



# 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 *Fabrice DEDOUIT*  
Le 06 Mai 2009

Titre :

« **IMAGERIE EN COUPE ET ANTHROPOBIOLOGIE :**  
**APPLICATIONS MÉDICO-LÉGALES**  
**POUR LA DÉTERMINATION DE L'ÂGE** »

---

### JURY

Mr le Pr. Gérald QUATREHOMME (*Professeur des Universités*), Rapporteur, Toulouse  
Mr le Pr. Michel SIGNOLI (*Directeur de Recherche*), Rapporteur, Marseille  
Mr le Pr. Georges LEONETTI (*Professeur des Universités*), Marseille  
Mr le Pr. Didier GOSSET (*Professeur des Universités*), Lille  
Mr le Pr Eric CRUBEZY (*Professeur des Universités*), Toulouse  
Mr le Pr Daniel ROUGE (*Professeur des Universités*), Toulouse  
Mr le Pr Francis JOFFRE (*Professeur des Universités*), Toulouse  
Mr le Pr Hervé ROUSSEAU (*Professeur des Universités*), Toulouse

---

**Ecole doctorale :** *Ecole Doctorale Biologie - Santé - Biotechnologies de Toulouse*

**Unité de recherche :** *Laboratoire d'Anthropobiologie AMIS, FRE 2960*

**Directeur(s) de Thèse :** *Professeur Norbert TELMON (Professeur des Universités), Toulouse*

# Remerciements

---

*Nos remerciements vont en tout premier lieu à notre jury*

**Monsieur le Doyen Daniel ROUGE**, Professeur de Médecine Légale et Droit de la Santé à la Faculté de Médecine de Toulouse, Université Paul Sabatier, Directeur Adjoint du laboratoire AMIS FRE 2960.

Vous êtes mon Maître en Médecine Légale. Mes remerciements sont multiples et s'adressent à l'Enseignant, au Chef de Service, à l'Expert Judiciaire, au Médecin Légiste et à l'Anthropologue. Soyez assuré de ma reconnaissance et de ma profonde gratitude.

**Monsieur Francis JOFFRE**, Professeur en Imagerie Médicale et Radiodiagnostic à la Faculté de Médecine de Toulouse, Université Paul Sabatier.

Vous êtes mon Maître en Imagerie Médicale. Vos qualités humaines, la clarté et la rigueur de votre enseignement resteront pour nous un exemple. Veuillez trouver ici l'expression de notre gratitude et de notre profond respect.

**Monsieur Eric CRUBEZY**, Professeur d'Anthropologie, Université Paul Sabatier, Directeur du laboratoire AMIS FRE 2960.

Vous êtes mon Maître en Anthropobiologie. Vous m'avez permis de découvrir l'anthropobiologie au cours d'un Master 2 Recherche. Je tiens à vous remercier d'avoir accepté de juger ce travail.

**Monsieur Hervé ROUSSEAU**, Professeur de Professeur en Imagerie Médicale et Radiodiagnostic à la Faculté de Médecine de Toulouse, Université Paul Sabatier.

Nous sommes très sensibles à l'honneur que vous nous faites en acceptant de juger ce travail.

Monsieur **Michel SIGNOLI**, Directeur de Recherche et Directeur de l'UMR 6578, Université de la Méditerranée.

Je tiens à vous remercier d'avoir accepté de juger ce travail et d'en être l'un des rapporteurs. Votre regard de Scientifique et d'Anthropologue est pour moi un honneur. Veuillez trouver ici l'expression de mes sentiments les plus respectueux.

Monsieur **Gérald QUATREHOMME**, Professeur de Médecine Légale et de Droit de la Santé à la Faculté de Médecine de Nice, Université Sofia Antipolis.

Je tiens à vous remercier d'avoir accepté de juger ce travail et d'en être l'un des rapporteurs. Votre regard de Médecin légiste et d'Expert en Anthropologie Médico-légale est pour moi un privilège. Vos critiques me permettront d'orienter et de mieux construire mes recherches futures. Veuillez trouver ici l'expression de notre sincère reconnaissance.

Monsieur **Georges LEONETTI**, Professeur de Médecine Légale et Droit de la Santé à la Faculté de Médecine de Marseille, Université de la Méditerranée.

Je tiens à vous remercier d'avoir accepté de juger ce travail. Veuillez trouver ici l'expression de mes sentiments les plus respectueux.

**Monsieur Didier GOSSET**, Professeur de Médecine Légale et Droit de la Santé à la Faculté de Médecine de Lille, Université Henri Warembourg.

Vous avez été mon Chef de Service en Médecine Légale durant une année. Je tiens à vous remercier d'avoir accepté de juger ce travail. Veuillez trouver ici l'expression de ma reconnaissance et de mon plus profond respect.

*Mais également à*

**Monsieur Norbert TELMON**, Professeur de Médecine Légale et Droit de la Santé à la Faculté de Médecine de Toulouse, Université Paul Sabatier.

Mes raisons pour vous remercier sont nombreuses et cette liste ne peut donc pas être exhaustive. Je tiens toutefois à vous adresser toute ma gratitude pour m'avoir constamment soutenu et guidé dans cette recherche doctorale. Vos conseils, votre maîtrise de l'outil statistique et de l'anthropobiologie ont été des aides plus que précieuses, sans lesquelles ce travail n'aurait pas pu aboutir. Veuillez trouver ici l'expression de ma reconnaissance et de mon plus profond respect.

*Nos remerciements vont ensuite*

A Bénédicte,

A mes parents,

A ma famille, passée, présente et future

A mes amis,

A tous mes proches,

A mes Maîtres,

A mes enseignants,

A mes collègues, d'ici et d'ailleurs,

A mes étudiants (?).



# Sommaire

---

<b><i>Préambule</i></b>	<b>1</b>
<b><i>Première partie : Introduction générale</i></b>	
<b>Chapitre 1 : La détermination de l'âge dans le cadre de l'identification des personnes</b>	<b>8</b>
1.1. Les problèmes généraux liés à l'identification des personnes	8
1.2. Les techniques classiques permettant la détermination de l'âge d'un individu vivant ou décédé	10
1.2.1. Chez l'enfant et l'adolescent	12
1.2.2. Chez l'adulte de moins de 60 ans	13
1.2.3. Chez le sujet âgé	15
1.3. Une nouvelle voie de recherche concernant la détermination de l'âge des individus ?	15
<b>Chapitre 2 : Tomodensitométrie et techniques de post traitement</b>	<b>17</b>
2.1. Tomodensitométrie hélicoïdale et reconstruction en rendu de volume : bases physiques	17
2.1.1. Acquisition	17
2.1.2. Reconstruction de l'image	17
2.1.3. Evolutions technologiques : mode hélicoïdal et acquisition volumique, technologie multidétecteurs	18
2.1.4. Post traitement : reconstructions tridimensionnelles	18
<b>Chapitre 3 : Imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) : bases physiques</b>	<b>22</b>
3.1. Principe de l'IRM	22
3.2. Rappels techniques	24
3.2.1. La relaxation longitudinale (T1)	24
3.2.2. La relaxation transversale (T2)	24
3.2.3. Encodage spatial grâce aux gradients	25
3.2.4. Les pondérations	25
3.2.4.1. Pondération T1	26
3.2.4.2. Pondération T2	26
3.2.4.3. Densité protonique	26

3.2.5.	Les séquences	27
3.2.5.1.	Echo de Spin ou séquence Spin Echo	27
3.2.5.2.	Séquences Turbo Spin Echo et Fast Spin Echo	27
3.2.5.3.	Inversion-Récupération	27
3.2.5.4.	Séquence Short Time of Inversion Recovery (STIR)	27
3.2.5.5.	Séquence en Écho de Gradient ou Gradient de diffusion	28
3.2.5.6.	Séquence saturation des graisses	28

## ***Deuxième partie : Imagerie en coupe et anthropologie*** 29

---

### **Chapitre 1 : La première côte droite** 31

1.1.	Description de la méthode développée par Kunos et ses collègues (Kunos <i>et al.</i> , 1999)	31
1.1.1.	Population non adulte	32
1.1.1.1.	Méthodologie utilisée par Kunos	32
1.1.1.2.	Résultats de l'étude de Kunos	32
1.1.2.	Population adulte	33
1.1.2.1.	Modifications morphologiques de l'extrémité sternale	34
1.1.2.2.	Autres modifications morphologiques de la première côte	34
1.2.	Matériel	38
1.2.1.	Echantillon d'étude	38
1.2.2.	Protocole d'imagerie	38
1.2.2.1.	Paramètres d'acquisition	38
1.2.2.2.	Paramètres du post traitement des images	39
1.3.	Méthodes	39
1.3.1.	Méthodes de codage	39
1.3.1.1.	Etude tridimensionnelle	39
1.3.1.2.	Etude bidimensionnelle	41
1.4.	Méthode d'analyse statistique	43
1.5.	Résultats	44
1.5.1.	Variabilités intra et inter-observateur	44
1.5.1.1.	Etude tridimensionnelle	44
1.5.1.2.	Etude bidimensionnelle	44
1.5.2.	Etude tridimensionnelle	44
1.5.2.1.	Etude tridimensionnelle et corrélation avec l'âge	44
1.5.2.2.	Etude tridimensionnelle et corrélation avec le sexe	45
1.5.3.	Etude bidimensionnelle	46
1.5.3.1.	Etude bidimensionnelle et corrélation avec l'âge	46
1.5.3.2.	Etude bidimensionnelle et corrélation avec le sexe	47
1.6.	Discussion sur l'intérêt de l'utilisation de l'imagerie dans l'estimation de l'âge par l'étude de la première côte droite	48
1.6.1.	La méthode de Kunos	48
1.6.2.	Première côte droite et tomographie multiscoupe	49

