



Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université Toulouse III - Paul Sabatier  
Discipline ou spécialité : *anthropobiologie*

---

Présentée et soutenue par *Laurent FANTON*  
Le 8 juillet 2009

Titre : *Estimation de l'âge au décès à partir de la 4<sup>ème</sup> côte*

---

### JURY

*Pr D. ROUGE (PU-PH)*  
*Pr D. MALICIER (PU-PH)*  
*Pr G. LEONETTI (PU-PH)*  
*Pr N. TELMON (PU-PH)*  
*Dr M.P. GUSTIN (MCU)*

---

**Ecole doctorale :** *Biologie Santé Biotechnologies*  
**Unité de recherche :** *AMIS CNRS/UPS FRE2960*  
**Directeur(s) de Thèse :** *Pr N. TELMON (PU-PH)*  
**Rapporteurs :** *Pr G. LEONETTI (PU-PH), Dr P. CROISILLE (MCU-PH)*

## **Remerciements**

A mon Maître le Professeur Daniel Malicier, pour son enseignement de la discipline médico-légale et la transmission de ses valeurs. Qu'il soit assuré de mon très profond respect et de mon indéfectible fidélité.

A Monsieur le Professeur Daniel Rougé, qui nous a fait l'honneur de participer à ce jury et pour son soutien. Qu'il soit assuré de mon très profond respect.

A Monsieur le Professeur Georges Léonetti, qui nous a fait l'honneur de participer à ce jury.

A Monsieur le Professeur Norbert Telmon, pour son soutien et ses encouragements tout au long de ce travail. Qu'il soit assuré de ma gratitude et de ma sincère amitié.

A Monsieur le Docteur Pierre Croisille, qui m'a fait l'honneur et le plaisir d'être rapporteur de ce travail.

A Christian Paultre et Marie-Paule Gustin-Paultre, mes initiateurs à la recherche et des amis, sans qui ce travail n'aurait pas abouti.

A Nicolas Bernard,

A mes parents, pour leurs encouragements et leur présence

A ma femme Fernanda, pour son soutien et le bonheur

A Thibault, Charles et Inès, pour la joie et la fierté qu'ils me procurent.

A mes amis Christophe Lapandéry, Jean-Christophe Jallès, Marc Fornas, Pierre , Hubert Pivet , Alain Debasch, Jean-Pierre Tournadre, André Humme, et Yves Courtial

# TABLE DES MATIERES

<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	3
<b>INTRODUCTION</b> .....	8
<u>1. PROBLEMATIQUE DES SCIENCES MEDICOLEGALE ET DE L'ESTIMATION DE L'AGE EN PARTICULIER</u> .....	8
2. <u>DESCRIPTION DE LA METHODE D'ISCAN</u> .....	11
2.1 <b>Les hypothèses fondatrices</b> .....	11
2.2 <b>Principes</b> .....	12
2.3 <b>Des qualités intrinsèques médiocres</b> .....	13
2.3.1 <u>L'absence de précision</u> .....	13
2.3.2 <u>L'existence de biais</u> .....	13
2.3.3 <u>Une transposition sur d'autres populations controversée</u> .....	14
2.3.4 <u>Une reproductibilité peu documentée</u> .....	15
3. <u>OBJECTIFS</u> .....	15
<b>A. ETUDE CRITIQUE DE LA METHODE D'ISCAN</b> .....	17
1. <u>INTRODUCTION</u> .....	17
2. <u>MATERIEL ET METHODE</u> .....	17
2.1 <b>Préparation des côtes</b> .....	19
2.2 <b>Protocole d'observation des côtes</b> .....	19
2.3 <b>Protocole d'étude des variables</b> .....	19
2.4 <b>Analyses statistiques</b> .....	20
2.5 <b>Ethique</b> .....	20
3. <u>RESULTATS</u> .....	21
3.1 <b>Reproductibilité de l'observation des phases</b> .....	21

<b>3.2. Reproductibilité et répétabilité de l'observation des variables à l'origine de phases</b> .....	21
3.2.1 <u>Reproductibilité et répétabilité de la mesure de la profondeur de la cavité articulaire</u> .....	21
a) <i>Reproductibilité</i> .....	21
b) <i>Répétabilité</i> .....	22
3.2.2 <u>Reproductibilité et répétabilité de l'observation de la forme de la cavité et de la configuration des bords et des murs</u> .....	22
a) <i>Reproductibilité</i> .....	22
b) <i>Répétabilité</i> .....	23
3.2.3 <u>Etude du facteur côte</u> .....	24
a) <i>Profondeur de la cavité articulaire</i> .....	24
b) <i>Forme de la cavité et configuration des bords et des murs</i> .....	27
<b>3.3 Nature de la relation avec l'âge</b> .....	31
4. <u>DISCUSSION</u> .....	33
<b>B. NOUVELLE APPROCHE DE LA DESCRIPTION DE LA METAMORPHOSE DE L'EXTREMITÉ STERNALE DE LA 4<sup>ÈME</sup> CÔTE</b> .....	35
1. <u>INTRODUCTION</u> .....	35
1.1 <b>L'articulation costo-sternale : une articulation physiologiquement complexe</b> .....	35
1.2 <b>Une articulations mécaniquement sollicitée</b> .....	37
1.3 <b>Objectifs</b> .....	38
2. <u>MATERIEL ET PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA MÉTHODE</u> .....	39
2.1 <b>Nature de l'échantillon</b> .....	39
2.2 <b>Préparation des côtes</b> .....	39
2.3 <b>Principes généraux de la méthode</b> .....	41
2.4 <b>Ethique</b> .....	42
3. <u>ANALYSE GEOMETRIQUE</u> .....	42

<b>3.1 Surface de la cavité</b> .....	42
3.1.1 <u>Matériel et méthode</u> .....	42
3.1.2 <u>Résultats</u> .....	43
3.1.3 <u>Eléments de discussion</u> .....	44
<b>3.2 Excentricité de la surface de la cavité</b> .....	45
3.2.1 <u>Matériel et méthode</u> .....	45
3.2.2 <u>Résultats</u> .....	45
3.2.3 <u>Eléments de discussion</u> .....	47
<b>3.3 Hauteur moyenne de la cavité</b> .....	48
3.3.1 <u>Matériel et méthode</u> .....	48
3.3.2 <u>Résultats</u> .....	48
3.3.3 <u>Eléments de discussion</u> .....	51
<b>3.4 Forme de l'os supportant l'articulation</b> .....	50
3.4.1 Matériel et méthode.....	50
3.4.2 Résultats.....	50
3.4.3 Eléments de discussion.....	51
<b>4. <u>ANALYSE HARMONIQUE</u></b> .....	51
<b>4.1 Méthode</b> .....	51
4.1.1 <u>Principe de la décomposition de Fourier</u> .....	52
4.1.2 <u>Transformée de Fourier du contour de la cavité</u> .....	55
4.1.3 <u>Transformée de Fourier des bords antérieurs et postérieurs des murs</u> .....	57
4.1.4 <u>Descripteur de Fourier</u> .....	58
<i>a) Descripteur de Fourier par représentation complexe</i> .....	58
<i>b) Propriétés des descripteurs de Fourier par représentation complexe</i> .....	59
<i>c) Exploitation des descripteurs de Fourier</i> .....	61
<b>4.2 Résultats-discussion</b> .....	62

4.2.1 <u>FFT du contour de la cavité</u> .....	62
a) <i>Résultats</i> .....	62
b) <i>Discussion</i> .....	65
4.2.2 <u>FFT du bord du mur</u> .....	66
a) <i>Résultats</i> .....	66
b) <i>Discussion</i> .....	67
4.2.3 <u>Descripteurs de Fourier du contour de la cavité</u> .....	68
a) <i>Résultats</i> .....	68
b) <i>Discussion</i> .....	70
4.2.4 <u>Descripteurs de Fourier du bord du mur antérieur et postérieur</u> .....	70
a) <i>Résultats</i> .....	70
b) <i>Discussion</i> .....	72
5. <u>ANALYSES DES FORMES VISUELLES</u> .....	72
<b>5.1 Matériel et méthode</b> .....	72
<b>5.2 Résultats</b> .....	72
5.2.1 <u>Histogrammes de l'âge</u> .....	72
5.2.2 <u>Corrélation de l'âge et de la surface postérieure pour les différentes formes</u> .....	75
5.2.3 <u>Score de forme</u> .....	76
<b>5.3 Discussion</b> .....	78
6. <u>ANALYSE MULTIVARIEE : REGRESSION MULTIPLE</u> .....	79
<b>6.1 Matériel et méthode</b> .....	79
6.1.1 <u>Association des variables issues des analyses géométriques, harmoniques et des formes visuelles</u> .....	79
6.1.2 <u>Association des variables issues des analyses géométriques, harmoniques et des formes visuelles avec la taille et le poids taille/poids</u> .....	80
<b>6.2 Résultats</b> .....	81
6.2.1 <u>Variables issues des analyses géométriques, harmoniques et de forme</u> .....	81

a) Corrélation des variables entre elles.....	81
b) Résultats de l'analyse statistique.....	83
c) Etude des résidus.....	83
d) Modèle de prédiction.....	85
6.2.2 <u>Variables harmoniques et variables tailles/poids</u> .....	86
<b>6.3 Discussion</b> .....	88
7. <u>LA QUESTION DES CÔTES NON EXPLOITABLES OU LES ABSENTS ONT-ILS TOUJOURS TORT</u> .....	90
8. <u>DISCUSSION</u> .....	91
<b>8.1 Métamorphose de la 4<sup>ième</sup> côte avec l'âge</b> .....	91
8.1.1 <u>Éléments descriptifs</u> .....	91
8.1.2 <u>Éléments explicatifs</u> .....	93
<b>8.2 Prédiction de l'âge</b> .....	94
<b>8.3 Limites du travail</b> .....	96
8.3.1 <u>Le caractère exploratoire de l'étude</u> .....	96
8.3.2 <u>Absence de prise en compte de l'épaisseur du mur et de la qualité de l'os</u> .....	96
8.3.3 <u>Préparation des os</u> .....	97
9. <u>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</u> .....	98
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	100
<b>ANNEXES</b> .....	113
<b>Annexe 1 - Protocole d'observation de l'étude de reproductibilité des phases</b> .....	114
<b>Annexe 2 - Photographies des côtes de l'étude descriptive</b> .....	119
<b>Annexe 3 - Photographies des morfo phénotypes identifiés visuellement</b> .....	120

# INTRODUCTION

## 1. PROBLEMATIQUE DES SCIENCES MEDICOLEGALE ET DE L'ESTIMATION DE L'AGE AU DECES EN PARTICULIER

Les disciplines médico-légales ont fait l'objet depuis quelques années d'une remise en question liée à la validité de la preuve scientifique et du témoignage de l'expert. Cette contestation s'est manifestée avec éclat dans deux procès ayant eu lieu au Etats-Unis et au cours desquels les témoignages des experts ont été à l'origine d'une remise en cause puis de débats (1,2). La principale conséquence à l'issue du premier de ces procès a été l'élaboration d'un *guideline* définissant les caractéristiques légales du contenu du témoignage de l'expert pour qu'il soit recevable. *In fine*, il préconisait de passer d'observations scientifiques approximatives à des méthodes précises, reproductibles et validées par la communauté scientifique (3). La conséquence essentielle du second procès a été de prendre en compte la spécificité de la matière, médico-légale en particulier, et le fait qu'elle n'était pas toujours adaptable aux critères de Daubert, sans pour autant remettre en cause la recevabilité du témoignage de l'expert. Cette approche était complémentaire de la première, en mettant au premier plan l'importance d'une expérience documentée et en insistant sur la flexibilité des critères de Daubert (4).

Bien que ces deux affaires soient américaines, elles ont été l'objet de très nombreux articles dans la littérature médico-légale. Nous avons pris le parti de ne pas les détailler compte tenu de leur abondance. On peut retenir que dans un premier temps ils ont attiré l'attention sur la difficulté de transposer au domaine médico-légal des techniques issues de multiples disciplines, en respectant des critères de qualité



jusque là peu pris en compte. Dans un second temps, ils ont témoigné d'une adaptation de la recherche médico-légale à ces nouvelles exigences de qualité, avec pour corollaire une meilleure qualité des articles publiés.

Dans la pratique, parmi les différentes branches de la médecine légale, la génétique médico-légale avait anticipé ce mouvement en mettant en place des procédures d'assurance qualité, portant notamment sur la validation de ses techniques analytiques (5). Cette primauté de qualité s'était imposée par les procédures d'accréditation des laboratoires de génétique médico-légale (6). Elle avait également pu être secondaire à la proximité technique de cette discipline avec la génétique médicale.

L'anthropologie médico-légale n'a pas échappé à ces nouvelles exigences (4, 7 - 9). Toutefois, elle présentait par rapport à la génétique une spécificité secondaire au fait, qu'elle utilisait des techniques issues de multiples disciplines. Ces dernières, quantitatives ou qualitatives, faisaient souvent appel à l'expérience acquise de l'observateur devenant ainsi l'expert. Cette part de subjectivité, les caractéristiques des variables étudiées et le fait qu'un certain nombre de ces techniques aient été élaborées avec des méthodologies anciennes ont pu expliquer leur inadéquation aux exigences de qualité précédemment évoquées (10). Cette inadéquation a aussi pu être secondaire à l'absence d'évaluations scientifiques consensuelles, qui constituent une démarche habituelle dans d'autres disciplines.

Les remarques précédentes étaient en particulier vraies pour les méthodes d'estimation de l'âge au décès, alors que paradoxalement on constatait une augmentation des demandes d'identifications (7); ces dernières intéressant des cadavres isolés ou des charniers, notamment dans le cadre de génocides faisant l'objet de poursuites devant le Tribunal Pénal International (11,12). Ces méthodes avaient fait l'objet de travaux, dont les principaux objectifs avaient été de comparer leur précision et leur reproductibilité ou de tester l'intérêt de leur association (12 - 14). Cela n'a été que récemment, que des auteurs s'étaient intéressés à leurs qualités intrinsèques dans le cadre des critères de qualité précédemment évoqués (9). Ainsi, chez l'adulte deux types de méthodes avaient été distinguées, en basant sur une déviation standard maximale inférieure ou égale à 5 ans (7). Les premières, macroscopiques, d'utilisation simple, mais imprécises, étaient qualifiées de méthodes de débrouillage ou de première ligne. Il s'agissait selon un ordre décroissant de précision de la méthode basée sur l'étude du cément dentaire (15), de celles combinant plusieurs indicateurs macroscopiques (16,17), et enfin de celle basée sur l'observation de l'extrémité sternale de la 4<sup>ième</sup> côte (18). L'étude de la racémisation de l'acide aspartique (19) considérée comme le *gold standard*, était à utiliser en seconde ligne du fait de la complexité de sa mise en œuvre.

Quoiqu'il en soit, ces travaux n'avaient pas remis fondamentalement en question les méthodes évoquées. En effet, exclusivement focalisées sur l'estimation de l'âge, ils n'avaient jamais porté sur leurs fondements. L'objectif de ce travail a été de s'intéresser à la méthode d'estimation de l'âge au décès basée sur l'examen macroscopique de la 4<sup>ième</sup> côte, considérée un temps comme une des méthodes de référence. Compte tenu des remarques précédentes, il a été considéré que son

ancienneté pouvait justifier une remise à plat avec une approche plus moderne, sans préjuger des résultats finaux.

## 2. DESCRIPTION DE LA METHODE D'İSCAN

### **2.1 Les hypothèses fondatrices**

La méthode d'estimation de l'âge à partir de l'extrémité sternale de la 4<sup>ème</sup> côte a été proposée par İscan dans les années quatre-vingt (18). Son auteur s'est inspiré de constatations radiologiques, histologiques et macroscopiques la plupart du temps indirectes, pour justifier son intérêt. Les premières, intéressaient en effet non pas l'extrémité costale, mais la minéralisation et l'ossification du cartilage costo-sternal avec l'âge (20). Ce phénomène, avaient été ensuite confirmées par plusieurs auteurs, notamment par McCormick, qui avait tenté de l'utiliser comme indicateur du sexe, puis de l'âge (21 – 23). Sur le plan histologique, İscan s'était principalement inspiré d'une étude d'Epker (24), dans laquelle cet auteur avait constaté des modifications au niveau de la partie extra articulaire de la côte avec l'âge. Enfin, sur le plan macroscopique, il avait rapporté les modifications macroscopiques de l'extrémité sternale des côtes avec l'âge constatées par Kerley puis par Ubelaker (25,26). Ces constatations constituaient finalement le seul argument direct de modifications de l'extrémité sternale de la côte avec l'âge. Par ailleurs, İscan avait aussi justifié le développement de cette méthode par l'intérêt d'en disposer d'une supplémentaire par rapport à celles disponibles, ce d'autant que la côte était facilement accessible et à priori peu sujette au stress mécanique articulaire ou à celui de la grossesse (par rapport aux méthodes basées sur l'étude du pubis) (18).

## 2.2 Principes

Dérivant d'une méthode métrologique, la méthode d'İşcan a d'abord été développée chez l'homme adulte à partir de deux populations américaines, de morpho phénotype leucoderme, de faibles effectifs et dans lesquelles les sujets de moins de 50 ans étaient surreprésentés (18,27). Elle est initialement basée sur l'évaluation d'une variable quantitative : la profondeur de l'articulation et de 2 variables qualitatives ordinales : la forme de la cavité articulaire et la configuration du bord et du mur. Ces dernières ont été identifiées à partir d'une méthode empirique de sériations visuelles développée dans les années cinquante (28). Elles ont chacune 6 stades (de 0 à 5), dont les descriptions intègrent l'épaisseur du mur et la qualité de l'os. *In fine*, ces trois variables ont permis à İşcan de mettre en évidence 9 phases morphologiques en fonction de l'âge, puis d'attribuer à chaque décade la phase la plus représentée. La profondeur avait toutefois été transformée en variable qualitative dans la méthode finale.

Secondairement, İşcan a développé la même méthode pour les femmes, à partir de deux populations de sujets américains de morpho phénotype leucoderme de faibles effectifs et dans lesquelles les sujets de plus de 50 ans étaient également surreprésentés (29).

En 1994, Loth a montré que cette méthode pouvait être appliquée à des côtes sus et sous jacentes, du fait de variations minimales touchant essentiellement les sujets masculins et féminins de moins de 30 ans (30). Ces constatations ont été confirmées en 2001 par une étude comparative réalisée par Yoder sur le 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup>,

6<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup>, 8<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> côtes droite et gauches (31) Toutefois, ces auteurs préconisaient l'utilisation d'un score composite dans ce cas de figure.

Malgré, des méthodologies souvent différentes les travaux ultérieurs sur les qualités intrinsèques de cette méthode ont mis en évidence un certain nombre de problèmes expliquant sa place actuelle.

## **2.3 Des qualités intrinsèques médiocres**

### **2.3.1 L'absence de précision**

Cela a probablement été le principal grief fait à cette méthode, qui est apparue d'emblée imprécise chez les hommes de plus de 40 ans. İşcan avait rapporté à partir de la phase 5 (âge moyen = 38,8 ans), une déviation standard de 7 ans (27). Tous les travaux ultérieurs ont confirmé ces constatations. Bien qu'ils aient souvent été réalisés avec des méthodologies différentes, ils permettaient de retenir une précision allant de 3,4 ans pour les sujets de moins de 30 ans, à plus de 16 ans pour les sujets âgé de plus de 50 ans (13,15,32,33). Chez les femmes, cette précision était encore moins bonne (15,29).

### **2.3.2 L'existence de biais**

L'ensemble des études ont confirmée, que cette méthode comme la plupart des méthodes de ce type, avait tendance à surestimer l'âge des sujets jeunes et à sous estimer celui des sujets âgés (12,13,32,33).

### 2.3.3 Une transposition controversée sur d'autres populations

En 1987, İşcan a réalisé une étude portant sur la transposition de cette méthode chez des sujets de morpho phénotype différent de celui sur lequel elle avait été mise au point (34). Ce travail portait sur quatre échantillons d'individus nord-américains des deux sexes, de morpho phénotype leucoderme et mélanoderme. A son issue, il a mis en évidence une surestimation de l'âge des sujets mélanodermes de plus de 40 ans.

Les travaux ultérieurs portant sur cette question de la transposition de cette méthode ont montré des résultats différents sur les populations de morpho phénotype mélanoderme (14,33,35). Oetllé en particulier, a réalisé une étude portant sur une population de sujets sud-africains des deux sexes. Elle a constaté que la méthode d'İşcan était moins précise qu'habituellement en raison de particularité morphologiques, qui l'ont conduit à modifier la description des phases. Elle a également constaté, comme Russell et Martrille et contrairement à İşcan, l'absence de tendance spécifique par rapport à l'âge.

Les travaux portant sur des populations de morpho phénotype leucoderme ont également présenté des résultats divergents. Yavuz a ainsi constaté que la méthode d'İşcan était transposable à une population turque contemporaine (36). En revanche, deux études ultérieures réalisées sur des populations de l'ex-Yougoslavie et de Bosnie ont montré qu'elle ne l'était pas complètement (11,37).

#### 2.3.4 Une reproductibilité peu documentée

En 1986, İşcan a testé la variation inter observateur de l'observation des phases sur des populations masculine et féminines (38,39). Outre, un biais évident lié au choix arbitraire de la phase de référence, la méthodologie très empirique utilisée n'était pas adaptée à une évaluation objective de la reproductibilité inter observateur (40).

Les travaux ultérieurs ont eu des conclusions divergentes. Ainsi Baccino n'a pas mis en évidence de différence significative dans l'observation des phases réalisées par ses deux observateurs (13), alors que Kimmerle constatait une mauvaise reproductibilité chez les quatre siens (12). Ils ont également montré, que pour cette méthode comme pour les autres, la reproductibilité inter observateurs avait été meilleure chez les sujets jeunes et âgés que chez les sujets d'âge moyen. Dans tous les cas, l'absence de méthodologie identique rendait difficile une comparaison objectives des résultats rapportés.

### 3. OBJECTIFS

L'analyse générale de ces travaux a bien montré qu'à travers des résultats souvent imprécis, biaisés, non concordants, voire contradictoires se posait un problème méthodologique fondamental. Des échantillons de taille souvent insuffisante pour permettre une analyse statistique rigoureuse, ne pouvaient que produire des résultats aux conclusions générales incertaines, voir chaotiques. Des descriptions visuelles de phases peu précises laissaient par ailleurs une large possibilité d'interprétation à l'expert. Ces éléments remettaient sérieusement en cause la précision de la méthode d'İşcan, mais également sa reproductibilité, élément fondamental de la qualité de ce type de méthode (42). Toutes ces insuffisances n'ont

cependant jamais permis de la remettre fondamentalement en question et il convenait de tout reprendre à la base.

Le premier objectif de ce travail a été de réaliser une étude critique de la méthode d'İşcan, basée sur l'évaluation de l'observation de ses phases et de celle des variables à partir desquelles elles avaient été établies. Une amélioration de la méthode été secondairement été envisagée.



# **A. ETUDE CRITIQUE DE LA METHODE D'İŞCAN**

## **1. INTRODUCTION**

L'objectif de la première partie de ce travail a été de réaliser une étude critique de la méthode d'İşcan en évaluant la reproductibilité de l'observation de ses phases, puis de celle des variables ayant servi à les établir et de leur répétabilité. Ces dernières n'ont jamais été envisagées, alors que l'interprétation des phases en découle directement. Pour répondre à cet objectif une méthodologie conforme aux recommandations en ce domaine a été utilisée (40 - 42).

## **2. MATERIEL ET METHODE**

Pour l'étude de la reproductibilité de l'observation des phases définies par İşcan, les données rapportées au cours d'une étude de reproductibilité de la méthode réalisée à l'occasion de la réunion de l'American Academy of Forensic Sciences de 1985 ont été utilisées (38) (table 1). Cette approche présentait l'intérêt d'apporter un regard objectif sur la seule étude de ce type, dont l'ensemble des données étaient disponibles.

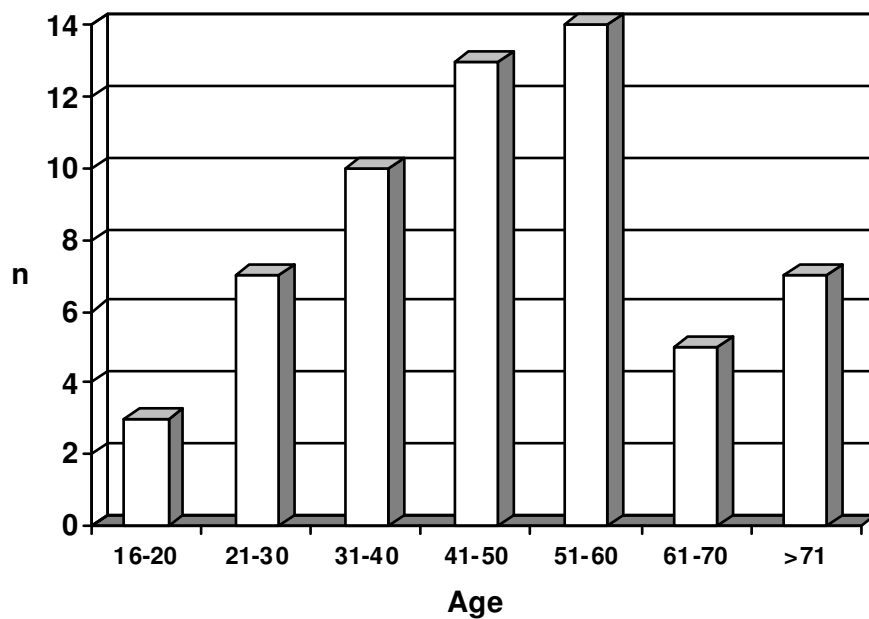
Pour l'étude des variables ayant servi à établir les phases, un échantillon médico-légal de 59 quatrièmes côtes droites d'hommes d'ethnie française a été collecté à l'institut universitaire de médecine légale de Lyon durant l'année 2004 (âge moyen = 49 ans, minimum = 17 ans, maximum = 94 ans) (figure 1).

**Table 1. Résultats de l'étude sur la reproductibilité de l'observation des phases chez le sujet masculin rapportés par İşcan en 1986 (38)**

		Observateurs																									
		Auteurs	Observateurs avec un degré doctoral															Sans degré doctoral									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Côtes	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	1	1	1	0	2	1	1	1	0	1	1	1	1	1	2	1	0	1	1	1		1	1	1		1
	3	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	0	1	2	1	1	2	1	2		1	2	1		2
	4	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	5	2	2	2	2	3			1
	5	4	5	4	2	3	3	1	3	4	2	2	4	3		5	2	3	4	2	2	4	2	2	2	2	2
	6	4	3	6	4	5	5	3	3	5	6	6	3	5	7	5	5	5		3	6	5	6	5	3		3
	7	5	5	3	5		5	3	5	5	4	5	5	4	7	4	5	4	5	2	5			5		3	7
	8	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	7	7	7	7	7	7	7	7	6		7	7	7		7	7
	9	6	5	8	5	8	7	7	7	7	7	6		6	7	6	8	6	7	3	6		7	7			8
	10	7	7	8	7	7	7	7	7	7	7	7	8	7	7	8	7	7	7	5	7	7		8	7		7
	11	5	3	7	5	8	6	3	7	6	5	2	6	4	7	6	6	6		4	4		5	7	5		8
	12	5	5	6	3	3	4	5	5	5	4	5	3		6	4	4	6		3	5	5		8	4	5	7
	13	8	8	8	7	6	8	6	8	5	8	8			8	7	8	6	8	7	8	8		7		8	8
	14	8	7	8	7	7	8	8	8	8	8		7	8	8	8		8	8	8	8		7		8		7
	15	8	5	7	5	5	6	4	6	5	4	3	5	5	4	6			7	4	5	4	5	3			3

La phase idéale de 15 4<sup>èmes</sup> côtes déterminée par comparaison avec les photographies non légendée des phases établie pas İşcan, a été évaluée par les auteurs de la méthode et deux groupes d'observateurs de niveaux académiques différents

**Figure 1. Histogramme de la population (n = 59)**



## **2.1 Préparation des côtes**

Selon le protocole décrit par İşcan (18,27,29), les côtes ont macéré dans l'eau jusqu'à ce que les tissus mous et le cartilage se détachent. Elles ont ensuite été immergées au bain-marie dans de l'eau à 80°C, jusqu'au décharnement et au décollement complets du cartilage. Cette option technique a été choisie afin de permettre une comparaison pertinente, qui imposait de respecter la procédure appliquée par l'auteur.

## **2.2 Protocole d'observation des côtes**

Chaque côte a été examinée au cours de deux séances (séance 1 et séance 2) à deux semaines d'intervalle, par 10 observateurs : 1 anthropologue, 5 médecins légistes et 4 observateurs non-légistes. Ces observateurs devaient estimer la profondeur de la cavité de l'articulation, la forme de la cavité, et la configuration du bord et du mur (annexe 1). Chaque observation a été précédée d'une explication de la méthode, puis réalisée à l'aide des photos commentées de l'article d'İşcan (28). La profondeur a été mesurée à l'aide d'un pied à coulisse. Pour la forme de la cavité et la configuration du bord et du mur, les observateurs ont indiqué le stade idéal, ou en cas d'hésitation, les deux stades correspondants. Cette option a été choisie afin de définir d'éventuels stades intermédiaires.

## **2.3 Protocole d'étude des variables**

La reproductibilité inter observateur de l'observation des phases a été appréciée par l'étude de la concordance ou de la non concordance entre l'ensemble des observateurs, puis pour chaque groupe de statut académique différents. Concernant

les observations non documentées, il a été considéré par défaut, qu'elles correspondaient à une non réponse permettant de définir une 10<sup>ième</sup> variables.

