le mouvement. C'est de cette façon que l'énergie potentielle stockée par l'élévation préalable du centre de gravité est transformée en énergie cinétique. La courbure inverse que constitue la cyphose thoracique permet un découplage des deux sections et des mouvements des ceintures scapulaire et pelvienne. Elle minimise les déplacements latéraux. Enfin, par le même principe de mouvement couplé au niveau de la lordose cervicale, la rotation des épaules est rendue indépendante de celle de la tête, dont la stabilité, nécessaire pour les organes sensoriels (vue, ouïe), est ainsi conservée.

Un rôle mécanique actif est donc conféré à la colonne vertébrale dont les trois courbures sagittales ne sont pas seulement considérées comme système d'amortissement des chocs mais jouent un rôle fondamental dans la conversion des mouvements assurant la propulsion. Elles permettent en effet l'usage de faisceaux musculaires à orientation essentiellement parasagittale dans la génération d'un mouvement de rotation axiale.

La conformation des courbures sagittales est donc susceptible, selon ce modèle, de modifier les modalités de la bipédie. Une compréhension précise et complète de la mécanique rachidienne semble cependant loin d'être achevée et les modèles proposés continuent d'être développés avec un degré d'abstraction élevé. Les études sont souvent limitées à une fraction de la colonne vertébrale (étage lombaire thoracique ou cervical, zones charnières, articulation sacro-vertébrale), et les masses musculaires, lorsqu'elles sont considérées, sont simplifiées aux insertions principales censées générer les moments les plus élevés.

Les modalités biomécaniques précises de la bipédie et l'ensemble de leurs implications pour l'équilibre sagittal et latéral de la tête et du tronc sont loin d'être comprises dans leur totalité. Leur explication continuera de nécessiter la construction de modèles intégrant un nombre croissant de structures anatomiques pour que les connaissances acquises sur la variabilité morphologique de celles-ci, et surtout des vertèbres, permette d'induire précisément les variations rencontrées dans le comportement mécanique de la colonne vertébrale. L'insistance de J. PIVETEAU (1965) sur la connaissance détaillée de la variabilité actuelle, condition préliminaire et nécessaire à la compréhension de la morphologie des restes fossiles, est toujours pertinente ; particulièrement lorsque le problème posé, les modalités de la bipédie dans la lignée humaine, implique une structure composite aussi complexe que la colonne vertébrale, et qu'il existe encore de nombreuses lacunes dans la compréhension de son comportement.

« Buscar la verdad sobre algo lleva a buscar la verdad sobre todo. Salgo en busca de un problema, pero éste me plantea otros. Continuidad de los problemas; su serie ininterrumpida. Si me detengo no sería porque haya llegado al reposo, sino por no poder llegar a él. Resignación. [...] Buscar la verdad plena, es decir, sus condiciones, es filosofía; es buscar el reposo en toda su exigencia. Esta única verdad que merece tal nombre [procede de la] aceptación de los problemas sin previo acotamiento y eliminación. No se sabe si es posible. »

José Ortega y Gasset

Curso 1929/30

Apuntes preparatorios recogidos por Paulino Garagorri y publicados bajo el título ¿Que es conocimiento? en la Revista de Occidente de Alianza Editorial, Madrid, 1992.

BIBLIOGRAPHIE

(477 RÉFÉRENCES)

1. ABITBOL, M.M. (1987a). Evolution of the lumbosacral angle. *American Journal of Physical Anthropology*, 72: 361-372.
2. ABITBOL, M.M. (1987b). Evolution of the sacrum in hominoids. *American Journal of Physical Anthropology*, 74: 65-81.
3. ABITBOL, M.M. (1987c). Obstetrics and posture in pelvic anatomy. *Journal of Human Evolution*, 16 (3): 243-255.
4. ABITBOL, M.M. (1988). Evolution of the ischial spine and of the pelvic floor in the Hominoidea. *American Journal of Physical Anthropology*, 75 (1): 53-67.
5. ABITBOL, M.M. (1989). Sacral curvature and supine posture. *American Journal of Physical Anthropology*, 80: 379-389.
6. ABITBOL, M.M. (1991). Ontogeny and Evolution of Pelvic Diameters in Anthropoid Primates and in *Australopithecus afarensis* (AL 288-1). *American Journal of Physical Anthropology*, 85 (2): 135-148.
7. ABITBOL, J.-J.; DOWLING, T.J. (1995). Trauma of the lumbar spine. *Current Opinion in Orthopedics*, 6 (2): 104-110.
8. ADAMS, M.A.; HUTTON, W.C. (1980). The effect of posture and the role of the apophysial joints in resisting intervertebral compressive force. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 62 (B): 358-362.
9. ADAMS, M.A.; HUTTON, W.C. (1983). The mechanical function of the lumbar apophyseal joints. *Spine*, 8 (3): 327-330.
10. ADAMS, M.A.; DOLAN, P.; HUTTON, W.C. (1987). Diurnal variations in the stresses on the lumbar spine. *Spine*, 12: 130-137.
11. AEBY, C. (1879). Die Altersverschiedenheit der menschlichen Wirbelsäule. *Archiv für Anatomie und Entwicklung-Geschichte*, : 77-138.
12. ALEXANDRE, C. (1992). La raréfaction osseuse vertébrale physiologique sénile. In: L. Simon, C. Hérisson, B. Biot, dir. *Le rachis vieillissant*. Masson, Paris. pp. 235-238.
13. ALEXANDRE, C. (1993). Les facteurs de résistance osseuse. In: C. Marcelli, J.-L. Sébert, dir. *Architecture et résistance mécanique osseuses*. Masson, Paris. pp. 41-48.
14. AMONOO-KUOFI, H.S. (1992). Changes in the lumbosacral inclination and the curvature of the lumbar spine during aging. *Acta Anatomica*, 145: 373-377.
15. AMONOO-KUOFI, H.S.; PATEL, P.J.; FATANI, J.A. (1990). Transverse diameter of the lumbar spinal canal in normal adult Saudis. *Acta anatomica*, 137 (2): 124-128.
16. ANDERSON, M.A. (1883). Observations on the diameters of human vertebrae in different regions. *Journal of Anatomy and Physiology*, 17: 341-344.
17. ANDERSON, C.K.; CHAFFIN, D.B.; HERRIN, G.D. (1986). A study of lumbosacral orientation under varied static loads. *Spine*, 11 (5): 456-462.

18. ANDERSSON, G.B.J.; WINTERS, J.M. (1990). Role of muscle in postural tasks: spinal loading and postural stability: *In: J. Winters, S.L.-Y. Woo, eds. Multiple muscle system. Biomechanics and movement organization.* Springer Verlag. pp. 377-395
19. ANTÓN, S.C. (1994). Mechanical and other perspectives on Neandertal craniofacial morphology. *In: R.E. Corruccini et R.L. Ciochon, eds. Integrative paths to the past.* Prentice Hall, New Jersey. pp. 677-695.
20. ARAMBOURG, C. (1955). Sur l'attitude, en station verticale, des Néanderthaliens. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 240 (série D): 804-806.
21. ARENSBURG, B. (1989). New Skeletal Evidence Concerning the Anatomy of Middle Palaeolithic Populations in the Middle East: the Kebara Skeleton. *In: P. Mellars, C. Stringer, eds. The Human Revolution.* Edinburgh University Press, Edinburgh. pp. 165-171.
22. ARENSBURG, B. (1991). The vertebral column, thoracic cage and hyoid bone. *In: O. Bar Yosef, B. Vandermeersch, eds. Le squelette Moustérien de Kebara.* Cahiers de Paléanthropologie, CNRS ed., Paris. pp. 113-146 (+24 figures).
23. ARRIAZA, B.T. (1997). Spondylolysis in prehistoric human remains from Guam and its possible etiology. *American Journal of Physical Anthropology*, 104: 393-397.
24. ASPDEN, R.M.; BORNSTEIN, N.H.; HUKINS, D.W.L. (1987). Collagen organisation in the interspinous ligament and its relationship to tissue function. *Journal of Anatomy*, 155: 141-151.
25. AUDRAN, M.; BASLÉ, M.F.; CHAMAILLARD, S. (1992). Les modifications de l'architecture trabéculaire liées à l'âge. *In: L. Simon, C. Hérisson, B. Biot, dir. Le rachis vieillissant.* Masson, Paris. pp. 239-244.
26. AUDRAN, M.; CHAPPARD, D.; BASLÉ, M.F.; REBEL, A. (1993). Vieillesse et modification de l'architecture et de la résistance mécanique de l'os. *In: C. Marcelli, J.-L. Sébert, dir. Architecture et résistance mécanique osseuses.* Masson, Paris. pp. 113-119.
27. BADELON, B.F.; BINDEL, P.; CHAUVEL, F.; VANDAELE, I. (1992). Evaluation de la mobilité du rachis dorso-lombaire en fonction de l'âge. *In: L. Simon, C. Hérisson, B. Biot, dir. Le rachis vieillissant.* Masson, Paris. pp. 63-80.
28. BAGNALL, K.M.; HARRIS, P.F.; JONES, P.R.M. (1977a). A radiographic study of the human fetal spine. 1. The development of the secondary cervical curvature. *Journal of Anatomy*, 123: 777-782.
29. BAGNALL, K.M.; HARRIS, P.F.; JONES, P.R.M. (1977b). A radiographic study of the human fetal spine. 2. The sequence of development of ossification centres in the vertebral column. *Journal of Anatomy*, 124 (3): 791-802.
30. BAGNALL, K.M.; HARRIS, P.F.; JONES, P.R.M. (1979). A radiographic study of the human fetal spine. 3. longitudinal growth. *Journal of Anatomy*, 128 (4): 777-787.
31. BALDET, P. (1993). Le micro-environnement osseux: structure et principales modalités réactionnelles. *In: C. Marcelli, J.-L. Sébert, dir. Architecture et résistance mécanique osseuses.* Masson, Paris. pp. 14-26.
32. BARNES, E. (1994). *Developmental defects of the axial skeleton in palaeopathology.* University Press of Colorado.
33. BAULNY, D.; SÉNÉGAS, J. (1992). L'involution du rachis. Aspects fondamentaux, biomécaniques, et anatomo-pathologiques. *In: L. Simon, C. Hérisson, B. Biot, dir. Le rachis vieillissant.* Masson, Paris. pp. 29-42.

34. BEHRENSMEYER, A.K.; LAPORTE, L.F. (1981). Footprints of a Pleistocene hominid in northern Kenya. *Nature*, 289 (5794): 167-169.
35. BEN-ITZHAK, S.; SMITH, P.; BLOOM, R.A. (1988). Radiographic study of the humerus in Neanderthals and *Homo sapiens sapiens*. *American Journal of Physical Anthropology*, 77: 231-242.
36. BÉRAUD, P.; LAMOTTE, S. (1987). Arthrose dorsale précoce et activité physique. In: J. Rodineau, L. Simon, dir. *Microtraumatologie du sport*. Masson, Paris. pp. 173-175.
37. BERGE, C. (1984). Multivariate analysis of the pelvis for Hominids and other extant Primates: implications for locomotion and systematics of the different species of Australopithecines. *Journal of Human Evolution*, 13 (7): 555-562.
38. BERGE, C.; ORBAN-SEGEBARTH, R.; SCHMID, P. (1984). Obstetrical interpretation of the australopithecine pelvic cavity. *Journal of Human Evolution*, 13 (7): 573-587.
39. BERNHARDT, M.; BRIDWELL, K.H. (1989). Segmental analysis of the sagittal plane alignment of the normal thoracic and lumbar spines and thoracolumbar junction. *Spine*, 14 (7): 717-721.
40. BERRY, J.L.; MORAN, J.M.; BERG, W.S.; STEFFEE, A.D. (1987). A morphometric study of human lumbar and selected thoracic vertebrae. *Spine*, 12 (4): 362-367.
41. BICK, E.M.; COPEL, J.W. (1950). Longitudinal growth of the human vertebra. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 32 (A): 803-814.
42. BIRKNER, R. (1980). L'image radiologique typique du squelette. Maloine S. A., Paris.
43. BLACK, K.M.; MCCLURE, P.; POLANSKY, M. (1996). The influence of different sitting positions on cervical and lumbar posture. *Spine*, 21 (1): 65-70.
44. BONNEL, F. (1993). Os cortical et os trabéculaire: un point de vue mécanique finaliste (de l'anatomie microscopique à la macroscopie). In: C. Marcelli, J.-L. Sébert, dir. *Architecture et résistance mécanique osseuses*. Masson, Paris. pp. 1-13.
45. BONNEL, F.; MOREL, M. (1990). Bases anatomiques de la stabilité rachidienne. In: A. Dimeglio, F. Bonnel, eds. *Le rachis en croissance: scoliose, taille assise et puberté*. Springer, Berlin. pp. 11-19.
46. BOOKSTEIN, F.L. (1947). The Measurement of Biological Shape and Shape Change. *Lecture Notes in Biomathematics*, 24: 1-191.
47. BOOKSTEIN, F.L. (1982). On the cephalometrics of skeletal changes. *American Journal of Orthodontics*, 82 (3): 177-198.
48. BOOKSTEIN, F.L. (1983). The geometry of craniofacial growth invariants. *American Journal of Orthodontics*, 83 (3): 221-234.
49. BOOKSTEIN, F.L. (1986). Size and Shape Spaces for Landmark Data in Two Dimensions. *Statistical Science* 1 (2): 181-242
50. BOOKSTEIN, F.; CHERNOFF, B.; ELDER, R.; HUMPHRIES, J.; SMITH, G.; STRAUSS, R. (1985). *Morphometrics in evolutionary biology*. Sp. Public. 15. The academy of natural sciences of Philadelphia.
51. BOULE, M. (1911). L'homme fossile de la Chapelle aux Saints. *Annales de paléontologie (1911-1913)*, 6: 111-172; 7: 21-56 85-192; 8: 1-70.