1.6.2.1.	Première côte droite et reconstructions tridimensionnelles	50
1.6.2.2.	Première côte droite et reconstructions bidimensionnelles	50
<b>Chapitre 2 : La quatrième côte droite</b>		<b>52</b>
2.1.	Description de la méthode développée par Iscan et ses collègues	52
2.1.1.	La méthode sur des populations caucasoïdes	52
2.1.2.	Des différences inter ethniques de maturation de l'extrémité sternale de la quatrième côte droite existent t'elles?	56
2.2.	Matériel	58
2.2.1.	Echantillon d'étude	58
2.2.2.	Protocole d'imagerie	59
2.2.2.1.	Paramètres d'acquisition tomодensitométrique	59
2.2.2.2.	Paramètres du post traitement des images	60
2.2.3.	Préparation des côtes après examen tomодensitométrique	60
2.3.	Méthodes	60
2.3.1.	Méthode de codage	60
2.3.2.	Méthodes d'analyse statistique	61
2.4.	Résultats	62
2.4.1.	Variabilité intra-observateur	62
2.4.1.1.	Sur os secs	62
2.4.1.2.	Sur les reconstructions tomодensitométriques	63
2.4.2.	Variabilité inter-observateur	64
2.4.2.1.1.	Codage sur l'os sec	64
2.4.2.1.2.	Codage d'après les reconstructions tomодensitométriques	65
2.4.3.	Erreur inter-méthode	66
2.4.3.1.1.	Pour l'observateur n° 1	66
2.4.3.1.2.	Pour l'observateur n° 2	69
2.4.4.	Performance opérationnelle	70
2.5.	Discussion sur l'intérêt de l'utilisation de l'imagerie tridimensionnelle dans l'estimation de l'âge par la méthode Iscan	75
2.5.1.	La méthode d'Iscan	75
2.5.2.	Les différentes variabilités de notre étude	76
2.5.3.	Les codages en tomодensitométrie	77
<b>Chapitre 3 : La surface auriculaire</b>		<b>78</b>
3.1.	Estimation de l'âge au décès basée sur les modifications morphologiques de la surface auriculaire : méthodes existantes	79
3.1.1.	Eléments anatomiques. Histologie des remaniements dégénératifs	79
3.1.2.	La méthode développée par Lovejoy et ses collègues	80
3.1.3.	La méthode de Buckberry et Chamberlain	82
3.1.4.	La méthode de Schmitt et Broqua	83
3.1.5.	Vieillessement de l'articulation sacro-iliaque : études radiologiques pré existantes	84
3.1.5.1.	Arthrose sacro-iliaque	85
3.1.5.2.	Pathologies de l'articulation sacro-iliaque	86
3.1.6.	Architecture de l'os trabéculaire de l'os coxal : organisation et intérêt	

potentiel dans l'estimation de l'âge au décès	86
<b>3.2. Matériel</b>	<b>90</b>
3.2.1. Echantillon d'étude	90
3.2.2. Paramètres d'acquisition tomодensitométrique	90
3.2.3. Paramètres du post traitement des images	91
<b>3.3. Méthodes</b>	<b>92</b>
3.3.3. Méthode de codage et de cotation : approche globale et définition des critères issus des méthodes ostéoscopiques « classiques »	92
3.3.3.1. Porosité	93
3.3.3.2. Texture	95
3.3.3.3. Organisation transverse	95
3.3.3.4. Manifestations dégénératives péri auriculaires	95
3.3.4. Méthode de codage : critères affectés par les modifications dégénératives de l'architecture de l'os trabéculaire	97
3.3.4.1. Visibilité du faisceau auriculo-acétabulaire	97
3.3.4.2. Gradient de densité de l'os trabéculaire	99
3.3.5. Méthode d'analyse statistique	99
<b>3.4. Résultats</b>	<b>101</b>
3.4.3. Les différentes variabilités de notre étude	101
3.4.3.1. Variabilité intra-observateur	101
3.4.3.2. Variabilité inter-observateur	101
3.4.3.3. Erreur inter-méthode	102
3.4.4. Résultats statistiques	103
3.4.5. Les scores globaux	105
<b>3.5. Discussion</b>	<b>108</b>
3.5.1. Discussion concernant les méthodes pré existantes d'estimation de l'âge au décès par l'étude de la surface auriculaire	109
3.5.1.1. La méthode de Lovejoy	109
3.5.1.2. La méthode de Chamberlain et Buckberry	109
3.5.2. Discussion concernant la transposition tomодensitométrique tridimensionnelle des critères issus de méthodes existantes	110
3.5.2.1. Organisation transverse	110
3.5.2.2. Microporosité	110
3.5.2.3. Macroporosité	111
3.5.2.4. Texture de surface	112
3.5.2.5. Activités apicales et rétro auriculaire	113
3.5.3. Recherche et évaluation de critères propres : architecture de l'os trabéculaire	113
3.5.3.1. Le faisceau auriculo-acétabulaire	113
3.5.3.2. Le gradient	114
3.5.4. Concordances et divergences des différentes modalités	115
3.5.5. Performance opérationnelle des scores globaux 3D et 2D	115

## **Chapitre 4 : La symphyse pubienne** **117**

<b>4.1. La symphyse pubienne en anthropologie</b>	<b>118</b>
4.1.1. Méthodes antérieures à celle de Suchey-Brooks	118
4.1.2. Description de la méthode développée par Suchey et Brooks	119
4.1.2.1. Principes de la méthode de Suchey et Brooks	119

4.1.2.2.	Description des six phases	121
4.1.3.	La symphyse pubienne en tomodynamométrie	124
4.2.	Matériel	125
4.2.1.	Echantillon d'étude	125
4.2.2.	Protocole d'imagerie	126
4.2.2.1.	Paramètres d'acquisition tomodynamométrique	127
4.2.2.2.	Paramètres du post traitement des images	127
4.2.3.	Préparation des symphyses pubiennes après examen tomodynamométrique	128
4.3.	Méthodes	128
4.3.1.	Méthode de codage	128
4.3.1.1.	Codage à partir des reconstructions tridimensionnelles	128
4.3.1.2.	Codage à partir des reconstructions bidimensionnelles	128
4.3.2.	Méthodes d'analyse statistique	129
4.4.	Résultats	129
4.4.1.	Etude tridimensionnelle	129
4.4.2.	Etude bidimensionnelle	131
4.5.	Discussion	138
4.5.1.	La méthode Suchey-Brooks	138
4.5.2.	L'étude tomodynamométrique de Telmon <i>et al.</i> (2005)	139
4.5.3.	Notre étude	140
4.5.3.1.	Etude tridimensionnelle	140
4.5.3.2.	Etude bidimensionnelle	142

## **Chapitre 5 : Les fusions métaphyso-épiphysaires fémoro-tibiales** 145

5.1.	Apports des études radiographiques de l'articulation fémoro-tibiale dans la détermination de l'âge d'un individu	145
5.1.1.	Versant physaire fémoral distal	146
5.1.2.	Versant physaire tibial proximal	147
5.2.	Matériel	147
5.2.1.	Population d'étude	147
5.2.2.	Protocole d'imagerie	148
5.3.	Méthodes	149
5.3.1.	Méthodes de codage	149
5.3.2.	Méthode d'analyse statistique	152
5.4.	Résultats	153
5.4.1.	Variabilités intra et inter-observateur	153
5.4.1.	Résultats statistiques	153
5.4.2.	Analyse transitionnelle	158
5.5.	Discussion	159
5.5.1.	L'atlas de Pyle et Hoerr	159
5.5.1.1.	Extrémité fémorale distale	159
5.5.1.2.	Extrémité tibiale proximale	160
5.5.2.	IRM et détermination de l'âge osseux	160
5.5.3.	Détermination de l'âge osseux d'un individu vivant par IRM du genou	161

## **Chapitre 1 : Applicabilité des méthodes d'imagerie en coupe concernant la détermination de l'âge chez le vivant** 165

<b>1.1.</b>	Les critères transposés de l'anthropologie physique à l'imagerie en coupe	<b>167</b>
1.1.1.	Discussion et limites de l'étude tomодensitométrique de la quatrième côte droite	<b>167</b>
1.1.2.	Discussion et limites de l'étude tomодensitométrique de la surface auriculaire	<b>169</b>
1.1.3.	Discussion et limites de l'étude tomодensitométrique de la symphyse pubienne	<b>172</b>
<b>1.2.</b>	Les critères propres à l'imagerie en coupe	<b>174</b>
1.2.1.	Discussion et limites de l'étude tomодensitométrique de la première côte droite	<b>174</b>
1.2.2.	Discussion et limites de l'étude tomодensitométrique de la surface auriculaire	<b>176</b>
1.2.3.	Discussion et limites de l'étude tomодensitométrique de la symphyse pubienne	<b>178</b>
1.2.4.	Discussion et limites de l'étude en imagerie par résonance magnétique tomодensitométrique des fusions métaphyso-épiphysaires fémoro-tibiales	<b>180</b>

## **Chapitre 2 : Etude tomодensitométrique en anthropologie médico-légale : illustration pratique de la détermination de l'âge d'individus non identifiés à partir de deux exemples** 182

<b>2.1.</b>	Autopsie virtuelle et identification médico-légale – Application pratique : à propos d'un cas contemporain	<b>183</b>
2.1.1.	Matériel et méthodes	<b>183</b>
2.1.1.1.	L'histoire du cas	<b>183</b>
2.1.1.2.	Protocole d'imagerie	<b>183</b>
2.1.1.3.	Etudes autopsique et anthropologique	<b>184</b>
2.1.2.	Résultats	<b>184</b>
2.1.2.1.	Anthropologie virtuelle	<b>184</b>
2.1.2.2.	Etude anthropologique sur os secs	<b>185</b>
2.1.3.	Epilogue : confirmation de l'identité	<b>185</b>
<b>2.2.</b>	Etude anthropologique virtuelle d'une momie naturelle sibérienne du XIX <sup>ème</sup> siècle	<b>187</b>
2.2.1.	Contexte de découverte de la momie - la momie et sa tombe	<b>187</b>
2.2.2.	Matériel et méthode	<b>188</b>
2.2.2.1.	Matériel	<b>188</b>
2.2.2.2.	Méthodes	<b>188</b>
2.2.3.	Résultats	<b>189</b>
2.2.3.1.	Etude tomодensitométrique : estimation de l'âge osseux	<b>189</b>
2.2.3.2.	Etude anthropologique sur os secs : détermination de l'âge osseux	<b>191</b>

<b>Chapitre 3 : Réflexions concernant la détermination de l'âge</b>	<b>195</b>
<b>3.1. Estimer l'âge au décès, un véritable casse-tête méthodologique !</b>	<b>195</b>
<b>3.1.1. Les limites des méthodes classiques</b>	<b>195</b>
<b>3.1.2. Une solution statistique ?</b>	<b>196</b>
<b>3.1.2.1. Différences entre la méthode statistique traditionnelle et l'approche bayésienne</b>	<b>196</b>
<b>3.1.2.2. Application à l'âge individuel</b>	<b>197</b>
<b>3.1.2.3. La vraisemblance maximale</b>	<b>197</b>
<b>3.2. Réflexion sur une approche multicritère de la détermination de l'âge au décès en imagerie</b>	<b>199</b>