Concernant l'étude des variables sur lesquelles les phases ont été établies, la reproductibilité inter observateur de leur observation a été appréciée par la l'étude de la concordance des observations avec celle de l'expert. La reproductibilité intra observateur (répétabilité) a été appréciée par la concordance des observations de chaque observateur entre la séance 1 et la séance 2. Les difficultés de description liées aux côtes ont ensuite été envisagées avant d'analyser la valeur prévisionnelle de l'âge donné par cette méthode.

## **2.4 Analyses statistiques**

L'analyse de la variable qualitative (profondeur) a été réalisée par un test non-paramétrique de Wilcoxon. Celle des variables qualitatives (phase, forme de la cavité, configuration des bords et des murs) a été réalisée en utilisant le coefficient kappa ( $\kappa$ ). La relation entre l'âge et les variables a été étudiée avec le coefficient de corrélation de Pearson.

## **2.5 Ethique**

Sur le plan éthique les prélèvements ont été réalisés en accord avec la loi française : le Procureur de la République avait donné son accord pour leur réalisation au cours des autopsies médico-légale et les familles avaient été informées de la nature et des objectifs de cette étude.

### 3. RESULTATS

#### **3.1 Reproductibilité de l'observation des phases**

La reproductibilité de l'observation des phases a été étudiée par la concordance ou la non concordance des valeurs observées respectivement entre l'ensemble des observateurs (n = 25), puis pour chacun des deux groupes d'observateurs, en utilisant la statistique Kappa. Le coefficient Kappa ( $\kappa$ ) a permis de définir une échelle de concordance interprétée comme suit : 0.00 - 0.20, pauvre ; 0.21 – 0.40, léger ; 0.41 - 0.60, modérée ; 0.61 – 0.80, substantiel ; et 0.81 – 1.00, presque parfait (43).

Il a été constaté une mauvaise reproductibilité des observations des phases décrites par İşcan, qui allait de pauvre pour les sujets les moins expérimentés ( $\kappa < 0.20$ ) à légère pour les plus expérimentés et pour l'ensemble des observateurs ( $\kappa < 0,40$ ). Ces résultats mettaient en évidence une difficulté de reconnaissance des phases décrites par İşcan, qui n'avait pas été clairement évaluée (38). Elle justifiait l'étude de l'observation des variables ayant servi à les établir.

#### **3.2 Reproductibilité et répétabilité de l'observation des variables à l'origine des phases**

##### 3.2.1 Reproductibilité et répétabilité de la mesure de la profondeur de la cavité articulaire

###### a) *Reproductibilité*

La reproductibilité de la mesure de la profondeur a été calculée pour chaque observateur à partir des écarts entre ses valeurs et celles de l'expert pour chaque

séance observation. Un test non paramétrique de Wilcoxon apparié a permis d'apprécier ces écarts par la probabilité qu'ils soient soit dus au hasard (p-value).

Il a été constaté une mauvaise reproductibilité des observations de la profondeur : seulement 2 observateurs ont trouvé des valeurs de profondeur qu'on ne pouvait jugée discordance avec celle de l'expert au risque alpha égale à 5% lors de la première séance d'observations et 4 selon les mêmes critères lors de la deuxième séance.

#### *b) Répétabilité*

Elle a été calculée pour chaque observateur par la mesure de l'écart de ses observations entre les deux séances en utilisant le même test statistique que précédemment. Ainsi, avec les mêmes critères, seulement 5 observateurs ont présenté une répétabilité suffisante d'une séance d'observation à l'autre au seuil défini.

### 3.2.2 Reproductibilité et répétabilité de l'observation de la forme de la cavité et de la configuration du bord et du mur

#### *a) Reproductibilité*

La reproductibilité des observations de la forme de la cavité et de la configuration du bord et du mur a été étudiée par la concordance ou la non concordance des valeurs observées entre chaque observateur et l'expert en utilisant la statistique Kappa pour chaque séance d'observations. La même échelle de concordance que pour l'étude de la reproductibilité de l'observation des phases a été utilisée.

Il a été constaté pour les deux variables une mauvaise reproductibilité des observations, la concordance allant de pauvre à légère pour chacune d'entre elle (table 2). Il a cependant été observé une légère amélioration lors de la deuxième observation, plus de la moitié des observateurs améliorant leur concordance avec l'expert. Il a également été mis en évidence, que la reproductibilité était indépendante du statut académique.

#### *b) Répétabilité*

La répétabilité des observations de la forme de la cavité et de la configuration du bord et du mur pour chaque observateur a été étudiée par la concordance de leurs observations entre les deux séances en utilisant la même statistique que précédemment. Cette répétabilité était mauvaise pour les deux variables, la concordance allant de pauvre à légère pour chacune d'elle. La répétabilité est apparue comme la reproductibilité indépendante du statut académique.

**Table 2. Reproductibilité et répétabilité de l'observation de la forme de la cavité et de la configuration du bord et du mur**

	Forme de la cavité			Configuration du bord et du mur		
	obs vs exp		Séance 1 vs Séance 2	obs vs exp		Séance 1 vs Séance 2
	Séance 1	Séance 2		Séance 1	Séance 2	
Kappa min	0.06	0.12	0.11	0.16	0.14	0.10
Kappa max	0.25	0.32	0.47	0.22	0.34	0.47

Reproductibilité : pour chaque observateur, les écarts de l'évaluation de la forme de la cavité et du bord du mur avec celle de l'expert ont été appréciés par la valeur du coefficient Kappa lors des deux essais (obs vs exp, Séance 1, Séance 2). Répétabilité : pour chaque observateur, les écarts de l'évaluation de la forme de la cavité et du bord du mur entre ses deux observations ont été appréciés par la même statistique (Séance 1 vs Séance 2). Kappa min et Kappa max représentent les coefficients Kappa minimum et maximum obtenus pour l'ensemble des observateurs.

### 3.2.3 Etude du facteur côtes

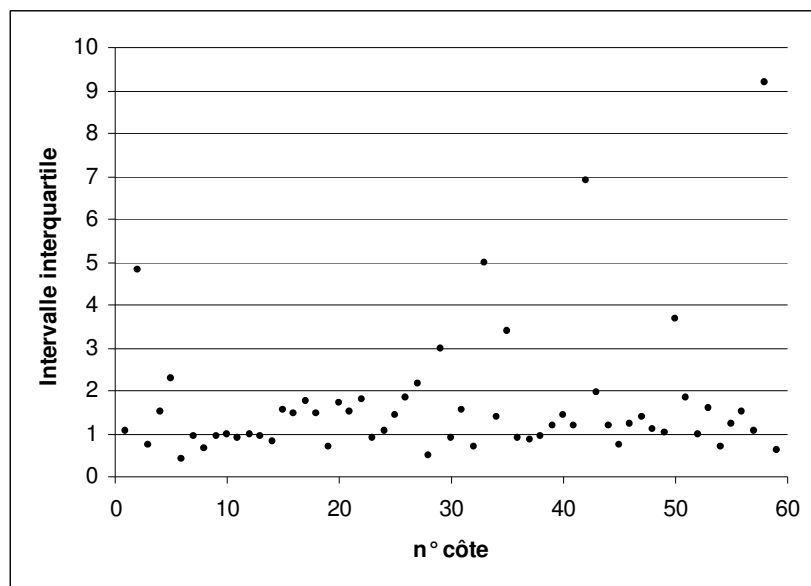
#### *a) Profondeur de la cavité articulaire*

La dispersion des valeurs de la mesure de la profondeur pour chaque côte a permis d'identifier celles posant des problèmes. Cette dispersion a été évaluée en calculant pour chaque côte l'intervalle interquartile des profondeurs de l'ensemble des observations sans celles de l'expert. La figure 2 a montré que 9 côtes présentaient un intervalle interquartile important (> 3 mm). L'analyse de ces côtes à forte dispersion a mis en évidence, que les difficultés de mesure de la profondeur de la cavité articulaire pouvaient être secondaires à des problèmes d'identification des points de mesure et/ou à la réalisation de cette dernière. Ces problèmes ont été liés à 1) la présence de plusieurs points de mesure potentiels (figure 3), 2) à l'irrégularité de la cavité ou des bords (figure 4), ou 3) à l'existence de projections ou de fenêtres



osseuses (figure 5). La persistance de cartilage au fond de l'articulation, de même que des pertes de substances liées à la répétition des mesures ont aussi pu perturber la mesure. Enfin, la difficulté à déterminer les points de mesure a pu être dépendante des capacités individuelles de reconnaissance des observateurs.

**Figure 2. Dispersion de la mesure de la profondeur pour chaque côte (n = 59)**

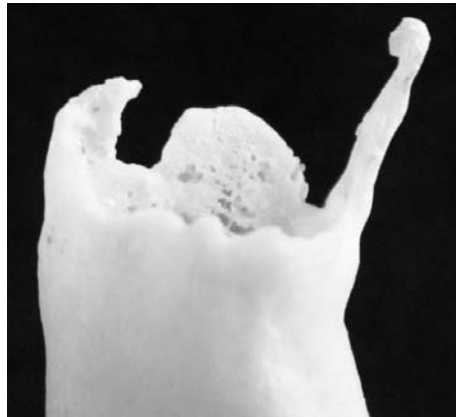


Pour chaque côte numérotée de 1 à 59, la mesure de la dispersion des valeurs de la profondeur a été donnée par la valeur de l'intervalle inter quartile correspondant.

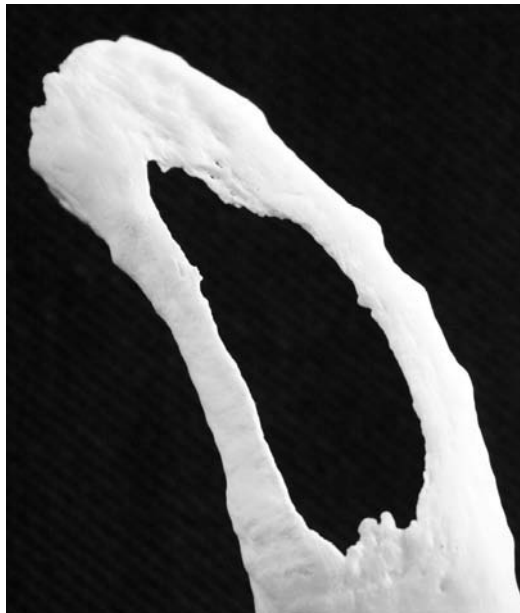
**Figure 3. Irrégularité du fond de la cavité**



**Figure 4. Irrégularités des bords de la cavité**



**Figure 5. Fenêtres osseuses**



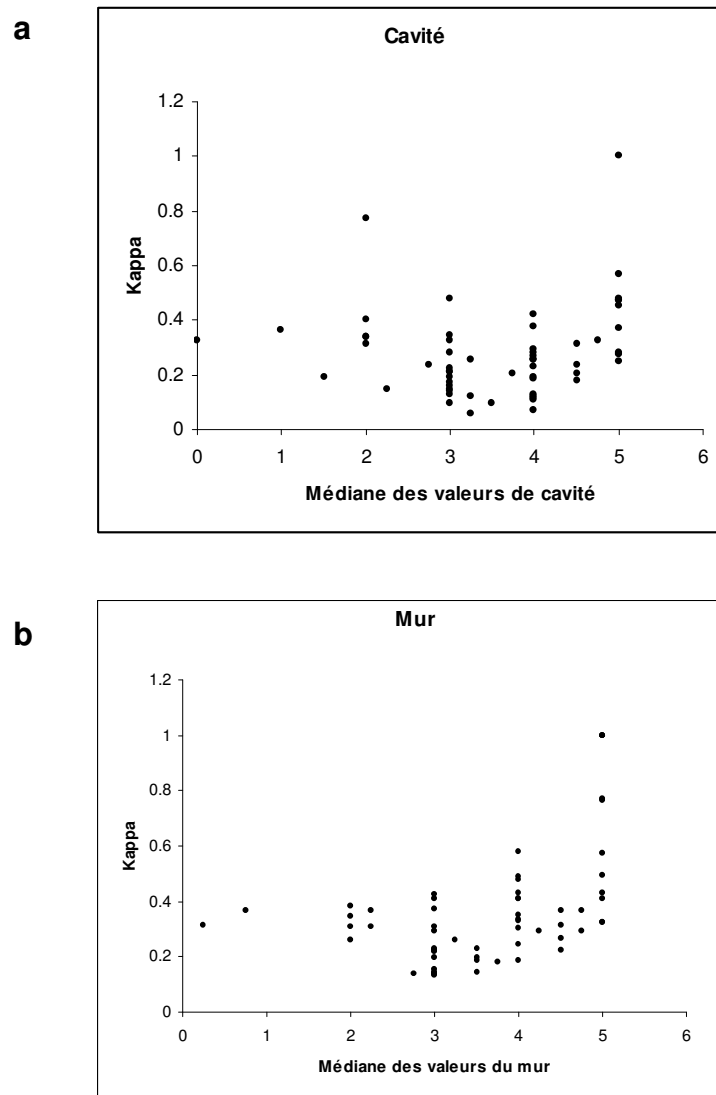
*b) Forme de la cavité et configuration des bords et des murs*

Pour la forme de la cavité et la configuration du bord et du mur, la concordance des observations a été évaluée par le coefficient Kappa calculé pour chaque côte en prenant en compte l'ensemble des observations sans celles de l'expert. Les figures 6a et 6b ont présenté les valeurs des concordances entre observateurs pour chaque côte en fonction de la médiane des 18 observations. La médiane a été choisie comme valeur de référence à la place de celle de l'expert car elle offrait *a priori* le meilleur consensus entre les 18 observations. Ceci a permis d'étudier la concordance des observations en fonction de la valeur *a priori* de la forme de la cavité (figure 6a) et de la forme du mur (figure 6b).

Pour la forme de la cavité, la figure 6a a montré une concordance pauvre ( $<0.20$ ) pour 20 côtes, dont la majorité (17 sur 20) présentait une cavité médiane comprise entre 3 et 4.

Pour la configuration du bord et du mur, la figure 6b a montré un nombre de côtes à concordance faible, mais important que pour la variable précédente. Comme pour ces dernières, la majorité des côtes concernées présentaient une médiane comprise entre 3 et 4. Par ailleurs il a été constaté à partir du stade 3, que plus la médiane était importante et plus la concordance entre observateurs était forte.

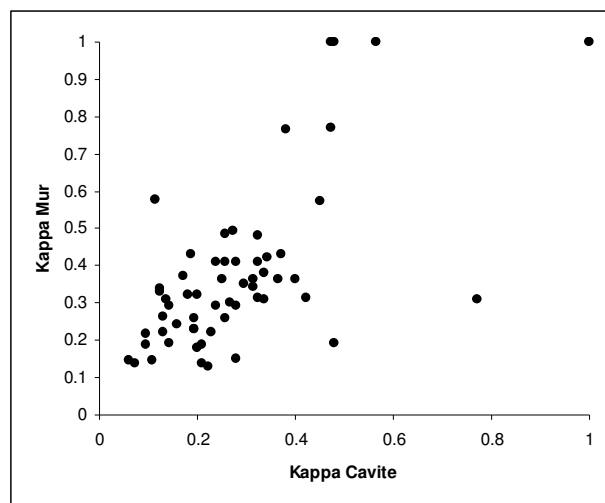
**Figure 6. Concordance des observations relatives à la forme de la cavité et à la configuration du bord et du mur (n = 59)**



La concordance par côte (n = 59) est donnée par le coefficient Kappa entre les 18 observations, (a) pour la forme de la cavité et (b) pour la configuration du bord et du mur. On a donné en abscisse pour chaque côte la médiane des observations

Enfin, la figure 7 a montré, sans que l'on puisse dégager une véritable tendance, que plus les observations de la forme de la cavité étaient concordantes, plus celles du bord et des murs l'étaient également.

**Figure 7. Relation entre la concordance de la forme de la cavité et la configuration du bord et du mur pour chaque côte**



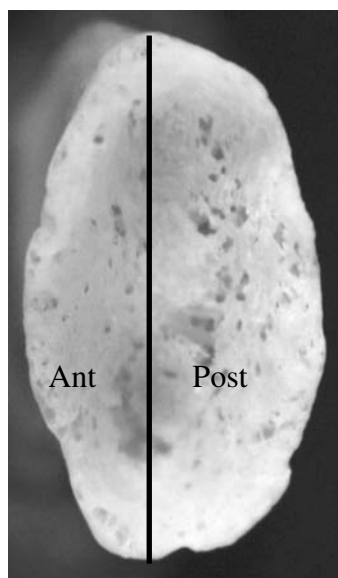
Le graphique a montré la relation entre la concordance des observations du mur et de la cavité pour chaque côte (n = 59). Cette concordance a été appréciée, pour chaque côte, par, en abscisse, le coefficient Kappa de la forme de la cavité

L'analyse des côtes présentant un consensus faible ( $\kappa < 0.20$ ) a permis de mettre en évidence des ambiguïtés d'observation de la forme de la cavité et de celle des bords et des murs.

Pour la forme de la cavité, les difficultés de reconnaissance ont été secondaires à l'imprécision des descriptions, qui ont mélangé des appréciations subjectives de la forme de la cavité, de sa profondeur et des éléments additifs (qualité du mur, texture de l'os). Il est possible, que l'absence de standardisation et la médiocre qualité des

photographies de référence (échelle et vue différentes, superpositions des bords) ait pu aussi contribuer à ces difficultés de reconnaissance. La prise en compte dans nos observations de stades intermédiaires en cas d'hésitations entre 2 stades, n'a pas été suffisante pour améliorer ces observations, faute de critères précis. Ceci était particulièrement net pour les stades 3 et 4. Paradoxalement, la difficulté théorique de reconnaissance du stade 5 n'a pas eu d'influence sur le consensus, bien que l'appréciation de la forme cavité à ce stade ait pu être gênée par des projections osseuses. Dans ce cas, il était possible que la plupart des observateurs ayant facilement attribué un stade 5 pour la forme du mur aient automatiquement conclu que le stade de la forme de la cavité était forcément égal à 5. Cette analyse morphologique a aussi permis de mettre en évidence certains aspects de formes, qui pourraient être pris en compte dans une description plus précise, comme par exemple l'apparition d'un évasement unilatéral initialement localisé à une partie du mur postérieur, puis étendu à toute sa longueur (figure 8).

**Figure 8. Evasement asymétrique du bord postérieur**



Pour la configuration du bord et du mur, des difficultés similaires à celles rencontrées pour la variable précédente ont été observées. La difficulté de reconnaissance des dentelures irrégulières et régulières du bord a rendu difficile la différenciation entre les stades 2, 3 et 4 en l'absence d'autre élément discriminant (figure 9). Ces difficultés ont été majorées par la prise en compte d'éléments additifs subjectifs et communs à la variable précédente, ainsi que par l'existence de côtes intermédiaires. En revanche, les projections osseuses débutantes postérieures et/ou antérieures (*becs*) ont semblé constituer des éléments discriminants à fort consensus. Par ailleurs, il a été constaté que le bord antérieur était parfois porteur d'une information différente de celle du mur postérieur.

**Figure 9. Difficultés de différenciation des dentelures**



### **3.3 Nature de la relation des variables avec l'âge**

Après avoir évalué les questions relatives à la mise en œuvre de la méthode, il convenait de s'intéresser à ses fondements : la nature de la relation entre l'âge et les variables. Cette question était importante pour évaluer si, malgré les insuffisances de la qualité des observations de forme, ces observations contenaient une information suffisante sur l'âge.

Pour évaluer cette relation, différents modèles analytiques (linéaire, polynomial de second ordre et exponentiel) ont été testés dans plusieurs situations : première ou seconde session de l'expert (n = 59) et première ou seconde session des 10 observateurs (n = 590). Les variables cavité et mur étant ordinales avec un nombre suffisant de modalités, elles ont été traitées comme des variables continues.

Quelles que soient les variables et leur mode d'observation, les meilleures corrélations entre les variables et l'âge ont toujours été observées lorsque le logarithme de l'âge était utilisé. Ceci a permis de confirmer un résultat classiquement décrit : l'imprécision de la prédiction augmentant avec l'âge. Les corrélations les plus significatives ont été obtenues lorsque toutes valeurs observées des 10 observateurs pour la seconde session ont été prise en compte.

La table 3 a donné les valeurs des corrélations avec l'âge, ainsi que leur significativité (p-value) pour chaque variable. La profondeur a toujours donné les moins bonnes corrélations.

Enfin, pour envisager l'intérêt de l'utilisation simultanée des 3 variables, les relations des variables entre elles ont été étudiées. Il a été constaté une dépendance des variables prise 2 à 2, qui confirmait en partie les biais relatifs aux confusions des descriptions entre la cavité et le mur.



**Table 3. Corrélations des variables avec l'âge**

	Corrélation	p-value
Profondeur	0.53	$<10^{-42}$
Forme de la cavité	0.71	$<10^{-90}$
Configuration des bords et des murs	0.73	$<10^{-99}$

La corrélation a été appréciée par le coefficient de corrélation Pearson calculé entre chaque variable et le logarithme de l'âge, pour les 10 observateurs et les 59 côtes (n = 590). La significativité de la liaison a été donnée par un test de Student de non corrélation.

#### 4. DISCUSSION

L'analyse objective des variables sur lesquelles est fondée la méthode d'Ïscan a montré une mauvaise reproductibilité et une mauvaise répétabilité de leur observation. Pour la profondeur de la cavité articulaire, les mauvais résultats constatés n'ont pas pu être attribués à l'instrument de mesure précis au 1/10<sup>ième</sup> de mm. Ils ont été essentiellement imputables au choix de l'endroit où s'effectuait la mesure. La détermination de cet endroit était insuffisamment précisée par la méthode et source de variations importantes dans les mesures.

Pour la forme de la cavité et la configuration du bord et du mur, les difficultés d'observation ont été secondaires à des descriptions imprécises, à des photos de qualité très médiocres (échelles, angles de vue et luminosité différents) et à l'absence de prise en compte du caractère continu de la sénescence. Elles ont été

plus marquées pour les stades 3 et 4, expliquant en partie l'imprécision de la méthode à partir de ces stades. Par ailleurs, pour ces variables lorsque l'observateur a hésité entre deux stades, il généralisait aux deux variables le stade de celle qui était la moins ambiguë. Ceci compensait les insuffisances de la méthode dans cette situation, mais remettait également en question l'indépendance des variables. D'une manière générale, ces résultats ont posé la question du recours au langage naturel par un expert pour donner une description objective d'un savoir implicite contenu dans une description.

Malgré ces mauvais résultats, il s'est avéré que les variables décrites par İşcan contenaient une information objective par rapport à l'âge. Il a donc été envisagé de tenter d'améliorer la méthode d'İşcan à partir de deux principes. Le premier était d'analyser plus finement et plus objectivement l'extrémité sternale de la 4<sup>ième</sup> côte à l'aide d'outils modernes de traitement de l'image. Le second était de rechercher des relations entre de nouvelles variables et l'âge en utilisant des modèles statistiques adaptés.

## **B. ETAMORPHOSE DE L'EXTREMITÉ STERNALE DE LA 4<sup>ÈME</sup> CÔTE : NOUVELLE APPROCHE**

### 1. INTRODUCTION

#### **1.1 L'articulation costo-sternale : une articulation physiologiquement complexe**

L'articulation costo-sternale associe deux éléments osseux et un fibrocartilage hyalin par nature immature (44, 45). La persistance de ce dernier répond à la nécessité physiologique d'assurer la flexibilité entre des côtes autour du sternum. Cette fonction entre en contradiction avec un processus physiologique de maturation de ce cartilage. Ce processus décrit initialement dans des travaux radiologiques (20, 46-50) associe une minéralisation péri chondrale et centrale précédant l'ossification (51), qui aboutissent à le rigidifier. Presque complet au niveau de la première côte, ce processus est en revanche variable au niveau des autres côtes (52). Des études radiologiques souvent anciennes, ont montré la complexité de sa régulation en mettant en évidence des facteurs environnementaux nutritionnels (44), génétiques (53), hormonaux (54, 55), pathologiques (56 – 59), iatrogènes (60) et biomécanique (44, 61). Plus récemment, la nature non pathologique de ce phénomène est apparue être sous le contrôle d'une régulation endocrine et paracrine, dans laquelle la parathormone avait un rôle inhibiteur jusqu'à la puberté et ensuite activateur (62-64). Cette régulation était marquée par la synthèse très précoce de collagène de type X par les chondrocytes, alors que celle de phosphatase alcaline (deuxième élément indispensable au remodelage osseux) n'intervenait qu'après la puberté (64).

Parallèlement à ce processus de minéralisation et d'ossification, le cartilage costo chondral présente également une dégénérescence qualifiée d'amiantoïde de sa matrice, débutant à partir de 20 ans (après le début de la minéralisation) et se terminant à 50 ans (65 - 68). Ce phénomène, impliqué dans d'autres processus dégénératifs (69), associe une augmentation de la pigmentation du cartilage (70), une augmentation de taille et une réorganisation des fibres de collagène (69), des modifications moléculaires quantitatives et qualitatives des protéoglycanes et de l'acide hyaluronique (67, 71-73), et une diminution de l'hydratation (74). La physiologie de ces modifications n'est actuellement pas clairement établie. Bien qu'il n'existe à notre connaissance pas de certitude entre le processus de minéralisation et d'ossification du cartilage et celui de dégénérescence de sa matrice, des constatations pathologiques permettent de supposer qu'ils sont peut être liés (59,75).

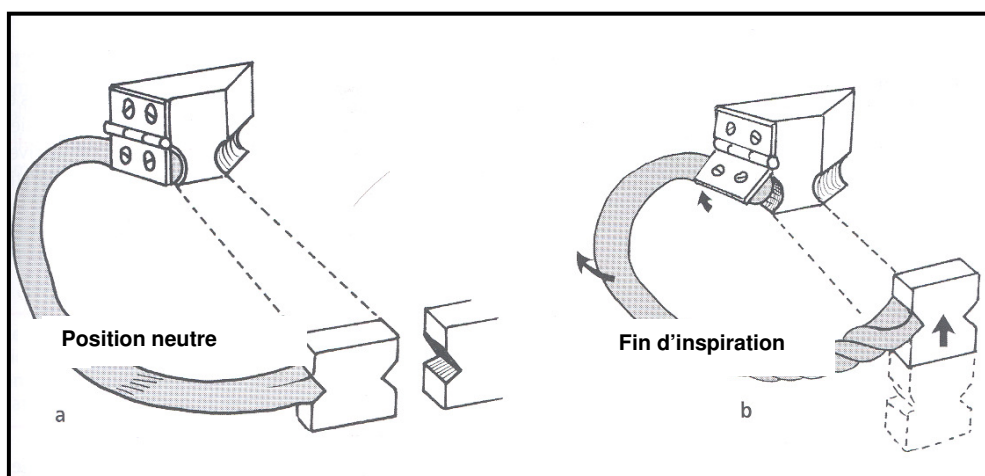
Parallèlement, les connaissances sur les processus physiologiques à l'origine des modifications des éléments osseux de l'articulation costo-sternale sont moins connus, que ceux intéressant le cartilage. Sur le plan morphologique, McCormick a été le premier à décrire radiologiquement un évasement et une augmentation de la profondeur de la cavité articulaire, ainsi qu'une augmentation de l'irrégularité de ses bords, augmentant avec l'âge (23) Ces constatations n'ont en fait que confirmer les premiers travaux d'İşcan auxquelles elles étaient postérieures. D'autres auteurs ont rapporté que la jonction costo-chondrale pouvait être modifiée à l'occasion de pathologies. Ils ont notamment décrit son élargissement dans l'acromégalie et le rachitisme (59). Sur le plan histologique, il n'a pas été réalisé à notre connaissance de travaux portant sur les modifications de l'extrémité sternale de la côte. En revanche, Epker avait rapporté une étude portant sur la sénescence des côtes au

cours de laquelle il avait constaté une augmentation de la surface costale et une apposition périostée continue (plus rapide que la résorption) avec l'âge commun à la plupart des os (24). Ce processus était associé à une résorption au niveau de l'endoste se traduisant par un amincissement de la zone corticale. Concernant le sternum, les modifications radiologiques constatées à son niveau étaient toujours intégrées dans des études portant sur le cartilage. Il n'a, à notre connaissance, jamais fait l'objet d'une attention particulière hormis à l'occasion d'une étude radiologique rapportée en 1954 (49).

## **1.2 Une articulation mécaniquement sollicitée**

A côté de la présence de ce cartilage, l'articulation sterno-costale présente également des particularités biomécaniques. Il s'agit d'une synchondrose dans laquelle le cartilage est soudé à la côte et articulé avec le sternum par l'intermédiaire d'un interligne en forme de dièdre empêchant sa rotation axiale lors des mouvements. Ces derniers sont essentiellement associés à la respiration, phénomène automatique continue de la naissance à la mort de l'individu. Ainsi, lors de l'inspiration, le cartilage présente avec la côte un mouvement latéral en anse de seau et un mouvement antéro postérieur de soulèvement (76, 77). Au cours de cette phase active mettant en œuvre les muscles intercostaux et le diaphragme, le cartilage va grâce à ses propriétés mécaniques de torsion se comporter comme un matériau élastique (figure 10). La côte subit le même phénomène, mais à un moindre niveau du fait de sa rigidité. Lors de l'expiration, le retour à la position d'origine se fait passivement grâce à la restitution de l'énergie accumulée lors de l'inspiration. Ces phénomènes sont potentiellement, comme King et Semine l'avaient suggéré, à l'origine d'un stress cumulatif (44, 61).