52. BRÄUER, G. (1988). Osteometrie. In: R. Knußmann, Hrsg. *Anthropologie. Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen. Band I, 1. Teil.* Gustav Fischer Verlag, Stuttgart. pp. 160-232.
53. BRIAND, D.; BONNEL, F. (1994). Adaptations morphologiques à la marche bipède dans l'échelle animale In J. Péliissier, V. Brun, dir. *La marche humaine et sa pathologie. Exploration et rééducation.* Masson, Paris. pp. 6-9.
54. BROOM, R.; ROBINSON, J.T.; SCHEPERS, G.W.H. (1950). Sterkfontein Ape-man *Plesianthropus*, *Transvaal Museum Memoir* No. 4. Pretoria, South Africa.
55. BROWN, F.H.; HARRIS, J.; LEAKEY, R.; WALKER, A. (1985). Early *Homo erectus* from West Lake Turkana, Kenya. *Nature*, 316: 788-792.
56. BRYANT, J.T.; REID, J.G.; SMITH, B.L.; STEVENSON, J.M. (1989). Method for determining vertebral body positions in the sagittal plane using skin markers. *Spine*, 14 (3): 258-265.
57. BUKOVIĆ, D.; DJELMIŠ, J.; ŠABAT, H. (1993). Mechanical Behavior of Lumbosacral Spine Caused by Altered Biomechanical Conditions in Advanced Pregnancy. *Collegium Antropologicum*, 17 (1): 103-109.
58. BURKE, A.C.; NELSON, C.E.; MORGAN, B.A.; TABIN, C. (1995). Hox genes and the evolution of vertebrate axial morphology. *Development*, 121: 333-346.
59. BURR, D.B.; MARTIN, R.B. (1989). Errors in bone remodelling: toward a unified theory of metabolic bone disease. *The American Journal of Anatomy*, 168 (2): 186-216.
60. CARRERA, J.M.; TORRENTS, M.; MUÑOZ, A.; DEVESA, R.; COMAS, C. (1997). Biometría fetal ecográfica. In: J. M. Carrera, dir. *Crecimiento fetal normal y patológico.* Masson, S.A.: Barcelona, Madrid, Paris, etc. pp. 123-188.
61. CARTER, D.R.; WONG, M.; ORR, T.E. (1991). Musculoskeletal ontogeny, phylogeny, and functional adaptation. *Journal of Biomechanics*, 24 (supp. 1): 3-16.
62. CAVAGNA, G.A.; HEGLUND, N.C.; TAYLOR, C.R. (1977). Mechanical work in terrestrial locomotion: two basic mechanisms for minimizing energy expenditure. *The American Journal of Physiology*, 233 (2): R243-R261.
63. CHANSIGAUD, J.P.; CRISCUOLO, J.L.; KAMINA, P. (1986). Evolution de la courbure du rachis cervical in utero. Essai d'interprétation. *Bulletin de l'Association des Anatomistes*, 70: 39-45.
64. CHARTERIS, J.; WALL, J.C.; NOTTRODT, J.W. (1981). Functional reconstruction of gait from the Pliocene hominid foot prints at Laetoli, northern Tanzania. *Nature*, 290 (5806): 496-498.
65. CHRIST, B.; WILTING, J. (1992). From somites to vertebral column. *Annals of Anatomy*, 174 (1): 23-32.
66. CLARK HOWEL, F. (1957). The Evolutionary significance of variation and varieties of "Neanderthal" Man. *Quarterly Review of Biology*, 32: 330-347.
67. CLEUVENOT, E. (1993). Ellipses équiprobables et taux d'éloignement dans la cas de petits échantillons. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 5 (num. spéc.): 449-452.
68. CLOPPER, C.J.; PEARSON, E.S. (1934). The use of confidence or fiducial limits illustrated in the case of the binomial. *Biometrika*, 26: 404.
69. COBB, J.R. (1948). Outline for the study of scoliosis. Instructional Courses Lectures, Vol.5, of the American Academy of Orthopaedic Surgeons. Ann Arbor, Michigan.

70. COHEN-SOLAL, M.E.; SEBERT, J.L. (1993). Oestrogènes, architecture et résistance mécanique osseuse. *In: C. Marcelli, J.-L. Sébert, dir. Architecture et résistance mécanique osseuses*. Masson, Paris. pp. 147-151.
71. COLLIS, D.K.; PONSETI, I.V. (1969). Long-term follow-up of patients with idiopathic scoliosis not treated surgically. *Journal of Bone and Joint Surgery [Am]*, 51-A: 425-445.
72. CONROY, G.C.; WEBER, G.W.; SEIDLER, H.; TOBIAS, P.V.; KANE, A.; BRUNSDEN, B. (1998). Endocranial Capacity in an Early Hominid Cranium from Sterkfontein, South Africa. *Science*, 280 (5370): 1730-1731.
73. COURPRON, P. (1992). Place du tassement vertébral dans l'ostéoporose sénile. (épidémiologie, évolutivité, relation avec les fractures du col). *In: L. Simon, C. Hérisson, B. Biot, dir. Le rachis vieillissant*. Masson, Paris. pp. 277-282.
74. CRISCO, J.J.; PANJABI, M.M. (1990). Postural biomechanical stability and gross muscular architecture in the spine. *In: J. Winters, S.L.-Y. Woo, eds. Multiple muscle system. Biomechanics and movement organization*. Springer Verlag. pp. 438-450.
75. CRUBEZY, E.; TRINKAUS, E. (1992). Shanidar 1: a case of hyperostotic disease (DISH) in the middle paleolithic. *American Journal of Physical Anthropology*, 89: 411-420.
76. CUNNINGHAM, D.J. (1886). The lumbar curve in man and apes. *Royal Irish Academy Cuningham Memoire*, N° 2.
77. D'ANGELI-CHEVASSUT, M.; GAVIRIA, M. (1994). La marche humaine, description et repères sémantiques. *In J. Péliissier, V. Brun, dir. La marche humaine et sa pathologie. Exploration et rééducation*. Masson. Paris. pp. 9-20.
78. DAGNELIE, P. (1975). *Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques. 3 vol.* Les presses agronomiques de Gembloux - A.S.B.L. Gembloux, Belgique.
79. DAI, L. (1998). The relationship between vertebral body deformity and disc degeneration in lumbar spine of the senile. *European Spine Journal*, 7 (1): 40-44.
80. DARWIN, C. (1871). *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex*. Publié par John Murray, 1871, et 1981 pour l'édition moderne *fac simile*: Princeton University Press, Princeton, NJ.
81. DASTUGUE, J.; GERVAIS, V. (1992). *Paléopathologie du squelette humain*. Société nouvelle des éditions Boubée, Paris, et CNRS.
82. DAVIS, P.R. (1959). The medial inclination of the human thoracic intervertebral articular facets. *Journal of Anatomy*, 93: 68-74.
83. DAVIS, P.R. (1961). Human lower lumbar vertebrae: some mechanical and osteological considerations. *Journal of Anatomy*, 95: 337-345.
84. DAWSON, J.E.; TRINKAUS, E. (1997). Vertebral osteoarthritis of the La Chapelle-aux-Saints 1 Neanderthal. *Journal of Archaeological Science*, 24: 1015-1021.
85. DAY, M.H. (1978). Functional interpretations of the morphology of postcranial remains of early african Hominids. *In: C. J. Jolly, ed. Early Hominids of Africa*. St Martin's Press, New York. pp. 311-345.
86. DAY, M.H. (1986). Bipedalism: pressures, origins and modes. *Major topics in primate and human evolution*. Cambridge Univ. Press. pp. 188-202.

87. DAYER, J.M. (1985). Role of the synovial membrane in joint destruction: interaction with cellular and humoral components. In: G. Verbrugen, E. M. Veys, eds. *Degenerative joints. Vol. 2.* Elsevier Science Publishers B. V. Biomechanical Division. pp. 157-166.
88. DE BEER KAUFMAN, P. (1974). Variation in the number of presacral vertebrae in Bantu-speaking South African negroes. *American Journal of Physical Anthropology*, 40 (3): 369-374.
89. DE BEER KAUFMAN, P. (1977). The number of vertebrae in southern African negro, the American negro and the Busman (Sn). *American Journal of Physical Anthropology*, 47 (3): 409-414.
90. DE GUISE, J.A.; MALLOUCHE, H.; DANSEREAU, J.; LABELLE, H. (1995). Techniques d'imagerie appliquées à la biomécanique rachidienne. *Rachis*, 7 (3): 135-144.
91. DEAN, J.C.; WILCOX, C.H.; DANIELS, A.U.; GOODWIN, R.R.; VAN WAGONER, E.; DUNN, H.K. (1991). A new method for assessing relative dynamic motion of vertebral bodies during cyclic loading in vitro. *Journal of Biomechanics*, 24 (12): 1189-1197.
92. DEFRISE-GUSSENHOVEN, E. (1955). Ellipses équiprobables et taux d'éloignement en Biométrie. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique*, 31 (26): 1-31.
93. DELMAS, A. (s.d.). *Les variations numériques et morphologiques rachidiennes, leur intérêt théorique et pratique.* pp. 1-40.
94. DELMAS, A. (1951). Attitude érigée et types rachidiens de statique corporelle. *L'attitude. Journées médicales de la Fédération Française d'Education Physique S.D.M.S.*: 17-43.
95. DELMAS, A. (1956). Quelques aspects de l'anthropologie rachidienne. *Revue anthropologique*, 2ème année (1): 349-373.
96. DELMAS, A. (1958). L'acquisition de la station érigée. In: *Les Processus de l'Hominisation. Colloques internationaux du CNRS.* Paris, 19-23 mai 1958. Editions du CNRS. pp. 9-35.
97. DELMAS, A. (1970). H. Rouvière. *Anatomie humaine. Tome I: Tête et cou; Tome II: Tronc.* Masson, Paris, etc.
98. DELMAS, A.; PINEAU, H. (1961). *Modes locomoteurs en relation avec le poids des vertèbres chez les primates.* Comptes rendus de l'association des anatomistes. 57ème réunion. pp. 264-273.
99. DELMAS, A.; PINEAU, H. (1984). Le poids des vertèbres présacrées. Essais sur la signification des poids absolus et relatifs chez les mammifères. *Cahiers d'Anthropologie et Biométrie humaine*, 2 (3): 1-122.
100. DEMES, B. (1987). Another look at an old face; biomechanics of the neanderthal facial skeleton reconsidered. *Journal of Human Evolution*, 16: 297-305.
101. DEMPSTER, D.W. (1993). Quantitative assessment of cancellous bone structure. In: C. Marcelli, J.-L. Sébert, dir. *Architecture et résistance mécanique osseuses.* Masson, Paris. pp. 76-82.
102. DESCRIMES, J.L.; AUBIN, C.E.; SKALLI, W.; ZELLER, R. (1995). Introduction des facettes articulaires dans une modélisation par éléments finis de la colonne vertébrale et du thorax scoliotique: aspects mécaniques. *Rachis*, 7 (5): 301-304.
103. DICKSON, R.A.; DEACON, P. (1987). Spinal Growth. *Journal of Bone and Joint Surgery [Am]*, 69-B (5): 690-692.
104. DICKSON, R.A.; LEATHERMAN, K.D. (1976). Spinal deformity in adults: changing concepts. *Journal of Bone and Joint Surgery [Am]*, 58-A: 729.

105. DIEM, K. (1972). *Tables scientifiques*. Documenta Geigy, Ciba-Geigy S.A.
106. DIETRICH, M.; KEDZIOR, K.; ZAGRAJEK, T. (1990). Modeling of muscle action and stability of the human spine. In: J. Winters, S. L.-Y. Woo, eds. *Multiple muscle system. Biomechanics and movement organization*. Springer Verlag. pp. 451-460.
107. DIETRICH, M.; KEDZIOR, K.; ZAGRAJEK, T. (1995). Rachis et commandes musculaires. *Rachis*, 7 (3): 123-128.
108. DIMEGLIO, A.; HÉRISSON, C. (1985). La croissance osseuse. Un rachis exposé. In: J. Rodineau, L. Simon, dir. *Muscles, tendons et sport*. Masson, Paris. pp. 68-72.
109. DIMÉGLIO, A.; HÉRISSON, C.; SIRES, A. (1990). La maladie de Scheuerman In J. Rodineau, L. Simon, dir. *Microtraumatologie du sport*. Collection de pathologie locomotrice. Masson. Paris. pp. 163-172.
110. DOLLÉ, P.; DIERICH, A.; LEMEURE, M.; SCHIMMANG, T.; SCHUHBAUR, B.; CHAMBON, P.; DUBOULE, D. (1993). Disruption of the Hoxd-13 gene induces localized heterochrony leading to mice with neonatal limbs. *Cell*, 75: 431-441.
111. DONTIGNY, R.L. (1985). Function and pathomechanics of the sacroiliac joint. *Physical Therapy*, 65: 35-44.
112. DUDAY, H.; ARENSBURG, B. (1991). La Pathologie. In: O. Bar Yosef, B. Vandermeersch, eds. *Le squelette Moustérien de Kebara*. Cahiers de Paléanthropologie, CNRS ed., Paris. pp. 179-193 (+21 figures).
113. DUNCAN, H.; RIDDLE, J.; JUNDT, J.W.; PITCHFORD, W. (1985). Osteoarthritis and the subchondral plate. In: G. Vezrbruggen, E. M. Veys, eds. *Degenerative joints, vol. 2*. Elsevier Science Publishers B. V. (Biomechanical Division). pp. 181-191.
114. EBRAHEIM, N.A.; ROLLINS, J.R.; XU, R.; YEASTING, R.A. (1996). Projection of the lumbar pedicle and its morphometric analysis. *Spine*, 21 (11): 1296-1300.
115. EDELSON, J.G.; FAAOS, M.D.; NATHAN, H. (1988). Stages in the natural history of the vertebral end plates. *Spine*, 13 (1): 21-26.
116. EDWARDS, W.T.; YUAN, H. (1995). Rehabilitación de la columna vertebral. Hueso. In: S. H. Hochschuler, H. B. Cotler, R. D. Guyer, eds. *Rehabilitación de la columna vertebral. Ciencia y Práctica*. Mosby / Doyma Libros, Madrid, Baltimore, etc. pp. 229-246.
117. EL-BOHY, A.A.; YANG, K.H.; KING, A. (1989). Experimental verification of facet load transmission by direct measurement of facet lamina contact pressure. *Journal of Biomechanics*, 22: 931-941.
118. ELYAQTINE, M. (1995). *Variabilité morphologique et métrique de l'os temporal chez Homo sapiens*. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, n°1321.
119. ELYAQTINE, M. (1996). L'os temporal chez *Homo erectus* et *Homo sapiens*. Variabilité et Evolution. *Revue d'Archéométrie*, 20: 5-22.
120. ELYAQTINE, M. (1997). Mise en évidence de relations phylétiques entre *Homo erectus* et *Homo sapiens* par l'analyse morphométrique de l'os temporal. Phyletic relationships between *Homo erectus* and *Homo sapiens* revealed by the temporal bone morphometric analysis. *Biométrie Humaine et Anthropologie*, 15 (1-2): 23-29.