<b><i>Conclusion</i></b>	<b>203</b>
--------------------------	------------

<b><i>Références bibliographiques</i></b>	<b>207</b>
---	------------

<b><i>Annexes</i></b>	<b>229</b>
-----------------------	------------



# Préambule

---

Les applications anthropologiques possibles en radiologie ne sont pas un phénomène récent. En effet, dès 1896, soit un an seulement après la première **radiographie** réalisée par Roentgen, des radiographies étaient effectuées au Muséum de Vienne sur une momie (Dedekind, 1896 ; Roentgen, 1895). Cette radiographie qui était un cliché de genoux en incidence de face se montrait particulièrement intéressante. Elle a en effet permis, sans retirer les bandelettes recouvrant la momie et sans risque d'altérer cette dernière, de déterminer de par l'aspect radiographique des physes fémorales distales et tibiales proximales qu'il s'agissait d'un sujet dont la croissance osseuse n'était pas achevée, probablement un adulte jeune ou un adolescent. Des signes manifestes d'immaturité osseuse sous la forme de persistance des cartilages de conjugaison et d'absence de fusion métaphyso-épiphysaire des os concernés étaient en effet visibles. L'intérêt de cette technique radiographique en anthropologie, notamment son caractère non invasif, pratiquée sur des sujets dont l'intégrité physique devait être préservée au maximum était donc très précocement démontrée. Dans les années qui ont suivies cette radiographie, de nombreuses autres radiographies ont été effectuées sur des fragments de membres momifiés ou sur des momies intègres. Le tableau n° P-1 résume les études radiologiques précoces, dans les dix années seulement qui ont suivi la découverte des rayons de Roentgen, appelés par la suite rayons X. Rapidement, ces radiographies ont également été utilisées afin de déterminer, lorsque cela était possible, le sexe et l'âge des individus radiographiés (Fawcitt *et al.*, 1984). De la même façon, la détermination du morphotype et l'utilisation de points craniométriques étaient par la suite effectuées et utilisés comme caractères discrets pour déterminer des liens de parenté entre différents individus (Harris et Wente, 1980).

La **tomodensitométrie** (TDM) appelée également scanner ou CT-scan, technique radiologique plus récente, a été mise au point par Hounsfield en 1973 (Hounsfield, 1973). Pourtant, dès 1976, elle était utilisée sur le cerveau momifié et bien préservé d'un enfant de 14 ans, mort 3200 ans plus tôt (Lewin et Harwood-Nash, 1977 a ; 1977 b).

**Tableau n° P-1 - Etudes radiographiques anthropologiques effectuées de 1896 à 1905.**

Auteur	Année d'étude	Sujet d'étude	Ville et pays de réalisation de l'étude
Koenig	1896	Momies égyptiennes humaines et chats	Francfort, Allemagne
Holland	1896	Momie d'oiseau	Liverpool, Grande-Bretagne
Dedekind	1896	Momies égyptiennes	Vienne, Autriche
Londe	1897	Momies égyptiennes Fausses momies	Paris, France
Culin et Leonard	1898	Momies péruviennes	Philadelphie, Etats-Unis
Petrie	1898	Momies égyptiennes	Londre, Grande-Bretagne
Gorjanovic-Kramberger	1901	Fossile hominidé	Vienne, Autriche
Gardiner	1904	Momies égyptiennes	Londre, Grande-Bretagne
Albers-Schoenberg	1905	Momies égyptiennes	Hambourg, Allemagne

Par la suite, les différentes évolutions technologiques de la tomodynamométrie ont également été mises à contribution pour de nombreuses utilisations anthropologiques. Ainsi, les appareils utilisés pour effectuer des examens tomodynamométriques à visée anthropologique sur différentes momies étaient en phase avec la technologie de leur époque de réalisation : les scanners séquentiels ont fait place aux scanners spiralés monocoupes puis aux scanners spiralés multicoupes ou multibarrettes. La mise au point de consoles de reconstruction, permettant un post traitement des images axiales natives a également considérablement modifié les possibilités de reconstructions et d'illustration des cas étudiés. Le tableau n° P-2 résume les études tomodynamométriques importantes dans le domaine de l'anthropologie. La littérature abonde d'articles illustrant les possibilités de l'imagerie en anthropologie mais le plus souvent pour une application bien particulière qui est celle de l'étude des momies. Cependant, l'analyse de ces articles ne permet pas pour la plupart, de déterminer comment les images ont en pratique été utilisées dans un but anthropologique. Ainsi, les images sont certes belles et esthétiques sur un plan strictement iconographique mais n'apportent que peu d'éléments diagnostiques concernant notamment les modalités de détermination de l'affinité populationnelle, du sexe, de l'évaluation de l'âge au décès et de la stature des individus

étudiés. Chhem a popularisé ces applications radiologiques sur des momies et des fossiles par la création d'une nouvelle discipline radiologique : la **paléo-radiologie** (Chhem et Brothwell, 2008). Cette application radiologique particulière permet ainsi l'étude de restes fossiles et contemporains, animaux et humains, dans différents buts, notamment paléo-pathologique.

Enfin, il est important de noter également l'introduction très récente du micro-scanner en anthropologie pour l'étude de momies, dès 2004 (Mc Erlain *et al.*, 2007). Cette technique d'imagerie très prometteuse, qui permet la réalisation de coupes tomodensitométriques plus fines que les scanners cliniques, n'en est encore qu'à ses débuts dans ses applications anthropologiques.

**Tableau n° P-2 - Etudes tomodensitométriques anthropologiques importantes effectuées depuis 1977 à nos jours sur des momies (modifié d'après Chhem et Brothwell, 2008).**

Auteur	Année d'étude	Structure étudiée
Lewin et Harwood-Nash	1977	Cerveau
Harwood-Nash	1979	Corps entier
Marx et D'Auria	1988	Reconstructions tridimensionnelles crâniennes et faciales
Magid <i>et al.</i>	1989	Reconstructions tridimensionnelles d'un squelette complet
Nedden <i>et al.</i>	1994	Réalisation d'une stéréolithographie crânio-faciale de momie
Yardley et Rutka	1997	Exploration oto-rhino-pharyngologique
Melcher <i>et al.</i>	1997	Reconstructions dentaires
Hoffman <i>et al.</i>	2002	Endoscopie virtuelle
Ruhli <i>et al.</i>	2002	Biopsies guidées sous TDM
Cesareni <i>et al.</i>	2003	Retrait virtuel des bandelettes
Mc Erlain <i>et al.</i>	2007	Micro-scanner cérébral

L'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) est une technique radiologique encore plus récente que la tomodensitométrie. Les premières images de tissus humains seront produites en 1975 ; en 1977 sera réalisée la première image d'un corps humain vivant par Damadian (Damadian *et al.*, 1977 ; Grannell et Mansfield, 1975). Comme il sera précisé par la suite (cf. première partie, chapitre 3), les protons et par conséquent les molécules d'eau sont nécessaires à l'obtention d'un signal en IRM (Kastler *et al.*, 2006). L'obtention de ce signal et donc d'une image est l'un des problèmes majeurs de cette technique pour une éventuelle utilisation anthropologique, notamment sur des momies, qui, par nature, sont composées de tissus déshydratés.

La première tentative d'utilisation de l'IRM sur un spécimen de momie égyptienne a été effectuée en 1983 (Notman *et al.*, 1986). Malgré la multitude des séquences réalisées, cette tentative s'est soldée par un échec et aucune image ou donnée ne se révélait utilisable.

La première obtention d'image IRM en anthropologie eu lieu en 1986 suite à l'examen en IRM d'une momie péruvienne naturelle d'enfant (Piepenbrink *et al.*, 1986). L'étude IRM s'était focalisée sur un avant-bras et un pied de cet enfant. Les pièces explorées avaient au préalable bénéficié pendant 18 jours d'une réhydratation à base de solution aqueuse et d'acétone à 20 %, une précédente tentative sans réhydratation étant restée infructueuse. Même si les auteurs concluent par le fait que cette technique est très prometteuse, cette phase de réhydratation apparaît tout de même invasive pour l'ensemble de la communauté scientifique. De plus, le signal et le contraste obtenus, donc l'image, ne sont dans ces conditions que la représentation de la diffusion des molécules d'eau au sein des parties molles, n'apportant pas d'information concernant la structure interne de l'élément étudié, avec de plus, un mauvais rapport signal sur bruit.

En 1986, une IRM de restes cérébraux de 8000 ans d'ancienneté était réalisable du fait d'un environnement aqueux favorable à la persistance de l'hydratation des tissus cérébraux (Doran *et al.*, 1986).

Il faut attendre 2007 pour des résultats plus probants (Karlik *et al.*, 2007 ; Rühli *et al.*, 2007). Ainsi Karlik étudiait en spectro-IRM et en IRM un cerveau de momie d'un enfant égyptien de 15 ans mort 3200 ans auparavant, qui présentait un état d'adipocire. Rühli *et al.* présentaient les images obtenues par IRM des fragments d'une momie artificielle égyptienne (extrémité céphalique, deux mains et un pied) et d'une momie naturelle péruvienne, sans réhydratation. Les examens étaient effectués sur un appareil clinique de 1.5 teslas avec l'utilisation d'une séquence tridimensionnelle à temps d'écho très court. Il était possible de différencier au plan osseux l'os spongieux et l'os cortical, les tissus à haut taux de collagène, les artères, les ligaments, la moelle osseuse, les méninges et les dents. Les temps de relaxation des tissus momifiés étaient très courts, généralement inférieurs à 1 milliseconde. Les auteurs indiquaient que cette technique donnerait accès à des informations quantitatives mais également qualitatives et qu'une analyse sur les substances chimiques utilisées au cours de la momification serait ultérieurement possible. Il faut cependant noter que l'utilisation anthropologique de l'IRM, même si elle représente une gageure technologique, est pour l'instant marginale parmi les techniques d'imagerie disponibles en anthropologie.

Ce travail de thèse s'est intégré dans le cadre précédemment décrit de **paléoradiologie**. Son but était **d'évaluer** d'une part, et de **valider** d'autre part les possibilités offertes par l'imagerie en coupe dans le domaine de **l'estimation de l'âge d'individus vivants** ou **de l'estimation de l'âge au décès**. Ce travail a ainsi porté sur l'étude d'individus vivants et de pièces osseuses préparées (os secs). Pour ce faire, plusieurs moyens d'imagerie ont été utilisés : la **tomodensitométrie multicoupe** et **l'imagerie par résonance magnétique**.