**Figure 10. Schématisation des contraintes s'exerçant sur le cartilage lors de la respiration d'après Dufour et Pillu (77)**



### **1.3 Objectifs**

L'estimation de l'âge au décès à partir de l'examen macroscopique de l'extrémité sternale de la 4<sup>ème</sup> côte est basée sur l'observation d'un des éléments d'une articulation apparaissant finalement plus complexe qu'il n'y semblait (18, 27, 29). Cette méthode présente des qualités intrinsèques médiocres ayant justifié de nombreuses critiques, auxquelles nous nous sommes précédemment associés (78). L'objectif initial de la seconde partie de ce travail a été de tenter de l'améliorer. Pour cela deux approches pouvaient être envisagées. La première consistait à reprendre plus finement la description des variables décrites par İşcan en les traitant avec des méthodes statistiques modernes et adaptées. La subjectivité de cette approche, principal défaut de la méthode originale, ne nous a pas paru être un gage de succès. La seconde approche consistait à mettre en évidence de nouvelles variables permettant de s'affranchir, au moins en partie, du caractère subjectif de la méthode. C'est celle qui a été retenue avec comme objectifs 1) de redéfinir la métamorphose

de la 4<sup>ième</sup> côte au vu d'éléments biologiques et biomécaniques non pris en compte auparavant et 2) de poser les fondements d'une nouvelle méthode plus précise et plus reproductible.

## 2. MATERIEL ET PRINCIPES GENERAUX DE LA METHODE

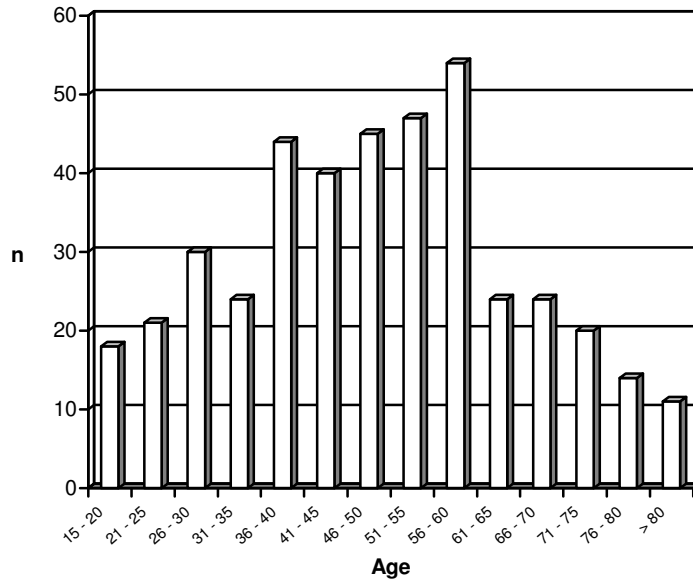
### **2.1 Nature de l'échantillon**

Un échantillon médico-légal de 415 quatrièmes côtes droites d'hommes d'ethnie française a été constitué à l'institut universitaire de médecine légale de Lyon entre 2005 et 2007 (âge moyen = 49 ans, âge minimum = 15 ans, âge maximum = 96 ans) (figure 11). Dans cet échantillon toutes les tranches d'âge étaient suffisamment représentées. On constatait par ailleurs sur la figure 12, que sa structure était relativement proche de celle de la population masculine française actuelle (79).

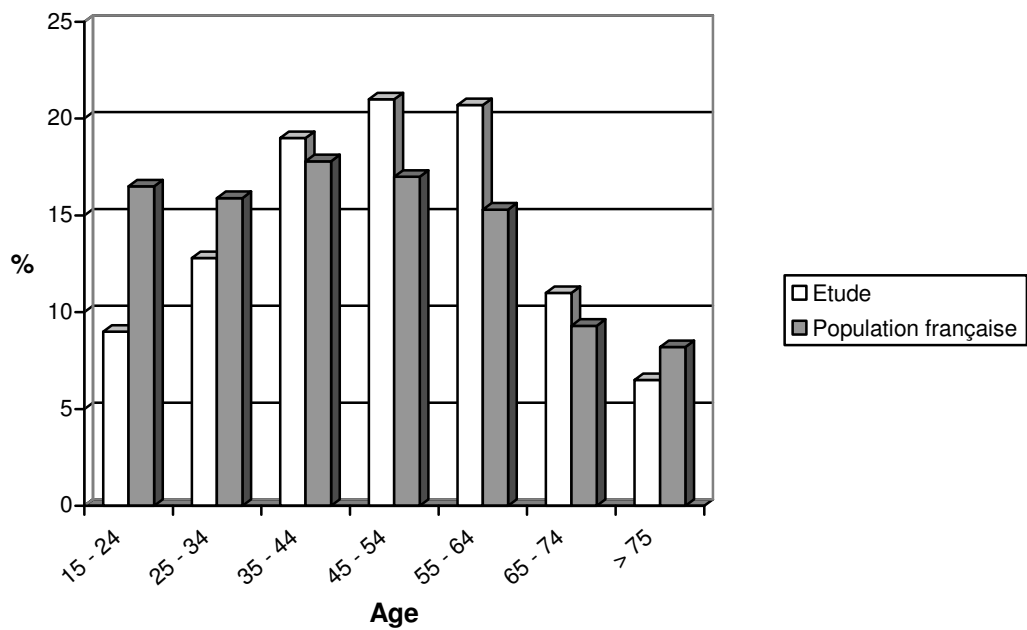
### **2.2 Préparation des côtes**

Selon le protocole décrit par İşcan (19 , 27, 29), les côtes ont macéré dans l'eau, jusqu'à ce que les tissus mous et le cartilage se détachent. Elles ont ensuite été immergées au bain-marie dans de l'eau à 80°C, jusqu'au décharnement et au décollement complets du cartilage.

**Figure 11. Histogramme de la population de l'étude (n = 415)**



**Figure 12. Histogrammes de la population de l'étude et de la population française masculine contemporaine (79)**

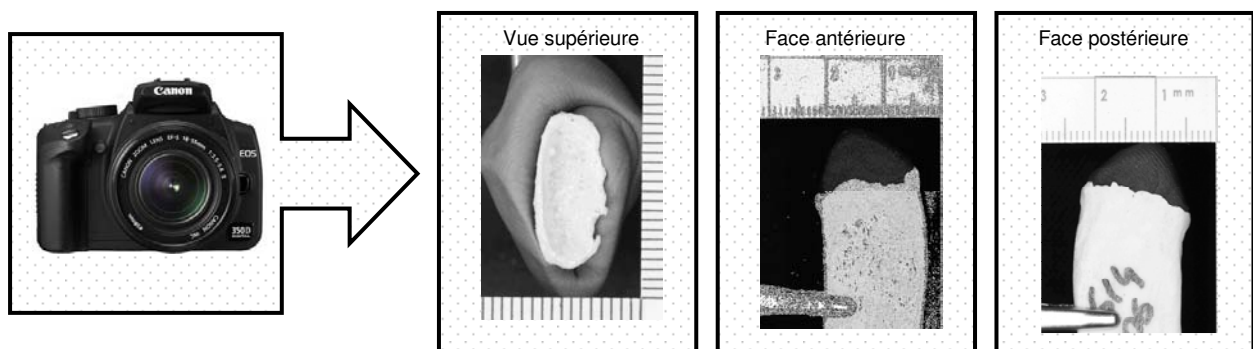




### 2.3 Principes généraux de la méthode

L'acquisition de variables objectives a reposé sur les caractéristiques géométriques de l'articulation de la côte et sur l'étude de la configuration de ses bords. Elle a mis en jeu des méthodes métriques simples et des outils modernes de traitement de l'image. Ces derniers ont nécessité la réalisation de clichés de la cavité articulaire (vue supérieure) et de ses bords antérieurs et postérieurs (vue de face). Ils ont été réalisés selon un protocole standardisé associant une fixation de la côte et l'utilisation d'un appareil numérique équipé d'un objectif macro (figure 13). Les contours des images étudiées ont toutes été extraits à l'aide du logiciel PHOTOSHOP 7.0 ®. Compte tenu du caractère exploratoire des techniques utilisées, il a été choisi, dans un souci de clarté, de développer au fil du texte leurs principes et leur résultat pour chaque variable. La liaison entre les variables a été appréciée dans tous les cas par le coefficient de corrélation de Pearson. Parallèlement, une analyse morphologique macroscopique de la configuration des bords l'articulation a été réalisée.

**Figure 13. Protocole photographique (n = 415)**



## 2.4 Ethique

Sur le plan éthique les prélèvements ont été réalisés en accord avec la loi française : le Procureur de la République avait donné son accord pour leur réalisation au cours des autopsies médico-légales et les familles avaient été informées de la nature et des objectifs de cette étude.

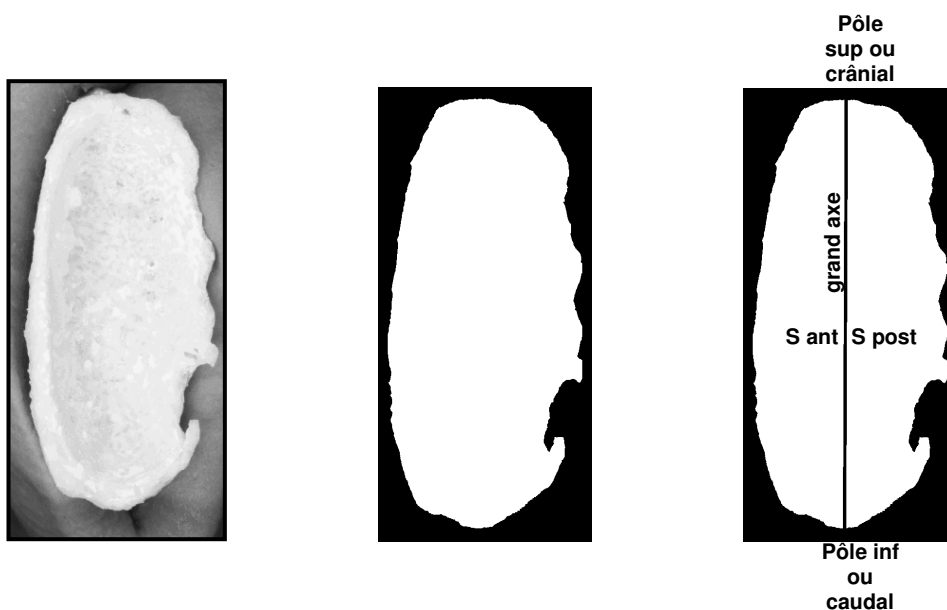
## 3. ANALYSE GEOMETRIQUE

### 3.1 Surface de la cavité

#### 3.1.1 Matériel et méthode

A partir du contour de la cavité définissant un ovoïde un axe principal joignant les deux pôles supérieurs et inférieurs a été visuellement déterminé (figure 14). Cet axe principal a permis de séparer un contour antérieur et postérieur et leur surface respective.

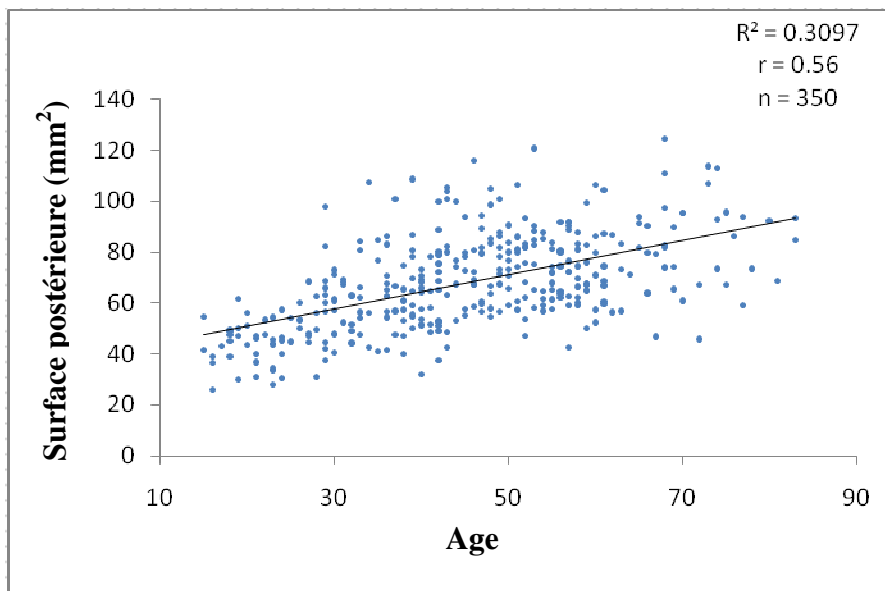
**Figure 14. Définition du grand axe et des hémisurfaces antérieures et postérieures à partir du cliché d'une vue supérieure de la cavité articulaire**



### 3.1.2 Résultats

La surface totale a montré une bonne corrélation avec l'âge ( $r = 0.55$ ,  $n = 350$ ), tout comme la surface postérieure de l'ovoïde (figure 15). Par contre, la corrélation de la surface antérieure était moins bonne ( $r = 0.43$ ,  $n = 350$ ). La présence de projections osseuses crânielles ou caudales a eu peu d'influence sur la corrélation avec la surface. Pour chaque côte, la surface postérieure est apparue en moyenne significativement supérieure à la celle de la surface antérieure ( $p\text{-value} < 10^{-19}$ ). A partir de 30 ans, il a été constaté que des individus se séparaient assez nettement dans la distribution surfaces – âge. Ils présentaient une surface plus élevée pour leur âge et le plus souvent une surface postérieure plus grande que la surface antérieure.

**Figure 15. Corrélation entre l'âge et la surface postérieure de l'ovoïde**



### 3.1.3 Éléments de discussion

La surface de l'ovoïde définie est apparue être le reflet à la fois de la surface du fond de la cavité et de la surface des murs de la cavité sur le plan sagittal. Son augmentation avec l'âge était conforme à des observations anciennes montrant un élargissement des côtes avec l'âge. Il a également été constaté qualitativement qu'avec l'âge, la partie postérieure du mur s'inclinait davantage par rapport au plan horizontal que la partie antérieure. La conséquence de cette observation était une projection plus importante du mur dans ce plan, pouvant expliquer l'inégalité des valeurs des surfaces antérieures et postérieures et la meilleure corrélation avec l'âge de la partie postérieure pour laquelle l'ossification était plus visible.

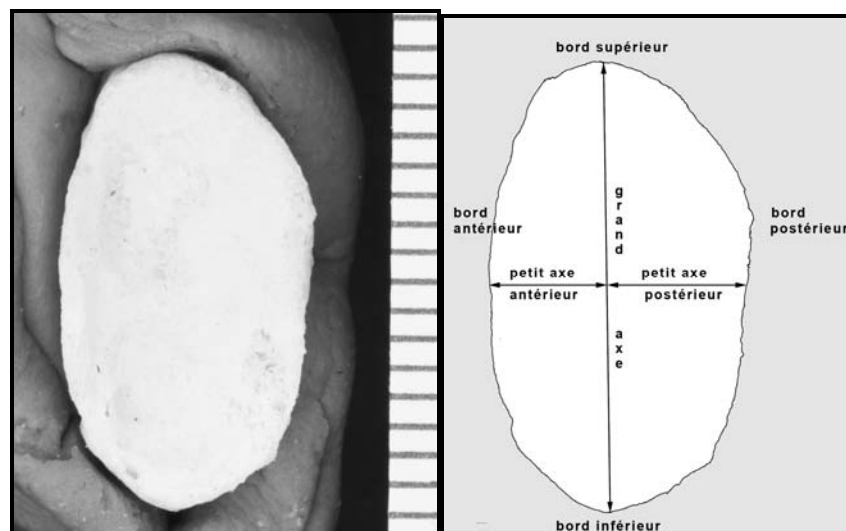
A partir de 40 ans, une dizaine de côtes présentaient une surface postérieure très importante, les mettant à la marge supérieure du nuage de points centrés sur la droite de régression. Leur examen macroscopique n'a pas permis de leur attribuer une morphologie spécifique. Tout se passait comme si leur vieillissement était plus rapide que pour les autres individus de la population étudiée.

## 3.2 Excentricité de la surface de la cavité

### 3.2.1 Matériel et méthode

Pour chaque ovoïde, la construction manuelle d'un axe secondaire perpendiculaire à l'axe principal et passant par son milieu a permis de définir un petit axe antérieur et un petit axe postérieur (figure 16). L'excentricité totale de l'ovoïde a pu ainsi être calculée par le rapport de la longueur de l'axe principal sur celle de l'axe secondaire, de même que les excentricités antérieures et postérieures avec les petits axes secondaires antérieurs et postérieurs.

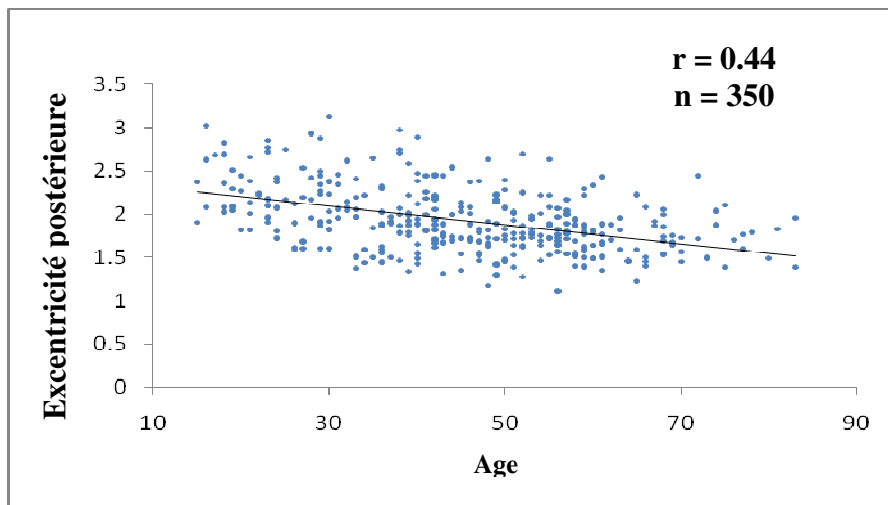
**Figure 16. Construction des petits axes antérieurs et postérieurs**



### 3.2.2 Résultats

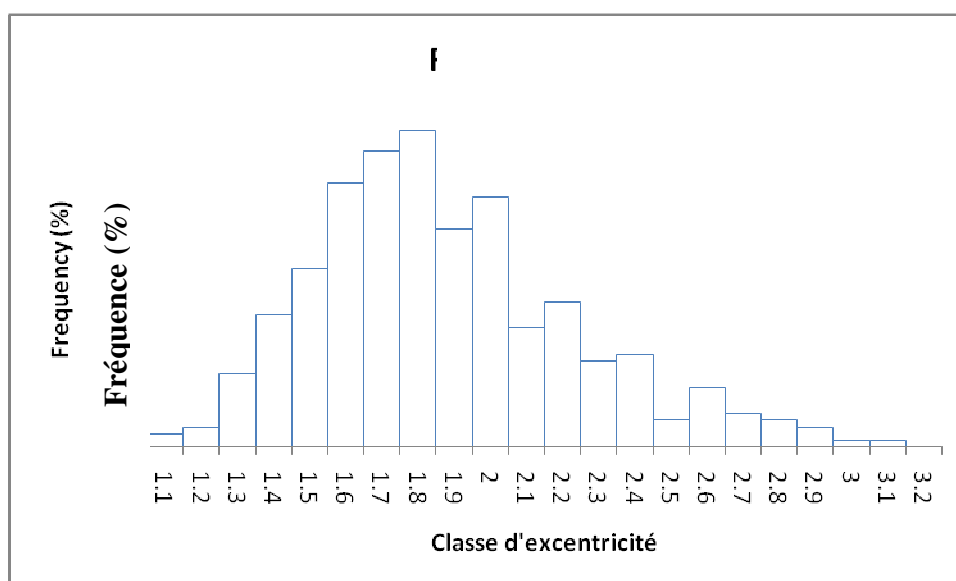
L'excentricité totale corrélait négativement avec l'âge ( $r = -0.32$ ,  $n = 350$ ), celle de l'excentricité postérieure apparaissant encore meilleure ( $r = -0.44$ ,  $n = 361$ ) (figure 17). En revanche, l'excentricité antérieure ne corrélait pas avec l'âge ( $r = -0.02$ ,  $n = 361$ ,  $p\text{-value} = 0.67$ ). Cette corrélation négative exprimait une tendance à l'élargissement de l'ovoïde avec l'âge.

**Figure 17. Corrélation entre l'âge et l'excentricité postérieure de l'ovoïde**



L'histogramme des excentricités postérieures (figure 18) a permis de distinguer éventuellement deux populations, dont l'une d'excentricité forte supérieure à 2.1 (côtes de formes aplaties) quel que soit l'âge. Ces deux sous populations ne présentaient pas de corrélations nettement différentes entre l'âge et la surface postérieure et entre l'âge et l'excentricité. Dans certaines classes d'âge, une dizaine d'individus se séparaient assez nettement de la distribution excentricité – âge. Ils présentaient une excentricité plus élevée pour leur âge. Enfin, la surface postérieure corrélait négativement avec l'excentricité postérieure ( $r = - 0.57$ ,  $n = 350$ ) et la régression multiple de l'âge en fonction de la surface et de l'excentricité a peu amélioré la corrélation.

**Figure 18. Histogramme de l'excentricité postérieure (n = 415)**



### 2.2.3 Eléments de discussion

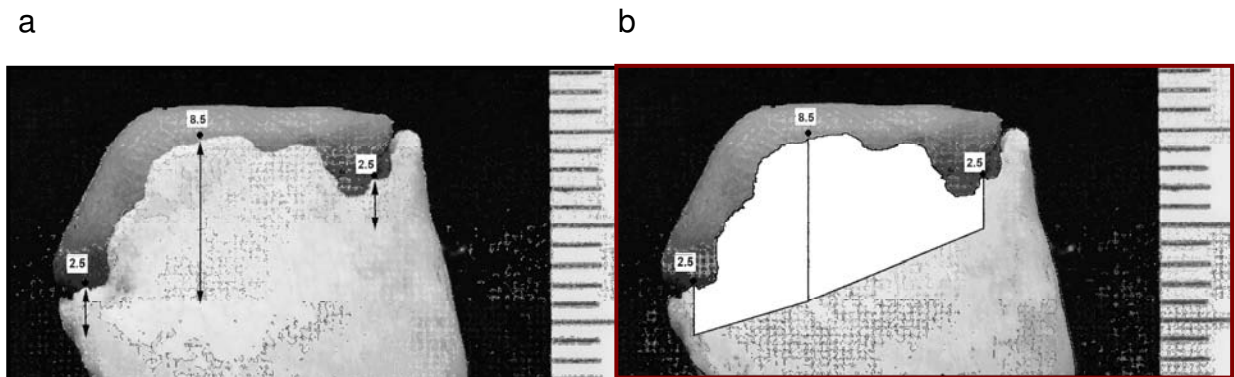
La détermination manuelle du grand axe n'a pas toujours été facile ni précise. Ceci a introduit une source d'incertitude dans la séparation des surfaces et un facteur de bruit dans la corrélation de la surface postérieure avec l'âge. De ce fait, cette dernière n'apparaissait pas meilleure que la surface totale. La détermination du petit axe au milieu du grand axe pouvait faire l'objet de la même critique. Toutefois, l'excentricité totale ainsi calculée avait une corrélation assez bonne avec l'âge. Ici encore, l'excentricité de la partie postérieure corrélait mieux avec l'âge que la partie antérieure et pour les mêmes raisons. Enfin, il a été constaté une bonne corrélation entre les surfaces et les excentricités postérieures ce qui rendait peu efficace une régression multiple, âge en fonction de la surface et de l'excentricité. Ainsi, il est apparu qu'avec l'âge, la surface de la cavité augmentait surtout dans sa partie postérieure. Dans le même temps, elle avait tendance à s'arrondir (diminution de l'excentricité).

### 3.3 Hauteur moyenne de la cavité

#### 3.3.1 Matériel et méthode

Compte-tenu de l'irrégularité des bords des murs et du fond de la cavité, la hauteur de la cavité/mur était difficile à mesurer comme İşcan avait déjà pu le souligner. Pour contourner cette difficulté une hauteur moyenne antérieure et postérieure a été calculée. Pour cela, 3 hauteurs ont été mesurées en des points repérés sur le bord de l'articulation (figure 19 a). La surface totale comprise entre ce bord et la trace du fond défini par les trois hauteurs a pu être estimée, ainsi que les surfaces inférieures et supérieures qui la composaient. Ces surfaces divisées par le nombre de points du contour ont permis d'estimer une hauteur moyenne totale, inférieure et supérieure (figure 19 b).

**Figure 19. Détermination des points de mesures et la surface**



#### 3.3.2 Résultats

Il a été constaté que la hauteur moyenne du mur antérieur était très significativement supérieure à celle du mur postérieur. Le tableau 4 a donné les valeurs de corrélation avec l'âge pour les différentes hauteurs moyennes obtenues. Il a de nouveau été observé, que la partie postérieure était plus informative que la partie antérieure, mais



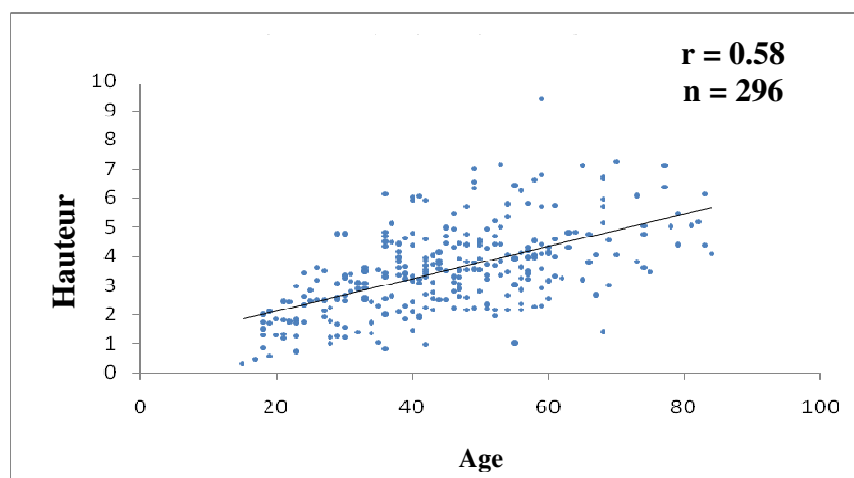
que la partie supérieure du bord postérieur l'était encore plus. La meilleure dispersion autour de la droite de régression a été obtenue pour la régression de la partie supérieure du mur postérieur (figure 20).

Dans 54 cas la hauteur n'a pas pu être mesurée en raison de la présence de projections osseuses, de la présence de cartilage minéralisé ou de perte de substance.

**Tableau 4. Corrélation entre l'âge et la hauteur des murs (n = 296)**

	Supérieur	Inférieur	Totale
Mur antérieur	0.50	0.49	0.51
Mur postérieur	0.58	0.47	0.55

**Figure 20. Corrélation entre l'âge et la hauteur du mur postérieur**



### 3.3.3 Eléments de discussion

L'inégale répartition des croissances osseuses constatées au niveau des hauteurs traduisait une asymétrie du phénomène de croissance osseuse favorisant la partie postéro-supérieure. Elle pouvait être la conséquence d'une inégale répartition des contraintes mécaniques entre la jonction côte-cartilage traduisant leur intensité maximale au niveau de la partie postéro-supérieure.

## **3.4 Forme de l'os supportant l'articulation**

### 3.4.1 Méthode

La forme de l'os au niveau de la zone juxta articulaire a été caractérisée par ses dimensions crânio-caudales (L) et antéro postérieures (l). Ces mesures ont été effectuées avec pied à coulisse à 3 cm de l'articulation.

### 3.4.2 Résultats

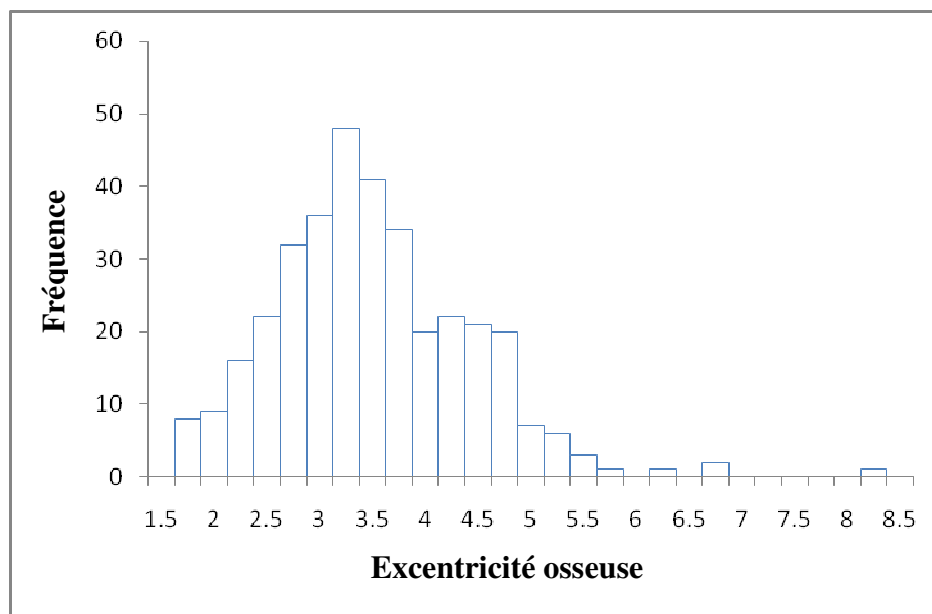
Il a été constaté, que l'excentricité de l'os ou L/l et la surface du rectangle L x l ne présentaient pas de corrélation avec l'âge, ni de corrélation entre eux. Toutefois, l'histogramme bimodal de l'excentricité suggérait une sous population de côtes étroites, qui présentaient un rapport L/l compris entre 4.2 et 8 (figure 21). Ces deux sous-populations n'avaient des corrélations comparables avec l'âge, la surface ou l'excentricité postérieure de la cavité articulaire. Leur séparation n'était donc pas pertinente.