121. ENDO, B.; KIMURA, T. (1970). Postcranial skeleton of the Amud Man. *In*: H. Suzuki and F. Takai, eds. *The Amud Man and His Cave Site*. Academic Press, Tokyo.
122. ENGELS, F. (1876). *Du rôle du travail dans la transformation du singe en homme*. Edition Posthume dans *Dialectique de la nature*. Editions Sociales (1952). Texte complet en ligne: ABU bibliothèque Universelle, C.N.A.M., <http://cedric.cnam.fr/ABU/>.
123. ENSINK, F.-B.M.; SAUR, P.M.M.; FRESE, K.; SEEGER, D.; HILDEBRANDT, J. (1996). Lumbar range of motion: influence of time of day and individual factors on measurements. *Spine*, 21 (11): 1339-1343.
124. ERICKSEN, M.F. (1976). Some aspects of aging in the lumbar spine *American Journal of Physical Anthropology*, 45: 575-580.
125. ERICKSEN, M.F. (1978a). Aging in the lumbar spine II. L1 and L2 *American Journal of Physical Anthropology*, 48: 241-246 .
126. ERICKSEN, M.F. (1978b). Aging in the lumbar spine III. L5 *American Journal of Physical Anthropology*, 48: 247-250.
127. ERLEBACHER, A.; FILVAROFF, E.H.; GITELMAN, S.E.; DERYNK, R. (1995). Toward a molecular understanding of skeletal development. *Cell*, 80: 371-378.
128. EVANS, F.G. (1968). *The human vertebral column from the biomechanical point of view*. Proceedings VIIIth International Congress of Anthropological and Ethnological Sciences, Tokyo and Kyoto, 1968. Science Council of Japan. pp. 340-344.
129. FARFAN, H.F.; OSTERIA, V.; LAMY, C. (1976). The mechanical etiology of spondylolysis and spondylolisthesis. *Clinical Orthopaedics*, 117: 40-55.
130. FAUCHET, R.; STAGNARA, P. (1980). Pourquoi faut-il dépister précocement les cyphoses? *Cahiers Médicaux*. 5 827-834.
131. FENDER, P.; SENGLER, J.; MICHOT, P.; BUEMI, A.; LEROMAIN, C. (1992). Statique rachidienne normale. Etude clinique et radiographique chez 100 sujets âgés de 30 à 39 ans. *In*: L. Simon, C. Hérisson, B. Biot, dir. *Le rachis vieillissant*. Masson, Paris. pp. 15-20.
132. FERNER, H.; STAUBESAND, J. (1983). *Sobotta Atlas de Anatomía Humana*. 2 vol. 18^a Edición en Alemán (1982). Atlas der Anatomie des Menschen. Ed.: Urban & Schwarzenberg. Trad. N. G. Meeroff. Editorial Medica Panamericana, Madrid, Bogotta, etc.
133. FICK, R. (1933). Untersuchungen an der Wirbelsäule der Menschaffen. *Sitzungsberichte der preußischen Akademie der Wissenschaften. Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse*: 167-239.
134. FICK, R. (1934). Über die Beckenneigung. *Sitzungsberichte der preußischen Akademie der Wissenschaften. Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse*, XXI: 402-424.
135. FICK, R. (1936). Untersuchung an der Wirbelsäule von 30 Gibbons und über die Wirbelzahlen der Menschenaffen. *Sitzungsberichte der preußischen Akademie der Wissenschaften. Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse*, XVII: 160-178.
136. FIENBERG, A.A.; UTSET, M.F.; BOGARAD, L.D.; HART, C.P.; AWGULEWITSCH, A.; FERGUSON-SMITH, A.; FAINSOD, A.; RABIN, M.; RUDDLE, F.H. (1987). Homeobox genes in murine development. *Current topics in developmental biology*, 23: 233-256.

137. FISCHER, E. (1933). Genetik und Stammesgeschichte der menschlichen Wirbelsäule. *Biologisches Zentralblatt*, Band 53. (Heft 3/4): 203-220.
138. FISCHER, R.A. (1958). *Statistical Methods for Research Workers*. 13th edition rev. Oliver and Boyd, Edinburgh, London.
139. FLEAGLE, J. G. (1999). *Primate Adaptation and Evolution*. 2nd Edition. Academic Press, San Diego, London.
140. FORESTIER, J.; ROTÈS-QUÉROL, J. (1950). Hyperostose ankylosante vertébrale sénile. *Revue de Rhumatologie*, 17: 525-535.
141. FRANCIS, C.C. (1955). Variations in the articular facets of the cervical vertebrae. *The Anatomical Record*, 122: 589-602.
142. GEPNER, P.; PIERRON, D.; ROBINE, D. (1994). Lombalgie chronique et vertèbre transitionnelle lombosacrée: un lien pathogénique probable à propos de 5 observations. *Rachis*, 6 (3): 141-146.
143. GERSTER, J.C. (1992). Chondrocalcinose et rachis vieillissant. In: L. Simon, C. Hérisson, B. Biot, dir. *Le rachis vieillissant*. Masson, Paris. pp. 311-316.
144. GOULD, S.J. (1997). The exaptive excellence of spandrels as a term and prototype. *Proceeding of the National Academy of Science of the USA*, 94 (20): 10750-10755.
145. GRACOVETSKY, S. (1990). Musculoskeletal function of the spine. In: J.M. Winterss, S.L.-Y. Woo, eds. *Multiple Muscle Systems: Biomechanics and Movement Organization*. Springer-Verlag, New York. pp. 410-437.
146. GRACOVETSKY, S.; FARFAN, H.F.; LAMY, C. (1981). The mechanism of the lumbar spine *Spine*, 6 (3): 249-262.
147. GRAF, W.; DE WAELE, C.; VIDAL, P.P. (1995). Functional anatomy of the head-neck movement system of quadrupedal and bipedal mammals. *Journal of Anatomy*, 186: 55-74.
148. GRAY, H. (1977). *Anatomy, descriptive and surgical*. Edition américaine révisée, à partir de la 15ème édition britannique. Bounty Books, New York.
149. GRECO, M. (1968). *Postural attitudes in subjects from 10 to 13 years old*. Proceedings VIIIth International Congress of Anthropological and Ethnological Sciences, Tokyo and Kyoto, 1968. Science Council of Japan. pp. 44-45.
150. GREEN, T.P.; ALLVEY, J.C.; ADAMS, M.A. (1994). Spondylolysis. Bending of the inferior articular processes of lumbar vertebrae during simulated spinal movements. *Spine*, 19: 2683-2691.
151. GROBLER, L.J.; ROBERTSON, PETER A.; NOVOTNY, J.E.; POPE, M.H. (1993). Etiology of Spondylolisthesis Assessment of the Role Played by Lumbar Facet Joint Morphology. *Spine*, 18 (1): 80-91.
152. GROTE, H.J.; AMLING, M.; VOGEL, M.; HAHN, M.; PÖSL, M.; DELLING, G. (1995). Intervertebral variation in trabecular microarchitecture throughout the normal spine in relation to age. *Bone*, 16 (3): 301-308.
153. HAAS, S.L. (1939). Growth in length in vertebrae. *Archives of Surgery*, 38: 245-249.

154. HAMBUCKEN, A. (1993). *Variabilité morphologique et métrique de l'Humerus, du Radius et de l'Ulna des Néandertaliens. Comparaison avec l'Homme moderne*. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I.
155. HANDAL, J.; SELBY, D. (1995). Inestabilidad vertebral. In: S. H. Hochschuler, H. B. Cotler, R. D. Guyer, eds. *Rehabilitación de la columna vertebral. Ciencia y Práctica*. Mosby / Doyma Libros, Madrid, Baltimore, etc. pp. 153-167.
156. HAOND, P.; BIOT, B. (1992). Vieillessement vertébral et courbures sagittales du rachis. In: L. Simon, C. Hérisson, B. Biot, dir. *Le rachis vieillissant*. Masson, Paris. pp. 20-28.
157. HARRISSON, D.D.; JANIK, T.J.; TROYANOVICH, S.J.; HOLLAND, B. (1996). Comparaison of lordotic cervical spine curvatures to a theoretical ideal model of the sagittal cervical spine. *Spine*, 21 (6): 667-675.
158. HASEBE, K. (1913). Die Wirbelsäule der Japaner. *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie*, 15: 259-380.
159. HEGGENESS, M.H.; DOHERTY, B.J.; COHEN, M.; COTTIN, Y.; MARCER, I.; DIDIER, J.-P. (1997). The trabecular anatomy of the thoracolumbar vertebrae: implications for burst fractures. *Journal of Anatomy*, 191 (2): 309-312.
160. HEIM, J.-L. (1976). Les hommes fossiles de La Ferrassie. Tome I. *Archives de l'Institut de Paléontologie Humaine*. Mémoire 35. Masson, Paris, etc.
161. HEIM, J.-L. (1982). Les hommes de La Ferrassie. Tome II. *Archives de l'Institut de Paléontologie Humaine*, Mémoire 38. Masson, Paris, etc.
162. HEIPLE, K.G.; LOVEJOY, C.L. (1971). The distal femoral anatomy of Australopithecus. *American Journal of Physical Anthropology*, 35: 75-84.
163. HENRY MC, H.M. (1991). First steps ? Analyses of the postcranium of early hominids. In: Y. Coppens, B. Senut, dir. *Origines de la bipédie chez les hominidés*. Editions du CNRS, Paris. pp. 133-142.
164. HEWES, G.W. (1961). Food transport and the origin of human bipedalism. *American Anthropologist*, 69: 63-67.
165. HEYLINGS, D.J.A. (1978). Supraspinous and interspinous ligaments of the human lumbar spine. *Journal of Anatomy*, 125: 127-131.
166. HONEYMAN, P.T.; JACOBS, E.A. (1996). Effects of culture on back pain in Australian aboriginals. *Spine*, 21 (7): 841-843.
167. HOU, S.; HU, R.; SHI, Y. (1993). Pedicle Morphology of the Lower Thoracic and Lumbar Spine in a Chinese Population. *Spine*, 18 (13): 1850-1855.
168. HOWELL, N. (1979). *Demography of the Dobe !Kung*. Academic Press, New York, etc.
169. HOWELLS, W.W. (1974). Neanderthals: names, hypotheses and scientific method. *American Anthropologist*, 76: 24-38.
170. HRDLKA, A. (1927). The Neanderthal phase of man. *Journal of the Royal Anthropological Institute of Great Britain*, 57: 249-274.
171. HULT, L. (1954). Cervical, dorsal and lumbar spinal syndromes. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 17 (suppl.): 65-73.