Ce travail était en premier lieu basé sur la **transposition** en tomodensitométrie de critères ostéoscopiques utilisés en anthropologie physique lorsqu'une problématique de détermination d'âge au décès d'un individu non identifié vient à se poser, ainsi que la **validation** de ces critères. Parallèlement à ce premier travail, des **critères propres à l'imagerie** ont également été recherchés en imagerie en coupe, que cela soit en tomodensitométrie mais également en IRM. Ils ont ensuite été testés et validés.

Plusieurs éléments anatomiques ont été retenus pour ce travail : les **premières** et **quatrièmes côtes droites**, l'os coxal par l'étude de la **surface auriculaire** et de la **symphyse pubienne**, et enfin **l'articulation fémoro-tibiale**.

Cette thèse se décompose en **trois parties** :

- La **première partie**, appelée « *Introduction générale* » sera un rappel indispensable des possibilités de détermination de l'âge d'individus inconnus dans le cadre de procédures d'identification, qu'ils soient vivants ou morts mais également des techniques tomodensitométriques et IRM, pour une meilleure lecture et compréhension de la deuxième partie de cette thèse.

- La **deuxième partie**, appelée « *Imagerie en coupe et anthropologie* », sera une étude tomodensitométrique de, successivement, la **première côte droite**, la **quatrième côte droite**, la **surface auriculaire** et la **symphyse pubienne**. Elle sera suivie par une étude IRM des **fusions métaphyso-épiphysaires fémoro-tibiales**. L'ensemble de ces éléments anatomiques ont été étudié afin de déterminer leur apport respectif possible dans une problématique de détermination de l'âge d'un individu, qu'il soit vivant ou décédé.

Chacune de ces études osseuses sera présentée sous la forme d'un chapitre qui comportera les items suivants :

- Place de cet élément anatomique en anthropologie physique,
- Matériels,
- Méthodes,

- Résultats,
  - Discussion.
- La **troisième partie** sera la « *Discussion générale* », qui s'articulera autour des chapitres suivants :
- L'applicabilité des méthodes décrites dans la deuxième partie chez le vivant,
  - Deux illustrations pratiques de la détermination de l'âge au décès d'individus non identifiés :
    - un exemple médico-légal d'étude tomодensitométrique à visée anthropologique d'un individu contemporain,
    - un exemple d'étude tomодensitométrique à visée anthropologique d'une momie naturelle sibérienne du XIX<sup>ème</sup> siècle,
  - Une réflexion sur la détermination de l'âge et une possible approche multicritère de la détermination de l'âge d'individus non identifiés en imagerie en coupe.

Dans cette thèse, l'estimation de l'âge d'un individu par les techniques odontologiques ou par l'apport possible de l'étude en imagerie en coupe de l'extrémité céphalique ne sera pas traitée. De même, l'étude des différents points d'ossifications secondaires et de la chronologie de leur fusion, utile pour déterminer l'âge au décès de nouveau-nés ou d'enfants ne sera pas développée.

# Première partie

---

## *Introduction générale*

# Chapitre 1

## La détermination de l'âge dans le cadre de l'identification des personnes

---

### 1.1. Les problèmes généraux liés à l'identification des personnes

L'identification d'un individu constitue une part importante de la médecine légale (Beauthier, 2007). Elle est fondamentale non seulement sur le plan humain, mais également sur le plan administratif et juridique (Laborier, 2002 ; Miras *et al.*, 1998). Elle peut être demandée par les autorités judiciaires, en matière criminelle ou civile. L'identification correspond à l'une des approches médico-légales et anthropologiques les plus difficiles qui soient (Miras *et al.*, 1998). Tout doit donc être mis en œuvre pour aboutir au mieux à cette identification, notamment face aux situations de catastrophe de masse (Lunetta *et al.*, 2003 ; Poisson *et al.*, 2003) ou d'élimination à caractère génocidaire (Beauthier *et al.*, 2000). C'est pour ces raisons que l'anthropologie médico-légale a été créée (Cattaneo et Baccino, 2002). Cette discipline est bien évidemment très proche de l'anthropologie physique mais s'en écarte quelque peu par cette caractéristique particulière qu'est l'aboutissement de l'identification (Beauthier, 2007). L'anthropologue physique s'attache à démontrer, lors de la découverte d'un squelette, son ancienneté, notamment par l'intermédiaire de l'archéologue, les rituels d'inhumation, l'appartenance biologique, les particularités osseuses pouvant aboutir à des indications intéressantes le mode de vie, l'activité professionnelle, le statut hiérarchique, ... . L'anthropologue médico-légal, en utilisant les mêmes méthodes que l'anthropologue physique, fonctionne à la fois en tant qu'identificateur et en tant qu'expert judiciaire, à la recherche d'indices pouvant faire évoquer une potentielle criminalité. L'identification des restes humains dépend de l'état du corps, et les démarches médico-légales et anthropologiques doivent être appliquées de façon rigoureuse. Les différentes possibilités rencontrées en identification médico-légale sont résumées dans le tableau n° I-1.

**Tableau n° I-1** – Les différentes possibilités rencontrées en identification médico-légale (d'après Quatrehomme et al., 1998).

Qualité de l'identification	Exemples
<b>Identité formelle</b>	Comparaisons radiologiques
	Comparaisons odontologiques
	Empreintes digitales
	Empreintes génétiques
<b>Identité probable</b>	Papiers d'identité
	Tatouages
	Formule dentaire compatible
<b>Identité possible</b>	Cicatrices
	Antécédents pathologiques
<b>Identité exclue</b>	Formule dentaire incompatible
	Antécédent de fracture incompatible

**Tableau n° I-2** – Les différentes méthodes utilisées dans le cadre d'une identification médico-légale (d'après Quatrehomme et al., 1998).

Niveau d'investigation	Méthode utilisée
<b>Méthodes simples</b>	Description de la personne (taille, corpulence, couleurs des yeux et des cheveux, ...)
	Description des vêtements
	Description des bijoux
	Description d'objets personnels (médicaments, papiers et documents officiels)
	Cicatrices cutanées
	Description des tatouages
	Caractéristiques morphologiques (scoliose, ...)
	Empreintes digitales
	Radiographies, notamment dentaires
<b>Méthodes de complexité intermédiaires</b>	Autopsie médico-légale (antécédents traumatiques, chirurgicaux avec ou sans ostéosynthèse, anomalies congénitales ou acquises, ...)
	Anatomo-pathologie
	Anthropologie physique classique
	Odontologie médico-légale
<b>Méthodes de méthodes de haute complexité</b>	Empreintes génétiques
	Superposition faciale
	Restauration faciale
	Reconstruction faciale
	Comparaison vidéo ou photographiques

Trois niveaux d'identifications anthropologiques ont été définis par Quatrehomme (Quatrehomme *et al.*, 1998). Ceux-ci font appel à des méthodes de complexités croissantes : les méthodes simples, les méthodes de complexité intermédiaires et les méthodes de haute complexité (cf. tableau n° I-2). Enfin, l'identification de personnes en médecine légale peut ainsi être **reconstructive**, à partir des éléments objectifs recueillis par l'examen soigneux de restes humains, permettant de déterminer l'affinité populationnelle, le sexe, d'estimer l'âge au décès et la stature d'un individu dont l'identité est inconnue, mais également **comparative** lorsque des comparatifs *ante mortem* tels que des radiographies, des empreintes digitales et génétiques sont connues permettant d'affirmer ou d'exclure une identité supposée (Knight, 1991 ; Miras *et al.*, 1998).

## 1.2. Les techniques classiques permettant la détermination de l'âge d'un individu vivant ou décédé

La détermination de l'âge en est un des éléments clé permettant l'identification d'un individu. Elle concerne le plus souvent des individus **décédés** mais aussi parfois des individus **vivants**. Elle fait appel à des méthodes issues de l'anthropologie (Durigon, 1983). Nombreuses sont les méthodes qui ont été décrites concernant la détermination de l'**âge au décès**. La plupart ont pour base l'étude anatomique macroscopique du squelette. Ces méthodes nécessitent un prélèvement et une préparation des pièces osseuses qui peuvent être longs et fastidieux et qui ont l'inconvénient de ne pas être applicables chez le vivant. En matière de détermination d'âge au décès, certains auteurs considèrent qu'il est fort peu probable de trouver de meilleurs indicateurs que ceux utilisés actuellement (Schmitt, 2001). Ainsi, il conviendrait de travailler avec ceux déjà disponibles en gardant cependant à l'esprit, qu'estimer l'âge d'un individu unique, de façon précise, reste une utopie. La plupart des méthodes anthropologiques ont une précision faible, surtout au delà de 30 ans. En effet, si les phénomènes de maturation sont relativement constants, les phénomènes de sénescence ne sont eux ni invariants ni linéaires (Crubezy *et al.*, 1993 ; Schmitt, 2001). Ils dépendent de nombreux facteurs et de l'interaction entre les gènes et le milieu environnant.

La détermination de l'âge est un acte médico-légal important souvent demandé par les autorités judiciaires. Si l'identification de sujets décédés représente une activité courante, il existe à notre époque un besoin croissant d'identification de sujets **vivants**. Dans la plupart des cas, il s'agit d'adolescents délinquants ne possédant pas de papiers d'identité, et dont la

détermination de l'âge est nécessaire pour pouvoir diligenter la procédure adéquate (moins de 16 ans, plus de 16 ans et moins de 18 ans, plus de 18 ans) (Leonetti *et al.*, 1995). Mais la demande peut aussi concerner des sujets plus âgés avec un état civil inconnu ou faux. Si de nombreuses méthodes de détermination de l'âge au décès à partir de l'étude du squelette sont à la disposition du médecin légiste (étude de l'extrémité sternale de la quatrième côte droite, de la surface auriculaire, de la symphyse pubienne, des sutures crâniennes, études osseuses histologiques, ...), la détermination de l'âge du sujet vivant à partir de l'étude du squelette ne peut faire appel qu'à des méthodes **radiologiques non invasives**. Jusqu'à l'âge de 20 ans, la détermination de l'âge peut être réalisée en couplant un examen clinique complet (poids, taille, périmètre crânien, maturation sexuelle selon Tanner et formule dentaire) à une détermination radiographique des âges dentaires et osseux. Les principales méthodes radiographiques utilisées en pratique courante sont présentées dans le tableau n° I-3. Des logiciels tels que Maturus<sup>®</sup> ou Adagos<sup>®</sup> sont également une aide en pratique quotidienne pour déterminer l'âge d'individus à partir de leurs clichés radiographiques.