### 3.4.3 Eléments de discussions

L'excentricité de la côte a mis en évidence au moins deux sous-populations, qui ne semblaient pas présenter au niveau de l'articulation un processus de vieillissement fondamentalement différent.

**Figure 21. Histogramme de l'excentricité extra articulaire de l'échantillon**

**(n = 415)**



## 4. ANALYSE HARMONIQUE

### **4.1 Méthode**

L'analyse harmonique définit une famille de méthodes de transformations mathématiques des fonctions, qui sont utilisées dans de nombreux domaines, en particulier dans celui de l'imagerie médicale (80, 81). Imaginée dès 1805 par Joseph Fourier, elle consiste à considérer, que toute fonction peut se décomposer en une somme de fonctions harmoniques appelées plus couramment fonctions sinusoïdales. Ces dernières sont définies par leur amplitude et par leur phase qui permettent de

leur donner une autre représentation de la fonction par sa décomposition. Cette représentation s'appelle spectre de la fonction.

#### 4.1.1 Principe de la décomposition de Fourier

A titre d'exemple et de façon très simple considérons trois fonctions sinusoïdales :

$$\text{Fig 22a: } y_1 = \sin\alpha ; \quad y_2 = 0.2 \sin 3\alpha ; \quad y_3 = 0.1 \sin 20\alpha$$

Pour simplifier les choses les phases sont nulles et les amplitudes valent respectivement :

$$1 \dots ; \dots 0.2 \dots ; \dots 0.1$$

Calculons la somme des deux fonctions :

$$\text{Fig 22b: } y_1 + y_2 = \sin\alpha + 0.2 \sin 3\alpha$$

Puis la somme des trois fonctions :

$$\text{Fig 22c : } Y = y_1 + y_2 + y_3 = \sin\alpha + 0.2 \sin 3\alpha + 0.1 \sin 20\alpha$$

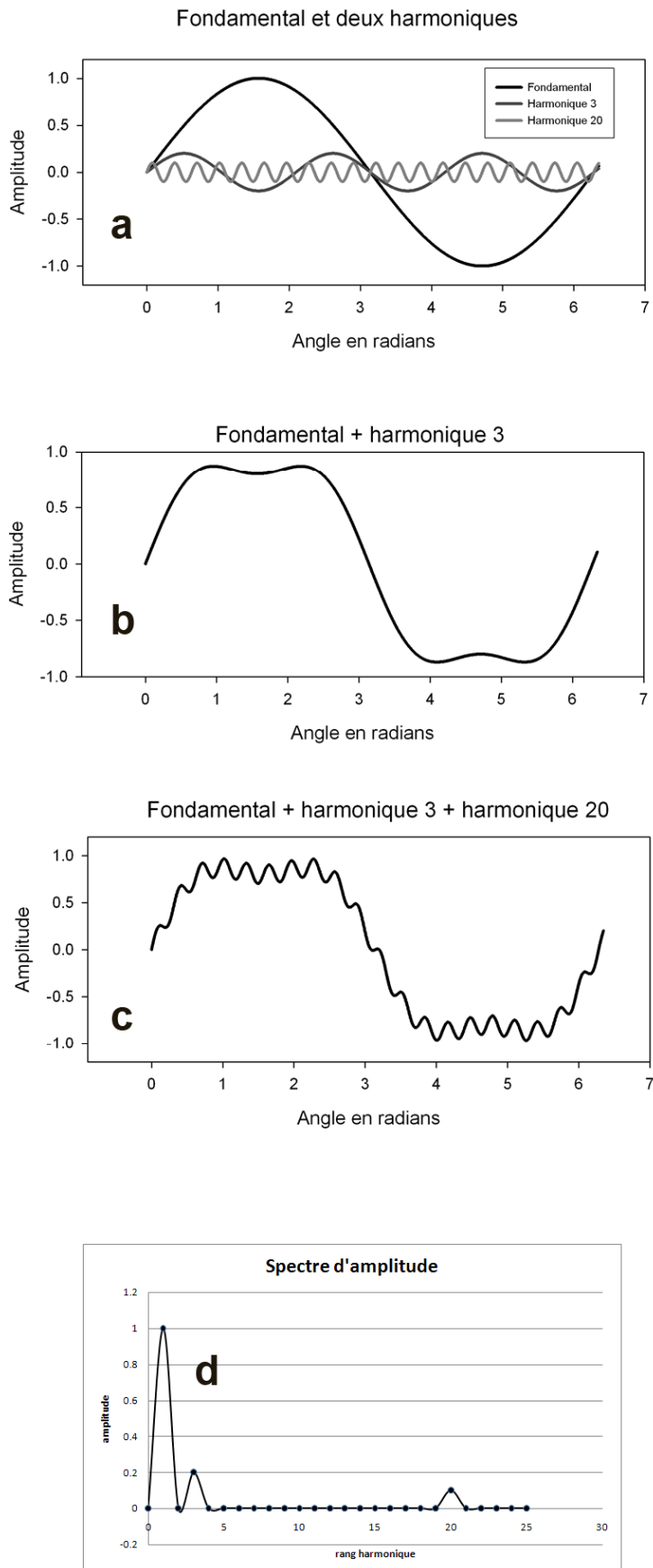
On voit ici comment l'addition de fonctions harmoniques peut produire des fonctions aussi compliquées que l'on veut. Si les fonctions harmoniques ont des fréquences, qui sont des multiples entiers, le résultat est une fonction périodique, ce qui est le cas ici. La fonction  $y_1$  est appelée fondamentale, les fonctions  $y_2$  et  $y_3$  harmoniques respectivement d'ordre 2 et 3 et d'amplitude 0.2 et 0.1. De même que la fonction  $Y$  de la figure 22c peut être décomposée comme la somme de trois fonctions sinusoïdales, on démontre que toute fonction périodique peut aussi être décomposée selon ce principe avec un fondamental et des harmoniques d'amplitude bien définie.

La représentation de la fonction par l'amplitude de ses différents harmoniques s'appelle spectre d'amplitude de la fonction et spectre de puissance si on élève les amplitudes au carré. La figure 22d donne la représentation spectrale de la fonction :

$$Y = y_1 + y_2 + y_3 \text{ qui s'appelle aussi spectre de } Y.$$

Il est également démontré, que pour n'importe quelle fonction régulière (sans discontinuité), il est toujours possible de la décomposer en une somme d'une infinité de fonctions harmoniques. En 1805, il a fallu plus de 20 ans pour asseoir solidement cette transformation, car le spectre apparaissait comme une fonction continue. Actuellement, il existe des méthodes numériques puissantes pour calculer de tels spectres que l'on appelle FFT pour Fast Fourier Transform.

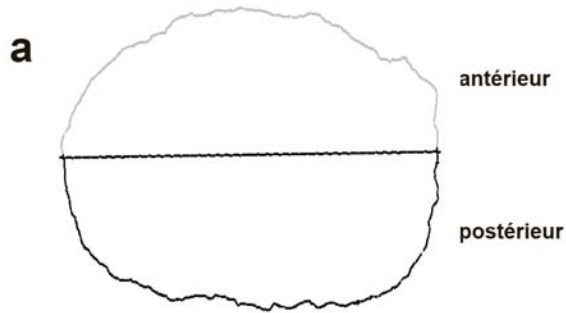
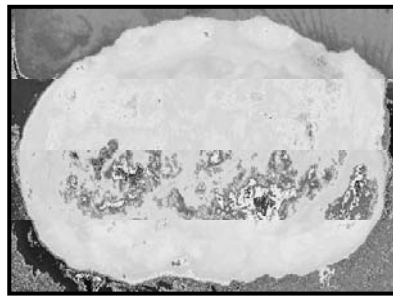
**Figure 22. Principe de la décomposition de Fourier**



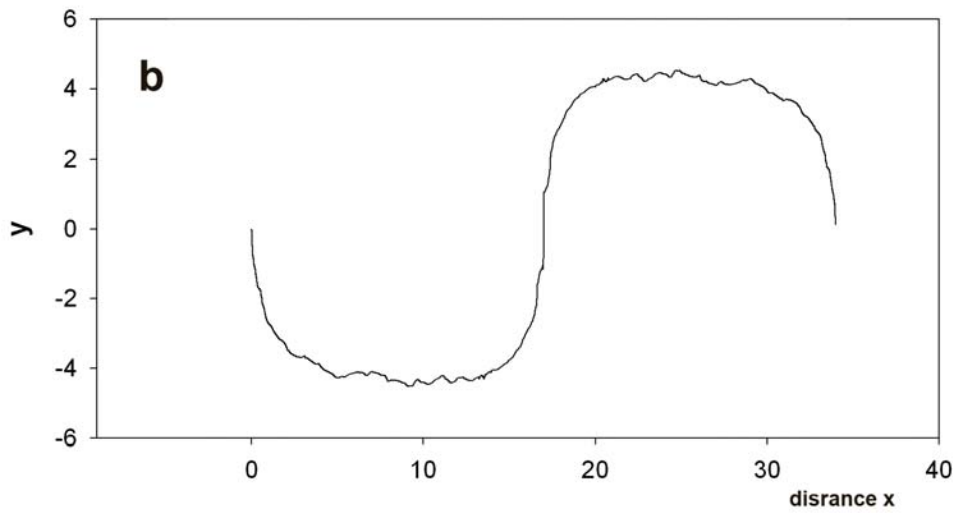
#### 4.1.2 Transformée de Fourier du contour de la cavité

Le contour de l'ovoïde précédemment décrit a été séparé en deux contours, antérieur et postérieur (figure 23a), qui ont été étudiés séparément. Pour améliorer la qualité de l'analyse, il a été développé pour chaque demi-contour son symétrique de manière à faire apparaître une périodicité permettant une analyse plus facile des harmoniques (figure 23b). Un algorithme de lissage a été utilisé pour supprimer des rebroussements (plusieurs ordonnés pour un x fixe) de la fonction et permettre ainsi le calcul de la FFT donnant le spectre de puissance définie ici par le carré de l'amplitude. Les données ont ensuite été ré-échantillonnées tous les 0.02 mm. Une série de pics pour les différentes fréquences harmoniques (F) a ainsi été obtenu, le premier pic étant le fondamental, le second pic le premier harmonique et ainsi de suite pour le deuxième, troisième quatrième harmonique (figure 23c). En se servant des échelles du pas d'échantillonnage, la période spatiale correspondante en mm a pu être calculée pour l'échelle harmonique. Au voisinage de  $F = 0$ , la période est devenue très grande et imprécise. La période spatiale a donné une idée de la finesse des « accidents repérés » à cette fréquence et la valeur du spectre correspondante indiquait leur importance respective. Il a été constaté que la méthode analysait les « accidents » jusqu'à 1 mm.

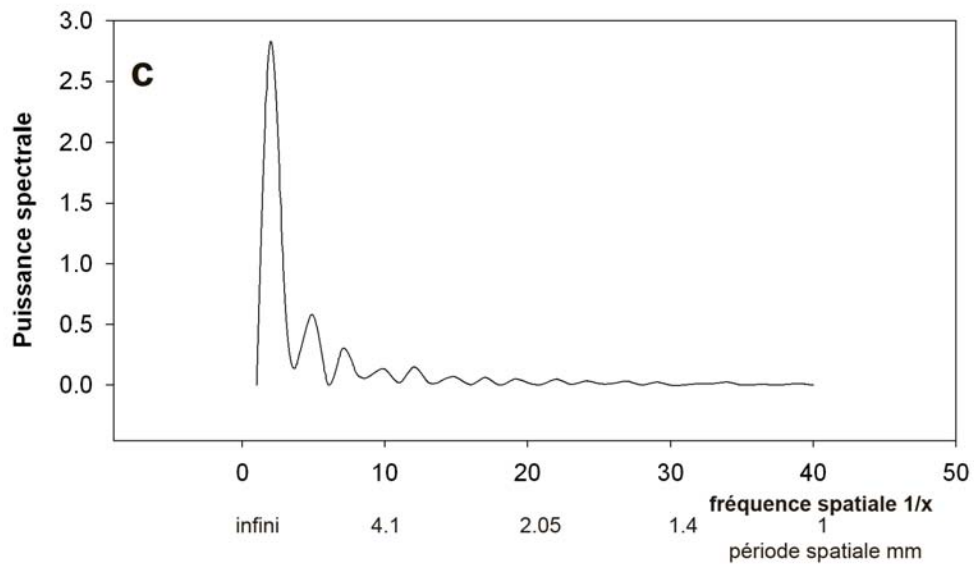
**Figure 23. Transformée de Fourier du contour de la cavité**



**Contour postérieur développé (81-2005-651)**



**Spectre de puissance du contour posérieur(81-2005-651)**

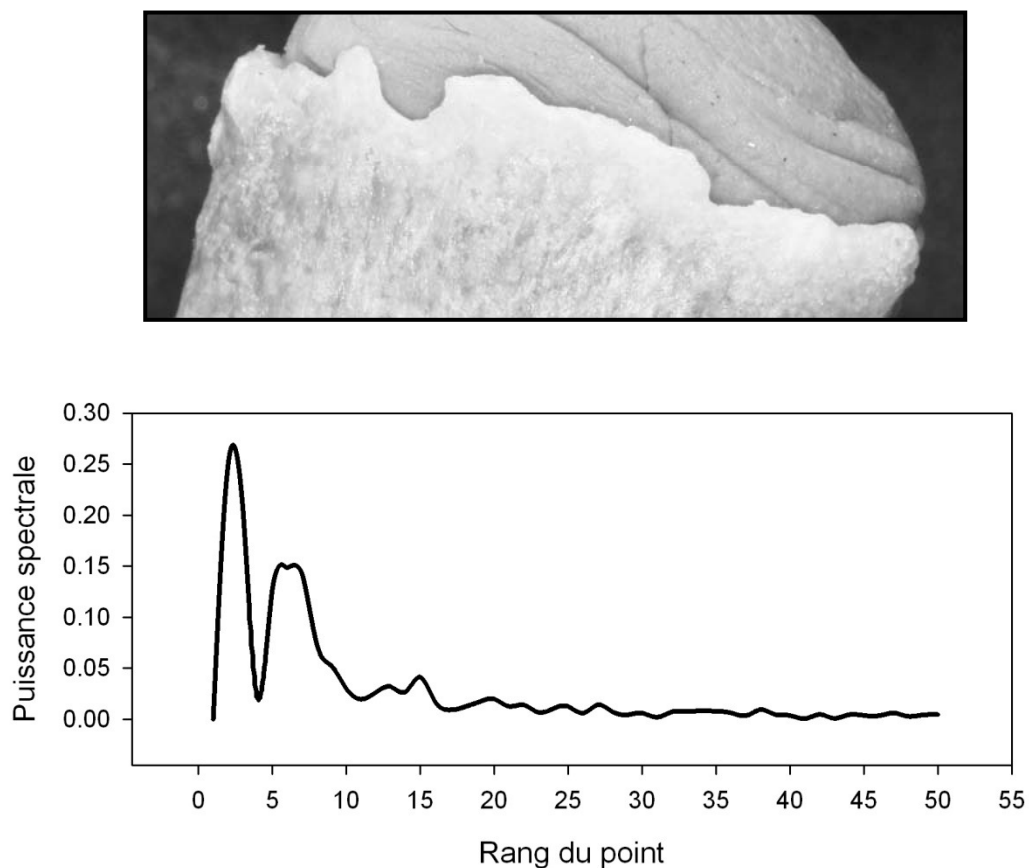




#### 4.1.3 Transformée de Fourier des bords antérieurs et postérieurs des murs

Pour le contour des bords antérieurs et postérieurs, il a été calculé respectivement une FFT sans dépliement, mais en effectuant un changement d'axes de telle sorte que la moyenne des valeurs à transformer soit nulle. Les données ont ensuite été ré-échantillonnées tous les 0.01 mm. La figure 24 a montré un tel spectre continu. Le rang des points de la transformée correspondait à la fréquence harmonique que l'on pouvait convertir comme précédemment en période en mm.

**Figure 24. Spectre d'un bord postérieur (FFT)**



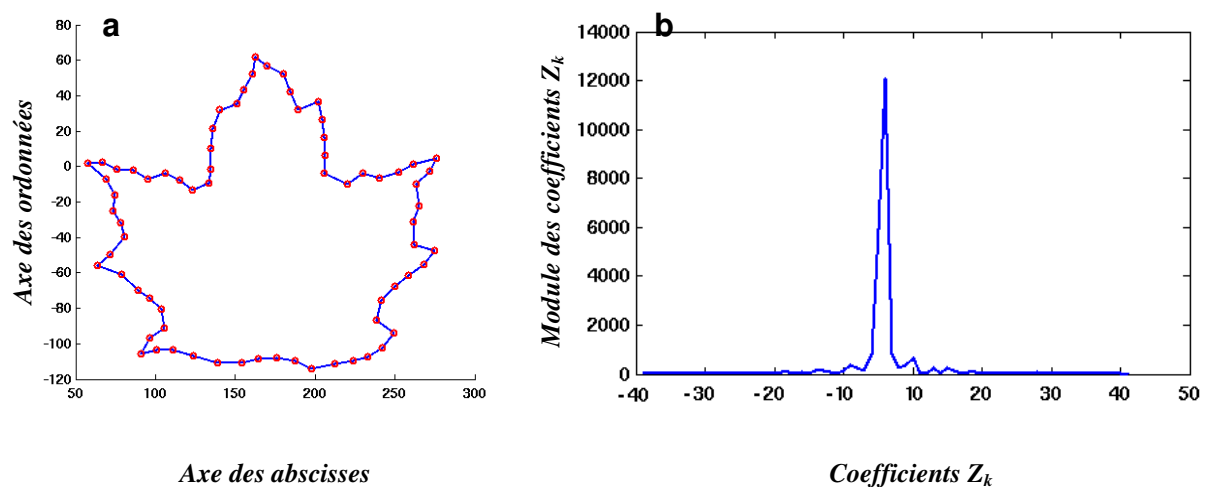
#### 4.1.4 Descripteur de Fourier

Les descripteurs de Fourier sont des outils mathématiques, qui permettent de décrire l'enveloppe externe d'une forme c'est-à-dire son contour. Il existe deux types de descripteur de Fourier : les descripteurs par tangente utilisés pour la description de contours continus et les descripteurs complexes utilisés pour la description de contours discrets. Etant donné que l'étude porte sur des images numériques, les contours de l'étude étaient représentés par une liste de pixels. Nous avons donc choisi d'utiliser les descripteurs complexes.

##### *a) Descripteur de Fourier par représentation complexe*

Dans cette représentation, la forme a été décrite par un ensemble  $\{M_j\}$  de points de contour et elle a été représentée dans le plan complexe. A chaque point du contour  $M_j$  a donc été attaché un nombre complexe  $z_j = x_j + iy_j$ , où  $x_j$  et  $y_j$  représentaient les coordonnées du point  $M_j$  dans le repère de l'image. La figure 25 donnait un exemple d'une telle représentation.

**Figure 25. Exemple de représentation d'un contour discret (a) avec le spectre du descripteur de Fourier associé (b)**



On appelle alors descripteur de Fourier, les coefficients de la transformée de Fourier Z de z :

$$Z_k = \sum_{j=1}^N z_j \exp(-2\pi ijk), \quad \text{pour } k \in [-N/2+1, N/2]$$

L'étude du spectre (ensemble des coefficients  $Z_k$ ) ainsi obtenu a permis de mettre en évidence des propriétés intéressantes. La figure 25b a donné un exemple du spectre correspondant à l'image de la figure 25a.

#### *b) Propriétés des descripteurs de Fourier par représentation complexe*

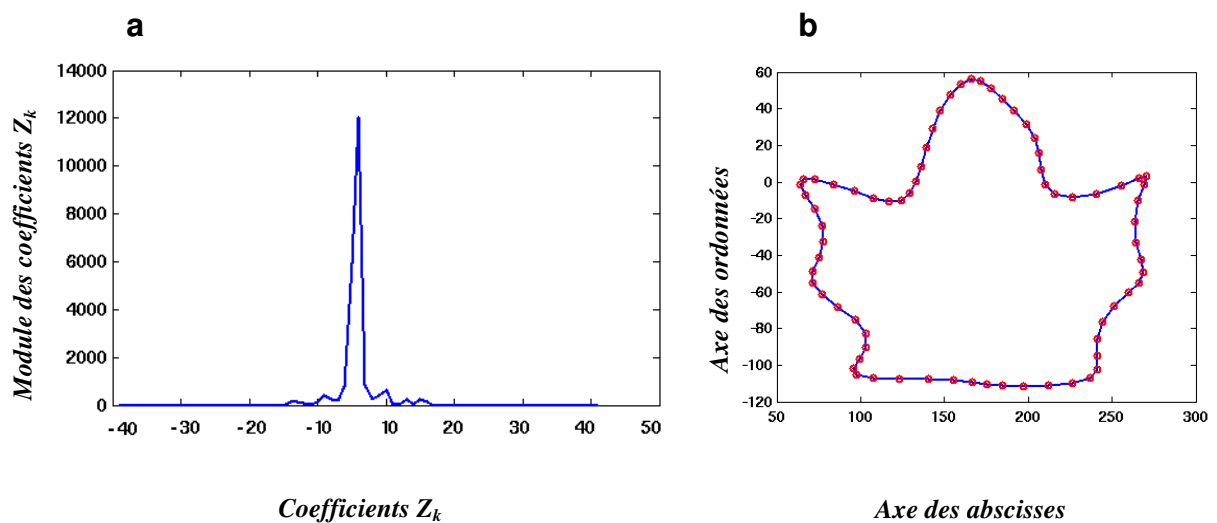
En utilisant les propriétés de la transformée de Fourier, le descripteur de Fourier pouvait être vu comme un opérateur réversible permettant de passer de l'espace image dans l'espace de Fourier. Le spectre de la figure 26b pouvait être vu comme la représentation de l'image de la figure 26a dans l'espace de Fourier. A partir d'un spectre dans l'espace de Fourier, on pouvait parfaitement reconstruire le contour discret d'une forme dans l'espace image.

De plus, chaque coefficient du spectre possède des propriétés intrinsèques. Voici les propriétés les plus importantes de ces coefficients :

- Pour  $k=0$ ,  $Z_0$  est le centre de gravité de la forme. Si on l'impose à zéro, la forme reconstruite est invariante par translation ;
- $Z_1$  joue un rôle de facteur d'échelle : la normalisation du spectre par  $Z_1$  rend la forme reconstruite invariante par homothétie ;
- Plus les coefficients sont nombreux, plus le contour est complexe. De plus, plus les valeurs des coefficients sont élevées, plus les détails sont fins sur la courbe.

La figure 26 a mis en évidence la dernière propriété énoncée ci-dessus. La figure 26a a donné le spectre simplifié du contour correspondant à la figure 25a (pour  $|k| > 20, Z_k = 0$ ). La figure 26b a donné l'image du contour obtenu après construction à partir du spectre simplifié (figure 26a).

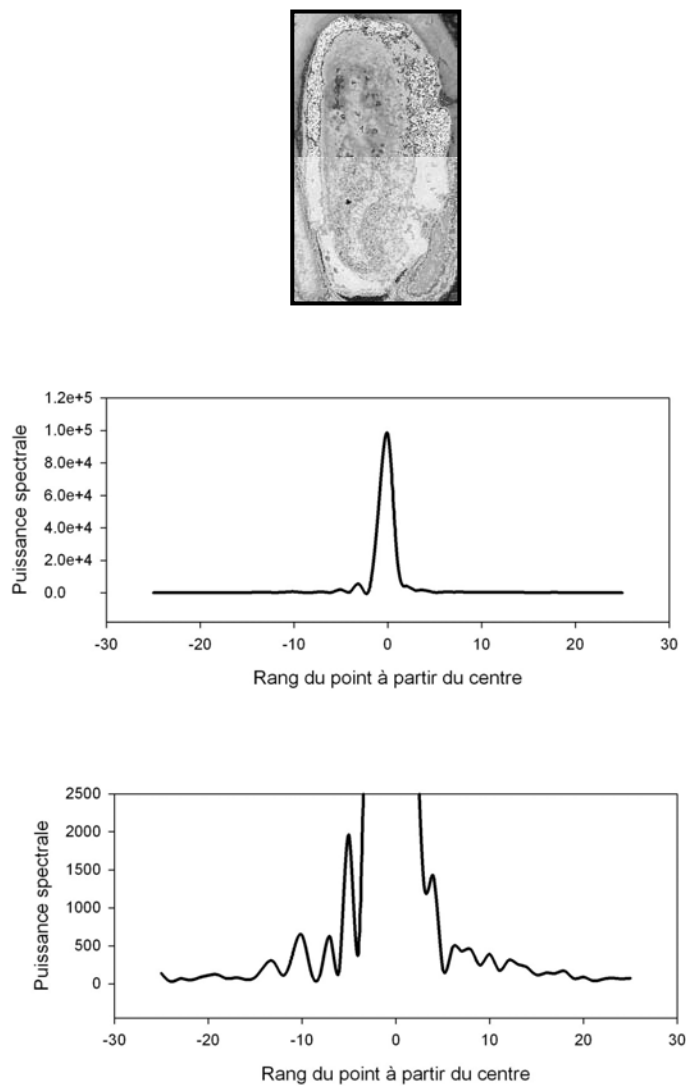
**Figure 26. Illustration de la réduction de la complexité d'un contour en agissant sur le spectre obtenu à partir de la description de Fourier du contour : (a) spectre simplifié et (b) contour reconstruit à partir du spectre simplifié**



*c) Exploitation des descripteurs de Fourier*

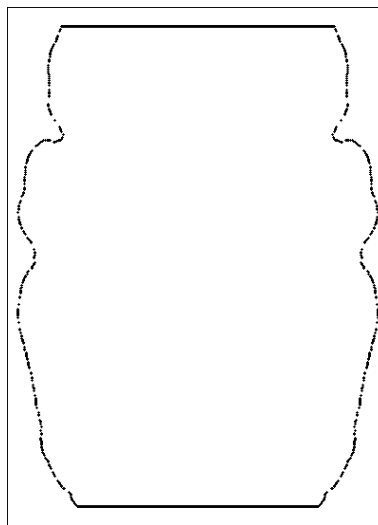
A partir de la définition et des propriétés précédentes, il a été possible de caractériser des courbes de contour de cavité ou de bords des murs en exploitant les spectres fournis par les descripteurs de Fourier correspondants. La figure 27 a donné un exemple de spectres pour la cavité postérieure à deux échelles de puissance différentes.

**Figure 27. Descripteur de Fourier du bord postérieur de la cavité**



Un traitement particulier a été appliqué au bord des murs antérieur et postérieur pour en faire un contour fermé. La figure 28 a montré comment en utilisant la symétrie du bord on a pu produire le contour fermé désiré. Toutes les largeurs horizontales étaient égales pour tous les individus.

**Figure 28. Transformation d'un bord postérieur en contour fermé**



## **4.2 Résultats-discussion**

### **4.2.1 FFT du contour de la cavité**

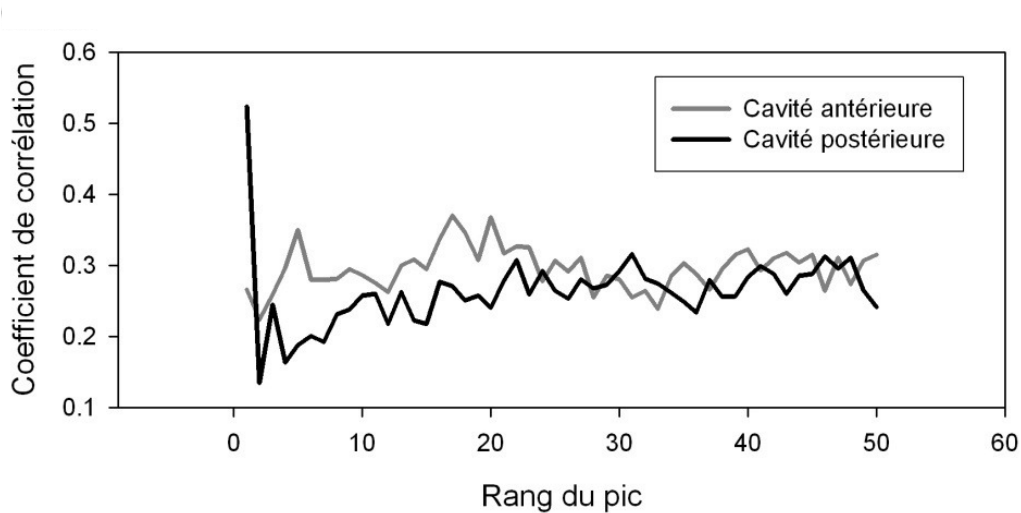
#### *a) Résultats*

Pour identifier les composantes du spectre éventuellement corrélées avec l'âge, pour chaque individu chaque harmonique du spectre a été corrélé avec son âge en utilisant le coefficient de corrélation de Pearson. La figure 29 a donné l'ensemble de ces corrélations tant pour la cavité antérieure que postérieure.