172. HUROV, J.R. (1987). Terrestrial locomotion and back anatomy in vervets (*Cercopithecus aethiops*) and patas monkeys (*Erythrocebus patas*). *American Journal of Primatology*, 13: 297-311.
173. HUSSON, J.L.; ALLOUIS, M.; QUEIROZ, F.DE; BRACQ, H.; MASSE, A. (1987). Hyperfriction articulaire isolée et dégénérescence cartilagineuse initiale. Etude expérimentale. In: J. Rodineau, L. Simon, dir. *Microtraumatologie du sport*. Masson, Paris. pp. 8-16.
174. HUSSON, J.L.; PONCER, R.; DE KORVIN, B. (1995). Jeu articulaire et instabilité. *Rachis*, 7 (3): 169-172.
175. ISHIDA, H. (1991). A strategy for long distance walking in the earliest hominids: effect of posture on energy expenditure during bipedal walking In Y. Coppens, B. Senut, dir. *Origines de la bipédie chez les hominidés*. Editions du CNRS. Paris. pp. 9-16.
176. JABLONSKY, N.G.; CHAPLIN, G. (1993). Origin of habitual terrestrial bipedalism in the ancestor of the Hominidae. *Journal of Human Evolution*, 24: 259-280.
177. JIANG, H.; MOREAU, M.; RASO, J.; RUSSELL, G.; BAGNALL, K. (1995). A comparison of spinal ligaments—differences between bipeds and quadrupeds. *Journal of Anatomy*, 187: 85-91.
178. JOHNSON, D.; O'HIGGINS, P. ; MCANDREW, T. J. (1988). The relationship between age, size and shape in the upper thoracic vertebrae in the mouse. *Journal of Anatomy*, 161: 73-82.
179. JOHNSON, D.; O'HIGGINS, P. ; MCANDREW, T. J. (1989). The effect of the gene undulated (un) on the shape of cervical and upper thoracic vertebrae in the house mouse. *Journal of Anatomy*, 163: 49-55.
180. JOHNSON, D.; O'HIGGINS, P. ; MCANDREW, T. J. (1990). The effect of diet on bone shape in the mouse. *Journal of Anatomy*, 172: 213-220.
181. JOHNSON, D.; O'HIGGINS, P. ; MCANDREW, T. J. ; KIDA, M. Y. (1992). The inheritance of vertebral shape in the mouse. I. A study using Fourier analysis to examine the inheritance of patterns of inheritance in the morphology of cervical and upper thoracic vertebrae. *Journal of Anatomy*, 180: 507-514.
182. JOLLY, C.F. (1970). The seed-eaters: A new model of Hominid differentiation based on a baboon analogy. *Man*, 5: 5-28.
183. JORDAAN, H.V.F. (1976). Newborn:adult brain ratios in Hominid evolution. *American Journal of Physical Anthropology*, 44 (2): 271-278.
184. JUNGERS, W.L. (1982). Lucy's limbs: skeletal allometry and locomotion in *Australopithecus afarensis*. *Nature*, 297 (5868): 676-678.
185. KAHLE, W.; LEONHARDT, H.; PLATZER, W. (1980). Anatomie 1. Appareil locomoteur. Atlas commenté d'anatomie humaine pour étudiants et praticiens. Edition française dirigée par C. Cabrol, 2ème édition. Flammarion Médecine Sciences, Paris.
186. KAPANDJI, I.A. (1982). *Physiologie articulaire. Fascicule III. Tronc et Rachis*. Maloine S. A., Paris.
187. KEITH, A. (1923a). Man's posture: its evolution and disorders. Lecture I.— Theories concerning the evolution of man's posture. *The British Medical Journal*, Volume 1 (No. 3246): 451-454.
188. KEITH, A. (1923b). Man's posture: its evolution and disorders. Lecture II.— The evolution of the orthograde spine. *The British Medical Journal*, Volume 1 (No. 3247): 499-502.
189. KEITH, A. (1923c). Man's posture: its evolution and disorders. Lecture III.— The postural adaptations of the shoulders and thorax. *The British Medical Journal*, Volume 1 (No. 3248): 545-548.

190. KEITH, A. (1923d). Man's posture: its evolution and disorders. Lecture IV.— The adaptations of the abdomen and of its viscera to the orthograde posture. *The British Medical Journal*, Volume 1 (No. 3249): 587-590.
191. KEITH, A. (1923e). Man's posture: its evolution and disorders. Lecture V.— ?. *The British Medical Journal*, Volume 1 (No. 3250): 624-628.
192. KEITH, A. (1923f). Man's posture: its evolution and disorders. Lecture VI.— The evolution of the human foot. *The British Medical Journal*, Volume 1 (No. 3251): 669-672.
193. KENNETH, M.W. (1990). Duplication with variation: Metameric logic in evolution from genes to morphology. *Yearbook of Physical Anthropology*, 33: 1-28.
194. KESHNER, E.A.; ALLUM, J.H.J. (1990). Muscle activation patterns coordinating postural stability from head to foot In J. Winters, S. L.-Y. Woo, eds. *Multiple muscle system. Biomechanics and movement organization*. Springer Verlag. pp. 481-497.
195. KESSEL, M. (1992). Respecification of vertebral identities by retinoic acid. *Development*, 115: 487-501.
196. KIPPERS, V.; PARKER, A. (1989). Validation of single-segment and three segment spinal models used to represent lumbar flexion. *Journal of Biomechanics*, 22 (1): 67-75.
197. KNUSSMANN, R.; FINKE, E. (1980). Studies on the Sex-specificity of the Human Spine Profile. *Journal of Human Evolution*, 9: 615-619.
198. KOTHE, R.; O'HOLLERAN, J.D.; LIU, W.; PANJABI, M.M. (1996). Internal architecture of the thoracic pedicle. *Spine*, 21 (3): 264-270.
199. KRAG, M.H.; WEAVER, D.L.; BEYNNON, B.D.; HAUGH, L.D. (1988). Morphometry of the thoracic and lumbar spine related to transpedicular screw placement for surgical spinal fixation. *Spine*, 13 (1): 27-32.
200. KRANTZ, G.S. (1963). The functional significance of the mastoid processes in man. *American Journal of Physical Anthropology*, 21: 591-593.
201. KRUKOFF, S. (1978). Structures angulaires constantes au cours de l'évolution du crâne chez l'homme et le chimpanzé. *Les Origines humaines et les époques de l'intelligence*. Masson, Paris. pp. 117-151.
202. KUBEIN-MEESBURG, D.; NÄGERL, H.; FANGHÄNEL, J. (1990). Elements of a general theory of joints. 1. Basic Kinematic and Static Function of Diarthrosis. *Anatomischer Anzeiger*, 170 (3/4): 301-308.
203. KUBEIN-MEESBURG, D.; NÄGERL, H.; FANGHÄNEL, J. (1991a). Elements of a general theory of joints. 4. Coupled Joints as Simple Gear Systems. *Anatomischer Anzeiger*, 172 (5): 309-321.
204. KUMAR, S.K.; DUFRESNE, R.M.; VAN SCHOOR, T. (1995a). Human trunk strength profile in flexion extension. *Spine*, 20 (2): 160-168.
205. KUMAR, S.K.; DUFRESNE, R.M.; VAN SCHOOR, T. (1995b). Human trunk strength profile in lateral flexion and axial rotation. *Spine*, 20 (2): 169-177.
206. KUMMER, B. (1965). Das mechanische Problem der Aufrichtung auf die Hinterextremität im Hinblick auf die Evolution der Bipedie des Menschen. In: G. Heberber, Hrsg. *Menschliche Abstammungslehre*. Gustav Fisher Verlag, Stuttgart. pp. 227-248.

207. KUMMER, B. (1968). *General problems in biomechanics of the upright posture and gait (an introduction)*. Proceedings VIIIth International Congress of Anthropological and Ethnological Sciences, Tokyo and Kyoto, 1968. Science Council of Japan. pp. 316-322.
208. KUMMER, B. (1975). Functional adaptation to posture in the pelvis of man and other primates. *In: R. Tuttle, ed. Primate Functional Morphology and Evolution*. Mouton, The Hague, Paris. pp. 281-290.
209. KUMMER, B. (1991). Biomechanical foundation of the development of human bipedalism. *In: Y. Coppens, B. Senut, dir. Origines de la bipédie chez les hominidés*. Editions du CNRS, Paris. pp. 1-8.
210. KUMMER, B. (1992). Biomechanische Probleme der aufrechten Haltung. *Annals of Anatomy*, 174 (1): 33-39.
211. LAGIER, R. (1992). Vieillesse du rachis. Confrontation anatomo-clinique. *In: L. Simon, C. Hérisson, B. Biot, dir. Le rachis vieillissant*. Masson, Paris. pp. 43-49.
212. LANIER, R.R. (1939). The presacral vertebrae of American white and negro males. *American Journal of Physical Anthropology*, 25: 341-420.
213. LANIER, R.R. (1954). Some factors to be considered in the study of lumbosacral fusion. *American Journal of Physical Anthropology*, 12 (3): 363-372.
214. LANYOB, L.E. (1993). The importance of mechanical adaptation in controlling bone architecture and adverting bone fracture. *In: C. Marcelli, J.-L. Sébert, dir. Architecture et résistance mécanique osseuse*. Acquisitions rhumatologiques, Masson, Paris. pp. 58-65.
215. LANYON, L.E.; RUBIN, C.T. (1984). Static versus dynamic loads as an influence on bone remodeling. *Journal of Biomechanics*, 17: 897-905.
216. LARSEN, E.H.; NORDENTOFT, E.L. (1962). Growth of the epiphyses and vertebra. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 32: 210-217.
217. LATIMER, B.; WARD, C.V. (1993). The thoracic and lumbar vertebrae. *In: A. Walker and R. Leakey eds. The Narioktome Homo erectus skeleton*. pp. 266-293
218. LAVAL-JEANTET, A.M.; CHEVALIER, F.; BERGOT, C.; LAVAL-JEANTET, M.; PEYRIN, F.; HOUSSARD, J.-P. (1993). La structure trabéculaire vertébrale en tomodynamométrie. *In: C. Marcelli, J.-L. Sébert, dir. Architecture et résistance mécanique osseuses*. Masson, Paris. pp. 82-91.
219. LAVASTE, F.; ROBIN, S. (1995). Le rachis instable: aspects biomécaniques. *Rachis*, 7 (3): 173-175.
220. LAVASTE, F.; SKALLI, W.; ROBIN, S.; DIOP, A.; MAZEL, C.; DUBOUSSET, J. (1991). Modélisation tridimensionnelle pra éléments finis du rachis lombaire: application à l'étude d'un système de fixation postérieure. *Rachis*, 3 (6): 475-486.
221. LAVASTE, F.; SKALLI, W.; ROBIN, S.; ROY-CAMILLE, R.; COTREL, Y. (1992). Three dimensional geometrical and mechanical modelling of the lumbar spine. *Journal of Biomechanics*, 25 (10): 1153-1164.
222. LAZAR, P. (1986). La naissance prématurée, au lien entre la station debout et le volume crânien ?. *L'Anthropologie*, 90 (3): 439-445.
223. LAZENNEC, J.Y. (1995). Anatomie du rachis. *In: R. Roy-Camille, G. Saillant, P. Antoniotti, C. Gilardeau, dir. Le rachis. Aspects fondamentaux, explorations, techniques*. Masson, Paris, Milan, Barcelone. pp. 18-76.

224. LE DOUBLE, A.-F. (1912). *Traité des variations de la colonne vertébrale de l'Homme*. Vigot, Paris.
225. LEAKEY, M.D.; HAY, R.L. (1979). Pliocene footprints in the Laetoli beds at Laetoli, northern Tanzania. *Nature*, 278 (5702): 317-323.
226. LEGAYE, J.; HECQUET, J.; MARTY, C.; DUVAL-BEAUPERE, G. (1993). Equilibre sagittal du rachis. Relations entre bassin et courbures rachidiennes sagittales en position debout. *Rachis*, 5 (5): 215-226.
227. LEMAIRE, J.P. (1986). Eléments d'anatomie comparée du rachis lombo sacré. Physiologie et physiopathologie de l'acquisition érigée. In: Table ronde internationale n°3 du CNRS, 1983. *Définition et origines de l'Homme*. Editions du CNRS, Paris. pp. 279-281.
228. LEPOUTRE, F.-X.; GODILLON, A.-P. (1992). Chirurgie de la scoliose: aide à la décision par l'imagerie en trois dimensions (3D). *Revue du Rhumatisme et des maladies ostéo-articulaires*, 59 (6 bis numéro spécial): 7-12S.
229. LEROI-GOURHAN, A. (1955). Du quadrupède à l'Homme (Station, face et denture). *Revue française d'odonto-stomatologie*, pp. 1021-1033.
230. LEUTENEGGER, W. (1972). Newborn size and pelvic dimensions of Australopithecus. *Nature*, 240: 568-569.
231. LEUTENEGGER, W. (1974). Functional aspects of pelvic morphology in simian primates. *Journal of Human Evolution*, 3: 207-222.
232. LEUTENEGGER, W. (1982). Encephalization and obstetrics in primates with particular reference to human evolution. In: E. Armstrong and D. Falk, Eds. *Primate Brain Evolution: Methods and Concepts*. Plenum Press, New York. pp. 85-95.
233. LEUTENEGGER, W. (1987). Neonatal brain size and neurocranial dimensions in Pliocene hominids: Implications for obstetrics. *Journal of Human Evolution*, 16 (3): 291-296.
234. LILLIEFORS, H.W. (1967). On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association*, 64: 399-402.
235. LISOWSKI, F.P. (1968). *A comparative and experimental investigation of locomotor adaptation*. Proceedings VIIIth International Congress of Anthropological and Ethnological Sciences, Tokyo and Kyoto, 1968. Science Council of Japan. pp. 331-334.
236. LITTLE, W.; FOWLER, H.W.; COULISON, J.; ONIONS, C.T. (1933). *The Shorter Oxford English Dictionary on Historical Principles*. 3d edition revised. Oxford University Press, Oxford.
237. LLOYD, A.E.; GOULD, S.J. (1993). Species selection on variability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, 90: 595-599.
238. LOVEJOY, C. O. (1978). A biomechanical review of the locomotor diversity of early hominids. In: C. J. Jolly, Ed. *Early Hominids of Africa*. St Martins Press, New York. pp. 403-429.
239. LOVEJOY, C.O. (1974). The gait of australopithecines. *Yearbook of Physical Anthropology*, 17: 147-161.
240. LOVEJOY, C.O. (1975). Biomechanical perspectives on the lower limb of early hominids. In: R.H. Tuttle, Ed. *Primate Functional Morphology and Evolution*. Mouton, The Hague. pp. 291-326.
241. LOVEJOY, C.O. (1978). A biomechanical review of the locomotor diversity of early hominids. In: C. J. Jolly, Ed. *Early Hominids of Africa*. St Martins Press, New York. pp. 403-429.

