

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

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