**Tableau n° I-3** – *Les différentes méthodes de détermination radiologiques de l'âge osseux (modifié, d'après Adamsbaum et al., 2002).*

Région radiographiée (incidence)	Auteur(s)	Date	Principe	Âge d'applicabilité
<b>Main et poignet gauches (face)</b>	Greulich et Pyle	1959	Comparaison à des clichés radiographiques (atlas)	Filles : de 0 à 18 ans, Garçons : de 0 à 19 ans
<b>Coude gauche (face et profil)</b>	Sauvegrain, Nahum et Bronstein	1965	Comparaison à chaque point	Filles : de 8.5 à 13 ans, Garçons : de 8.5 à 16 ans
<b>Coude gauche (face et profil)</b>	Sempé	1971	Comparaison à chaque point	Filles : de 9 à 15 ans, Garçons : de 10 à 18 ans
<b>Genou droit (face et profil)</b>	Pyle et Hoerr	1955	Comparaison à des clichés radiographiques (atlas)	Filles : de 0 à 15.5 ans, Garçons : de 0 à 18 ans
<b>Hémi squelette (face)</b>	Lefevre et Koifman	1965	Addition du nombre de points	De 0 à 30 mois
<b>Crête iliaque (face)</b>	Risser	1948	Cotation du noyau d'ossification secondaire de la crête iliaque	Filles : à partir de 13 ans, Garçons : à partir de 15 ans

Les méthodes d'estimation de l'âge sont nombreuses et reflètent soit des processus de croissance et de construction, soit des processus de sénescence et de destruction (Leonetti *et al.*, 1995). Les premières méthodes sont utilisées chez le fœtus, l'enfant, l'adolescent et l'adulte jeune (< 30 ans). D'une manière générale, les critères osseux explorant la croissance sont plus précis que ceux explorant la sénescence. Sur le plan anthropologique, la détermination de l'âge permet de différencier : l'enfance (1-12 ans), l'adolescence (13-18 ans), et les adultes en distinguant les adultes jeunes, matures et âgés.

### 1.2.1. Chez l'enfant et l'adolescent

L'âge peut se déduire de la taille en utilisant des courbes de croissance, ou, chez l'adolescent, de l'état de développement des caractères sexuels secondaires. Ces techniques sont cependant peu précises compte tenu des importantes disparités interindividuelles. Plus intéressante est l'exploitation des critères de maturation osseuse et dentaire (Leonetti *et al.*, 1995).

- L'appréciation du **degré de croissance osseuse** se fait par l'examen des cartilages de conjugaison, en se rapportant aux dates d'apparition et de soudure à la diaphyse des points osseux épiphysaires et complémentaires. Cet examen peut se faire de façon visuelle sur un corps totalement squelettisé, ou de façon radioscopique dans le cas d'un cadavre non entièrement décharné. De manière simple, l'on peut déterminer 3 stades généraux qui sont : **l'absence de fusion**, **l'union incomplète** et **l'union complète**. Le tableau n° I-4 résume les délais de fusion métaphyso-épiphysaire pour les individus de sexe masculin et de sexe féminin utilisables en anthropologie médico-légale. Chez le sujet vivant, ces marqueurs de croissance sont couramment utilisés pour la détermination radioscopique de l'âge osseux (étrangers en situation irrégulière, sans-papiers se prétendant mineurs pour éviter leur expulsion, jeunes délinquants mentant sur leur âge afin d'éviter une sanction pénale, ...). Dans ce cadre, la technique la plus utilisée est la technique de Greulich et Pyle qui étudie le degré de maturation osseuse de l'extrémité distale des deux os de l'avant-bras, des os du carpe, des métacarpiens et des phalanges (Greulich et Pyle, 1959).

- L'exploitation de la **maturation dentaire** pour la détermination de l'âge repose sur la chronologie d'apparition des dents déciduales et définitives. Cet examen se fait de façon immédiate sur le cadavre squelettisé, il pourra en revanche être nécessaire de procéder à une exérèse du maxillaire et de la mandibule en cas de persistance des parties molles de la face ; chez le sujet vivant l'examen sera fait radiologiquement par la réalisation

d'orthopantomogrammes. Certains auteurs critiquent néanmoins l'utilisation odontologique en matière de détermination de l'âge d'individus inconnus au motif que les âges osseux ou dentaires ne correspondraient pas nécessairement à l'âge chronologique de l'individu du fait de variations en fonction de l'ethnie, et de l'importance très longtemps négligée des facteurs nutritionnels (Olze *et al.*, 2006 ; Schmeling *et al.*, 2007).

**Tableau n° I-4** – Délais de fusion métaphyso-épiphysaire des principaux centres d'ossification (exprimés en années) (modifié, d'après Scheuer et Black, 2000).

Centre d'ossification	Sexe féminin		Sexe masculin	
	Début	Fin	Début	Fin
Tibia : apparition du tubercule antérieur	8	12	9	14
Humérus : fusion épicondyle latéral	11	15	12	17
Radius : fusion épiphyse proximale	11	13	14	17
Synchondrose sphéno-occipitale	11	16	13	18
Os coxal : fusion du « Y » acétabulaire	11	15	14	17
Fémur : fusion céphalique	12	16	14	19
Fibula : fusion épiphyse distale	12	15	15	18
Fibula : fusion épiphyse proximale	12	17	15	20
Ulna : fusion épiphyse proximale	12	14	13	16
Tibia : fusion du tubercule antérieur	12	14	14	16.5
Os coxal : début d'ossification de la crête iliaque	12	14	14	17
Humérus : fusion épicondyle médial	13	15	14	16
Humérus : fusion épiphyse proximale	13	17	16	20
Tibia : fusion épiphyse proximale	13	17	15	19
Fémur : fusion épiphyse distale	14	18	16	20
Fémur : fusion grand trochanter	14	16	16	18
Radius : fusion épiphyse distale	14	17	16	20
Tibia : fusion épiphyse distale	14	16	15	18
Ulna : fusion épiphyse distale	15	17	17	20
Fémur : fusion petit trochanter	16	17	16	17

### 1.2.2. Chez l'adulte de moins de 60 ans

L'estimation de l'âge se fait non plus à l'aide de marqueurs de la croissance ou de la maturation mais à l'aide de marqueurs dégénératifs. De nombreuses techniques ostéologiques ou dentaires existent.

Les trois principales méthodes **ostéoscopiques** de détermination de l'âge au décès sont (cf. tableau n° I-5) :

- la **méthode de Suchey-Brooks** qui étudie cinq critères sur la face symphysaire du pubis. Cette méthode, dérivant des travaux de Todd, est considérée comme une des

plus fiables en raison de la qualité de l'échantillon de référence, du nombre limité de phases et de l'existence de kits osseux comparatifs (Katz et Suchey, 1986 ; Suchey, 1979) ;

- la **technique d'Iscan**, développée à partir de trois critères sur l'extrémité sternale de la quatrième côte droite. Cette méthode prend en compte l'évolution morphologique de l'extrémité sternale costale après la fin de sa croissance soit 17 ans chez les hommes et 14 ans chez les femmes (Iscan *et al.*, 1984 a ; 1984 b ; Iscan *et al.*, 1985) ;
- la **méthode de Lovejoy** à partir de la surface auriculaire de l'os iliaque en distinguant cinq critères. Cette technique a tout son intérêt quand les os sont fragmentés et les autres méthodes inutilisables (Lovejoy *et al.*, 1985).

L'examen **microscopique** de l'os compact est également possible car la densité des ostéons diminue avec l'âge (Lynnerup *et al.*, 1998 ; 2006).

**Tableau n° I-5 – Principales méthodes ostéologiques d'estimation de l'âge.**

<b>Auteur(s)</b>	<b>Structure étudiée</b>	<b>Phases</b>	<b>Critères</b>
<b>Suchey-Brooks</b>	Surface symphysaire du pubis	<b>6 masculines</b> <b>6 féminines</b>	<b>5 critères :</b> - Stries - Délimitation des extrémités - Construction du rempart ventral - Anneau symphysaire - Eléments de destruction
<b>Iscan</b>	Extrémité sternale de la 4 <sup>ème</sup> côte droite	<b>9 masculines</b> <b>9 féminines</b>	<b>3 critères :</b> - Aspect du bord et des murs osseux - Profondeur du puits sternal - Aspect du puits sternal
<b>Lovejoy</b>	Surface auriculaire de l'os iliaque	<b>8 phases</b> indifférenciées pour les hommes et les femmes	<b>5 critères :</b> - Organisation transverse - Granulations - Activité rétro auriculaire - Activité apicale - Porosités

Les techniques **odontologiques** sont surtout basées sur l'examen morphométrique des dents monoradiculées (techniques de Gustafson (1950), Tore Solheim (1988), Lamendin (1992)). Certains auteurs utilisent également le degré de racémisation des acides aminés et notamment de l'acide aspartique (basé sur le fait que l'on observe, au cours de la vie, une

transformation progressive de l'acide L-aspartique en acide D-aspartique des tissus sans renouvellement cellulaire comme le cristallin ou la dentine) (Ohtani *et al.*, 2002).

Toutefois, il importe de retenir que ces différentes techniques sont nettement moins précises que celles utilisables lors de l'enfance ou de l'adolescence. Ainsi, même lorsqu'ils sont mis en œuvre par un opérateur expérimenté, les procédés considérés à l'heure actuelle comme les plus performants (par exemple la technique de Lamendin) n'autorisent qu'une précision de l'ordre de 5 ans environ.

### **1.2.3. Chez le sujet âgé**

Les techniques de détermination de l'âge sont jusqu'à présent demeurées extrêmement décevantes. La chronologie des processus dégénératifs affectant le squelette ou les tissus mous est en effet très variable d'une personne à l'autre. De ce fait, il n'existe encore aucun procédé scientifique permettant, à partir d'un cadavre putréfié ou de restes squelettiques, de faire la distinction entre un sujet de 70 ans et un sujet de 90 ans.

## **1.3. Une nouvelle voie de recherche concernant la détermination de l'âge des individus ?**

Le domaine de l'identification médico-légale a connu depuis quinze ans un fort développement du fait d'une demande en hausse tant pour des raisons qualitatives (augmentation des exigences quant aux critères d'identification acceptables) que quantitatives (mobilité des populations, isolement des individus). Une approche multidisciplinaire associant les médecins légistes, dentistes, anthropologues, radiologues, histologistes, biologistes, ingénieurs devraient permettre des progrès futurs, particulièrement pour les populations âgées de plus de 65 ans du fait de leur accroissement rapide et des lacunes des méthodes actuelles en ce qui concerne entre autres la détermination de leur âge.