242. LOVEJOY, C.O. (1981). The origin of man. *Science*, 211 (4480): 341-350.
243. LOVEJOY, C.O.; HEIPLE, K.G. (1972). Proximal femoral anatomy of Australopithecus. *Nature*, 235: 175-176.
244. LOVEJOY, C.O.; HEIPLE, K.G.; BURSTEIN, A.H. (1973). The gait of Australopithecus. *American Journal of Physical Anthropology*, 38: 757-779.
245. LOVEJOY, C.O.; TRINKAUS, E. (1980). Strength and robusticity of the Neanderthal tibia. *American Journal of Physical Anthropology*, 53: 465-470.
246. LOYAU, G.; MACRO, M. (1992). Vieillesse articulaire et arthrose rachidienne. In: L. Simon, C. Hérisson, B. Biot, dir. *Le rachis vieillissant*. Masson, Paris. pp. 79-85.
247. MACINTOSH, J.E.; BOGDUK, N.; PEARCY, M. J. (1993). The Effects of Flexion on the Geometry and Actions of the Lumbar Erector Spinae. *Spine*, 18 (7): 884-893.
248. MAFART, B.Y. (1980). *L'Abbaye Saint-Victor de Marseilles. Etude anthropologique de la nécropole des IV-VI siècles*. Collection Paléoécologie de l'Homme Fossile. Editions du CNRS, Paris.
249. MAIER, R.; WILHELMI, G. (1985). Genetical or inborn type of degenerative joint disease. In: G. Verbrugen, E. M. Veys, eds. *Degenerative joints. Vol. 2*. Elsevier Science Publishers B. V. Biomechanical Division. pp. 329-345.
250. MANDELL, P.J.; WEITZ, E.; BERNSTEIN, J.I.; LIPTON, M.H.; MORRIS, J.; BRADSHAW, D.; BODKIN, K.P.; MATTMILLER, B. (1993). Isokinetic Trunk Strength and Lifting Strength Measures. Differences and Similarities Between Low-Back-Injured and Noninjured Workers. *Spine*, 18 (16): 2491-2501.
251. MARCELLI, C. (1993). Le remodelage osseux: stimuli mécaniques et facteurs cellulaires de régulation. In: C. Marcelli, J.-L. Sébert, dir. *Architecture et résistance mécanique osseuses*. Masson, Paris. pp. 27-35.
252. MARCELLI, S.; SIMON, L. (1992). Syndrome fracturaire vertébral d'origine ostéoporotique. In: L. Simon, C. Hérisson, B. Biot, dir. *Le rachis vieillissant*. Masson, Paris. pp. 283-287.
253. MAROUDAS, A. (1985). The function of articular cartilage in terms of its structure in a healthy joint. How is it altered in the degenerative joint?. In: G. Verbrugen, E. M. Veys, eds. *Degenerative joints. Vol. 2*. Elsevier Science Publishers B. V. Biomechanical Division. pp. 99-115.
254. MARTIN, R. (1893). Zur physischen der Anthropologie der Feuerländer. *Archiv für Anthropologie, s.n.*
255. MARTIN, R.; SALLER, K. (1959). *Lehrbuch der Anthropologie, Vol. 2*. 3rd edn. Gustav Fischer, Stuttgart.
256. MASON, S. F. (1984). *Historia de las ciencias*. 5 volumes. Traduction au Castillan de « A History of Sciences ». Alianza Editorial, Madrid.
257. MATSUNAGA, S.; SAKOU, T.; TAKETOMI, E.; NAKANSI, K. (1996). Effects of strain distribution in the intervertebral discs on the progression of ossification of the posterior longitudinal ligaments. *Spine*, 21 (2): 184-189.
258. MAUREILLE, B. (1994). *La face chez Homo erectus et Homo sapiens : Recherche sur la variabilité morphologique et metrique*. Thèse de 3e cycle. Université Bordeaux I.
259. MAYR, E. (1963). *Populations, Species and Evolution*. The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge Massachusetts, London.

260. MAYR, E. (1982). *Histoire de la Biologie*. Trad. de « The Growth of Biological thought. Diversity, Evolution and Inheritance. » Fayard, Paris.
261. MAZIÈRES, B.; ARLET, J. (1987). Contusion du cartilage et arthrose post-contusive. *In: J. Rodineau, L. Simon, dir. Microtraumatologie du sport*. Masson, Paris. pp. 1-7.
262. MC COWN, T.D.; KEITH, A. (1939). The Stone Age of Mount Carmel. 2: The Fossil Human Remains from the Levallois-Mousterian. Clarendon Press, Oxford.
263. MCHENRY, H.M (1975). Fossils and the mosaic nature of human evolution. *Science*, 190 (4213): 425-431.
264. MCHENRY, H.M.; CORRUCINI, R.S. (1976). Fossil hominid femora and the evolution of walking. *Nature*, 259 (5545): 657-658.
265. MCLAIN, R.F.; MONTESANO, P.X.; RAUSCHNING, W. (1995). Embriología y anatomía de la columna vertebral. *In: S. H. Hochschuler, H. B. Cotler, R.D. Guyer, eds. Rehabilitación de la columna vertebral. Ciencia y Práctica*. Mosby / Doyma Libros, Madrid, Baltimore, etc. pp. 125-139.
266. MCLARNON, A. (1993). The vertebral canal. *In: A. Walker and R. Leakey eds. The Nariokotome Homo erectus skeleton*. Springer-Verlag. Berlin. pp. 391-432.
267. MCMINN, R.M.H.; HUTCHINGS, R.T.; PEGINGTON, J.; ABRAHAMS, P. (1993). *A Colour Atlas of Human Anatomy*. 3ème édition. Mosby-Wolfe, London, Baltimore, etc.
268. MED, M. (1980). Prenatal development of intervertebral articulation of man and its association with ventrodorsal curvature of the spine. *Folia morphologica*, 28 (3): 264-269.
269. MENDES CORREA, A.A. (1918). Osteometria Portuguesa. I. Coluna vertebral. *Annaes da Acad. Polytech. do Porto*. 12.
270. MENNECIER, I.; SEBERT, J.L. (1992). Ostéomalacie et ostéopathies raréfiantes du sujet âgé. *In: L. Simon, C. Hérisson, B. Biot, dir. Le rachis vieillissant*. Masson, Paris. pp. 302-310.
271. MÉRAT, J. (1987). Microtraumatismes sportifs et rachis lombaire. *In: J. Rodineau, L. Simon, dir. Microtraumatologie du sport*. Masson, Paris. pp. 176-179.
272. MERBS, C.F. (1989a). Spondylolysis: its nature and anthropological significance. *International Journal of Anthropology*, 4 (3): 163-169.
273. MERBS, C.F. (1989b). Trauma. *In: M. Y. Iscan, A. R. Kennedy, eds. Reconstruction of life from the skeleton*. Alan R. Liss Inc., New York. pp. 161-189.
274. MERBS, C.F. (1995). Incomplete spondylolysis and healing. A study of ancient canadian eskimo skeletons. *Spine*, 20 (21): 2328-2334.
275. MERBS, C.F. (1996). Spondylolysis and spondylolisthesis: a cost of being an erect biped or a clever adaptation. *Yearbook of Physical Anthropology*, 39: 201-228.
276. MILLER, J.A.A.; SKOGLAND, L.B. (1987). Musculoskeletal interactions in the adolescent spine. A study of the effect of some geometric and material property changes in a three dimensional mathematical model. *In: On the Importance of Growth in Idiopathic Scoliosis: A Biochemical, Radiological and Biomechanical Study*. Dissertation. University of Oslo. Oslo, Norway.
277. MILNE, J.S.; LAUDER, I.J. (1974). Age effects in kyphosis and lordosis in adults. *Annals of Human Biology*, 1 (3): 327-337.

278. MILNE, J.S.; LAUDER, I.J. (1976). The relationship of kyphosis to the shape of vertebral bodies. *Annals of Human Biology*, 3 (2): 173-179.
279. MIYAKE, R.; IKATA, T.; KATOH, S.; MORITA, T. (1996). Morphologic analysis of the facet joint in the immature lumbosacral spine with special reference to spondylolysis. *Spine*, 21 (7): 783-789.
280. MOLLESON, T.; COX, M.; WALDRON, A.H.; WHITTAKER, D.K. (1993). *The Spitalfields Project. Volume 2. The Anthropology. The middling sort.* Council for British Archeology Research Report 86, York.
281. MULLER, C.; SEBERT, J.L.; FARDELLONE, P. (1992). Mesure radiologique des hauteurs vertébrales. Aspects méthodologiques. In: L. Simon, C. Hérisson, B. Biot, dir. *Le rachis vieillissant.* Masson, Paris. pp. 263-271.
282. MÜLLER, F.; O'RAHILLY, R. (1986). Somitic-Vertebral Correlation and Vertebral Levels in the Human Embryo. *The American Journal of Anatomy*, 173: 3-19
283. MÜLLER-GERBL, M. (1992). Die Rolle der Wirbelgelenke für die Kinematik der Bewegungssegmente. *Annals of Anatomy*, 174 (1): 48-53.
284. NÄGERL, H.; KUBEIN-MEESBURG, D.; FANGHÄNEL, J. (1990). Elements of a general theory of joints. 2. Introduction into a Theory of Joints. *Anatomischer Anzeiger*, 171 (5): 323-333.
285. NÄGERL, H.; KUBEIN-MEESBURG, D.; FANGHÄNEL, J. (1992). Elements of a general theory of joints. 7. Mechanical structures of the relative motion of adjacent vertebrae. *Annals of Anatomy*, 174 (1): 66-75.
286. NARA, T. (1994). *Etude de la variabilité de certains caractères métriques et morphologiques des néandertaliens.* Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, n° 1157.
287. NATHAN, H.; WEINBERG, H.; ROBIN, G.C.; ARONSON, H.B. (1964). A simple method of inducing erect posture in baboons. *American Journal of Physical Anthropology*, 22: 321-328.
288. NEUMANN, P.; KELLER, T.; EKSTROM, L.; HULT, E.; HANSSON, T. (1993). Structural Properties of the Anterior Longitudinal Ligament. Correlation With Lumbar Bone Mineral Content. *Spine*, 18 (5): 637-645.
289. NIKITYUK, B.A. (1968). *The effects of erect posture on the growth and ageing of the skeleton.* Proceedings VIIIth International Congress of Anthropological and Ethnological Sciences, Tokyo and Kyoto, 1968. Science Council of Japan. pp. 322-324.
290. NOBACK, C.R.; ROBERTSON, G.G. (1951). Sequences of appearance of ossification centers in the human skeleton during the first five prenatal months. *The American Journal of Anatomy*, 89 (1): 1-28.
291. O'HIGGINS, P.; WILLIAMS, N.W. (1986). An investigation into the use of Fourier coefficients in characterizing cranial shape in primates. *Journal of Zoology*, London., 211: 409-430.
292. O'HIGGINS, P.; JOHNSON, D. (1993). The inheritance of vertebral shape in the mouse. II. A study using Fourier analysis to examine the inheritance of patterns of vertebral variation in the cervical and upper thoracic vertebral column. *Journal of Anatomy*, 182: 65-73.
293. O'HIGGINS, P.; MILNE, D.R.; RUNNION, C.K.; OXNARD, C.E. (1997). Adaptation in the vertebral column: a comparative study of patterns of metameric variation in mice and men *Journal of Anatomy*, 190: 105-113.

294. O'RAHILLY, R.; MEYER, D.B. (1979). The timing and sequence of events in the development of the human vertebral column during the embryonic period proper. *Anatomy and Embryology*, 157 (2): 167-176.
295. O'RAHILLY, R.; MULLER, F.; MEYER, D. (1980). The human vertebral column at the end of the embryonic period proper. *Journal of Anatomy*, 131 (3): 565-575.
296. ORTNER, D.J. (1991). Theoretical and methodological issues in paleopathology. In: D. J. Ortner, A. C. Aufderheide, eds. *Human Paleopathology. Current Syntheses and Future Options*. Smithsonian Institution Press, Washington, London. pp. 5-11.
297. ORTNER, D.J.; PUTSCHAR, W.G.J. (1985). *Identification of Pathological Conditions in Human Skeletal Remains*. Smithsonian Contributions to Anthropology. Num. 28. Smithsonian Institution Press, Washington.
298. OSMAN, A.A.-H.; BASSIOUNI, H.; KOUTRI, R.; NIJS, J.; GEUSENS, P.; DEQUEKER, J. (1994). Aging of the thoracic spine: distinction between wedging in osteoarthritis and fracture in osteoporosis—A cross-sectional and longitudinal study. *Bone*, 15 (4): 437-442.
299. OSMAN, A.A.-H.; BASSIOUNI, H.; MOKASSA, L.; GEUSENS, P. (1992). Vieillesse du rachis dorsal: comment distinguer un remaniement arthrosique d'une fracture ostéoporotique. In: L. Simon, C. Hérisson, B. Biot, dir. *Le rachis vieillissant*. Masson, Paris. pp. 256-262.
300. PAL, G.L.; ROUTAL, R.V. (1996). The role of the vertebral laminae in the stability of the cervical spine. *Journal of Anatomy*, 188: 485-489.
301. PAL, G.P. (1989). Weight transmission through the sacrum in man. *Journal of Anatomy*, 162: 9-17.
302. PAL, G.P.; ROUTAL, R.V. (1986). A study of weight transmission through the cervical and upper thoracic regions of the vertebral column in man. *Journal of Anatomy*, 148: 245-261.
303. PAL, G.P.; ROUTAL, R.V. (1987). Transmission of weight through the lower thoracic and lumbar regions of the vertebral column in man. *Journal of Anatomy*, 152: 93-105.
304. PAL, G.P.; ROUTAL, R.V. (1991). Relationship between the articular surface area of a bone and the magnitude of stress passing through it. *The Anatomical Record*, 230 (4): 570-574.
305. PANJABI, M.M.; YAMAMOTO, I.; OXLAND, T.; CRISCO, J. (1989). How does posture affect coupling in the lumbar spine?. *Spine*, 14 (9): 1002-1011.
306. PANJABI, M.M.; DURANCEAU, J.; GOEL, V.; OXLAND, T.; TAKATA, K. (1991a). Cervical human vertebrae quantitative three dimensional anatomy of the middle and lower regions. *Spine*, 16: 861-869.
307. PANJABI, M.M.; TAKATA, K.; GOEL, V.; DALE, F.; OXLAND, T.; DURANCEAU, J.; KRAG, M. (1991b). Thoracic human vertebrae quantitative three dimensional anatomy. *Spine*, 16: 888-901.
308. PANJABI, M.M.; GOEL, V.; OXLAND, T.; TAKATA, K.; DURANCEAU, J.; KRAG, M.; PRICE, M. (1992). Lumbar human vertebrae quantitative three dimensional anatomy. *Spine*, 17: 299-306.
309. PANJABI, M. M.; OXLAND, T.R.; TAKATA, K.; GOEL, V.; DURANCEAU, J.; KRAG, M. (1993). Articular Facets of the Human Spine. Quantitative Three-Dimensional Anatomy. *Spine*, 18 (10): 1298-1310.
310. PANJABI, M.M.; ODA, T.; CRISCO, J.J.; DVORAK, J. (1993). Posture affects motion coupling patterns of the upper cervical spine. *Journal of Orthopaedical Research*, 11 (4): 525-536.