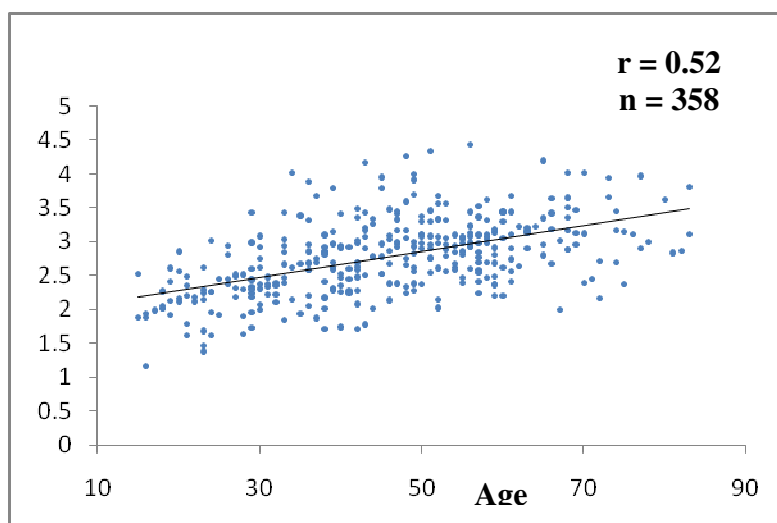
Deux observations s'imposaient : l'harmonique fondamentale de rang égal à 1 avait le mieux corrélé avec l'âge (figure 30). La corrélation avec l'âge du fondamental décroissait ensuite puis remontait à partir des harmoniques à période courte pour se stabiliser. Les sujets âgés avaient donc une tendance à avoir plus d'irrégularités

finies, que les sujets jeunes. Pour les harmoniques supérieures, le contour antérieur corrélait mieux avec l'âge, que le contour postérieur surtout dans la zone des harmoniques 15-25 (figure 31). La régression multiple de l'âge avec la fondamentale et la moyenne des harmoniques 40-50 a, là encore, peu amélioré la valeur de la corrélation (figure 32).

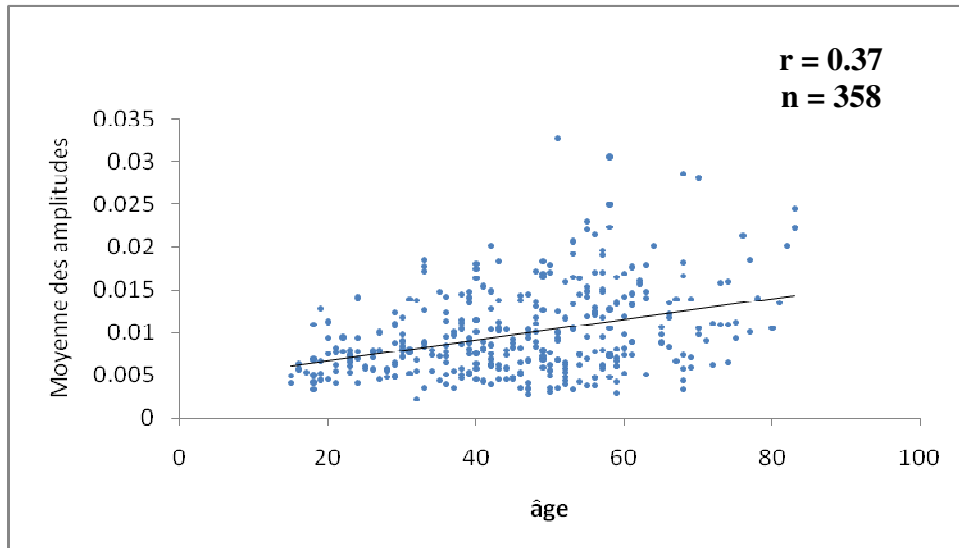
**Figure 29. Corrélation de l'âge et de la puissance des pics de la FFT de la cavité (n = 358)**



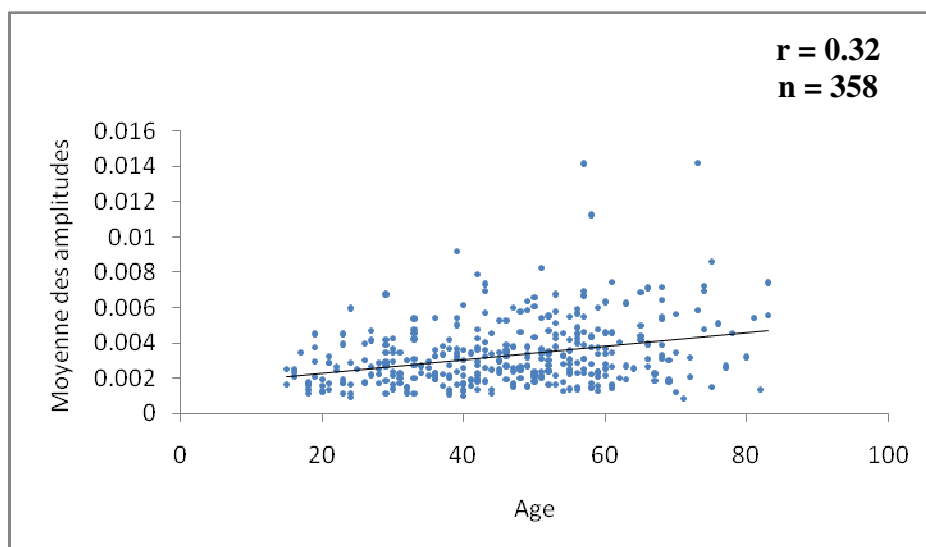
**Figure 30. Corrélation avec l'âge du fondamental (n = 358)**



**Figure 31. Corrélation avec l'âge de la moyenne du 15<sup>ème</sup> au 25<sup>ème</sup> harmonique pour la cavité antérieure**



**Figure 32. Corrélation avec l'âge de la moyenne du 40<sup>ème</sup> au 50<sup>ème</sup> harmonique pour le bord postérieur**





## *b) Discussion*

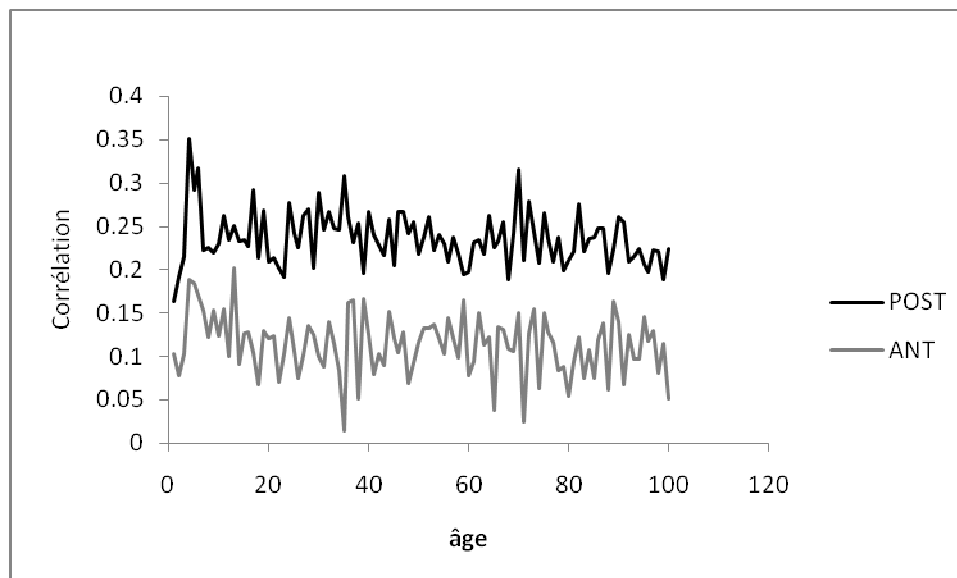
La corrélation du 1<sup>er</sup> harmonique de la cavité postérieure avec l'âge était à rapprocher de celle de la surface postérieure de la cavité avec l'âge : la valeur du 1<sup>er</sup> harmonique a donné une bonne indication de la surface correspondante. En effet, il a été vérifié, que ces deux variables corrélaient de façon importante entre elles ( $r = 0.84$ ,  $n = 350$ ) et de manière sensiblement égale avec l'âge. Pour ces raisons, la régression multiple de l'âge avec ces deux variables n'améliorait pas la corrélation. Pour les harmoniques supérieures de la cavité postérieure, les grandes irrégularités (harmoniques faibles) ont présenté peu de corrélation avec l'âge, alors que plus elles étaient fines (harmoniques élevés), plus la corrélation augmentait pour atteindre une valeur stable. Les irrégularités de ces contours sont apparues être le reflet de celle du mur postérieur, dont on ne voyait ici que les projections dans le plan sagittal (plan d'observation de la cavité). Il a été vérifié pour la cavité postérieure, que l'absence de projection osseuse n'améliorait pas significativement la corrélation avec l'âge. Pour la partie antérieure, il a été remarqué, que c'était surtout les points à forte amplitude qui faisaient la corrélation. Comme précédemment, il n'a pas pu être émis d'hypothèse pour ces points, qui étaient à la marge supérieure du nuage de points centrés sur la droite de régression. Pour toutes les corrélations envisagées jusqu'ici, la dispersion des points a augmenté avec l'âge. Ceci pouvait assez bien s'expliquer en considérant que le vieillissement dépendait à la fois de sa vitesse et de sa durée, c'est à dire de l'âge. Plus l'âge était grand la vitesse de vieillissement se faisait sentir

#### 4.2.2 FFT du bord du mur

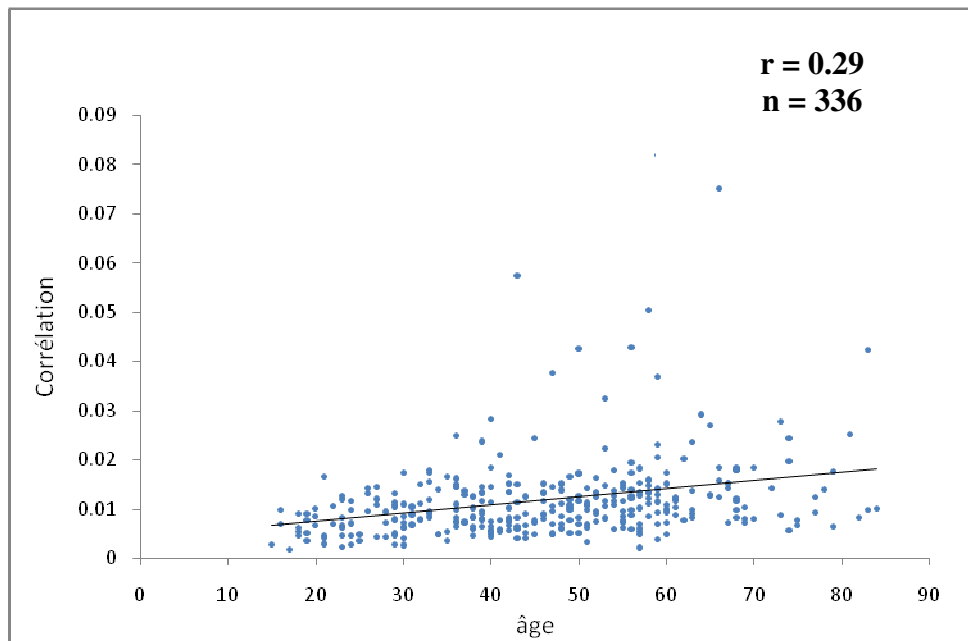
##### a) *Résultats*

Il était nécessaire d'identifier les composantes du spectre des bords des murs antérieurs et postérieurs, qui seraient éventuellement corrélées avec l'âge. Ainsi, pour chaque individu chaque harmonique du spectre a été corrélé avec son âge en utilisant le coefficient de corrélation de Pearson. La figure 33 a donné l'ensemble de ces corrélations tant pour la cavité antérieure que postérieure. Les corrélations étaient faibles et surtout produites par quelques valeurs très élevées. Là encore, les corrélations de l'âge avec la partie postérieure sont apparues plus importantes qu'avec la partie antérieure. Une des meilleures corrélations avec l'âge était donnée par la moyenne des amplitudes des harmoniques 20 à 40 (figure 34)

**Figure 33. Corrélation avec l'âge des 100 premiers points (FFT)**



**Figure 34. Corrélation de l'âge avec la moyenne des harmoniques 20-40 du bord postérieur**



*b) Discussion*

Les résultats des bords des murs étaient à rapprocher de ceux de la cavité puisqu'il s'agissait des projections du même bord dans le plan frontal et dans le plan sagittal (en position physiologique). Le fondamental dans le plan sagittal n'avait pas la même signification, car ici on n'avait pas joué sur la périodicité du contour de la cavité, qui n'est pas apparue dans ces deux projections frontales. Pour les autres harmoniques, il a été constaté des résultats assez comparables. Les bords postérieurs corrélaient peu avec l'âge, mais toutefois mieux que les bords antérieurs (qu'ils soient vus dans le plan frontal ou dans le plan sagittal). D'une manière générale, il a été constaté que c'était un petit nombre de valeurs extrêmes, qui rendaient très significatives les corrélations.

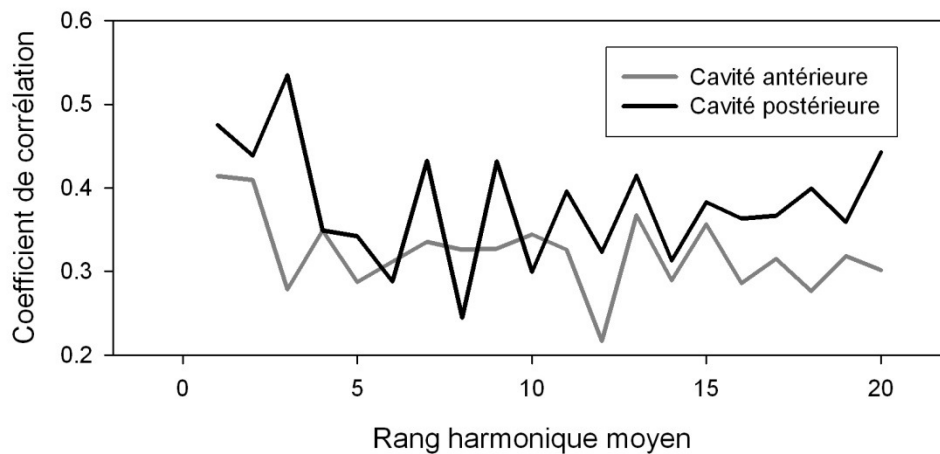
### 4.2.3 Descripteurs de Fourier du contour de la cavité

#### a) *Résultats*

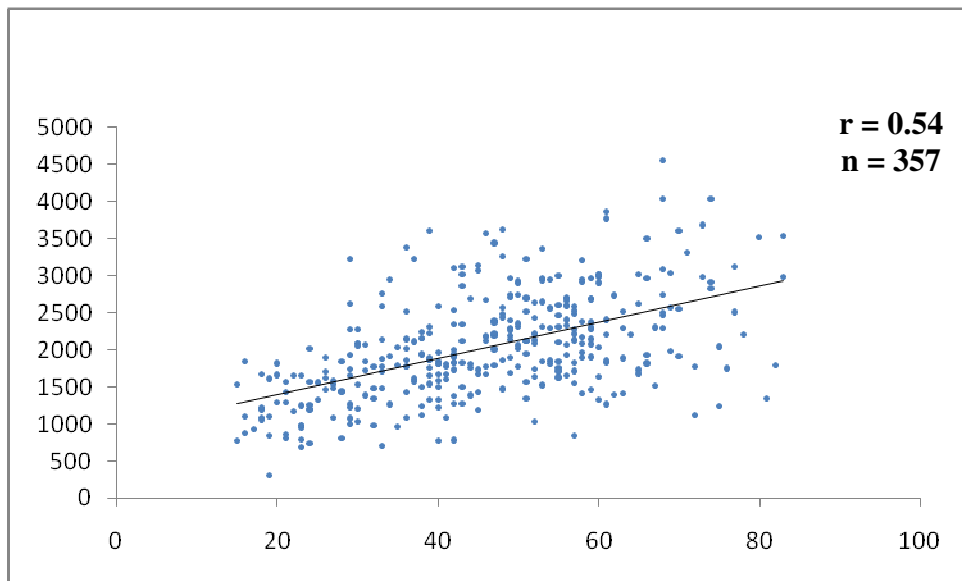
Pour chaque individu, la moyenne deux à deux des valeurs symétriques par rapport au fondamental, puis les différentes corrélations avec l'âge de chacune de ces moyennes ont été calculées (figure 35). La moyenne des 2<sup>èmes</sup> harmoniques corrélait le mieux avec l'âge pour la partie postérieure. La corrélation se stabilisait à partir du 10<sup>ième</sup> harmonique. La figure 36 a donné le détail de la distribution de cette moyenne en fonction de l'âge. De la même façon, entre la moyenne des harmoniques 10-20 de la cavité postérieure corrélaient très nettement avec l'âge. La figure 37 donnait cette distribution.

**Figure 35. Corrélation avec l'âge des descripteurs de Fourier de la cavité**

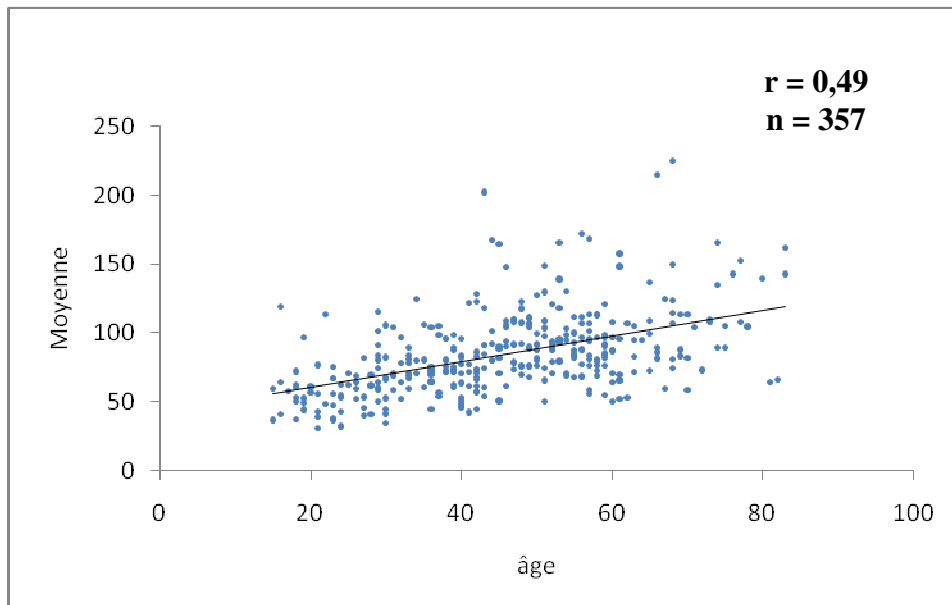
**(n = 357)**



**Figure 36. Corrélation de l'âge et de la moyenne des 2<sup>ème</sup> harmonique de la cavité postérieure**



**Figure 37. Corrélation de l'âge avec les moyennes des harmoniques 10-20**



*b) Discussion*

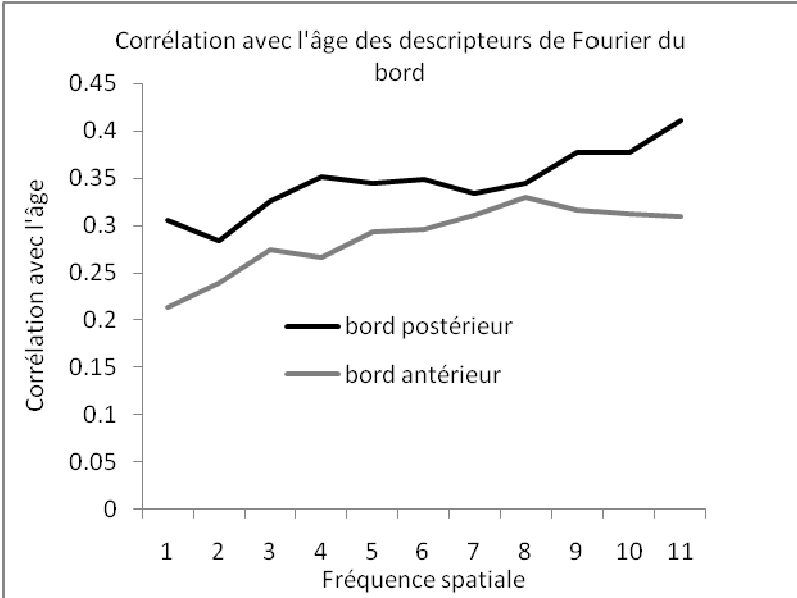
L'analyse par descripteur de Fourier à deux dimensions était voisine de l'analyse de Fourier à une dimension. Il a été logique de considérer, qu'à priori elle fournissait une information équivalente. Il a été constaté, que pour les premiers harmoniques, tant Fourier que descripteur, les corrélations avec l'âge étaient bonnes et équivalentes. Pour les harmoniques supérieurs, les descripteurs de Fourier sont apparus nettement supérieurs. D'un point de vue formel, les descripteurs de Fourier étaient plus adaptés car ils prenaient en compte les irrégularités de rebroussement, alors qu'il était nécessaire de les supprimer pour calculer les transformées de Fourier. Toutefois, là encore, la corrélation des deux variables entre elles expliquait l'absence d'amélioration significative avec la régression multiple.

#### 4.2.4 Descripteurs de Fourier du bord du mur antérieur et postérieur

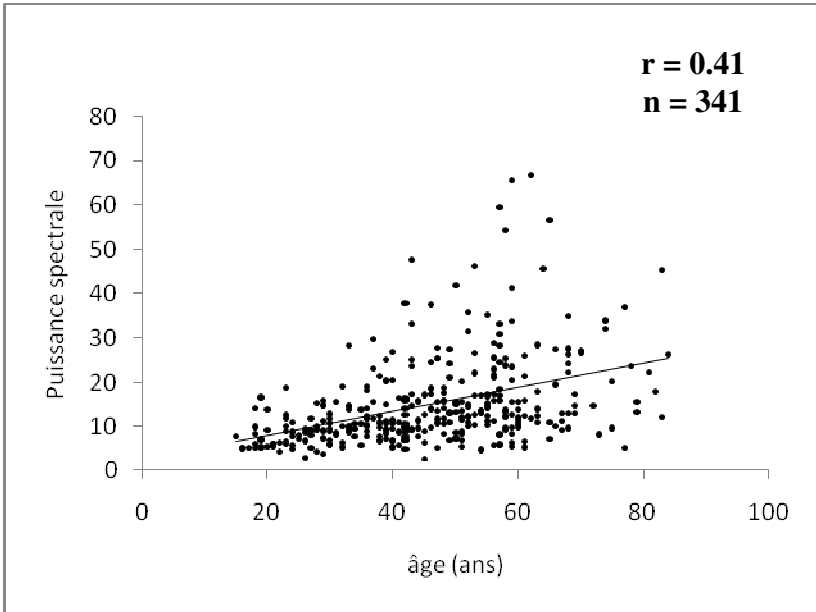
##### *a) Résultats*

Pour chaque individu, la moyenne des valeurs symétriques par rapport au fondamental prises 5 par 5, puis les différentes corrélations avec l'âge de chacune de ces moyennes ont été calculées (figure 38). La corrélation était meilleure pour le bord postérieur et croissait comme la fréquence des harmoniques considérées. La figure 39 a donné la moyenne des puissances spectrales des harmoniques 45-50 en fonction de l'âge.

**Figure 38. Corrélation avec l'âge des descripteurs de Fourier du bord (n = 341)**



**Figure 39. Puissance spectrale des harmoniques 45-50 des descripteurs de Fourier du bord postérieur en fonction de l'âge**



## *b) Discussion*

Les descripteurs de Fourier pour les bords postérieurs corrélaient mieux avec l'âge que ceux des bords antérieurs. Pour les moyennes des descripteurs harmoniques supérieures (45-50), il a été constaté le même type de corrélation qu'avec les descripteurs de la cavité ( $r$  entre 0.4 et 0.5). Il a également été observé que les descripteurs donnaient pour les bords de meilleures corrélations que les transformées de Fourier. Dans ce type de contour avec rebroussements, ils sont apparus mieux adaptés que les transformées de Fourier traditionnelles.

## 5. ANALYSE DES FORMES VISUELLES

### **5.1 Matériel et méthode**

Pour mettre à profit les performances visuelles dans l'analyse des formes, comme avait tenté de le faire İşcan, nous nous sommes attachés à différencier différentes formes caractéristiques apparaissant au niveau des bords antérieurs et postérieurs des côtes. Une sériation macroscopique a été réalisée au niveau du bord antérieur et du bord postérieur des 415 côtes de l'échantillon. Elle a permis d'identifier 23 types de formes différentes isolées ou parfois associées (annexe 3).

Une méthodologie identique avait été réalisée au niveau de la texture de l'os, de l'aspect de l'arrête du mur et son épaisseur. Elle n'a pas été exploitée compte tenu du caractère éminemment subjectif de ces variables que l'on a observé.

### **5.2 Résultats**

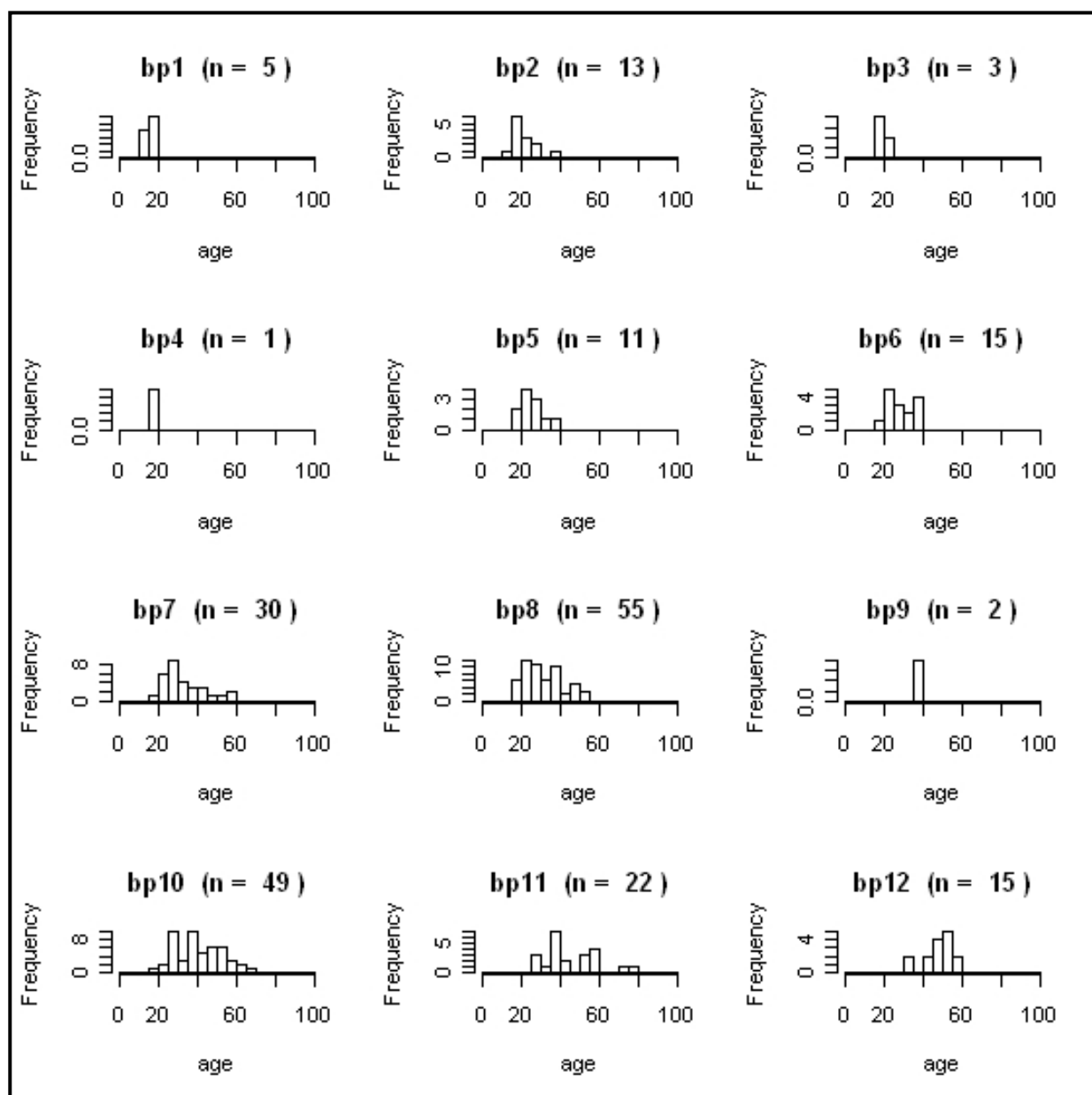
#### 5.2.1 Histogramme de l'âge

Les histogrammes de l'âge selon les différentes catégories de formes ont montré une assez forte dispersion et une tendance déjà constatée avec l'analyse harmonique :

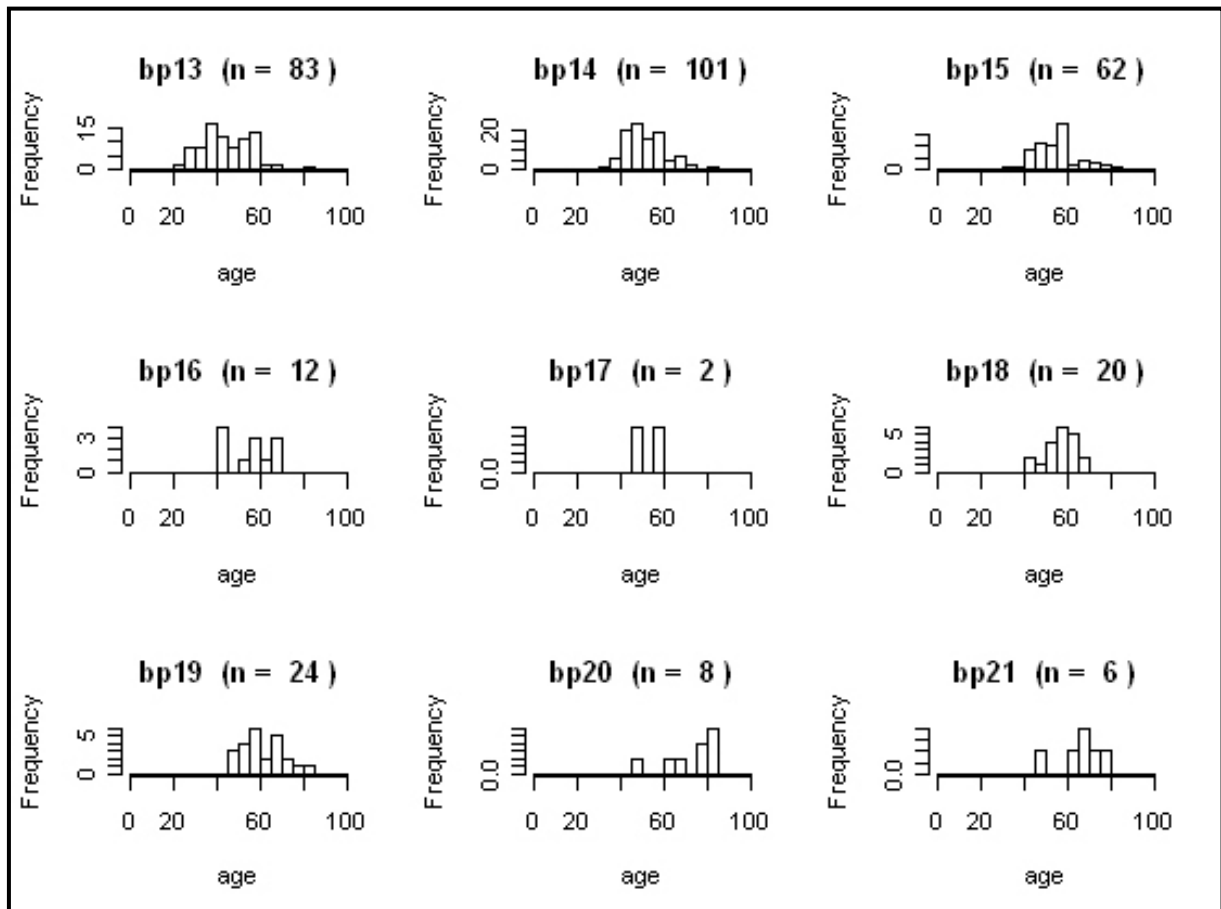


l'irrégularité des bords a tendance à augmenter avec l'âge. Cependant, on ne pouvait pas utiliser directement utiliser cette information à des fins prédictives. Les figures 40 et 41 ont donné pour le bord postérieur les histogrammes de l'âge pour chacune des catégories de forme. Les bords antérieurs ont donné des résultats tout à fait comparables.