Il serait intéressant de pouvoir adapter au vivant les méthodes scopiques habituellement utilisées pour la détermination de l'âge au décès. Il « suffirait » pour cela d'obtenir une représentation radiologique suffisamment proche de la réalité anatomique. On trouve dans la littérature récente des essais de développement de telles méthodes (Grabherr *et al.*, 2008). Ainsi, plusieurs auteurs ont étudié par tomodensitométrie le développement et la maturation osseuse de l'extrémité médiale de la clavicule (Kreitner *et al.*, 1998 ; Schulz *et al.*, 2005 ; Schulze *et al.*, 2006).

De telles méthodes pourraient aussi être utilisées dans le domaine de l'anthropologie pour l'étude des momies, matériel précieux qui doit pouvoir être exploité sans être dégradé.

Récemment, certaines innovations technologiques ont permis d'ébaucher de nouvelles perspectives de recherche. On assiste ainsi depuis quelques années au développement de ce que Weber appelle l'**anthropologie virtuelle** ou étude morphologique de fossiles et d'hommes contemporains à partir d'une base de données d'images numériques (Weber, 2001). Les progrès de l'informatique, de la radiologie, et en particulier de la tomodensitométrie, permettent aujourd'hui d'obtenir en peu de temps des images des pièces osseuses très représentatives de la structure étudiée, et ce aussi bien chez le sujet décédé que chez le vivant. Cette nouvelle source d'information dont bénéficie largement la médecine, pourrait être exploitée en anthropologie médico-légale, et ce notamment pour la détermination de l'âge d'individus, qu'ils soient vivants ou décédés.

# Chapitre 2

## Tomodensitométrie et techniques de post traitement

---

### 2.1. Tomodensitométrie hélicoïdale et reconstruction en rendu de volume : bases physiques

#### 2.1.1. Acquisition

L'idée principe de la tomodensitométrie réside dans la possibilité de reconstructions mathématiques d'une coupe axiale bidimensionnelle à partir de multiples projections monodimensionnelles (Doyon *et al.*, 2000). L'acquisition des projections se fait par rotation d'un ensemble constitué d'un tube à rayon X et d'un détecteur autour de l'objet d'étude. Le faisceau de rayons X, lors de la traversée de l'objet, subit absorption et diffusion, par effets photoélectrique et Compton. Cette atténuation dépend de la densité du milieu, de sa composition atomique et de l'énergie du faisceau de rayons X incident. La mesure élémentaire est l'atténuation linéaire de chaque projection. La rotation du faisceau de rayon X permet de multiples mesures, et la détermination d'un coefficient d'atténuation en chaque élément volumique de l'objet.

#### 2.1.2. Reconstruction de l'image

L'ensemble des projections et donc des mesures échantillonnées sert à la réalisation d'une matrice image (Doyon *et al.*, 2000). Cette matrice comporte un certain nombre de pixels associés aux coefficients d'atténuation mesurés dans les éléments volumiques correspondants. Ainsi sont définis les voxels (volume éléments), éléments volumiques de l'image, dont la section correspond à la taille du pixel et la profondeur à la largeur du faisceau X détecté (épaisseur de coupe).

L'algorithme mathématique de reconstruction est appelé rétroprojection filtrée. En pratique, une transformée de Fourier suivie d'une transformée de Fourier inverse sont appliquées. En plus du filtre rampe ayant un rôle dans la reconstruction et la suppression de flou, l'utilisateur a la possibilité de rajouter à cette étape des filtres visant à privilégier les hautes ou les basses fréquences en fonction de la nature des informations souhaitées.

Le processus de reconstruction aboutit à une image dont le contenu des pixels est rapporté à une échelle de densité standardisée, codée sur 12 bits (et comportant donc 4096 valeurs, ou Unités Hounsfields = UH). Les coefficients d'atténuation de l'air et de l'eau sont à la base cette échelle, dite échelle d'Hounsfield : - 1000 UH pour l'air, 0 UH pour l'eau. L'oeil humain ne pouvant percevoir et les moniteurs vidéos ne pouvant afficher les 4096 niveaux de gris qui correspondraient à la dynamique de densité mesurée, il est nécessaire de réaliser un fenêtrage, défini par un centrage et un largeur de fenêtre, afin d'obtenir les informations pertinentes adaptées au contraste voulu et à l'objet exploré.

### **2.1.3. Evolutions technologiques : mode hélicoïdal et acquisition volumique, technologie multidétecteurs**

Depuis la première machine dédiée aux applications cliniques, les aspects technologiques de la tomodensitométrie ont beaucoup évolués (Blum *et al.*, 2000 ; Doyon *et al.*, 2000). Outre les modifications de la géométrie des scanners, le passage d'une acquisition séquentielle (coupe par coupe) à une acquisition hélicoïdale, a fait naître des possibilités de reconstruction dans un plan différent du plan d'acquisition et de visualisation tridimensionnelle et a diminué la durée de l'examen. Le mode d'acquisition hélicoïdal, dit également spiralé, dont les débuts datent de 1989, suppose la rotation continue du tube à rayons X et des détecteurs pendant un déplacement à vitesse constante de la table, une alimentation du tube à rayons X par contacts glissants, et une transmission sans fil du signal. Etant donné que dans ce mode le faisceau de rayon X n'effectue plus une rotation de 360 ° sur une coupe donnée, ceci sous entend la nécessité d'un algorithme d'interpolation linéaire. L'importance de cette interpolation est définie par le pitch, rapport entre l'avance de la table par rotation et l'épaisseur de coupe. A la fin des années 1990 apparaissent les scanners multicoupes, basés sur la subdivision de la couronne de détecteurs en de multiples barrettes selon l'axe z de la table. L'apparition de scanner multidétecteurs a principalement permis une diminution du temps d'acquisition et la résolution spatiale, déterminée par l'épaisseur de coupe s'est encore discrètement améliorée, devenant infra-millimétrique.

### **2.1.4. Post traitement : reconstructions tridimensionnelles**

Historiquement, le début des techniques de reconstruction tridimensionnelles d'images scanner date de la fin des années 1970 (Harris *et al.*, 1979). Cependant, dans l'histoire du scanner, les techniques de reconstructions volumiques utilisées en routine clinique sont

apparues en parallèle à la généralisation de l'acquisition spiralée. L'acquisition spiralée a marqué le tournant d'une acquisition de données purement bidimensionnelles à une acquisition de données volumiques, permettant une parfaite continuité des coupes dans l'axe z de déplacement de la table. En parallèle, l'augmentation de la puissance des calculateurs a permis d'obtenir les reconstructions, d'abord avec un différé acceptable puis en temps réel. Les reconstructions tridimensionnelles d'images scanner se basent sur des principes non développés spécifiquement pour l'imagerie médicale. La technique de lancer de rayon (*ray tracing* ou *ray casting*) tente de reconstituer le parcours inverse de la lumière, en partant de l'oeil de l'observateur et en allant vers la source lumineuse. En envoyant depuis le point de vue de l'observateur un ensemble de rayons dans la scène virtuelle vers l'objet étudié, il est en effet possible de déterminer un rendu de la surface ou du volume de l'objet : c'est la base des modes de reconstructions SSD (*surface shaded display*) et VRT (*volume rendering technique*).

## 2.2. Techniques de reconstruction

On distingue les reconstructions bidimensionnelles (2D), dites multiplanaires **MPR** (*multiplanar reconstructions*), et les reconstructions 3D qui incluent les reconstructions **MIP** (*maximum intensity pixel*), **SSD** (*surface shaded display*) et **VRT** (*volume rendering technique*).

Les reconstructions **MPR** sont des reconstructions bidimensionnelles dans un plan différent du plan d'acquisition : celui ci peut être un plan anatomique (sagittal, frontal), un plan oblique, voire courbe. L'utilisateur peut définir l'épaisseur de ces coupes reconstruites, cette dernière pouvant être plus épaisse que l'épaisseur de coupe lors de l'acquisition.

La technique de projection de pixel d'intensité maximale **MIP** se base sur l'affichage du voxel d'intensité la plus élevée selon une ligne virtuelle traversant le volume d'intérêt depuis l'oeil de l'observateur.

Le Mode **SSD** est historiquement le plus ancien, datant des années 1970. Seule une part restreinte de l'information initiale est utilisée, ce qui permet de diminuer la puissance de calcul nécessaire. Il permet l'affichage d'une surface apparente du volume de données acquises. L'obtention de l'image, après détermination du point de vue, passe par la définition d'une valeur de seuil, déterminant quels voxels, du fait de leurs densités, participeront à l'image de la surface. Lancer des rayons vers chaque point du volume depuis le point de vue,

permet de déterminer le premier point (voxel) le long du trajet du rayon qui a une valeur supérieure ou égale au seuil. Tous les autres points du trajet sont ignorés et la profondeur du point est restituée par une échelle de gris : si le voxel est proche du point de vue, le pixel est clair ; s'il est lointain, le pixel est foncé.

La technique de rendu volumique (**VRT**), qui fait participer tous les voxels du volume à l'image, est une technique gourmande en ressources (processeurs multiples, carte graphique dédiée, mémoire vive). Après détermination du point de vue, le lancer de rayon est appliqué de la même manière que dans le mode SSD. Toutefois, l'utilisateur définit ici non pas un seuil, mais un ensemble de densités UH auquel il applique une opacité, une luminosité et une couleur : cette opacité peut varier de 0 % (transparent) à 100 % (opaque). La sommation des contributions de chaque voxel le long d'un rayon (ligne virtuelle partant de l'œil de l'observateur et traversant le volume) détermine la valeur d'un pixel et ce procédé est appliqué pour tous les pixels de l'image finale (2D) présentée à l'observateur. Comme toutes les opacités sont additionnées le long de chaque rayon, l'image ne comporte pas d'information directe de profondeur. Il y a une sommation pondérée des niveaux d'opacité d'arrière en avant. La contribution à l'opacité visualisée des voxels rencontrés selon ce mode de visualisation dépend donc de leur emplacement dans le volume : un voxel « opaque » masque ceux qui sont « derrière » lui. L'ombrage permet également une appréciation du volume, en illuminant ou en masquant les voxels constituant la surface du volume. La source lumineuse simulée peut être déplacée. La visualisation du volume sous plusieurs angles et mieux encore, en mouvement, permet d'apprécier la profondeur : ceci est nommé effet de profondeur cinématique.