311. PANJABI, M.M.; OXLAND, T.R. ET. AL. (1994). Mechanical behavior of the human lumbar and lumbosacral spine as shown by three-dimensional load-displacement curves. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 76 (A3): 413-423.
312. PANJABI, M.M.; OXLAND, T.R.; LIN, R.-M.; MCGOWEN, T.W. (1994). Thoracolumbar Burst Fracture. A Biomechanical Investigation of its Multidirectional Flexibility. *Spine*, 19 (5): 578-585.
313. PANJABI, M.M.; VASAVADA, A.; WHITE, A. (1995). Biomécanique du rachis: éléments de stabilité. In: R. Roy-Camille, G. Saillant, P. Antonietti, C. Gilardeau, dir. *Le rachis. Aspects fondamentaux, explorations, techniques*. Masson, Paris, Milan, Barcelone. pp. 77-98.
314. PAQUET, N.; MALOUIN, F.; RICHARDS, C.L. (1994). Hip-Spine Movement Interaction and Muscle Activation Patterns During Sagittal Trunk Movements in Low Back Pain Patients. *Spine*, 19 (5): 596-603.
315. PASSUTI, N.; DELECRIN, J.; GOUIN, F.; MAUGARS, Y. (1995). Rachis et remodelage osseux: aspects expérimentaux et données cliniques. The spine and bone remodelling: experimental aspects and clinical data. *Rachis*, 7 (3): 155-158.
316. PATEU, Y. (1937). *Recherches anatomiques sur l'inclinaison du bassin chez l'homme et chez la femme*. Thèse de médecine, Bordeaux. Imprimerie Brusau Frères, Bordeaux.
317. PATURET, G. (1951). *Traité d'Anatomie Humaine. Tome 1. Ostéologie, Arthrologie, Myologie*. Masson, Paris.
318. PEACOCK, A. (1951). Observations on the pre-natal development of the intervertebral disc in man. *Journal of anatomy*, 85: 260-274 (+ 4 planches).
319. PINEAU, J.C.; MOLLARD, R.; IGNAZI, G. (1983). Etude analytique de la courbure externe du rachis à partir de mesures biostéométriques sur le vivant. *Cahiers d'Anthropologie et Biométrie humaine*, 1 (3): 1-17.
320. PIVETEAU, J. (1959). Les restes humains de la grotte du Régourdou (Dordogne). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 248: 40-44.
321. PIVETEAU, J. (1963-1965). La grotte du Régourdou (Dordogne), Paléontologie humaine. *Annales de Paléontologie (Vertébrés)*, 49; 50; 52: 285-304;155-194;163-194.
322. PIVETEAU, J. (1983). *Origine et Destinée de l'Homme*. 2^e édition corrigée. Masson, Paris.
323. PLAMONDON, A.; GAGNON, M.; MAURIS, G. (1988). Application of a steroradiographic method for the study of intervertebral motion. *Spine*, 13 (9): 1027-1032.
324. POLLY, D.W.; KILKELLY, F.X.; MCHALE, K.A.; ASPLUND, L.M.; MULLIGAN, M.; CHANG, A.S. (1996). Measurement of lumbar lordosis. Evaluation of intraobserver, interobserver, and technique variability. *Spine*, 21 (13): 1530-1536.
325. PONSETI, I.V.; FRIEDMAN, B. (1950). Prognosis in idiopathic scoliosis. *Journal of Bone and Joint Surgery [Am]*, 32-A: 381-395.
326. PORTIER, L.; THIBAUT, A.; SKALLI, W.; SANTIN, J.J.; ZELLER, R.; LAVASTE, F. (1993). Approche d'une modélisation globale, tridimensionnelle par éléments finis, de la colonne vertébrale pour l'étude de la scoliose. *Rachis*, 5 (5): 227-232.
327. PREUSCHOFT, H. (1990). Gravity in Primates and its relation to body shape and locomotion. *Human Evolution*, 5 (6): 559-578.

328. PREUSCHOFT, H.; HAYAMA, S.; GÜNTHER, M.M. (1988). Curvature of the lumbar spine as a consequence of mechanical necessities in japanese macaques trained for bipedalism. *Folia Primatologica*, 50: 42-58.
329. PREUSCHOFT, H.; WITTE, H. (1991). Biomechanical reasons for the evolution of hominid body shape. In: Y. Coppens, B. Senut, dir. *Origines de la bipédie chez les hominidés*. Editions du CNRS, Paris. pp. 59-78.
330. PREUSCHOFT, H.W.; RECKNAGEL, S. (1991). Human body proportions explained on the basis of biomechanical principles. *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie*, 78 (3): 407-423.
331. PRIVAT, J.-M.; OHANNA, F.; BONNEL, F. (1990). Classification radio-anatomique simplifiée des lésions traumatiques du rachis dorso-lombaire. In: A. Dimeglio, F. Bonnel, eds. *Le rachis en croissance: scoliose, taille assise et puberté*. Springer, Berlin. pp. 51-62.
332. PUTZ, R. (1985). The functional morphology of the superior articular processes of the lumbar vertebrae. *Journal of Anatomy*, 143: 181-187.
333. PUTZ, R. (1992). The detailed functional anatomy of the ligaments of the vertebral column. *Annals of Anatomy*, 174 (1): 40-47.
334. PUTZ, R.L.V.; MÜLLER-GERBL, M. (1996). The vertebral column—a phylogenetic failure? A theory explaining the function and vulnerability of the Human spine. *Clinical Anatomy*, 9: 205-212.
335. RAK, Y. (1986). The Neanderthal; a new look at an old face. *Journal of Human Evolution*, 15: 151-164.
336. RAK, Y. (1991). The pelvis. In: O. Bar Yosef, B. Vandermeersch, eds. *Le squelette Moustérien de Kébara*. Cahiers de Paléanthropologie, CNRS ed., Paris. pp. 147-156 (+15 figures).
337. RAK, Y.; ARENSBURG, B. (1987). Kebara 2 Neanderthal pelvis: first look at a complete inlet. *American Journal of Physical Anthropology*, 73 (2): 227-231.
338. RALPHS, J.R.; BENJAMIN, M. (1994). The joint capsule: structure, composition, ageing and disease. *Journal of Anatomy*, 184: 503-509.
339. REEVE, J.; ADAMS, M. (1993). *The Spitalfields Project. Volume 1. The Archeology. Across the Styx*. Council for British Archeology Research Report 85, York.
340. RESNICK, D. (1988). The aging vertebral column: pathologic-radiographic correlation. In: M. E. Kricun, ed. *Imaging modalities in spinal disorders*. W. B. Saunders Company, Philadelphia etc. pp. 43-58.
341. RESNICK, D.; NIWAYAMA, G. (1988a). Rheumatoid Arthritis and the Seronegative Spondylarthropathies: Radiographic and Pathologic Concepts. In: D. Resnick, G. Niwayama, eds. *Diagnosis of Bone and Joint Disorders, vol. 2*. W. B. Saunders Company, Philadelphia etc., 2nd ed. pp. 894-953.
342. RESNICK, D.; NIWAYAMA, G. (1988b). Calcification and Ossification of the Posterior Spinal Ligaments and Tissues. In: D. Resnick, G. Niwayama, eds. *Diagnosis of Bone and Joint Disorders, vol. 3*. W. B. Saunders Company, Philadelphia etc., 2nd ed. pp. 1603-1615.
343. RESNICK, D.; NIWAYAMA, G. (1988c). Degenerative Disease of the Spine. In: D. Resnick, G. Niwayama, eds. *Diagnosis of Bone and Joint Disorders, vol. 3*. W. B. Saunders Company, Philadelphia etc., 2nd ed. pp. 1480-1561.
344. RESNICK, D.; NIWAYAMA, G. (1988d). Diffuse Idiopathic Skeletal Hyperostosis. In: D. Resnick, G. Niwayama, eds. *Diagnosis of Bone and Joint Disorders, vol. 3*. W. B. Saunders Company, Philadelphia etc., 2nd ed. pp. 1562-1602.

345. RESNICK, D.; NIWAYAMA, G. (1988e). Degenerative Disease of Extraplural Locations. *In*: D. Resnick, G. Niwayama, eds. *Diagnosis of Bone and Joint Disorders*, vol. 3. W. B. Saunders Company, Philadelphia etc., 2nd ed. pp. 1364-1479.
346. REVEL, M.; ANDRÉ-DESHAYS, C.; MAYOUX-BENHAMOU, M.A. (1987). Rôle des contraintes sur la pathologie dorsale et lombaire. *In*: J. Rodineau, L. Simon, dir. *Microtraumatologie du sport*. Masson, Paris. pp. 100-106.
347. ROBBINS, S.L.; COTRAN, R.S. (1988). Pathologie. *Bases morphologiques et physiopathologiques des maladies*. « Pathologic basis of disease ». Edition française sous la direction d'Yves Le Charpentier. W. B. Saunders et Piccin Nuova Libreria, Padova, pour l'édition française.
348. ROBINSON, J.T. (1972). *Early Hominid Posture and Locomotion*. University of Chicago Press, Chicago, London.
349. ROBINSON, J.T.; FREEDMAN, L.; SIGMON, B.A. (1972). Some aspects of Pongid and Hominid Bipedality. *Journal of Human Evolution*, 1 (4): 361-370.
350. ROCHCONGAR, P.; DUREY, A. (1987). Biomécanique de la symphyse pubienne et des articulations sacro-iliaques. *In*: J. Rodineau, L. Simon, dir. *Microtraumatologie du sport*. Masson, Paris. pp. 62-67.
351. ROGERS, J.; WATT, I.; DIEPPE, P. (1990). Comparison of visual and radiographic detection of bony changes at the knee joint. *British Medical Journal*, 300: 367-368.
352. ROHLF, F.J. (1990). Fitting Curves to Outlines. *In*: F. J. Rohlf, F. L. Bookstein, eds. *Proceedings of the Michigan Morphometrics Workshop*. The Univ. of Michigan Museum of Zoology. Special Publications N°2. Ann Arbor. Michigan. pp. 167-177.
353. ROSE, M.D. (1975). Functional proportions of primate lumbar vertebral bodies. *Journal of Human Evolution*, 4: 21-38.
354. ROSENBERG (1920). *Die verschiedenen Formen der Wirbelsäule des Menschen und ihre Bedeutung*. Fischer, Jena.
355. ROSENBERG, K.R. (1992). The Evolution of Modern Human Childbirth. *Year book of Physical Anthropology*, 35: 125-151.
356. ROSS, E.C.; PARNIANPOUR, M.; MARTIN, D. (1993). The Effects of Resistance Level on Muscle Coordination Patterns and Movement Profile During Trunk Extension. *Spine*, 18 (13): 1829-1838.
357. ROSS, P.D.; HUANG, C.; DAVIS, J.W.; WANISCH, R.D. *et al.* (1995). Vertebral dimension measurements improve prediction of vertebral fracture incidence. *Bone*, 16 (4): 257s-262s.
358. ROTHSCHILD, B.M.; WOODS, R.J. *ET AL.* (1992). Arthritis in new world monkeys: osteoarthritis, calcium pyrophosphate deposition disease, and spondyloarthropathy. *International Journal of Primatology*, 14 (1): 61-78.
359. ROTHSCHILD, B.M.; ROTHSCHILD, C. (1994). No laughing matter: spondylarthropathy and osteoarthritis in hyaenidae. *Journal of Zoo and Wildlife Medicine*, 25 (2): 259-263.
360. ROY, C.; ROUSSOULY, P.; DIMNET, J. (1995). Aspects cinématiques et dynamiques du comportement du rachis. *Rachis*, 7 (3): 129-134.
361. ROY-CAMILLE, R. (1994). L'instabilité rachidienne. *Rachis*, 6 (2): 107-112.