**Figure 40. Histogramme de l'âge pour chacune des catégories de formes décrites au niveau du bord postérieur (n = 415)**



**Figure 41. Histogramme de l'âge pour chacune des catégories de formes décrites au niveau du bord postérieur (n = 415)**



### 5.2.2 Corrélation de l'âge et de la surface postérieure pour les différentes formes décrites

Le tableau 5 a donné les valeurs des corrélations entre l'âge et la surface postérieure de la cavité pour les individus appartenant aux différentes catégories de formes, ainsi que la p-value sous l'hypothèse nulle. Les corrélations n'ont été calculées que lorsque le nombre de côte par catégorie était strictement supérieur à 4. Les p-values ont permis de comparer les corrélations pour des groupes d'effectifs différents. Il a été constaté qu'elles étaient d'autant plus significatives que les histogrammes étaient plus étalés. Cependant, même dans ce cas, la significativité était toujours plus faible,

que celle obtenue pour la corrélation entre l'âge et la surface postérieure avec l'ensemble des côtes.

**Tableau 5. Corrélation entre l'âge et la surface postérieure pour les différentes catégories de forme (n = 350)**

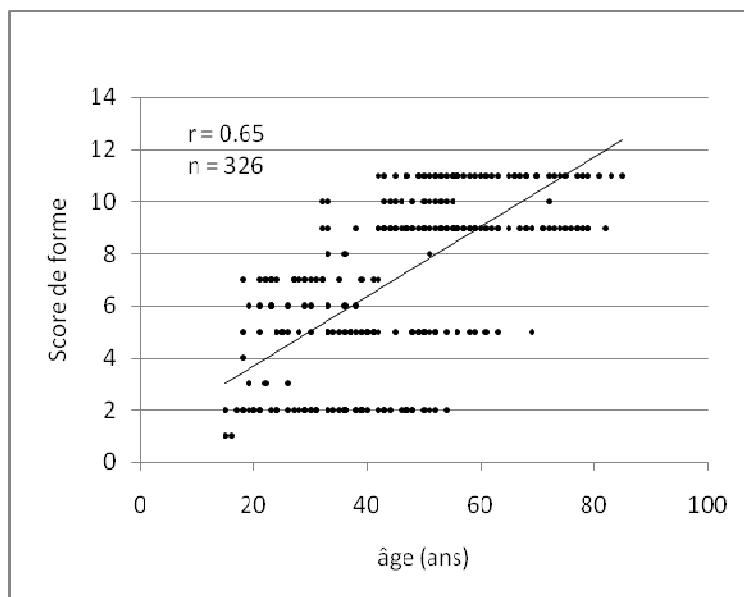
Nom	Code	n	r	p-value	Nom	Code	n	r	p-value
<b>B ant 1</b>	ba1	5	0.76	1.4E-01	<b>Bord post 1</b>	bp1	5	0.76	1.4E-01
<b>B ant 2</b>	ba2	9	0.55	1.2E-01	<b>Bord post 2</b>	bp2	13	0.10	7.4E-01
<b>Bord ant 3</b>	ba3	7	0.12	8.0E-01	<b>Bord post 3</b>	bp3	3		
<b>Bord ant 4</b>	ba4	4			<b>Bord post 4</b>	bp4	1		
<b>Bord ant 5</b>	<b>ba5</b>	<b>12</b>	<b>0.89</b>	<b>8.9E-05</b>	<b>Bord post 5</b>	bp5	5	0.25	4.5E-01
<b>Bord 6</b>	ba6	25	0.41	4.1E-02	<b>Bord post 6</b>	bp6	15	0.55	3.3E-02
<b>Bord ant7+13</b>	ba7	45	0.37	1.2E-02	<b>bordPost7+13</b>	bp7	30	0.60	4.4E-04
<b>Bords ant 9</b>	<b>ba8</b>	<b>32</b>	<b>0.45</b>	<b>9.7E-03</b>	<b>Bord post 9</b>	bp8	55	0.54	1.7E-05
<b>Bord ant 10</b>	<b>ba9</b>	<b>72</b>	<b>0.38</b>	<b>1.1E-03</b>	<b>Bord post 10</b>	bp9	2		
<b>Bord ant 11</b>	ba10	76	0.50	4.1E-06	<b>Bord post 11</b>	bp10	49	0.51	1.6E-04
<b>Bord 12</b>	ba11	26	0.28	1.7E-01	<b>Bord post 12</b>	bp11	22	0.08	7.1E-01
<b>Bord ant 14</b>	ba12	12	0.16	5.4E-01	<b>Bord post 14</b>	bp12	15	0.31	2.6E-01
<b>Bord ant 15</b>	ba13	3			<b>Bord post 15</b>	<b>bp13</b>	<b>83</b>	<b>0.46</b>	<b>1.5E-05</b>
<b>Bord ant 16</b>	ba14	86	0.22	4.0E-02	<b>Bord post 16</b>	<b>bp14</b>	<b>101</b>	<b>0.33</b>	<b>8.8E-04</b>
<b>Bord ant 17</b>	ba15	66	0.32	9.4E-03	<b>Bord post 17</b>	bp15	62	0.04	7.4E-01
<b>Bord ant 18</b>	ba16	17	0.00	9.9E-01	<b>Bord post 18</b>	bp16	12	0.63	2.9E-02
<b>Bord ant 19</b>	ba17	2			<b>Bord post 19</b>	bp17	2		
<b>Bord ant 20</b>	ba18	42	0.20	2.0E-01	<b>Bord post 20</b>	bp18	20	0.01	9.5E-01
<b>Bord ant 21</b>	ba19	10	0.07	8.6E-01	<b>Bord post 21</b>	bp19	24	0.19	3.7E-01
<b>Bord ant 22</b>	ba20	10	0.24	5.1E-01	<b>Bord post 22</b>	bp20	8	0.27	5.2E-01
<b>Bord ant 23</b>	ba21	5	0.50	3.9E-01	<b>Bord post 23</b>	bp21	6	0.39	4.4E-01
<b>Bord ant 24</b>	ba22	0			<b>Bord post 24</b>	bp22	0		

### 5.2.3 Score de forme

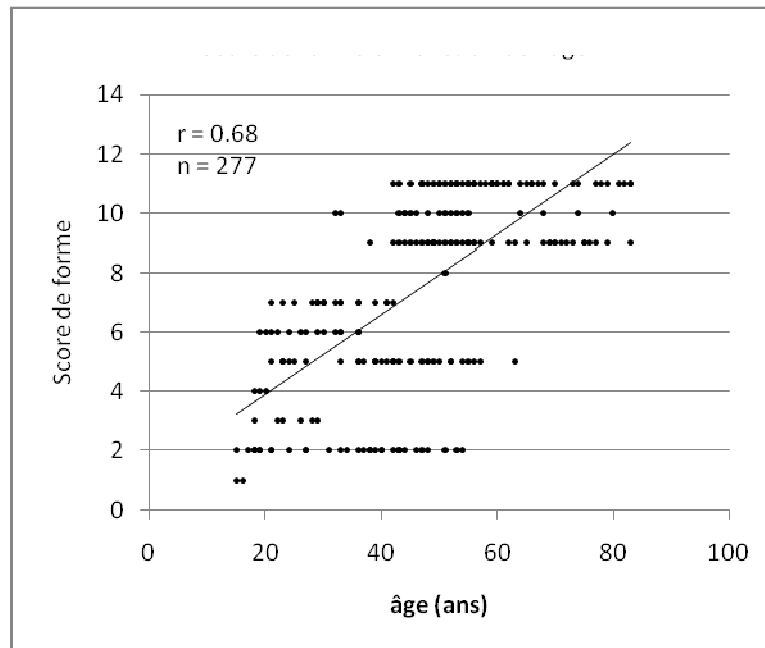
Les différentes formes visuelles ne permettaient pas de séparer clairement des sous populations pour lesquelles on aurait de meilleures corrélations des autres variables avec l'âge. Pour utiliser cette information de forme, elles ont été transformées pour obtenir un score de forme et un seul pour chaque côte. Ainsi, avec cette transformation, cette information a pu être utilisée dans un modèle de corrélation avec l'âge. Ce score de forme visuelle était établi à partir des analyses visuelles

réalisées précédemment. Les formes visuelles de 1 à 8 ont donné des scores de même valeur. Nous avons regroupé les formes visuelles 5 et 11 dans le score 5 ; 2 et 9 dans le score 2; 17 et 18 dans le score 9 ; 20 et 21 dans le score 11. La forme visuelle 14 correspondait au score 10. Nous avons éliminé les côtes ayant une forme visuelle de type 10, 12, 13, 15 et 16, 23 et 24. Ces regroupements visent à simplifier les formes selon l'importance des découpes et les scores varient comme l'importance de la profondeur des irrégularités du mur. Les figures 42 et 43 ont respectivement montré la corrélation de ce score pour les bords postérieur et antérieur. Il a été constaté des corrélations pratiquement similaires ne permettant pas de différencier ces deux murs

**Figure 42. Corrélation entre l'âge et le score de forme au niveau du bord postérieur**



**Figure 43. Corrélation entre l'âge et le score de forme au niveau du bord antérieur**



### 5.3 Discussion

L'information sur l'âge apportée par les formes visuelles a été de bonne qualité à condition d'exprimer ses modalités par un score, comme nous l'avons montrée dans la première partie de ce travail. La comparaison des corrélations antérieures et postérieures a montré des valeurs de corrélation très voisines si l'on prenait en compte la taille différente des échantillons. La taille de l'échantillon obtenu pour les bords du mur postérieur étant plus importante que celle du mur antérieur, nous avons sélectionné cette variable pour les analyses ultérieures. On peut penser, que l'observation fine des processus d'ossification tels qu'ils sont décrits par ce score pouvait apporter des informations complémentaires sur la métamorphose de l'articulation.

## 6. ANALYSE MULTIVARIEE : REGRESSION MULTIPLE

Au cours des analyses harmoniques ou géométriques, plusieurs variables ont été définies et les plus performantes en termes de prédiction de l'âge ont été recherchées. A cette occasion, comme nous l'avons déjà montré, il a été vérifié que la corrélation multiple de deux variables de même nature n'améliorait pas nettement la corrélation. Dans la partie de ce travail, une recherche plus systématique a été réalisée en testant les variables les plus pertinentes. Le fait que la variable prédite soit continue et que toutes les variables puissent être traitées comme des variables continues nous a conduit à privilégier pour cette analyse prédictive un modèle de régression multiple.

### **6.1 Matériel et méthode**

#### 6.1.1 Association des variables issues des analyses géométriques, harmoniques et des formes visuelles.

Pour l'analyse globale, les variables suivantes ont été sélectionnées, en rappelant les valeurs du coefficient de corrélation de Pearson obtenues entre l'âge et la variable ainsi que la taille de l'échantillon de côtes :

- la surface postérieure de la cavité notée surface-post ( $r = 0.56$ ,  $n = 350$ ) ;
- l'excentricité postérieure notée excentr-post ( $r = -0.44$ ,  $n = 350$ ) ;
- la hauteur supérieure du bord postérieur notée hautSup-bordpost ( $r = 0.58$ ,  $n = 296$ ) ;
- la puissance spectrale du fondamental de la FFT de la cavité postérieure notée FFT-Fond-Cav-post ( $r = 0.52$ ,  $n = 358$ ) ;
- la puissance spectrale moyenne des harmoniques 20 à 40 de la FFT des bords notée FFT-20-40-Bord-post ( $r = 0.29$ ,  $n = 336$ ) la puissance spectrale

moyenne des harmoniques 10-20 des descripteurs de Fourier de la cavité postérieure notée Descrip-Fourier-10-20-cav-post ( $r = 0.49$ ,  $n = 357$ ) ;

- la puissance spectrale moyenne des harmoniques 45-50 des descripteurs de Fourier du bord postérieur de la cavité notée Descrip-Fourier-45-50-bord-post ( $r = 0.41$ ,  $n = 357$ ) ;
- le score de la forme postérieure (notée score-post) définie précédemment ( $r = 0.65$ ,  $n = 326$ ).

Toutes ces variables ont été renseignées pour un échantillon de 235 côtes. Un modèle de régression linéaire multiple a été construit afin d'expliquer la variable âge par une combinaison linéaire des 7 variables précédentes notées  $x_i$  avec  $i$  allant de 1 à 7 :

$$\hat{\text{âge}} \text{ prédit} = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_7x_7$$

#### 6.1.2 Association des variables issues des analyses géométriques, harmoniques et des formes visuelles avec la taille et le poids taille/poids

Nous disposons de la taille pour un échantillon de 273 individus et du poids pour un échantillon de 208. La taille présentait une corrélation significative négative avec l'âge ( $r = -0.19$ ,  $n = 273$ ,  $p\text{-value} = 0.002$ ), alors que le poids ne corrélait pas significativement avec l'âge ( $r = -0.02$ ,  $n = 208$ ). Les variables précédentes ont donc été associées à la variable taille sur un échantillon d'effectifs beaucoup plus faible ( $n = 156$ ). Il a été vérifié, que cet échantillon était comparable à l'échantillon précédent sur le plan de l'âge moyen. Pour ces deux raisons, une étude supplémentaire a été réalisée.



## 6.2 Résultats

### 6.2.1 Variables issues des analyses géométriques, harmoniques et de forme

L'excentricité postérieure étant corrélée négativement avec l'âge, cette corrélation a été rendue positive à l'aide du changement de variable suivant :

$$\text{Excentr-post}^* = 4 - \text{Excentr-post}$$

#### *a) Corrélation des variables entre elles*

Les corrélations des variables entre elles ont été résumées dans le tableau 6 (n = 235). Le niveau de corrélation de ses variables entre elles, indiquaient leur niveau de redondance. Il a été constaté que la puissance spectrale du fondamental de la cavité postérieure donnait une information très redondante avec à la fois la surface (r = 0.83) et l'excentricité postérieures (r = 0.80). Il en était de même pour la surface postérieure et la puissance spectrale moyenne des harmoniques 10-20 des descripteurs de Fourier de la cavité postérieure (r = 0.70).

**Tableau 6. Corrélation des variables issues des analyses géométriques, harmoniques et de forme (n = 235)**

r	HautSup-bordpost	Score-post	FFT-Fond-Cav-post	Descrip-Fourier-10-20-cav-post	Descrip-FourierBord-Post45-50	Surface-post	Excentr-post	FFT-20-40-Bord-post	Age
HautSup-bordpost	1.00	0.42	0.43	0.39	0.51	0.47	0.35	0.51	0.60
Score-post		1.00	0.28	0.35	0.42	0.34	0.24	0.30	0.62
FFT-Fond-Cav-post			1.00	0.56	0.36	<b><i>0.83</i></b>	<b><i>0.80</i></b>	0.14	0.49
Descrip-Fourier-10-20-cav-post				1.00	0.43	<b><i>0.70</i></b>	0.26	0.21	0.48
DFBord-Post45-50					1.00	0.37	0.28	0.62	0.49
Surface-post						1.00	0.55	0.13	0.51
Excentr-post							1.00	0.14	0.41
FFT-20-40-Bord-post								1.00	0.36
Age									1.00

Les corrélations en gras souligné italique permettent de repérer les variables les plus redondantes

Une procédure de sélection pas à pas (Forward stepwise) a été appliquée en utilisant la procédure implémentée dans STATSOFT, avec une probabilité à l'entrée dans le modèle de 0.10 et une probabilité de sortie du modèle de 0.15. Les 5 variables ci-dessous ont été sélectionnées dans l'ordre suivant :

1. le score de la forme postérieure
2. la hauteur supérieure du bord postérieur
3. la puissance spectrale du fondamental de la FFT de la cavité postérieure
4. la puissance spectrale moyenne des harmoniques 10-20 des descripteurs de Fourier de la cavité postérieure
5. la puissance spectrale moyenne des harmoniques 45-50 des descripteurs de Fourier du bord postérieur

#### *b) Résultats de l'analyse statistique*

Les coefficients de régression des 5 variables qui sont entrés dans la régression multiple étaient tous significativement différents de 0 au risque 10% (tableau 7). Le modèle était statistiquement significatif (p-value :  $< 10^{-40}$ ) avec un coefficient de corrélation multiple ajusté de 0.75.

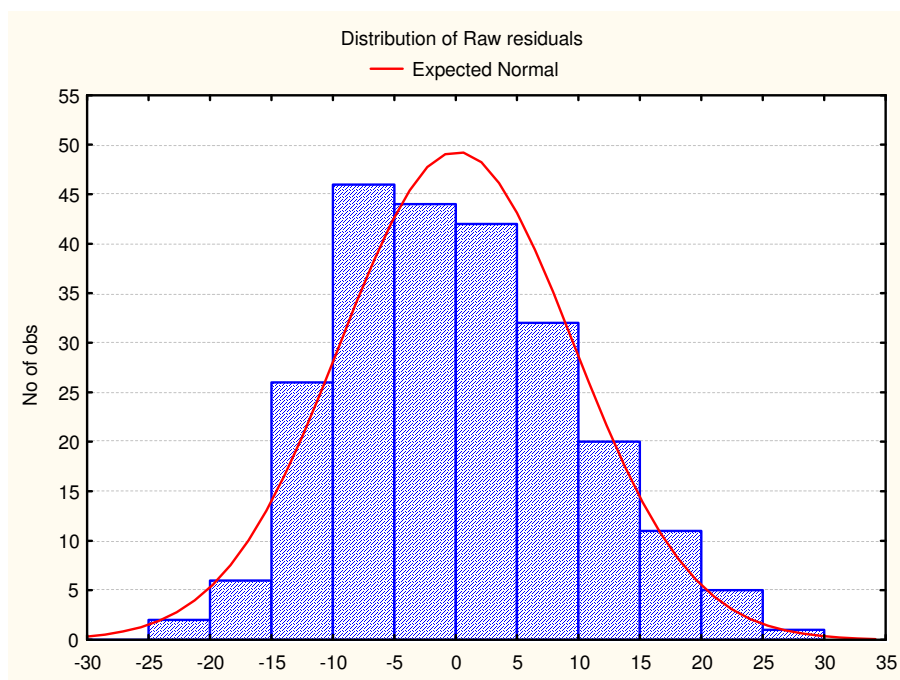
#### *c) Etude des résidus*

La figure 44 a montré que les résidus étaient peu dispersés autour de la normalité et ne présentaient pas de valeurs extrêmes pour certaines valeurs prédites. Cette normalité des résidus traduisait la pertinence du modèle.

**Tableau 7. Résultats de l'analyse statistique de la régression multiple (n = 235)**

	Coefficient de régression $b_i$	Ecart-type	t-Student ddl(229)	p-value
Score-post	1.70	0.22	7.56	0.000000
HautSup-bordpost	2.79	0.54	5.14	0.000001
FFT-Fond-Cav-post	4.74	1.47	3.22	0.001
Descrip-Fourier-10-20-cav-post	0.05	0.03	1.82	0.07
DFBordPost45-50	0.16	0.10	1.65	0.1

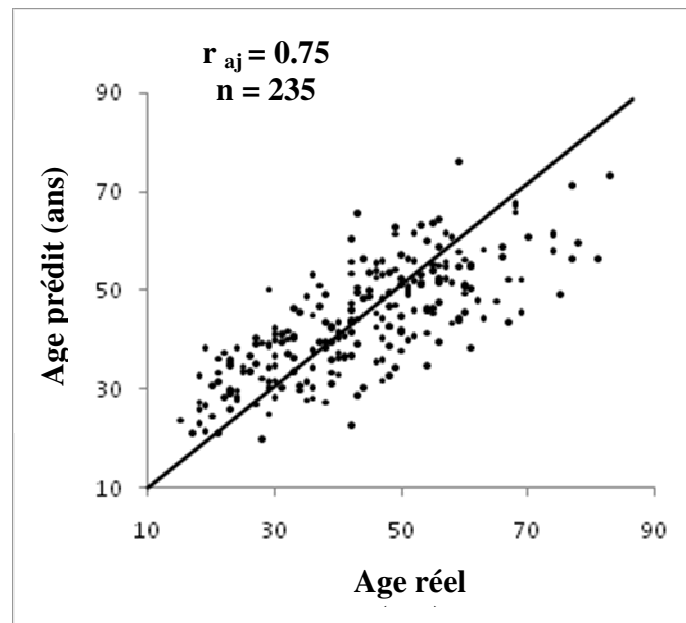
**Figure 44. Distribution des résidus**



d) *Modèle de prédiction*

La figure suivante 45 a donné l'âge prédit en fonction de l'âge réel. La dispersion symétrique des valeurs autour de la première diagonale a montré, que la linéarité du modèle était satisfaisante. Il a été constaté que les âges très faibles avaient tendance à être légèrement sur estimés contrairement aux âges élevés qui avaient tendance à être sous-estimés.

**Figure 45. Age prédit en fonction de l'âge réel**



La distance de COOK a donné l'influence de chaque observation sur la régression en combinant la qualité de la prédiction (résidus) et son poids dans la corrélation (effet de levier). Plus cette distance était élevée et plus les points influençaient la mauvaise qualité du modèle. Le tableau 8 a donné les côtes pour lesquelles les valeurs excessives des résidus correspondent à une valeur de COOK élevée.

**Tableau 8. Côtes des résidus et des distances de COOK importants**

Côte	âge réel	âge prédit	résidus (ans)	distance de COOK
75-2006-025-P	75	49	26	0.027
81-2005-651-P	81	56	25	0.027
69-2006-668-P	69	46	23	0.013
67-2006-235-P	67	44	23	0.028
61-2006-666-P	61	38	23	0.006
77-2007-574-P	77	56	21	0.044
42-2007-165-P	42	23	19	0.025
54-2007-111-P	54	35	19	0.014
19-2007-080-P	19	38	-19	0.012
29-2008-052-P	29	50	-21	0.019
43-2007-548-P	43	65	-22	0.119

### 6.2.2 Variables harmoniques et variables tailles/poids

Pour un nombre restreint d'individus, nous avons disposé de leur taille et de leur poids. La taille corrélait négativement avec l'âge de façon significative ( $r = - 0.19$ ,  $n = 273$ ), alors que le poids ne corrélait pas significativement avec l'âge ( $r = - 0.02$ ,  $n = 208$ ).

La taille étant corrélée négativement avec l'âge, la corrélation positive à l'aide du changement de variable suivant :

$$taille^* = 200 - taille$$

Un modèle de régression linéaire multiple a été construit par la même méthode de sélection pas à pas que précédemment, en considérant les 7 variables précédentes ainsi que la taille, soit 8 variables :

$$\hat{age\ prédit} = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_7x_7 + b_8x_8$$

Le nombre d'individus pour lesquels les 8 variables étaient renseignés était de 156. Le tableau 9 a résumé les résultats de l'analyse statistique de ce modèle. Les 5 variables introduites dans le modèle ont toutes un coefficient de régression significativement différent de 0 (p-value < 0.05). Il était statistiquement significatif avec un coefficient de corrélation multiple ajusté de 0.77 (p-value < 10<sup>-27</sup>).

**Tableau 9. Résultats de l'analyse statistiques à 8 variables (n = 156)**

Rang introduction	Variable x <sub>i</sub>	Coefficient de régression b <sub>i</sub>	écart-type	t-Student ddl(150)	p-value	
1	hautSup-bordpost	3.77	0.64	5.85	0.000000	***
2	score-post	1.36	0.26	5.16	0.000001	***
3	Descrip-Fourier-10-20-cav-post	0.10	0.03	2.98	0.003	**
4	taille	0.27	0.11	2.59	0.014	*
5	FFT-Fond-Cav-post	3.36	1.69	1.99	0.048	*

La procédure de sélection pas à pas a été effectuée de nouveau sur le même échantillon et dans les mêmes conditions, sans proposer la taille. L'excentricité postérieure de la cavité a été sélectionnée à la place de la taille et de la transformée de Fourier du fondamental de la cavité postérieure du modèle précédent. Les 4 variables introduites dans le modèle avaient toutes un coefficient de régression significativement différent de 0 ( $p\text{-value} < 0.10$ ). Le modèle était statistiquement significatif avec un coefficient de corrélation multiple ajusté de 0.76 ( $p\text{-value} < 10^{-27}$ ).

**Table 10. Résultat de l'analyse statistique de la régression multiple sans la taille (n = 156)**

Rang introduction	Variable $x_i$	Coefficient de régression $b_i$	écart-type	t-Student ddl(151)	p-value	
1	hautSup-bordpost	4.05	0.64	6.34	0.000000	***
2	score-post	1.41	0.27	5.29	0.000000	***
3	Descrip-Fourier-10-20-cav-post	0.11	0.03	3.45	0.0007	***
4	excentr-post	4.47	2.27	1.97	0.051	

### 6.3 Discussion

Il a été constaté que la régression multiple était efficace pour prendre en compte les variables qui par combinaison linéaire offraient la meilleure corrélation avec l'âge et pouvait en faire un modèle prédictif. L'introduction d'un nombre important de variables explicatives a montré que notre choix dans le type de variable était pertinent.