De même que pour les reconstructions MPR, la finesse des coupes axiales détermine directement la qualité des images VRT. C'est en fait la finesse des détecteurs qui va déterminer la quantité d'informations brutes rentrant en considération pour la synthèse de l'image 3D. Les dernières avancées techniques permettent de reconstruire en 3D et MPR, non plus à partir des coupes axiales, mais directement à partir des données volumiques (*raw data*). Pour l'heure, si la source de données est la pile de coupes axiales, il est important que ces coupes soient chevauchantes car la redondance de l'information dans le plan axial permet une qualité optimale en 3D.

### 2.3. Principaux artéfacts en tomодensitométrie

Outre les artéfacts liés au patient (artéfacts cinétiques) et les artéfacts dus à la présence de métal, il convient de rappeler l'existence d'artéfacts de durcissement de faisceau, de volume partiel et d'artéfacts liés à l'acquisition spirallée (Barrett et Keat, 2004 ; Doyon *et al.*, 2000).

L'artéfact de **durcissement du faisceau** est lié à l'atténuation préférentielle des photons de basses énergies du faisceau de rayon X dans le milieu (Barrett et Keat, 2004 ; Doyon *et al.*, 2000). Lorsqu'une coupe est hétérogène, comportant des tissus de forte densité (typiquement de l'os) et des tissus de densité faible ou de l'air, il apparaît des bandes sombres ou des stries : ceci est secondaire au durcissement du faisceau, supérieur à un moment de la rotation du tube (où davantage de tissu dense est traversé) par rapport à un autre.

L'effet de **volume partiel** est lié à la largeur du faisceau X (Barrett et Keat, 2004 ; Doyon *et al.*, 2000). On y inclue l'effet de moyennage des densités au sein d'un voxel, quand des tissus de différentes densités participent à ce même voxel. Il en résulte une densité moyenne pour un voxel. On peut en rapprocher le volume partiel survenant quand un tissu de forte densité, est excentré dans le champ de vue et traversé par le faisceau X à une position donnée du tube, mais pas lorsque le tube est dans la position diamétralement opposée. Ces deux effets sont limités par l'obtention de coupes plus fines.

L'acquisition spirallée et les détecteurs multiples sont soumis aux mêmes artéfacts, mais sont également affectés par des artéfacts spécifiques (Barrett et Keat, 2004 ; Doyon *et al.*, 2000). Certains artéfacts sont liés à l'algorithme d'interpolation linéaire et augmentent avec le pitch. **L'effet de cône** traduit la divergence du faisceau de rayon X selon l'axe z. Ce caractère "conique" du faisceau, en rapport avec le nombre de détecteurs, est analogue à un effet de volume partiel, se manifestant selon l'axe z de déplacement de la table. Cet effet est atténué par un protocole de reconstruction adapté par le constructeur, tenant compte du caractère conique du faisceau.

Les **artéfacts en marches d'escalier** survenant lors des reconstructions multiplanaires ou tridimensionnelles, sont directement liés à l'épaisseur de coupe et au caractère jointif et non chevauchant de celles-ci (Barrett et Keat, 2004 ; Doyon *et al.*, 2000). L'utilisation de coupes fines et chevauchantes permet de s'en absoudre.

## Chapitre 3

### Imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) : bases physiques (Kastler, 2006 ; Wikipedia, 2008)

---

#### 3.1. Principe de l'IRM

L'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) est basée sur le principe de la résonance magnétique nucléaire (RMN). Grâce aux différentes **séquences**, on peut observer les tissus mous avec des contrastes plus élevés qu'en tomodensitométrie ; en revanche, elle ne permet pas l'étude des corticales osseuses (tissus « durs ») ni donc la recherche de fractures où seul l'œdème péri-lésionnel pourra être observé.

L'examen IRM n'est pas invasif et n'irradie pas. Le nom complet de l'IRM est image à résonance magnétique nucléaire (IRMN) ; on omet souvent son caractère nucléaire. Cette omission permet de ne pas effrayer les patients qui associent souvent, et à tort, le mot nucléaire avec les rayonnements ionisants.

La résonance magnétique nucléaire exploite le fait que les noyaux de certains atomes possèdent un moment magnétique de **spin**. C'est en particulier le cas de l'atome d'hydrogène 1 que l'on retrouve en grande quantité dans les molécules qui composent les tissus biologiques comme l'eau (H<sub>2</sub>O) et les molécules organiques. Pour comprendre les principes de l'IRM, on peut s'imaginer ces spins comme des toupies tournant sur elles-mêmes autour de leur axe. En IRM, on place les atomes que l'on veut étudier dans un champ magnétique constant et on leur applique une onde électromagnétique oscillante à une fréquence bien particulière dite fréquence de résonance ou fréquence de Larmor. En effet, pour que le champ oscillant puisse avoir un effet notable sur les atomes, il faut qu'il entre en résonance avec ceux-ci, c'est-à-dire que sa fréquence soit ajustée au mouvement de rotation de ces spins. Le choix de la fréquence de Larmor permet donc de cibler quels atomes on va imager en fonction de l'intensité du champ magnétique (qui est de quelques **teslas** pour les appareils actuels). En IRM, on utilise principalement les atomes d'hydrogène dont la fréquence de résonance est autour de 42 MHz/Tesla, ce qui correspond à la gamme des ondes radio. En effet, l'atome d'hydrogène qui est constitué d'un seul proton, est très abondant dans les tissus biologiques. En outre, son

moment magnétique nucléaire est relativement fort, ce qui fait que la résonance magnétique de l'hydrogène donne lieu à un phénomène de résonance très net et facile à détecter.

Même s'il s'agit en réalité de phénomènes quantiques, on peut se représenter, de façon imagée, que sous l'effet du champ magnétique statique, les moments magnétiques de spin vont progressivement s'aligner dans une direction initialement parallèle à celui-ci et donner lieu à une aimantation globale dans la direction du champ  $B_0$ , dite direction longitudinale. Par habitude, on note cette direction de la lettre  $z$  et l'aimantation longitudinale résultant de l'addition de tous ces moments magnétiques de la lettre  $M$ . En fait, seule une très faible proportion (environ 0.001 %) des moments magnétiques nucléaires s'aligne dans la direction  $z$ , la très grande majorité ne possède pas une orientation stable en raison de l'agitation thermique. Néanmoins, cette petite proportion de spins qui s'alignent est suffisante pour être détectée ; c'est pourquoi on néglige le reste des moments magnétiques des 99.999 % restant qui statistiquement se compensent les uns les autres.

Lorsque l'on applique l'onde magnétique radiofréquence oscillante à la fréquence de Larmor, cela va entraîner les moments magnétiques qui vont alors s'écarter progressivement de l'axe  $z$  pour aller se placer à perpendiculairement à leur axe de départ un peu comme un parapluie qui s'ouvrirait mais en plus les spins continuent leur rotation autour de l'axe  $z$ . C'est ce qu'on appelle un mouvement de **précession**.

L'onde magnétique oscillante, notée  $B_1$  va donc avoir comme rôle de faire « basculer » les moments magnétiques de spin pour les placer dans un plan perpendiculaire à la direction du champ statique  $B_0$ . C'est ce qu'on appelle l'**excitation** : plus celle-ci dure longtemps et plus la proportion de moments magnétiques qui auront basculé sera importante et donc plus l'aimantation longitudinale (dans la direction  $z$ ) diminuera.

Lorsqu'on interrompt le champ oscillant, les moments magnétiques qui se sont écartés de leur axe initial vont revenir vers la direction  $z$  sans cesser de tourner. On peut alors mesurer ce mouvement de rotation des spins sous la forme d'un signal oscillant qui a la même fréquence que l'onde excitatrice. C'est ce signal, dit de précession, qu'on mesure en IRM au moyen d'une antenne réceptrice.

## 3.2. Rappels techniques

### 3.2.1. La relaxation longitudinale (T1)

Au fur et à mesure que les moments magnétiques retrouvent la direction du champ statique  $z$ , le signal oscillant qu'ils émettent va en diminuant, jusqu'à disparaître quand tous les moments magnétiques sont de nouveau alignés longitudinalement, c'est-à-dire dans la direction  $z$ . Le temps que mettent les moments magnétiques nucléaires à retrouver leur alignement longitudinal sur la direction  $z$  est baptisé **temps de relaxation** ; il est noté T1. En notant  $M_z(0)$  la valeur à l'équilibre de l'aimantation longitudinale (lorsque tous les spins sont alignés), on peut donner la loi d'évolution de la « repousse » de l'aimantation longitudinale après à avoir appliqué une excitation qui aurait fait basculer tous les moments magnétiques au temps  $t = 0$  :  $M_z(t) = M_z(0) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T1}})$ .

Ce phénomène de relaxation (c'est-à-dire de retour à l'équilibre) suit donc une dynamique exponentielle. Il faudrait alors un temps infini pour que tous les spins se retrouvent alignés, c'est pourquoi on définit comme temps T1 le temps mis pour retrouver 63 % de l'aimantation longitudinale à l'équilibre. Ce temps de relaxation T1 dépend de l'agitation moléculaire dans le tissu que l'on observe. Il suit une courbe en forme de « U » inversé :

- si l'agitation moléculaire est très faible, les atomes d'hydrogène mettront du temps à revenir à l'équilibre (c'est le cas des tissus durs comme les os),
- si l'agitation des molécules d'eau est très forte, comme c'est le cas dans les liquides comme le liquide céphalo-rachidien, la repousse est également lente,
- si l'agitation est modérée (c'est à dire avec une constante de temps autour de la fréquence de Larmor) comme dans la graisse ou dans la substance blanche, alors le temps T1 est relativement court.

Ces différents T1 tournent autour de 1 seconde pour champ  $B_0$  de 3 teslas.