362. ROYSTON, J.P. (1982). An extension of Shapiro and Wilk's W test for normality to large samples. *Applied Statistics*, 31 (2): 115-124.
363. RUFF, C.B.; TRINKAUS, E.; WALKER, A.; LARSEN, C.S. (1993). Postcranial robusticity in *Homo*. 1: Temporal trends and mechanical interpretation. *American Journal of Physical Anthropology*, 91 (1): 21-53.
364. SAILLANT, G.; LEMOINE, L.; LAZENNEC, J.Y.; BENAZET, J.P. (1994). La déstabilisation du rachis. *Rachis*, 6 (65): 307-318.
365. SALES DE GAUZY, J.; MOURET, D.; VARDON, D.; CAHUZAC, J.PH. (1994). L'équilibre sagittal du bassin: rôle des facteurs musculaire et osseux chez l'enfant. *Rachis*, 6 (4): 179-182.
366. SANDERS, W.J. (1995). *Function, Allometry, and Evolution of the Australopithecine Lower Precaudal Spine*. Ph.D. Dissertation. New York University.
367. SANDERS, W.J. (1998). Comparative morphometric study of the australopithecine vertebral series Stw-H8/H41. *Journal of Human Evolution*, 34: 249-302.
368. SANDERS, W.J.; BODENBENDER, B.E. (1994). Morphometric analysis of lumbar vertebra UMP 67-28: Implications for spinal function and phylogeny of the Miocene Moroto hominoid. *Journal of Human Evolution*, 26: 203-237.
369. SAUR, P.M.M.; ENSINK, F.-B.M.; FRESE, K.; SEEGER, D.; HILDEBRANDT, J. (1996). Lumbar range of motion: reliability and validity of the inclinometer technique in the clinical measurement of trunk flexibility. *Spine*, 21 (11): 1332-1338.
370. SAUTOT, P.; MERLOZ, PH.; LAVALLEE, S.; CINQUIN, PH.; LEFEBVRE, J.M.; TROCCAZ, J.; EID, A.; PITTET, L. (1995). Visée pédiculaire assistée par ordinateur. *Rachis*, 7 (3): 145-1154.
371. SCHENDEL, M.J.; WOOD, K.B.; BUTTERMANN, G.R.; LEWIS, J.L.; OGILVIE, J.W. (1993). Experimental measurement of ligament force, facet force, and segment motion in the human lumbar spine. *Journal of Biomechanics*, 26 (4&5): 427-438.
372. SCHMORL, G.; JUNGHANNS, H. (1971). *The Human Spine in health and disease*. 2nd ed. Grune and Stratton, New York.
373. SCHULTZ, A.H. (1956a). *Postembryonic age changes*. In: H. Hofer, A.H. Schultz, D. Starck, eds. *Primatologia, vol. 1*. Krager, Basel, New York. vol. 1. pp. 1-66.
374. SCHULTZ, A.H. (1956b). The occurrence and frequency of pathological and teratological conditions and of twinnings among non-human primates. In: H. Hofer, A.H. Schultz, D. Starck, eds. *Primatologia, vol. 1*. Krager, Basel, New York. pp. 965-1014.
375. SCHULTZ, A.H. (1961). Vertebral column and thorax. In: H. Hofer, A.H. Schultz, D. Starck, eds. *Primatologia, vol. 4*. Krager, New York. pp. 1-66.
376. SCHULTZ, A.H. (1962). The relative weights of the skeletal parts in adult primates. *American Journal of Physical Anthropology*, n.s. 20: w.
377. SCOLES, P.V.; LINTON, A.E.; LATIMER, B.; LEVY, M.E.; DIGIOVANNI, B.F. (1988). Vertebral body and posterior element morphology: The normal spine in middle life. *Spine*, 13 (10): 1082-1086.
378. SCOLES, P.V.; LATIMER, B.M.; DIGIOVANNI, B.F.; VARGO, E.; BAUZA, S.; JELLEMA, L.M. (1991). Vertebral alterations in Scheuermann's kyphosis. *Spine*, 16 (5): 509-515.

379. SÉNÉGAS, J. (1990a). *Développement de l'appareil locomoteur*. Ed. Bergeret, Bordeaux.
380. SÉNÉGAS, J. (1990b). *Anatomie fonctionnelle de l'appareil locomoteur*. Ed. Bergeret, Bordeaux.
381. SENUT, B. (1985). Computerized tomography of a Neanderthal humerus from Le Régourdou (Dordogne, France): Comparisons with modern man. *Journal of Human Evolution*, 14: 717-723.
382. SHAPIRO, L. (1993). Evaluation of "unique" aspects of human vertebral bodies and pedicles with a consideration of *Australopithecus africanus*. *Journal of Human Evolution*, 25 (6): 433-470.
383. SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B.; CHEN, H.J. (1968). A comparative study of various tests of normality. *Journal of the American Statistical Association*, 63: 1343-1372.
384. SHARMA, M.; LANGRANA, N.A.; RODRIGUEZ, J. (1995). Role of ligaments and facets in lumbar spinal stability. *Spine*, 20 (8): 887-900.
385. SHINOHARA, H. (1997). Changes in the surface of the superior articular joint from the lower thoracic to the upper lumbar vertebrae. *Journal of Anatomy*, 190: 461-465.
386. SHIRAZI-ADL, A.; PARNIANPOUR, M. (1993). Nonlinear response analysis of the human ligamentous lumbar spine in compression. *Spine*, 18 (1): 147-158.
387. SICARD, C.; GAGNON, M. (1993). A Geometric Model of the Lumbar Spine in the Sagittal Plane. *Spine*, 18 (5): 646-658.
388. SIGMON, B.A. (1975). Functions and evolution of Hominid hip and thigh musculature. In: R. H. Tuttle, ed. *Primate functional morphology and evolution*. Mouton, The Hague, Paris. pp. 235-252.
389. SINGER, K.P.; GILES, L.G.F.; DAY, R.E. (1990). Intra-articular synovial folds of thoracolumbar junction zygapophyseal joints. *The Anatomical Record*, 226 (2): 147-152.
390. SKALLI, W.; LAVASTE, F.; MAUREL, N.; DIOP, A. (1995). Eléments finis et biomécanique du rachis. *Rachis*, 7 (3): 159-166.
391. ŠKERLJ, B. (1960). Human evolution and neanderthal man. *Antiquity*, 34: 90-99.
392. SLEMENDA, C.; LONGCOPE, C.; PEACOCK, M.; HUI, S.; JOHNSTON, C.C. (1996). Sex steroids, bone mass, and bone loss. A prospective study of pre-, peri-, and postmenopausal women. *Journal of Clinical Investigations*, 97 (1): 14-21.
393. SOLOW, B.; TALLGREN, A. (1976). Head posture and craniofacial morphology. *American Journal of Physical Anthropology*, 44 (3): 417-436.
394. SPENCER, F.; SMITH, F.H. (1981). The significance of Aleš Hrdlicka's "Neanderthal phase of man": A historical and current assessment. *American Journal of Physical Anthropology*, 56: 435 -459.
395. STAGNARA, P. (1980). Cyphoses dorsales régulières pathologiques. *Conférences d'enseignement de la SOFCOT*, 13: 51-76.
396. STAGNARA, P. (1985). *Les déformations du rachis. Scolioses, cyphoses, lordoses*. Masson, Paris etc.
397. STAGNARA, P.; GONAN, G.-P.; FAUCHET, P. (1984). Surgical treatment of idiopathic rigid lumbar scoliosis in the adult. In: R. A. Dickson, D. S. Bradford, eds. *Management of spinal deformities*. Butterworths International Medical Reviews: Orthopaedics 2., London etc. pp. 303-321.

398. STERN, J.T.; SUSMAN, R.L. (1983). The locomotor anatomy of *Australopithecus afarensis*. *American Journal of Physical Anthropology*, 60: 279-317.
399. STEWART, T.D. (1960). Form of the pubic bone in Neanderthal man. *Science*, 131: 1437-1438.
400. STEWART, T.D. (1962). Neanderthal cervical vertebrae with special attention to the Shanidar Neanderthals from Iraq. *Bibliotheca Primatologica*, 1: 130-154.
401. STEWART, T.D. (1963). Shanidar skeletons IV and VI. *Sumer*, 19: 8-26.
402. STOKES, I.A.F. (1995). Muscles et instabilité. *Rachis*, 7 (3): 167-168.
403. STOKES, I.A.F.; BEVINS, T.M.; LUNN, R.A. (1987). Back surface curvature and measurement of lumbar spinal motion. *Spine*, 12 (4): 355-361.
404. STRAUS, W.L.JR.; CAVE, A.J.E. (1957). Pathology and the posture of Neanderthal man. *Quarterly Review of Biology*, 32: 348-363.
405. TAGUE, R.G.; LOVEJOY, C.O. (1986). The obstetric pelvis of A.L. 288-1 (Lucy). *Journal of Human Evolution*, 15 (4): 237-255.
406. TAILLAN, B.; COMMANDRE, F.A.; ZIEGLER, G.; EULLER-ZIEGLER, L. (1987). Spondylose-Spondylolisthesis et sports. In: J. Rodineau, L. Simon, dir. *Microtraumatologie du sport*. Masson, Paris. pp. 180-184.
407. TAN, J.C. ; PARNIANPOUR, M. ; NORDIN, M. ; HOFER, H. ; WILLEMS, B. (1993). Isometric Maximal and Submaximal Trunk Extension at Different Flexed Positions in Standing. Triaxial Torque Output and EMG. *Spine*, 18 (16): 2480-2490.
408. TANAKA, H.; KIMURA, Y.; UJINO, Y. (1982). The experimental study of scoliosis in bipedal rat in lathyrism. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 101: 1-27.
409. TARDIEU, C. (1991). Etude comparative des déplacements du centre de gravité pendant la marche par une nouvelle méthode d'étude d'analyse tridimensionnelle. Mise à l'épreuve d'une hypothèse évolutive. In: Y. Coppens, B. Senut dir. *Origines de la bipédie chez les hominidés*. Editions du CNRS. Paris. pp. 49-58
410. TASSY, P. (1991). *L'arbre à remonter le temps. Les rencontres de la systématique et de l'évolution*. Christian Bourgeois éditeur, Paris
411. TAYLOR, J.R.; TWOMEY, L.T. (1986). Age changes in lumbar zygapophyseal joints: Observations on structure and function. *Spine*, 11 (7): 739-745.
412. TESTUT, L.; LATARJET, A. (1932). *Tratado de Anatomía Humana. Libro primero. Osteología*. Trad. au Castellán: J. C. Sabater et A. R. Villaret. Salvat Editores, Barcelona.
413. THALGOTT, J.; LAROCCA, H.; GARDNER, V.O. (1995). Rehabilitación de la columna vertebral. Artritis que afectan a la columna vertebral. In: S. H. Hochschuler, H. B. Cotler, R. D. Guyer, eds. *Rehabilitación de la columna vertebral. Ciencia y Práctica*. Mosby / Doyma Libros, Madrid, Baltimore, etc. pp. 433-439.
414. THOMAS, D.P. (1959). The effect of load carriage on normal standing in man. *Journal of Anatomy*, 93: 75-86.
415. TOBIAS, P.V. (1983). Recent advances in the evolution of the Hominids with especial reference to brain and speech. *Pontificae Academiae Scientiarum Scripta Varia*, 50: 85-140.

416. TOMINAGA, T.; DICKMAN, C.A. (1995). Comparative anatomy of the baboon and the human cervical spine. *Spine*, 20 (2): 131-137.
417. TREVATHAN, W.R. (1988). Fetal emergence patterns in evolutionary perspective. *American Anthropologist*, 90: 674-681.
418. TRINKAUS, E. (1976). The morphology of European and Southwest Asian Neandertal pubic bones. *American Journal of Physical Anthropology*, 44: 95-104.
419. TRINKAUS, E. (1983). *The Shanidar Neanderthals*. Academic Press, New York, etc.
420. TRINKAUS, E. (1985). Pathology and the posture of the La Chapelle-aux-Saints Neandertal. *American Journal of Physical Anthropology*, 67: 19-41.
421. TRINKAUS, E. (1987). The Neandertal face: evolutionary and functional perspective on a recent hominid face. *Journal of Human Evolution*, 16 (5): 428-444.
422. TRINKAUS, E.; LEMAY, M. (1982). Occipital bun among later Pleistocene hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, 57: 27 -35.
423. TRINKAUS, E.; CHURCHILL, S.E.; VILLEMEUR, K.G.; RILEY, K.G.; HELLER, J.A.; RUFF, C.B. (1991). Robusticity versus shape: The functional interpretation of Neandertal appendicular morphology. *Journal of the Anthropological Society of Nippon*, 99: 257-278.
424. TRINKAUS, E.; SHIPMAN, P. (1993). *The neanderthals*. Jonathan Cape, Pimlico, Random House, London.
425. TROISIÈRE, O. (1992). L'instabilité vertébrale lombaire. Problème de définition et d'identification. In: L. Simon, C. Hérisson, B. Biot, dir. *Le rachis vieillissant*. Masson, Paris. pp. 199-203.
426. TROTTER, M. (1926). The movable segments of the vertebral column in old Egyptians. *American Journal of Physical Anthropology*, 9: 457-456.
427. TSCHANTZ, P.; RUTISHAUSER, E. (1967). La surcharge mécanique de l'os vivant. Les déformations plastiques initiales et l'hypertrophie d'adaptation. *Annales d'Anatomie Pathologique*, 12: 223 -248.
428. TUAN, R.S. (1995). Rehabilitación de la columna vertebral. Ligamentos. In: S. H. Hochschuler, H. B. Cotler, R. D. Guyer, eds. *Rehabilitación de la columna vertebral. Ciencia y Práctica*. Mosby / Doyma Libros, Madrid, Baltimore, etc. pp. 247-254.
429. TULSI, R.M.; HERMANIS, G.M. (1993). A study of the angle of inclination and facet curvature of superior lumbar zygapophyseal facets. *Spine*, 18 (10): 1311-1317.
430. TULSI, R.S. (1971). Growth of the human vertebral column. An osteological study. *Acta Anatomica*, 79: 570-580.
431. TURKEL, S.J. (1989). Congenital abnormalities in skeletal populations. In: M. Y. Iscan, A. R. Kennedy, eds. *Reconstruction of life from the skeleton*. Alan R. Liss Inc., New York. pp. 109-127.
432. TURNER, M.B. (1886). The lumbar curve of the spinal column in several races of men. *The Journal of Anatomy and Physiology*, 20: 536-543.
433. TWIESSELMANN, F. (1961). Le fémur Néandertalien de Fond -de -Forêt (Province de Liège). *Mémoires de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique*, 148: 1-164.