La procédure de régression multiple pas à pas a permis de sélectionner les variables les plus influentes dans le modèle. L'algorithme a commencé par introduire dans le modèle la variable qui avait la corrélation avec l'âge la plus élevée. Puis, à chaque étape de sélection Forward stepwise d'une nouvelle variable, l'algorithme a vérifié



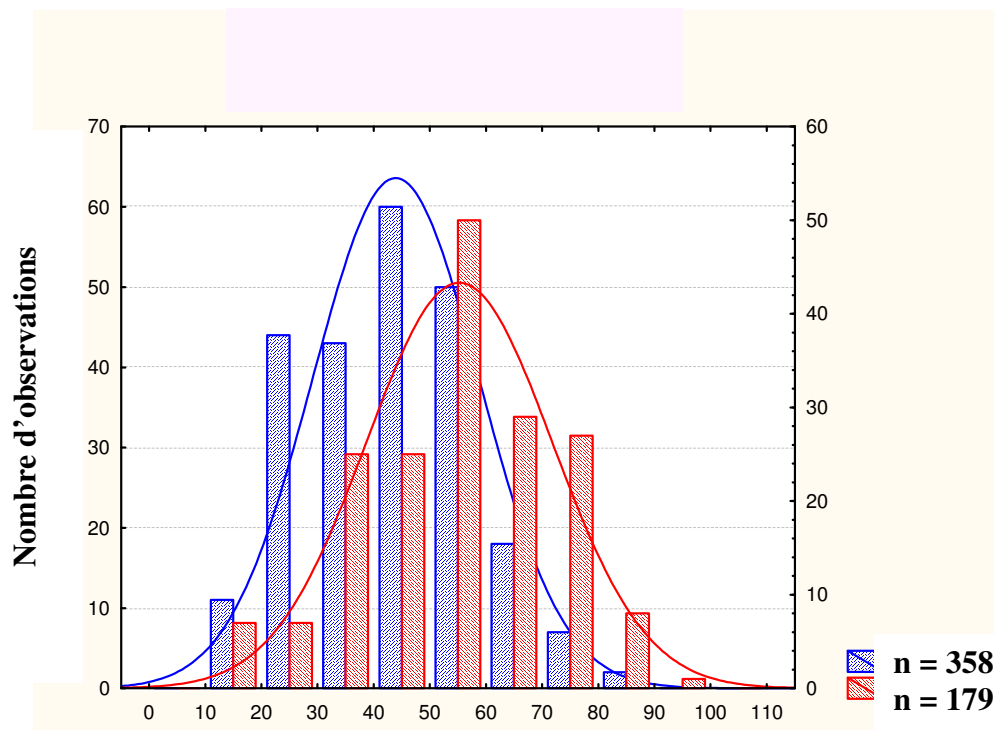
qu'aucune variable ajoutée lors d'une étape antérieure ne devait être éliminée, au motif qu'elle n'apportait plus de contribution significative. Cette méthode de sélection pas à pas constituait une bonne méthode lorsque l'on s'intéressait à la prédiction. Cependant, elle ne permettait pas de répondre facilement à la question de savoir quelle variable jouait le principal rôle pour prédire la variable dépendante (ici l'âge). Les coefficients standardisés de la régression multiple ne donnaient pas une bonne mesure de l'importance de chacune des variables parce qu'elles étaient corrélées entre elles. De plus, du fait de cette colinéarité, les coefficients de régression avaient tendance à présenter une certaine instabilité d'un échantillon à l'autre. Mais cette instabilité n'alternait pas la qualité générale de la prédiction. On aurait pu avoir une idée de l'importance avec laquelle les différentes variables influençaient le modèle en examinant leur rang d'introduction. Cependant, certains individus possédant des valeurs extrêmes pour certaines variables pouvaient les rendre particulièrement influentes. Les deux variables qui ont été introduites en premier pour les différents échantillons testés ont toujours été la hauteur supérieure du mur postérieur et le score obtenu à partir de l'analyse visuelle des côtes. Les puissances spectrales pour des fréquences spatiales élevées présentaient un intérêt inférieur à celui que nous avions escompté, bien qu'elles soient introduites dans le modèle prédictif de l'âge. Ceci pouvait s'expliquer par la méthode de préparation des côtes, dont on ne pouvait contrôler rigoureusement l'action sur la finesse des contours.

Dans cette étude, l'accent était mis sur l'utilisation de variables continues qui variaient le plus souvent linéairement avec l'âge. Pour cette raison, il n'a pas été jugé nécessaire d'effectuer d'analyse Bayésienne.

## 7. LA QUESTION DES CÔTES NON EXPLOITABLES OU LES ABSENTS ONT- ILS TOUJOURS TORTS ?

La figure 45 a donné la distribution de l'âge dans l'échantillon des 235 côtes (bleu) et des 179 (rouge) côtes, dont nous n'avons pas pu tenir compte dans le modèle car non renseignées pour certaines variables. Il s'agissait principalement de côtes de formes visuelles de type 10, 12, 13, 15 et 16, 23 et 24. Elles correspondaient la plupart du temps à des projections osseuses importantes, qui rendaient impossible les mesures géométriques. Il a été constaté ici un léger décalage de l'histogramme vers les âges les plus importants de ces côtes non analysée dans la régression. Ce décalage ne pouvait en aucun cas être utilisé pour définir une classe d'âge pour des côtes à fortes projection osseuse, comme le suggérait la méthode d'Işcan.

**Figure 45. Histogrammes des côtes utilisées et impossibles à exploiter**



## 8. DISCUSSION

### **8.1 Métamorphose de la 4<sup>ième</sup> côte avec l'âge**

#### 8.1.1 Eléments descriptifs

L'utilisation des analyses géométriques et harmoniques a constitué une approche novatrice dans le domaine de l'anthropologie physique. Elle a permis d'identifier des variables quantitatives continues et de réaliser une description objective du vieillissement de l'extrémité sternal de la 4<sup>ième</sup> côte chez le sujet masculin. Ce vieillissement constituait effectivement une métamorphose de part la transformation d'une articulation plane à une cavité articulaire englobant le cartilage. L'apparition de cette cavité était associée à une augmentation la surface de l'ovoïde étudié et de la profondeur de l'articulation évaluée par la hauteur de ses murs.

L'augmentation de la surface de l'ovoïde a traduit un élargissement à la fois de la côte et de la cavité articulaire. Le premier était conforme aux données de la littérature, mentionnant une tendance à l'élargissement de la plupart des os avec l'âge (24, 82, 83). L'élargissement de la cavité est apparue être une conséquence de la montée des murs autour du cartilage. Il était caractérisé par une asymétrie entre la partie antérieure et la partie de l'ovoïde postérieure manifestement secondaire à une éversion du mur postérieur (78). Cette éversion expliquait en partie le résultat de l'analyse harmonique du contour de l'articulation. Celui de la partie postérieure prenait en effet en compte une partie de l'information du bord du mur en raison de ce phénomène.

L'augmentation de la profondeur de l'articulation s'est également révélé asymétrique, mais cette fois au profit de la partie antérieure de l'articulation. Cette constatation a pu être rattachée au développement plus important du bord antérieur ou surtout à l'éversion du mur postérieur entraînant une sous-estimation de sa hauteur. Cette

augmentation de la hauteur des murs était associée à celle de l'irrégularité de leurs bords. Ce phénomène a été confirmé par l'analyse harmonique et par l'étude visuelle. Cette dernière a permis de mettre en évidence qualitativement l'étendue de sa variabilité sur un échantillon de grande taille en identifiant 23 types de formes. Elle a aussi remis en cause des constatations d'Işcan. La première concernait la présence de plaques sur le fond de l'articulation, qui comme l'avait noté Oettlé (35) n'était pas spécifique des sujets féminin. La seconde concernait l'observation de forme en arc du mur antérieur (annexe 3 : type 9) pour laquelle on pouvait faire la même remarque (29). De plus, cette forme semblait être associée à une forme particulière du mur postérieur (annexe 3 : type 14). Ces observations qualitatives permettaient de soulever l'hypothèse de formes générales du mur, dont le bord présentait des irrégularités initialement régulières, puis déchiquetées. L'étude visuelle a aussi permis une approche descriptive du développement des projections osseuses et de l'ossification du cartilage. Concernant les premières, il a été constaté qu'elles pouvaient prendre l'aspect de simples projections à une ossification circonférentielle autour du cartilage. Cette ossification paraissait être la conséquence d'une fusion de murs très développés avec les projections supérieures ou inférieures (annexe 3, type 23) et/ou d'une ossification à partir du bord latérale de celles-ci (annexe 3, type 22). L'existence d'irrégularités au niveau de leurs bords latéraux ressemblant à celles du bord du mur était en faveur de la deuxième hypothèse. Concernant le cartilage, lorsque son ossification était visible, elle avait la plupart du temps une localisation externe et un aspect poreux très différent de celui des murs et des projections supérieures et inférieures (annexe 3, type 14). Un seul cas d'ossification complète a été observé.

L'étude de la portion sous articulaire des côtes a mis en évidence un polymorphisme de forme des basé sur la largeur et sans relation avec l'âge. Ce polymorphisme a permis d'identifier éventuellement au moins une sous population de côtes très étroite et de constater son influence sur la forme générale de la cavité articulaire. Cette constatation remettaient par ailleurs en question l'intérêt de l'utilisation de la forme de cette dernière comme variable prédictive de l'âge par Işcan (18, 27, 29).

*b) Eléments explicatifs*

Chez le sujet masculin, la métamorphose de l'extrémité sternale de la 4<sup>ième</sup> côte est apparue marquée par la couverture de l'extrémité du cartilage et par le développement de projections osseuses au niveau des bords supérieurs et inférieurs. Replacés dans le contexte articulaire général, ces phénomènes osseux traduisaient une réaction autour d'un cartilage mécaniquement sollicité et siège d'une dégénérescence aboutissant à le rendre plus rigide et plus fragile (69, 84). Par analogie avec ce qui pouvait être observé au niveau d'énarthroses, ces observations pourraient témoigner d'une réaction ostéophytique compensatoire de protection de la jonction articulaire (85, 86, 87). Les asymétries de développement de la surface articulaire et de la hauteur des murs, de même que l'éversion du mur postérieur constituait un autre argument en faveur de cette hypothèse mécanique déjà soulevée par King et Semine (44, 61). Elles semblaient témoigner de contraintes plus importantes au niveau de la partie postérieure de l'extrémité sternale. La même hypothèse pouvait être proposée concernant les projections osseuses des bords crâniens et caudaux.

En se référant aux modèles proposés pour les énarthroses, la régulation de ces processus ostéophytiques pourrait dépendre de facteurs de croissance incluant des

IGFs (*insuline-like growth factors*) (88), TGF  $\beta$ 1, TGF  $\beta$ 2 et  $\beta$ 3 (*transforming growth factors* de type  $\beta$ 1,  $\beta$ 2 et  $\beta$ 3) (89, 90), PDGF (*platelet-derived growth factor*) (91) et les interleukines IL-1 $\beta$  et IL-6 (89). Le rôle de facteurs de croissance osseux et cartilagineux également identifiés dans ces processus (92), le plus souvent ostéo-arthrosiques, ne semblent toutefois pas en l'état des connaissances totalement applicable à l'articulation costo-sternale. Ses particularités anatomiques et mécaniques sont en effet très différentes de celle d'une énarthrose.

## **8.2 Prédiction de l'âge**

Tout dans ce travail a indiqué, que l'utilisation de variables objectives mesurables était préférable à celle de variables qualitatives. Le fait d'utiliser des valeurs mesurables a privilégié des méthodes de régression plutôt que des méthodes bayésiennes, d'une part parce que les grandeurs étaient continues et d'autre part parce que les relations avec l'âge était plutôt de type linéaire. La qualité des résultats a justifié ce choix, puisque la régression multiple est apparue efficace pour prendre en compte les variables, qui par combinaison linéaire offraient la meilleure corrélation avec l'âge et donnaient le meilleur modèle prédictif. L'introduction d'un nombre important de variables explicatives a également montré, que le choix dans le type de variable était pertinent. Le modèle de régression, que nous avons choisi avait toutefois une tendance, déjà signalée, à surestimer l'âge des jeunes et sous-estimer l'âge des personnes âgées (93 - 97). Cette faiblesse pouvait s'expliquer par un manque de linéarité de certaines variables dans leur corrélation avec l'âge. Cette recherche de non-linéarité et les moyens d'y remédier par des changements de variables appropriés aurait été utile si le biais constaté avait été important dans les résidus. Le problème essentiel nous paraissait ailleurs. L'existence dans toutes les

corrélations d'individus en dehors de la tendance générale a en effet montré, que le processus de vieillissement pouvait avoir dans certains cas des cinétiques très différentes de celles généralement observées. Pour ces individus, une explication dans les formes visuelles a été recherchée sans résultat probant. Cette dispersion incontrôlable expliquait la médiocre qualité des prévisions et confirmait, que la morphologie du vieillissement costal dépendait de facteurs auxquels nous n'avions pas accès. Les manifestations observées du vieillissement étaient la résultante de la vitesse du vieillissement et de sa durée. Ceci pouvait expliquer la dispersion des états de vieillissement chez des sujets relativement jeunes mais également âgés, confirmant la grande variabilité de la sénescence (41).

Comme cela a été suggéré le vieillissement au niveau de l'extrémité sternale de la côte impliquait des processus complexes génétiques, environnementaux, biomécaniques, hormonaux et pathologiques. En considérant que chacun de ces processus agissait plus ou moins indépendamment des autres pour exprimer cette métamorphose, il paraissait utile de rechercher des variables liées à cette métamorphose mais peu liées entre elles. Celles qui avaient été étudiées avaient une corrélation moyenne avec l'âge et le plus souvent une bonne corrélation entre elles. Cela expliquait les performances moyennes observées avec la corrélation multiple et la tendance du modèle à l'instabilité lors de changement d'échantillon. Un exemple inattendu a été constaté avec la taille, qui a montré comment la prise en compte de ce type de variable très différente de celles de l'extrémité sternale de la côte modifiait les variables les plus influentes dans la prédiction de l'âge. Les variables étudiées ayant montré leurs limites, il est apparu qu'une méthode basée sur cette articulation devrait prendre en compte de nouvelles variables locales (cartilage) ou générale (densité osseuse, poids).

## **8.3 Limites du travail**

### 8.3.1 Le caractère exploratoire de l'étude

Le caractère exploratoire de ce travail a été en partie pénalisé par des contraintes techniques et par un manque d'information sur certains paramètres ayant les conséquences précédemment évoquées. La principale de ces contraintes a été constituée par une certaine variabilité des clichés photographiques numériques, liée à un automatisme parfois mal contrôlé gênant leur exploitation. Un problème a également été soulevé concernant le contour des bords, qui a nécessité un prétraitement parfois à l'origine d'une perte d'information dans les fines irrégularités sensibles avec les descripteurs de Fourier. Enfin, certaines constatations visuelles, n'ont été qu'indirectement confirmées par les résultats de l'étude des variables objectives. Cet élément, comme le précédent, était inhérent aux limites techniques rencontrées. De plus, toutes les côtes n'étaient pas renseignées pour toutes les variables étudiées.

### 8.3.2 Absence de prise en compte de l'épaisseur du mur et de la qualité de l'os

La qualité de l'os, l'épaisseur des bords et l'aspect de leur arrête n'ont pas été étudiés statistiquement du fait de la subjectivité de leur observation et de l'influence de la préparation sur leur aspect. Malgré cela, on peut considérer compte tenu des données de la littérature, aux vues de nos constatations et de celles d'Işcan, qu'il existait avec l'âge une augmentation de la porosité de la surface articulaire associée à un amincissement de l'os corticale et donc des bords avec l'âge.



### 8.3.3 Préparation des os

La plupart des articles d'anthropologie et en particulier ceux d'İşcan () sont restés très imprécis sur la préparation des côtes. Les protocoles décrits associaient la plupart du temps une hydrolyse aqueuse à froid puis à chaud sans grand détail. Le résultat était fortement dépendant à la fois de la qualité de l'os, de son degré d'union avec le cartilage et de la durée de la phase chaude. Martrille avait à ce sujet évoqué dans un travail non publié le caractère potentiellement destructif de cette préparation. Seul Dudar a décrit assez précisément un protocole comportant une hydrolyse aqueuse à froid durant plusieurs semaines puis à chaud en association avec l'ajout d'un enzyme protéolytique. D'après une expérience personnelle postérieure à cette étude, ce type de traitement semblait être moins agressif que le traitement habituel. Il présentait également l'avantage d'être moins malodorant. Dans l'hypothèse de la poursuite de travail sur de l'os sec, il nous semblait devoir être privilégié et standardisé.

## 9. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'utilisation d'une approche moderne d'analyse a permis l'identification de variables quantitatives plus objectives que celles sur lesquelles reposait la méthode originale d'estimation de l'âge à partir de la 4<sup>ième</sup> côte. Ces nouvelles variables ont permis de redéfinir la métamorphose de cette articulation avec l'âge, métamorphose qui paraissait secondaire à la maturation du fibrocartilage articulaire et à un stress mécanique accumulatif. La complexité des mécanismes intervenant dans la régulation de ces phénomènes a expliqué les limites d'une approche basée sur l'étude d'une partie de l'articulation. Elle n'a pas permis ici d'accéder à suffisamment de variables explicatives pour permettre la mise au point d'une nouvelle méthode. Toutefois, ce résultat en demi-teinte a aussi pu s'expliquer par des difficultés d'ordre technique dans l'analyse harmonique des bords des murs de l'articulation. Il n'a en effet pas toujours été possible d'extraire la totalité du bord des murs à partir des photographies réalisées. L'analyse harmonique a donc été réalisée dans un grand nombre de cas sur des segments des bords avec une perte d'information importante. Cette perte d'information intéressait également la partie supérieure et la partie inférieure du bord du mur potentiellement informative.

Une perspective immédiate serait donc d'améliorer l'analyse harmonique, en particulier les descripteurs de Fourier des bords des murs. Pour cela il a été envisagé d'utiliser des images scannées des côtes de notre échantillon sur lesquelles pourraient être mis au point des outils de segmentation automatisés permettant de réaliser cette analyse sur la totalité du contour du bord des murs et d'acquérir les autres variables décrites, voir des variables supplémentaires (densité osseuse, épaisseur des murs). Cette approche pourrait peut être enfin permettre de

proposer une nouvelle méthode d'estimation de l'âge au décès sur l'os sec plus reproductible et peut être plus précise à partir de :

- la mesure de la hauteur moyenne du mur postérieur,
- des dimensions antéro postérieures de la cavité articulaire,
- la reconnaissance de formes des bords identifiées de manière objective par l'analyse harmonique.

L'utilisation de l'imagerie moderne serait également novatrice dans l'approche de ce que l'on appelle aujourd'hui l'anthropologie virtuelle et qui à notre connaissance se limite à la transposition des méthodes existante. Elle pourrait permettre d'optimiser l'acquisition des variables objective décrites mais également d'en acquérir d'autres de manière automatique, ce qui serait au moins le gage d'une excellente reproductibilité.

Parallèlement et comme cela a été suggéré dans une communication orale encore non publiée du Professeur Rösing, le cartilage costal devrait faire l'objet d'une investigation préliminaire. Son processus de dégénérescence paraissant indépendant de celui des éléments osseux adjacents pourrait en effet présenter un intérêt dans l'estimation de l'âge. A cet effet, le micro scanner nous semblerait de prime abord l'outil le plus adapté pour cette approche.

Dans ces différentes perspectives, un échantillon comportant l'ensemble de l'articulation de la 4<sup>ième</sup> côte de sujets masculins et féminins est en cours de constitution à l'institut de médecine légale de Lyon depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2009.

## **BIBLIOGRAPHIE**

1. Bohan TL, Heels EJ. The case against Daubert : the new scientific evidence 'standard' and standards in several states. *J Forensic Sci* 1995;40:1030-1104
2. Vidmar N, Lempert RO, Seidman DS, Hans VP, Landsman S, McCoun R et al. Amicus brief : Kumho Tire v. Carmichael. *Law Hum Behav* 2000;24:387-400.
3. Davies J. Admissibility of scientific evidence in courts. *Med Law* 2005;24(2):243-57.
4. Grivas CR, Komar DA. Kumho, Daubert, and the nature of scientific inquiry : implications for forensic anthropology. *J Forensic Sci* 2008;53(4):771-776.
5. Nishimi RY, O'Connor KW, Gwin HL, Anderson MA. Genetic witness : forensic uses of DNA tests. *J Int Bioethique* 1991;2(1):29-32.
6. Hallenberg C, Morling N. A report of the 1997, 1998 and 1999 Paternity Testing Workshops of the English Speaking Working Group of the International Society for Forensic Genetics. *Forensic Sci Int.* 2001;116(1):23-33.
7. Ritz-Timme S, Cattaneo C, Collins MJ, Waite ER, Schütz HW, Kaatsch HJ, Borrman HIM. Age estimation : the state of the art in relation to the specific demands of forensic practise. *Int J Legal Med* 2000;113:129-136.

8. Schmeling A, Geserick G, Reisinger W, Olze A. Age estimation. *Forensic Sci Int* 2007;165:178-182.
9. Rösing FW, Graw M, Marré B, Ritz-Timme S, Rotschild MA, Röttscher K, Schmeling A, Schröder I, Geserick G. Recommendations for the forensic diagnosis of sex and age from skeletons. *Homo* 2007;58:75-78.
10. Schmitt A, Murail P, Cunha E, Rougé D. Variability of the pattern of aging on the human skeleton : evidence from bone indicators and implications on age at death estimation. *J Forensic Sci* 2002;47(6):1203-1209.
11. Sarajlic N. Age estimation based on sternal ribs ends changes in Bosnian male population. *Med Arh* 2006;60(6):343-346.
12. Kimmerle EH, Prince DA, Berg GE. Inter-observer variation in methodologies involving the pubic symphysis, sternal ribs and teeth. *J Forensic Sci* 2008;53(3):594-600).
13. Baccino E, Ubelaker DH, Hayek LA, Zerilli A. Evaluation of seven methods of estimating age at death from mature human skeletal remains. *J Forensic Sci* 1999;44(5):931-936.
14. Martrille L, Ubelaker DH, Cattaneo C, Seguret F, Tremblay M, Baccino E. Comparaison of four skeletal method for the estimation of age at death on white and black adults. *J Forensic Sci* 2007;52(2):302-307.

15. Wittwer-Backofen U, Gampe J, Vaupel JW. Tooth cementum annulation for age estimation : result of a large known-age validation study. *Am J Physic Anthropol* 2004;123:119-129.
16. Kimmerle EH, Konigsberg LW, Jantz RL, Baraybar JP. Analysis of age-at-death estimation throught the use of pubic symphyseal data. *J Forensic Sci* 2008;53(3):558-568.
17. Acsadi G, Nemeskeri L. History of human life span and mortality. Budapest : Akademiai Kiado 1970:150p.
18. İşcan MY, Loth SR, Wright RK. Metamorphosis at the sternal rib end : a new method to estimate age at death in white males. *Am J Phys Anthropol* 1984;65:147-56.
19. Ritz-Timme S, Rochholz G, Schültz HW, Collins MJ, Waite ER, Cattaneo, Kaatsch HJ. Quality assurance in age estimation based on aspartic acid racemisation. *Int J Legal Med* 2000;114:83-86.
20. Rist E, Gally, Troeme. L'ossification des cartilages costaux dans l'espèce humaine : étude d'anatomo-radiologie statistique. *Presse Med* 1928;36 :641-644.
21. McCormick WF, Stewart JH. Ossification patterns of costal cartilages as indicator of sex. *Arch Pathol Lab Med* 1983;107:206-210.

22. Stewart JH, McCormick WF. The gender predictive value of sternal length. *Am J Forensic Med Pathol* 1983;4(3):217-220.
23. McCormick WF, Stewart JH. Age related changes in the human plastron : a roentgenographic and morphologic study. *J Forensic Sci* 1988;33(1):100-120.
24. Epker BN, Kelin M, Frost HM. Magnitude and location of cortical bone loss in human rib with aging. *Clin Orthop* 1965;41:198-203.
25. Kerley ER. Estimation of skeletal age : After about age 30 years. In Stewart TD ed : *Personnel identification in mass disaster*, Washington, DC : National Museum of Natural History, 1970:57-70.
26. Ubelaker DH. *Human skeletal remains : excavation, analysis, interpretation*. Chicago : Aldine 1978:.
27. İşcan M.Y., Loth S.R., Wright RK. Age estimation from the rib by phase analysis : white males. *J Forensic Sci* 1984;29:1094-1104.
28. McKern TW, Stewart TW. *Skeletal age changes in young american males*. Technical report EP-45, US Army Army Quartermaster Research and Development Center, Environmental Protection Research Division, Natick, MA, 1957.

29. İşcan M.Y., Loth S.R. Age estimation from the rib by phase analysis : white females. *J Forensic Sci* 1985;30:853-863.
30. Loth SR, İşcan MY, Scheuerman EH. Intercostal variation at the sternal end of the rib. *Forensic Sci Int* 1994;65:135-143.
31. Yoder C, Ubelaker DH, Powell JF. Examination of variation in sternal rib end morphology relevant to age assessment. *J Forensic Sci* 2001;46(2):223-227.
32. Saunders S, Fitzgerald C, Rogers T, Dudar JC, McKillop H. A test of several methods of skeletal age estimation using a documented archeological sample. *Can Soc Forensic Sci* 1992;25:97-118.
33. Russell KF, Simpson SW, Genovese J, Kinkel MD, Richard S, Lovejoy CO. Independent test of the fourth rib aging technique. *Am J Phys Anthrop* 1993;92:53-6.
34. İşcan MY, Loth SR, Wright RK. Racial variation in the sternal extremity of the rib and its effect on age determination. *J Forensic Sci* 1987;2:452-466.
35. Oettlé AC, Steyn M. Age estimation from sternal ends of ribs by phase analysis in South African Blacks. *J Forensic Sci* 2000;45(5):1071-1079.
36. Yavuz MF, İşcan MY, Cöloğlu AS. *Forensic Sci Int* 1998;98:47-54.



37. Donic D, Duric M, Babic D, Popovic D. Reliability of the individual age at the time of death based on sternal rib end morphology in Balkan population. *Vojnosanit Pregl* 2005;62(6):441-446.
38. İşcan MY, Loth SR. Determination of age from the sternal rib in white males: a test of the phase method. *J Forensic Sci* 1986;1(31):122-132
39. İşcan MY, Loth SR. Determination of age from the sternal rib in white females : a test of the phase method. *J Forensic Sci* 1986;31(3):990-999.
40. Komar DA, Buiksrea JE. *Forensic anthropology. Contemporary theory and practice.* Oxford : Oxford University Press:2008:362p.
41. Schmitt A. Estimation de l'âge au décès des sujets adultes à partir du squelette : des raisons d'espérer. *Bull Mém Soc Anthropol Paris* 2002;XIV(1-2):51-73.
42. Brennan P, Silman A. Statistical methods for assessing observer variability in clinical measures. *BMJ* 1992;304:1491-1494.
43. Kapucuoglu N, Bulbul D, Tulunay G, Temels MA. Reproducibility of grading systems for endometrial endometrioid carcinoma and their relation with pathologic prognostic parameters. *Int J Gynecol Cancer* 2008;18(4):790-6.
44. Semine AA, Damon A. Costochondral ossification and aging in five populations. *Hum Biol* 1975;47(1):101-116.

45. Bahrami S, Plate U, Dreier R, DuChesne A, Willital GH, Bruckner P. Endochondral ossification of costal cartilage is arrested after chondrocytes have reached hypertrophic stage of late differentiation. *Matrix Biol* 2001;19(8):707-715.
46. Michelson N. The calcification of the costal cartilage among white and negroes. *Hum Biol* 1934;6:543-557.
47. Falconer B. Calcification of hyaline cartilage in man. *Arch Pathol* 1938;26:942-955.
48. Hass GM. Studies of cartilage. *Arch Pathol* 1943;35:275-384.
49. Stewart TD. Metamorphosis of the joints of the sternum in relation to age in others bones. *Am J Phys Anthropol* 1954;12(3):519-535.
50. Elkeles A. Sex differences in the calcification of the costal cartilages. *J Am Geriatric Soc* 1966;14:456-462.
51. Kampen WU, Claassen, Kirsch T. Mineralization and osteogenesis in the human first rib cartilage. *Ann Anat* 1995;177:171:177.
52. Kunos CA, Simpson SW, Russell KF, Hershkovitz I. First rib metamorphosis : its possible utility for human age-at-death estimation. *Am J Phys Anthropol* 1999;110:308-323.

53. Vastine JH 2<sup>nd</sup>, Vastine MF, Arango O. Genetic influence on osseous development with particular reference to the deposition of calcium in the costal cartilage. *Am J Roentgenol Radium Ther* 1948;59(2):213-221.
54. Horner JL. Premature calcification of the costal cartilages : its frequents association with symptom of non-organic origin. *Am J Med Sci* 1949;218:186-193.
55. Sanders CF. Sexing by costal cartilage calcification-correspondance. *Brit J Radiol* 1966;39:233.
56. Heudtlass AP, Garre O. La calcification de los cartilagos costales en la evolution de la tuberculosis pulmonary. *Prensa Medica Argentina* 1940;27:365-369.
57. Riebel F. Ossification of the costal cartilage : their relation to habitus and disease. *Am J Roentgenol Radium Ther* 1929;21:44-47.
58. Senac MO, Lee FA, Gilsanz V. Early costochondral calcification in adolescent hyperthyroidism. *Radiology* 1985;156(2):375-377.
59. Ontell FK, Moore EH, Shepard JA, Shelton DK. The costal cartilages in health and disease. *Radiographics* 1997;17(3):571-577.
60. Dearden LC, Mosier HD Jr. The effect of prolonged prednisone treatment on human costal cartilage. *Am J Pathol* 1975;81(2):267-282.

61. King JB. Calcification of the costal cartilages. *Brit J Radiol* 1939;12:2-12.
62. Cancedda R, Descalzi Cancedda F, Castagnola P. Chondrocyte differentiation. *Int Rev Cytol* 1995;159:265-358.
63. Bianco P, Descalzi Cancedda F, Riminucci M, Cancedda R. Bone formation via cartilage models : the 'borderline' chondrocyte. *Matrix Biol* 1998;17(3):185-192.
64. Bahrami S, Plate U, Dreier R, DuCHesne A, Willital GH, Bruckner P. Endochondral ossification of costal cartilage is arrested after chondrocytes have reached hypertrophic stage of late differentiation. *Matrix Biol* 2001;19(8):707-715.
65. Böhmig R. Die kataplastischen Veränderungen in menschlichen Rippenknorpel. *Beitr Pathol Anat Physiol* 1929;81:172-210.
66. Amprino R. Studi sul significato meccanico delle fibrille collagene della cartilagine ialina dell'uomo. *Z Zellforsch Mikrosk Anat* 1938;28:734-760.
67. Miller EJ, Van der Korst JK, Sokoloff L. Collagen of human articular and costal cartilage. *Arthritis Rheum* 1969;12:21-29.
68. Rahlf G. Untersuchungen über Wachstum und Altern der menschlichen Rippenknorpel. *Virchows Arch* 1972;356:343-351.