434. TYRRELL, A.R.; REILLY, T.; TROUP, J.D.G. (1985). Circadian variation in stature and the effects of spinal loading. *Spine*, 10 (2): 161-164.
435. VALLOIS, H.V. (1926). La sustentation de la tête et le ligament cervical postérieur chez l'Homme et les Anthropoïdes. *L'Anthropologie*, 36: 191-207.
436. VALLOIS, H.V. (1954). Neandertals and Praesapiens. *Journal of the Royal Anthropological Institute of Great Britain*, 84: 111-130.
437. VAN INGEN SCHENAU, G.J.; BOBBERT, M.F. (1993) The global design of the hindlimb in quadrupeds. *Acta Anatomica*, 146 (2-3): 103-108.
438. VAN NAMEREN, H.; DRUKKER, J.; SANCHES, H.; BEURSGENS, J. (1990). Cervical spine motion in the sagittal plane (I). Range of motion of actually performed movements, an X-ray cinematographic study. *European Journal of Morphology*, 28 (1): 47-68.
439. VAN SCHAIK, J.P.J.; VERBIEST, H.; VAN SCHAIK, F.D.J. (1985). The orientation of laminae and facet joints in the lower lumbar spine. *Spine*, 10 (1): 59-63.
440. VANDERMEEERSCH, B.; TRINKAUS, E. (1995). The postcranial remains of the Régourdou 1 Neanderthal: the shoulder and arm remains. *Journal of Human Evolution*, 28 (5): 439-476.
441. VEYS, E.M.; VERBRUGGEN, G.; LUYTEN, F. (1985). Subtypes of degenerative joint disease in man. How do they come to grips with the factors involved in "in vitro" set ups or "in vivo" experimental osteoarthritis ?. In: G. Verbrugen, E. M. Veys, eds. *Degenerative joints. Vol. 2*. Elsevier Science Publishers B. V. Biomechanical Division. pp. 371-385.
442. VIGNES, J. (1982). *Rapports entre la morphologie externe et les courbures du rachis. Applications biomécaniques*. Thèse pour le Doctorat d'Etat en Médecine, Université Bordeaux II.
443. VIGNON, G.; DURANT, J.; PANSU, D.; BERTRAND, J.N.; TRUCHOT, R. (1962). La spondylorhéostose ou hyperostose ankylosante vertébrale sénile. *Le journal de médecine de Lyon*, 5 juin: Travail présenté à la Ligue Française contre le Rhumatisme, séance du 18 janvier 1961. pp. 955-965.
444. VINK, P.; HUSON, A. (1988). Lumbar back muscle activity during walking with a leg inequality. *Acta Morphologica Neerl.-Scand.*, 25: 261-271.
445. WALDRON, H.A. (1991a). Prevalence and distribution of osteoarthritis in a population from Georgian and early Victorian London. *Annals of the Rheumatic Disease*, 50: 301-307.
446. WALDRON, T. (1991b). The prevalence of, and the relationship between some spinal diseases in a human skeletal population from London. *International Journal of Osteoarcheology*, 1: 103-110.
447. WALDRON, H.A.; COX, M. (1989). Occupational arthropathy: evidence from the past. *British Journal of Industrial Medicine*, 46: 420-422.
448. WALENSKY, N.A. (1964). A re-evaluation of the mastoid region of contemporary and fossil man. *Anatomical Records*, 149: 67-72.
449. WANG, T.M.; SHIH, C. (1992). Morphometric variations of the lumbar vertebrae between chinese and indian adults. *Acta Anatomica*, 144 (O): 23-29.
450. WANGERMEZ, J. (1968). *Relations entre le bassin osseux et le rachis lombo-sacré chez l'homme et les anthropomorphes. Etude radiographique de profil par rapport à l'axe sacro-cotyloïdien*. Mémoire de D.E.S. en Sciences Naturelles, Bordeaux.

451. WASSILEV, W.; KÜHNEL, W. (1992). Struktur und Funktion der Zwischenwirbelscheibe. *Annals of Anatomy*, 174 (1): 54-65.
452. WEIDENREICH, F. (1943). The "Neanderthal man" and the ancestors of *Homo sapiens*. *American Anthropologist*, n.s. 45: 125-134.
453. WEIDENREICH, F. (1947a). Facts and speculations concerning the origin of *Homo sapiens*. *American Anthropologist*, n.s. 49 (2): 135-151.
454. WEIDENREICH, F. (1947b). The trend of human evolution. *Evolution*, 1 (4): 221-236.
455. WESSEL, J.; FORD, D.; DRIESUM, D.VAN. (1994). Torque of Trunk Flexion and Trunk Flexion With Axial Rotation in Healthy Men and Women. *Spine*, 19 (3): 329-334.
456. WHITE, A.A.; PANJABI, M.M. (1982). Clinical instability of the spine. In: R. H. Rothman, F. A. Simeone, eds. *The Spine 4*. W. B. Saunders, Philadelphia. pp. 219-244.
457. WHITE, T.D. (1980). Evolutionary implications of Pliocene hominid footprints. *Science*, 208 (4440): 175-176.
458. WHITE, T.D.; FOLKENS, P.A. (1991). *Human osteology*. Academic Press, San Diego, etc.
459. WHITE, T.D.; SUWA, G. (1987). Hominid footprints at Laetoli: facts and interpretations. *American Journal of Physical Anthropology*, 72 (4): 485-514.
460. WILKE, H.-J.; JUNGKUNZ, B.; WENGER, K.; CLAES, L.E. (1998). Spinal segment range of motion as a function of in vitro test conditions: effects of exposure period, accumulated cycles, angular-deformation rate, and moisture condition. *The Anatomical Record*, 251: 15-19.
461. WILKE, H.-J.; KETTLER, A.; WENGER, H.; CLAES, L.H. (1997). Anatomy of the sheep spine and its comparison to the human spine. *The Anatomical Record*, 247: 542-555.
462. WILLEN, J.; LINDAHL, S.; IRSTAM, L.; ALDMAN, B.; NORDWALL, A. (1984). The thoracolumbar crush fracture. An experimental study on instant axial dynamic loading: The resulting fracture type and its stability. *Spine*, 9: 624-631.
463. WILTSE, L. L.; FONSECA, A.S.; AMSTER, J.; DIMARTINO, P.; RAVESSOUD, F.A. (1993). Relationship of the Dura, Hofmann's Ligaments, Batson's Plexus, and a Fibrovascular Membrane Lying on the Posterior Surface of the Vertebral Bodies and Attaching to the Deep Layer of the Posterior Longitudinal Ligament. *Spine*, 18 (8): 1030-1043.
464. WILTSE, L.L.; ROTHMAN, L.G. (1995). Rehabilitación de la columna vertebral. Espondilólisis y espondilolistesis. In: S. H. Hochschuler, H. B. Cotler, R. D. Guyer, eds. *Rehabilitación de la columna vertebral. Ciencia y Práctica*. Mosby / Doyma Libros, Madrid, Baltimore, etc. pp. 529-562.
465. WINTER, D.A.; RUDER, G. K.; MCKINNON, D. (1990). Control of balance of upper body during gate. In: J. Winters, S.L.-Y. Woo, eds. *Multiple muscle system. Biomechanics and movement organization*. Springer Verlag, Berlin. pp. 534-541.
466. WINTERS, J.M.; PELES, J.D. (1990). Neck muscle activity and 3-D head kinematics during quasi-static and dynamic tracking movements. In: Winters, S. L.-Y. Woo, eds. *Multiple muscle system. Biomechanics and movement organization*. Springer Verlag, Berlin. pp. 461-480.
467. YAMAZAKI, N. (1990). The effects of gravity on the interrelationship between body proportion and brachiation in the gibbon. *Human Evolution*, 5 (6): 543-558.

468. YAMAZAKI, N.; ISHIDA, H.; KIMURA, T.; OKADA, M. (1979). Biomechanical analysis of primate bipedal walking by computer simulation. *Journal of Human Evolution*, 8: 337-349.
469. YANG, K.H.; KING, A.I. (1984). Mechanism of facet load transmission as a hypothesis for low back-pain. *Spine*, 9: 557-565.
470. ZAR, J.H. (1984). *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall, London, etc.
471. ZIHLMAN, A.; BRUNKER, L. (1979). Hominid bipedalism: then and now. *Yearbook of Physical Anthropology*, 22: 132-162.
472. ZIHLMAN, A.; TANNER, N. M. (1978). Gathering and the Hominid adaptation. In: L. Tiger, H. Fowler, eds. *Female Hierarchies*. Beresford Book Service, Chicago. pp. 163-194.
473. ZIHLMAN, A.L. (1978). Interpretations of early hominid locomotion. In: C. J. Jolly, ed. *Early Hominids of Africa*. St Martins Press, New York. pp. 361-377.
474. ZIHLMAN, A.L. (1978). Interpretations of early hominid locomotion. In: C. J. Jolly, Ed. *Early Hominids of Africa*. St Martins Press, New York. pp. 361-377.
475. ZIHLMAN, A.L. (1984). Body build and tissue composition in *Pan paniscus* and *Pan troglodytes*, with comparisons to other hominoids. In: R. L. Susman, ed. *The Pygmy Chimpanzee. Evolution, Biology and Behavior*. Plenum Press, New York. pp. 179-200.
476. ZINDRICK, M.R.; WILTS, L.L.; DOORNIK, A.; WIDELL, E.H.; KNIGHT, G.W.; PATWARDHAN, A.G.; THOMAS, J.C.; ROTHMAN, S.L.; FIELDS, B.T. (1987). Analysis of morphometric characteristics of the thoracic and lumbar pedicles. *Spine*, 12 (2): 160-166.
477. ZOGHBI, A. (1940). *Les différents types morphologiques de la colonne lombaire chez l'homme adulte*. Thèse pour le Doctorat en Médecine, Bordeaux. Imprimerie Biere, Bordeaux.

RESUME

Une méthodologie originale est développée afin de reconstituer les courbures sagittales (CS) de la colonne vertébrale impliquées par la morphologie des vertèbres isolées. Le corps vertébral (CV) est défini comme un quadrilatère quelconque. Les quatre segments joignant un diamètre parasagittal d'une surface articulaire postérieure au diamètre sagittal du CV, sont projetés dans le plan médian. L'espace intervertébral (EIV) déterminé par la morphologie de deux vertèbres adjacentes articulées, est déduit en mettant en contiguïté par le calcul leurs surfaces articulaires. Les quadrilatères représentant les CV sont empilés dans un repère cartésien afin d'étudier leur participation dans le dessin des CS. L'empilement alterné des quadrilatères représentant les CV et de ceux représentant les EIV permet d'étudier les CS impliquées par la morphologie des vertèbres. Ces profils sont décrits par les angulations calculées entre les segments dans la pile, et par une régression polynomiale qui leur est ajustée. Elle permet de calculer les localisations et valeurs des sommets, inflexions, maxima de courbure, et courbure en chaque point. Ces paramètres permettent une description statistique.

Le programme est appliqué à un échantillon subactuel. Plusieurs Néandertaliens sont comparés. Un dimorphisme sexuel net existe pour les CV. Les courbures successives sont dépendantes. La morphologie vertébrale contribue partiellement à la détermination des CS physiologiques. La variabilité rencontrée est comparable aux données physiologiques. La morphologie vertébrale n'intervient pas nécessairement dans la détermination des trois courbures. Les courbures des néandertaliens sont décrites. Les profils de Kébara et La Chapelle-aux-Saints ont une configuration nettement masculine et une lordose lombaire forte. Si les néandertaliens étudiés se situent dans la variabilité de l'échantillon actuel, des modalités particulières de la biomécanique de la charnière thoraco-lombaire sont envisageables.

SAGITTAL CURVATURES OF THE VERTEBRAL COLUMN IMPLIED BY THE MORPHOLOGY OF VERTEBRAE. DEVELOPMENT OF A NEW METHODOLOGY AND APPLICATION TO HOMO SAPIENS.

SUMMARY

An original methodology was developed in order to reconstruct the sagittal curvatures (SC) of the vertebral column (VC) implied by the morphology of the vertebrae. The shape of the vertebral body (VB) is defined precisely as an irregular quadrilateral. The four segments joining a parasagittal diameter of a posterior articular surface to the sagittal diameter of the vertebral body, are projected in the medial plane. The intervertebral space (IVS) determined by the morphology of two adjacent articulated vertebrae, is deduced when the two articular surfaces contiguity is mathematically restored. Quadrilaterals modelling VB can be stacked in a bivariate space in order to study the participation of these VB in the design of the SC. In the same manner, alternate stack of quadrilaterals modelling VB and of those modelling IVS allow the study of the SC implied only by vertebral morphology. Those profiles are described by the angles, in the stacks, between the segments defining vertebral levels, and by a polynomial regression fitted to the coordinates of the stack.

The methodology was programmed in Excel Macro language and applied to a sample of known sex and age. Neandertal are compared. Behaviour of angles and curvature variables are explained. A clear sexual dimorphism of VB is shown. Successive curvatures are dependent. Vertebral morphology partially contributes to the determination of physiological SC. Variability is in the same order as that of physiological data. Vertebral morphology does not necessarily determine three curvatures. Various curvatures in neandertal are accurately described. A clear male configuration of Kebara and La Chapelle-aux-Saints profiles is shown, as well as a strong lumbar lordosis. Studied neandertals are well within the sample variability, but different biomechanical patterns of the thoracolumbar level can be contemplated.

DISCIPLINE: ANTHROPOLOGIE BIOLOGIQUE - *BIOLOGICAL ANTHROPOLOGY*

MOTS CLES: colonne vertébrale, courbure sagittale, régression polynomiale, évolution, variabilité, *Homo sapiens*, néandertalien.

KEY WORDS: *vertebral column, sagittal curvature, polynomial regression, evolution, variability, Homo sapiens, neandertal.*

- Laboratoire d'Anthropologie. Avenue des Facultés. Université Bordeaux I Sciences. 33405 TALENCE CEDEX. FRANCE.
Tel.: (33).5.56.84.89.36. Fax: (33).5.57.96.25.25.45.

- Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Biología. Departamento de Biología Animal I. Sección Antropología. 28040 MADRID.
ESPAÑA. Tel.: (34).91.394.49.36. Fax: (34).91.394.49.47.