69. Hough AJ, Mottram FC, Sokoloff L. The collagenous nature of amianthoid degeneration of human costal cartilage. *Am J Pathol* 1973;73:201-216.
70. Van der Korst JK, Sokoloff L, Miller EJ. Senescent pigmentation of cartilage age and degenerative joint disease. *Arch Pathol* 1968;84:40-46.
71. Meyer K, Kaplan D. ageing of human cartilage. *Nature* 183 :1267-1268.
72. Mathews MD, Glagov S. Acid mucopolysaccharide patterns in aging human cartilage. *J Clin Invest* 1966:1103-1111.
73. Kröz W, Buddecke E. Chemische und makromolekulare Altersveränderungen von Polysaccharid-Proteinen aus menschlichem Rippenknorpel. *Hoppe-Seylers Z Physiol Chem* 1967;348:665-674.
74. Lin FC, Sokoloff L. Movement and composition of interstitial fluid of cartilage. *Arthritis Rheum* 1965;8:481-494.
75. Urist MR. Growth hormone and the skeleton, Vol 2, Biochemistry and Physiology of bone, Second edition. New York : Academic Press;1972:179p.
76. Andriacchi T, Schultz A, Belytschko T, Galante J. A model for studies of mechanical interactions between the human spine and rib cage. *J Biomech* 1974;7(6):497-507.

77. Dufour M, Pillu M. Biomécanique fonctionnelle. Membre – Tête – Tronc. Issy-les-Moulinaux : Elsevier-Masson 2008:568p.
78. Fanton L, Gustin MP, Paultre U, Schrag B, Malicier D. Critical study of the observation of the sternal end of the right '4<sup>th</sup> rib. J Forensic Sci (sous presse).
79. <http://www.insee.fr/>
80. Duerk JL. Principles of MR images formation and reconstruction. Magn Reson Imaging Clin N Am 1999;7(4):629-659.
81. Brown RA, Frayne R. A comparison of texture quantification techniques based on the Fourier and S transform. Med Phys 2008;35(11):4998-5008.
82. Sedlin E, Viallanueva AR, Frost HM. Age variations in the specific surface of Howship's lacunae as an index of human bone resorption. Anat Rec 1963;146:201-207.
83. Smith RW, Walker RR. Femoral expansion in aging women : implications for osteoporosis and fractures. Science 1964;145:156-157.
84. Sokoloff L. Elasticity of aging cartilage. Fed Proc 1966;1089-1095.
85. Menkes CJ, Lane NE. Are osteophytes good or bad ? Osteoarthritis Cartilage 2004;12 suppl A:S53-S54.

86. Das SK, Farooqui A. Osteoarthritis. Best Practice and Research Clinical Rheumatology. 2008;22(4):657-675.
87. Kawaguchi H. Endochondral ossification signals in cartilage degradation during osteoarthritis progression in experimental mouse models. Mol Cells. 2008;25(1):1-6.
88. Middleton J, Arnott N, Walsh S, Beresford J. Osteoblasts and osteoclasts in adult human osteophyte tissue express the mRNAs for insuline-like growthfactors I and II and type 1 IGF receptors. Bone 1995;16:287-293.
89. Dodds RA, Merry K, Littlewood A, Gowen M. Expression of mRNA for IL 1 $\beta$ , IL6 and TGF $\beta$ 1 in developing human bone and cartilage. J Histochem Cytochem 1994;42:733-744.
90. Horner A, Kemp P, Summers C, Bord S, Bishop NJ, Kelsall AW et al. Expression and distribution of platelet derived growth factor – beta and their signalling receptors in growing human bone. Bone 1998;23:95-102.
91. Horner A, Bord S, Kemp P, Greinger D, Compston JE. Distribution of platelet derived growth factor (PDGF) A chain mRNA, protein, and PDGF-a receptor in rapidly forming human bone. Bone 1996;19:352-362.

92. Zoricic S, Maric I, Bobinac D, Vukicevic S. Expression of bone morphogenetic proteins and cartilage-derived morphogenetic proteins during osteophyte formation in humans. *J Anat* 2003;202:269-277.
93. Masset C. Sur quelques fâcheuses méthodes de détermination de l'âge des squelettes. *Bull et Mém Soc Anthropol Paris* 1976;XIII:329-336.
94. Bocquet-Appel JP, Masset C. Farewell to paleodemography. *J Hum Evol* 1982;11:321-333.
95. Bocquet-Appel JP, Masset C. Paleodemography : expancy and false hope. *Am J Phys Anthropol* 1996;99:57-583.
96. Aykroyd RG, Lucy D, Pollard AM, Solheim T. Technical note : Regression analysis in adult age estimation. *Am J Phys Anthropol* 1997;104:259-265.
97. Aykroyd RG, Lucy D, Pollard AM, Roberts, Nasty, brutish, but not necessarily short : a reconsideration of the statistical method used to calculate age at death from adult human skeletal and dental age indicators. *Am Antiq* 1999;64:55-70.
98. Dudar JC, Pfeiffer S, Saunders SR. Evaluation of morphological and histological adult skeleton age-at-death estimation techniques using ribs. *J Forensic Sci* 1993,38(3):677-685.



**ANNEXES**

## **Annexe 1 - Protocole d'observation de l'étude de reproductibilité des phases**

### **Etude variation inter et intra observateur dans l'examen macroscopique de l'extrémité sternale de la 4<sup>ème</sup> côte.**

L'étude de l'extrémité sternale de la 4<sup>ème</sup> côte pour déterminer l'âge au décès a été proposée par İşcan en 1983.

Cette méthode repose sur la description de 3 composants :

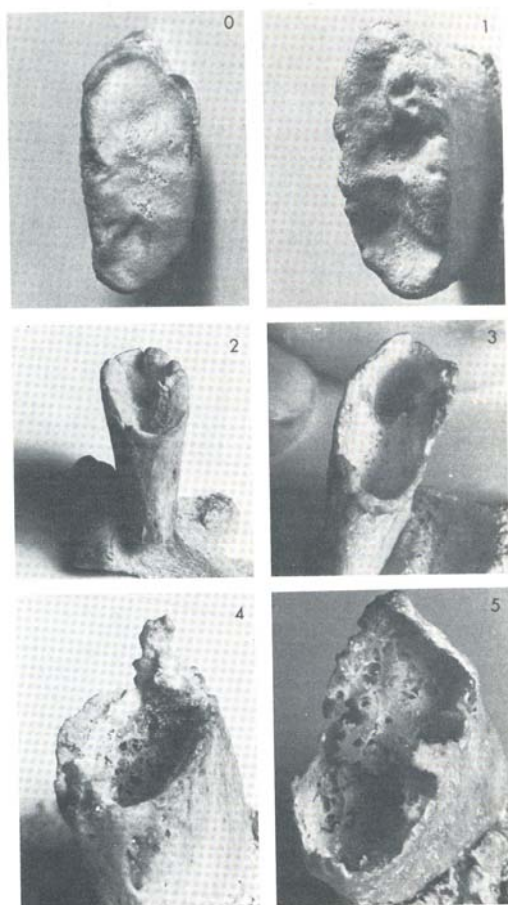
1. la profondeur de la dépression articulaire,
2. la forme de la dépression articulaire,
3. la description du mur (*bordure de l'articulation*) et de son bord

Pour chacun desquels l'auteur a décrit 6 stades.

Au cours de cette manipulation vous évalueriez à deux reprises (à 15 jours d'intervalle) le stade évolutif des trois composants décrits par İşcan sur 59 côtes, en suivant le protocole suivant :

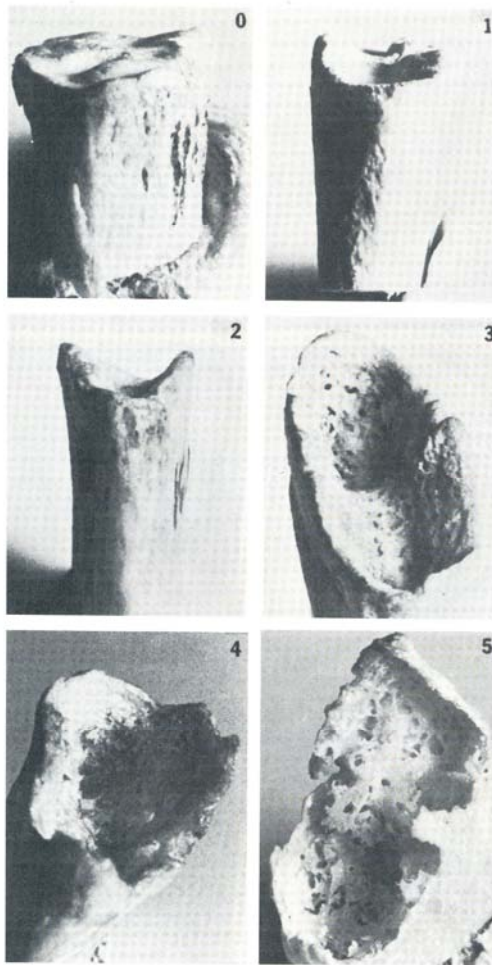
0. *évaluation du stade de chaque composant par comparaison aux photographies descriptives légendées de l'article de référence*
1. *report du résultat de l'observation sur un tableau*
  - I. *pour le composant 1 : mesure en mm ;*
  - II. *pour les composants 2 et 3*
    - i. *le stade ou les deux entre lesquels vous hésitez*
    - ii. *aucune réponse lorsque vous hésitez entre plus de 2 stades*

**Composant 1 : profondeur de la dépression**  
(mesurée par rapport au bord où elle est maximum)



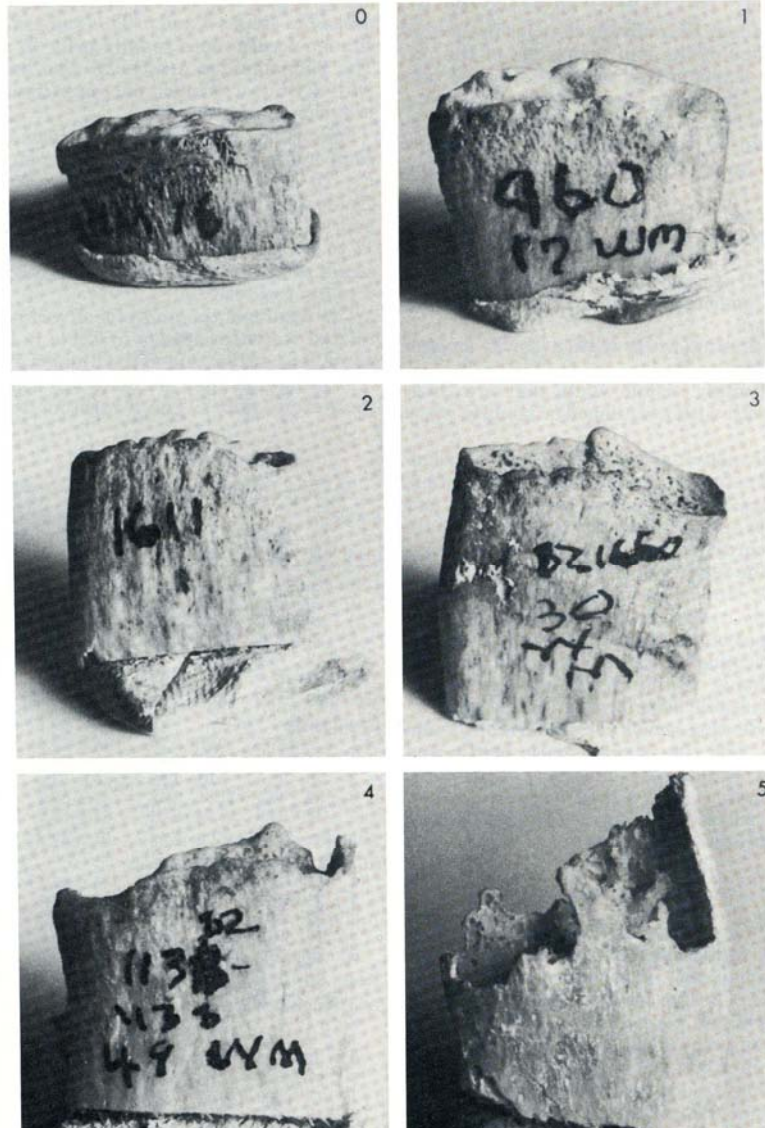
- (0) extrémité plate ou bombé, pas de dépression de plus de 1.1 mm,
- (1) dépression de 1.1 à 2.5 mm,
- (2) dépression de 2.6 à 4.5 mm,
- (3) dépression de 4.6 à 7.0 mm,
- (4) dépression de 7.1 à 10 mm,
- (5) dépression  $\geq$  10.1 mm

## Composant 2 : forme de la dépression



(0) Extrémité plate ou bombé, (1) Dépression peu profonde sans forme, (2) Forme de V avec murs assez épais, (3) Forme de U étroit avec murs assez épais, (4) U large avec murs fins, (5) Plein U profond, plus fragile et pauvre en texture avec quelques désintégrations de l'os.

### Composant 3 : forme des bords et des murs



- (0) Bords réguliers, absence de mur,
- (1) Mur débutant avec bord épais, lisse et régulier,
- (2) Mur épais et lisse, avec un bord érodé ou fin onduleux,
- (3) Phase transitoire entre la régularité du stage 2 et l'irrégularité du stage 4. Le bord irrégulier a disparu et les murs sont devenus fins. Murs moyennement robustes sans détérioration significative dans la texture de l'os,
- (4) Le bord est devenu aigu et a augmenté avec des projections osseuses souvent prononcées au niveau crânial et caudal. Les murs montrent plus d'amincissement et moins de robustesse avec des détériorations notables de la texture de l'os,
- (5) La texture montre une friabilité extrême et une porosité. Le bord est très mince, fragile et très irrégulier avec de longues projections osseuses. Occasionnellement comme la profondeur de la dépression augmente des fenêtres de formes dans les zones où le mur n'est pas complet.

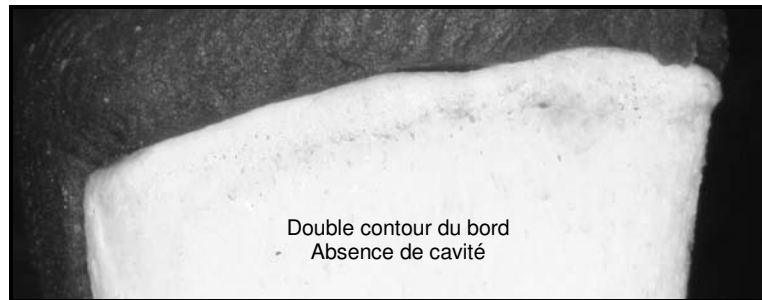
**OBSERVATEUR N°:**  
**N° pied-à-coulisse :**

Côtes	Composant 1 (mm)	Composant 2	Composant 3
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			
41			
42			
43			
44			
45			
46			
47			
48			
49			
50			
51			
52			
53			
54			
55			
56			
57			
58			
59			

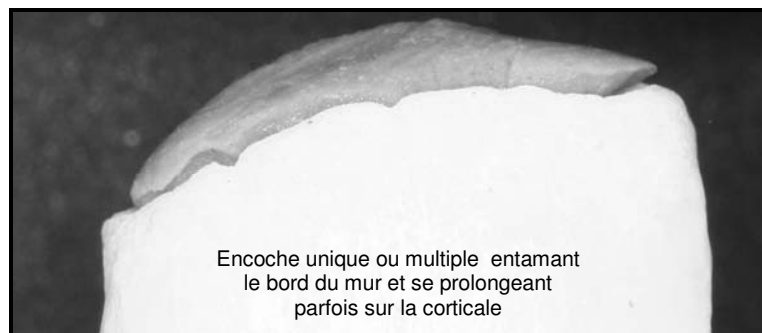
**Annexe 2. DVD des photographies des côtes de l'étude  
descriptive**

## **Annexe 3. Photographies des morpho phénotypes identifiés visuellement**

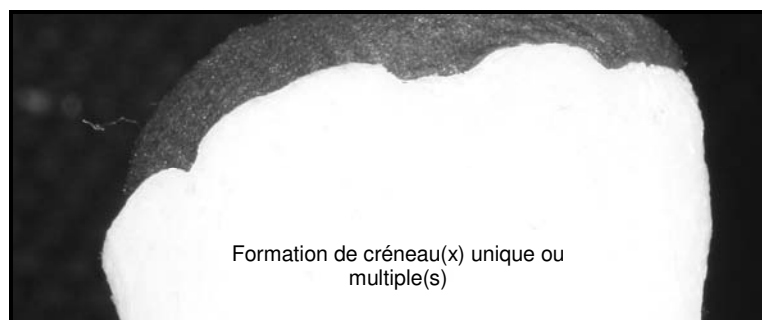
**Type 1**



**Type 2**

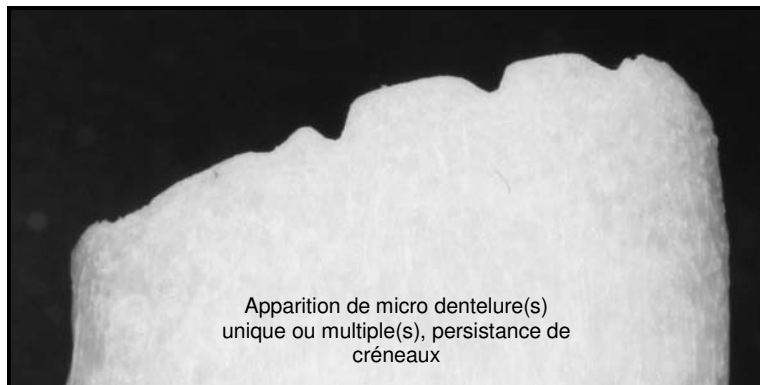


**Type 3**





## Type 4



## Type 5



## Type 6



### Type 7



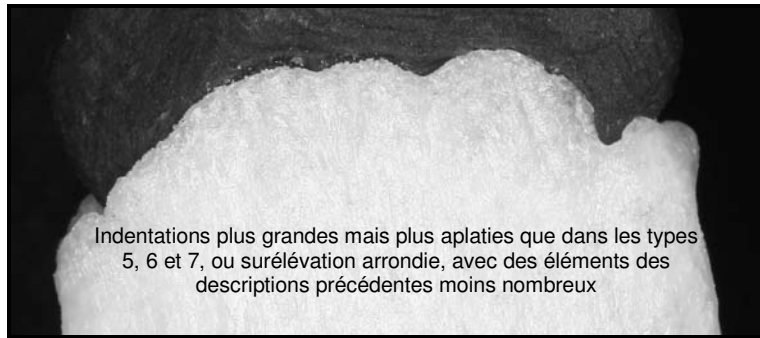
### Type 8



### Type 9



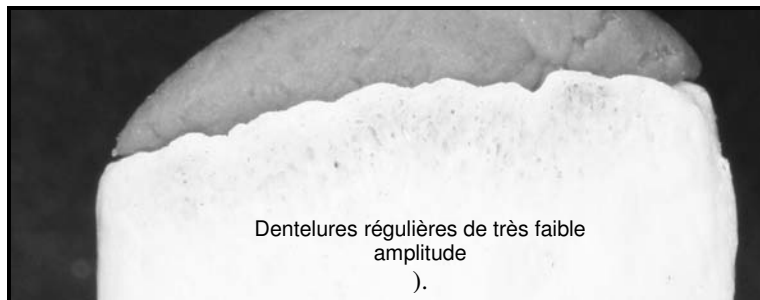
## Type 10



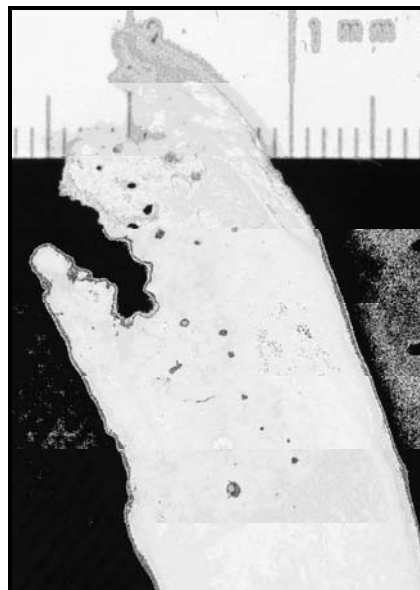
## Type 11

Ne répondent à aucune forme = atypique

## Type 12

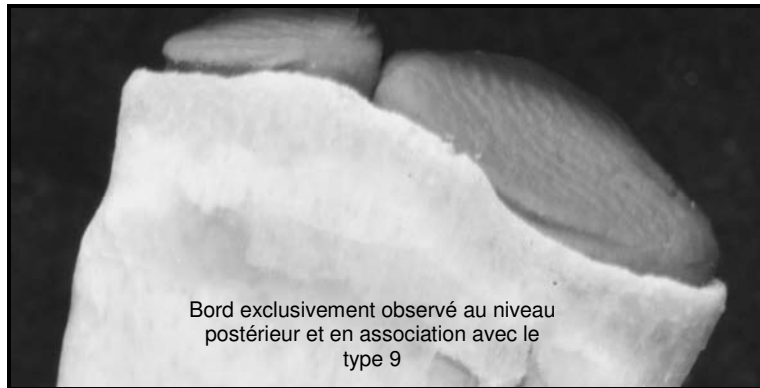


## Type 13

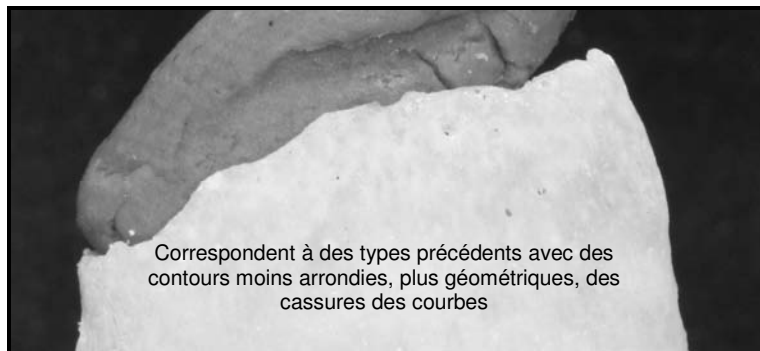


Comblement des espaces entre les projections caudales par du tissu osseux paraissant correspondre à une ossification du cartilage

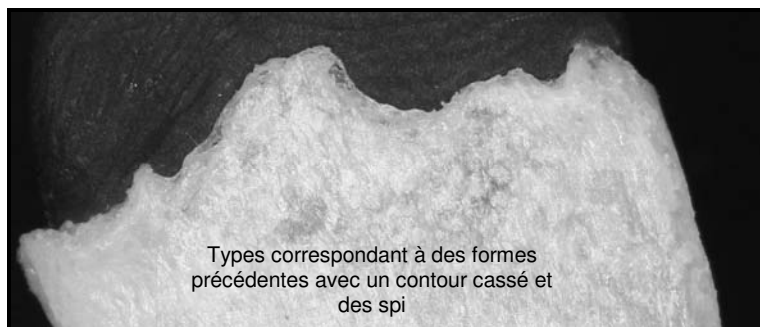
### Type 14



### Type 15



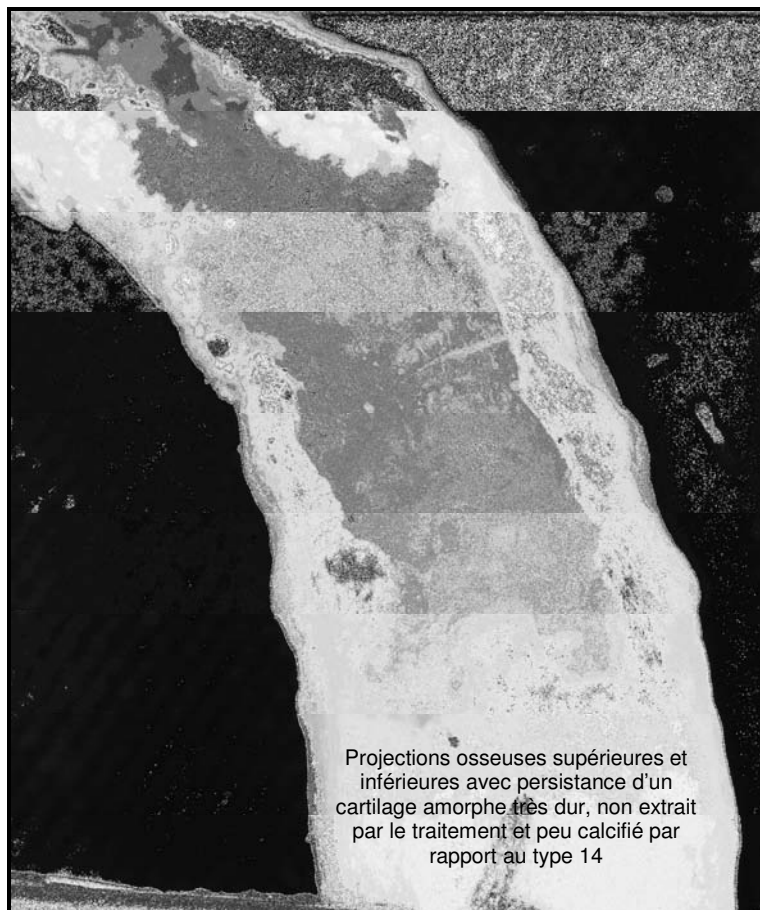
### Type 16



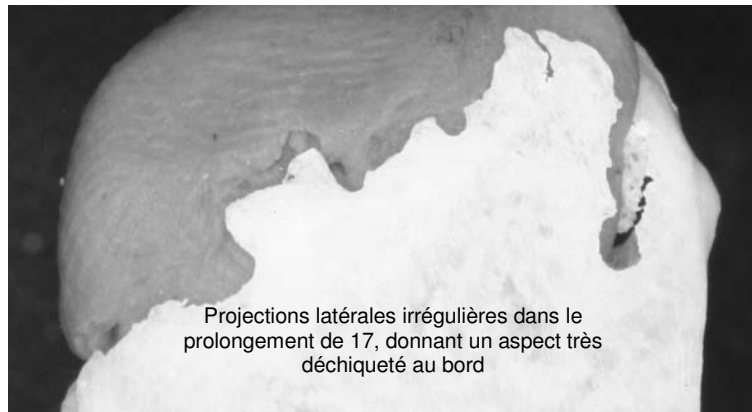
## Type 17



## Type 18



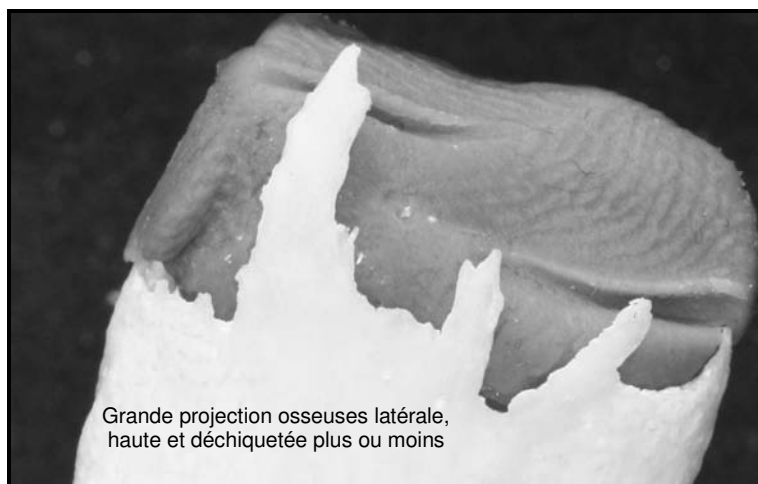
### Type 19



### Type 20



### Type 21



## Type 22



Fusion de projection caudale avec projections latérale de type 22

## Type 23



Cavité entre projections caudales remplie par cartilage ossifié central compact et par du cartilage ossifié plus compact et friable à l'extérieur

## TITLE

Estimation of age at death by examination of the sternal end of the 4<sup>th</sup> rib

### SUMMARY

Ten observers estimated the quality of the observation of the variables on which is based the İşcan's method on a sample of 59 4<sup>th</sup> ribs harvested from males. Results showed poor reproducibility and repeatability for all three variables (Wilcoxon test,  $\kappa$ -coefficient) and revealed problems in the method. A geometrical and harmonic mathematical analysis (Fast Fourier Transform, Fourier's descriptors) and visual description was then provided on a sample of 415 4<sup>th</sup> ribs harvested from males. Then new objectivised variables allowed to clarify the metamorphosis of the 4<sup>th</sup> rib with the age and to give the bases for a new method.



**AUTEUR** : Laurent FANTON

**TITRE** : Estimation de l'âge à partir de la 4<sup>ième</sup> côte

**DIRECTEUR DE THESE** : P<sup>r</sup> Norbert TELMON

**LIEU ET DATE DE SOUTENANCE** : TOULOUSE le

---

## **RESUME**

Dix observateurs ont évalué à la qualité de l'observation des variables sur lesquelles est fondée la méthode d'Isca sur un échantillon de 59 4<sup>ième</sup> côtes droites de sujets masculins. Les résultats ont montré une pauvre reproductibilité et répétabilité de leur observation (test de Wilcoxon, coefficient  $\kappa$ ) et mis en évidence les problèmes de la méthode. Une analyse mathématique géométrique et harmonique (FFT, descripteurs de Fourier), ainsi qu'une sériation visuelle ont ensuite été réalisées sur un échantillon de 415 4<sup>ième</sup> côtes de sujets masculins. Les nouvelles variables objectivées ont permis de préciser la métamorphose de la 4<sup>ième</sup> côte avec l'âge et de poser les bases d'une nouvelle méthode.

---

## **MOTS-CLES**

4<sup>ième</sup> côte – Analyse géométrique – Fast Fourier Transform – Descripteur de Fourier – Estimation de l'âge

---

**DISCIPLINE** : anthropobiologie

---

**LABORATOIRE DE RATTACHEMENT** : AMIS CNRS/UPS FRE2960 37

allée Jules Guesde Faculté de Médecine 31073 Toulouse cedex 3