### 3.2.2. La relaxation transversale (T2)

Par ailleurs, l'agitation moléculaire contribue aussi à un autre phénomène. Alors qu'en théorie les moments magnétiques devraient tous tourner de façon cohérente autour de l'axe  $z$ , c'est-à-dire avec une différence de phase constante, l'agitation moléculaire va faire que les atomes ne vont pas être dans un environnement physico-chimique constant et donc leur fréquence de Larmor va elle aussi n'être pas parfaitement égale à la fréquence de Larmor

théorique. Par conséquent, les différents moments magnétiques vont avoir tendance à se désynchroniser. Cela se traduit par une diminution du signal lié à leur rotation synchrone au cours du temps, dit temps de **relaxation T2**. Ce temps T2 mesure la disparition de l'aimantation transversale, c'est-à-dire de l'aimantation résultant du fait que les moments magnétiques sont synchrones dans leur rotation dans le plan transversal, perpendiculaire à  $B_0$ , où ils ont été amenés par l'onde excitatrice oscillante  $B_1$ . Là encore, il s'agit d'un phénomène qui suit une loi exponentielle (décroissante cette fois) :  $M(t) = M_0.e^{-\frac{t}{T_2}}$ .

### 3.2.3. Encodage spatial grâce aux gradients

La localisation spatiale des atomes est obtenue en ajoutant un gradient directionnel sur le champ magnétique de base ( $B_0$ ) grâce aux bobines de gradient de champ magnétique. La relaxation des protons sera alors modifiée par la variation du champ magnétique. Des techniques de traitement du signal utilisant les algorithmes de transformées de Fourier rapides permettent alors de localiser l'origine du signal. La résolution spatiale est liée à l'intensité du champ magnétique (de nos jours, les appareils utilisent un champ de 1 à 3 teslas) et de la durée de l'acquisition (en général une dizaine de minutes). On atteint actuellement une résolution de l'ordre du millimètre.

### 3.2.4. Les pondérations

En modifiant les paramètres d'acquisition IRM, notamment le **temps de répétition** entre deux excitations et le **temps d'écho** (temps entre le signal d'excitation et la réception de l'écho), l'utilisateur peut modifier la pondération de l'image, c'est-à-dire faire apparaître les différences de temps T1 et de temps T2 des différents tissus d'un organisme. Les tissus ayant des temps T1 et T2 différents en fonction de leur richesse en atome d'hydrogène et en fonction du milieu dans lequel ces derniers évoluent, peuvent renvoyer des signaux différents si l'on arrive à mettre en évidence ces différences de temps. Pour cela, on teste la réponse des atomes après des excitations particulières.

Des tissus différents ont des T1 différents. Après stimulation de radio-fréquence avec un temps de répétition court, on ne laisse pas le temps aux atomes d'hydrogène de certains tissus de revenir en position d'équilibre alors que, pour d'autres atomes d'hydrogène d'autres tissus, le temps est suffisamment long pour qu'il y ait un retour à l'équilibre. Lorsque l'on mesure l'état d'énergie des atomes des tissus, on note des écarts d'état entre ces différents atomes. Si

on laissait un temps trop long, tous les atomes auraient le temps de revenir en position d'équilibre et l'on ne noterait plus de différences entre différents tissus.

Des tissus différents ont des T2 différents. Après stimulation par un temps d'écho long, on retrouve des décroissances d'énergie d'amplitude plus importante entre les tissus. Les différences de T2 étant plus discriminantes si le temps d'écho est long.

#### 3.2.4.1. Pondération T1

Les paramètres de la pondération :

- temps d'écho : TE = 10 à 20 ms (ms = millisecondes),
- temps de répétition : TR = 400 à 600 ms.

En utilisant un temps de répétition court et un temps d'écho court (qui neutralise les différences de temps T2), on obtient un contraste d'image pondérée en T1, pondération dite **anatomique** : en pondération T1 sur le cerveau, la substance blanche apparaît plus claire que la substance grise. Le liquide céphalo-rachidien, situé entre la substance grise et l'os apparaît lui nettement plus foncé.

#### 3.2.4.2. Pondération T2

Les paramètres de la pondération :

- temps d'écho : TE > 80 ms,
- temps de répétition : TR > 2000 ms.

En utilisant un temps de répétition long (neutralise les différences de temps T1) et un temps d'écho long, on obtient un contraste d'image dite pondérée en T2, dite aussi pondération **tissulaire** : l'eau et l'œdème apparaissent en hypersignal.

#### 3.2.4.3. Densité protonique

Les paramètres de la pondération :

- temps d'écho : TE = 10 à 20 ms,
- temps de répétition : TR > 2000 ms.

En utilisant un temps de répétition long (2000 ms à 3000 ms) et un temps d'écho court (inférieur à 30 ms), on obtient un contraste d'image de **pseudo densité protonique** (tissus > liquide > graisse). Seuls les éléments tissulaires à forte densité protonique, comme les ménisques, seront en hypersignal.

En utilisant un temps de répétition plus long (5000 ms) et un temps d'écho court (inférieur à 30 ms), on obtient un contraste d'image de **vraie densité protonique** (liquide > tissus > graisse).

### **3.2.5. Les Séquences**

#### **3.2.5.1. Echo de Spin ou séquence Spin Echo**

La séquence IRM la plus classique est sans doute la séquence écho de spin. Cette dernière se décompose en :

- une impulsion  $90^\circ$  dite d'excitation,
- une période de déphasage dans le plan transverse des protons pendant  $TE/2$ ,
- une impulsion  $180^\circ$ , dite d'inversion,
- un rephasage pendant  $TE/2$ ,
- la lecture du signal (lecture de l'écho de spin).

Cette séquence permet les pondérations T1, T2 et de densité protonique. Elle n'est plus utilisée car le temps d'acquisition est beaucoup trop long car il faut compter environ 50 minutes pour l'acquisition d'une coupe sur une matrice de  $256^2$ .

#### **3.2.5.2. Séquences Turbo Spin Echo et Fast Spin Echo**

La technique associe la méthode écho de gradient et écho de spin pour une acquisition plus rapide mais plus sensible aux artefacts.

#### **3.2.5.3. Inversion-Récupération**

Ces séquences d'un constructeur à l'autre peuvent avoir des noms différents (FLAIR T1 ou TRUE T1). On envoie une impulsion à  $180^\circ$ , puis on attend un délai T pendant lequel l'aimantation longitudinale  $M_z$  (proportionnelle à l'intensité longitudinale) a augmenté. Après T, on envoie une impulsion à  $90^\circ$ , qui provoque un basculement de l'aimantation longitudinale, on obtient ainsi un courant mesurable et donc un signal lié à T1.

#### **3.2.5.4. Séquence Short Time of Inversion Recovery (STIR)**

Cette séquence a pour but d'annuler le signal de la graisse. Cette séquence d'un constructeur à l'autre peut avoir des noms différents (séquence FLAIR ou FLAIR T2).

Il s'agit d'une séquence en inversion-récupération pondérée T2 sur laquelle on a supprimé le signal de l'eau libre, qui apparaît alors en hyposignal, en adaptant le temps d'inversion.

### **3.2.5.5. Séquence en Écho de Gradient ou Gradient de diffusion**

Elle consiste à mesurer le mouvement brownien des molécules d'eau dans les tissus. Cela permet d'en déduire des informations sur les inhomogénéités des tissus et notamment de la substance blanche du tissu nerveux. Pour ce faire, les mesures de la diffusion sont effectuées sur un plus ou moins grand nombre de directions (de 6 à 64) qui permettent de calculer des tenseurs de diffusion dans chaque voxel. A partir de là, il est possible de définir la direction des fibres qui passent dans chacun des voxels et de reconstruire la trajectoire des principaux faisceaux de fibres.

### **3.2.5.6. Séquence saturation des graisses**

Cette séquence également appelée Fat Sat est une technique permettant de supprimer le signal de la graisse en IRM. C'est une méthode qui utilise la légère différence de fréquence de résonance des protons des atomes d'hydrogène présents dans la graisse par rapport à ceux de la molécule d'eau. Cette différence est d'environ 220 Hz. On envoie donc une radiofréquence dirigée spécifiquement sur la fréquence de la graisse afin de la saturer avant de recueillir le signal de la coupe.

# Deuxième partie

---

## *Imagerie en coupe et anthropologie*

Cette deuxième partie, appelée « *Imagerie en coupe et anthropologie* », sera une étude tomодensitométrique de successivement, la **première côte droite**, la **quatrième côte droite**, la **surface auriculaire** et la **symphyse pubienne**. Elle sera suivie par une étude IRM des **fusions métaphyso-épiphysaires fémoro-tibiales**. L'ensemble de ces éléments anatomiques ont été étudié afin de déterminer leur apport respectif possible dans une problématique de détermination de l'âge d'un individu, qu'il soit vivant ou décédé.

Chacune de ces études osseuses sera présentée sous la forme d'un chapitre qui comportera les items suivants :

- Place de cet élément anatomique en anthropologie physique,
- Matériels,
- Méthodes,
- Résultats,
- Discussion.

# Chapitre 1

## La première côte droite

---

L'observation de la première côte, bien que moins classique que les méthodes basées sur l'examen de la quatrième côte ou de la symphyse pubienne, offre une alternative et un complément intéressant aux autres techniques de détermination de l'âge au décès (Kunos *et al.*, 1999 ; Kurki, 2005). Les principales raisons citées par les auteurs justifiant l'utilisation et l'étude de la première côte d'un individu non identifié dans le cadre de la détermination de l'âge au décès sont :

- la première côte est plus facilement identifiable que la quatrième côte, même si l'observateur a à sa disposition l'ensemble relativement complet du gril costal,
- la première côte est nettement moins fragile que les autres éléments squelettiques, tels que la quatrième côte et la symphyse pubienne ; de ce fait, elle est plus apte à résister au cours du temps,
- la première côte serait, par ailleurs, moins sujette que la quatrième côte et la symphyse pubienne à des modifications liées au stress mécanique ou à l'influence de l'origine populationnelle et du sexe.

Le but de cette étude était l'estimation de l'âge d'individus vivants, basée sur l'observation tomodynamométrique de leur première côte droite à partir des observations de Kunos (Kunos *et al.*, 1999). D'autres éléments ont également été pris en compte à côté des stades issus de ceux de Kunos : les becs osseux débutant à l'extrémité sternale de la première côte et les calcifications au sein du cartilage costal.

### **1.1. Description de la méthode développée par Kunos et ses collègues (Kunos *et al.*, 1999)**

Tout comme la quatrième côte, la première côte subie au cours de la vie d'un individu des modifications en termes de forme, de taille et de texture osseuse. La détermination de l'âge du sujet prend en compte non seulement l'évolution de l'articulation costo-claviculaire,

mais également celle de l'épiphyse ou tête costale, ainsi que celle du tubercule épiphysaire. L'étude de la première côte a été conduite par Kunos sur une population adulte mais également juvénile. L'auteur indique que la précision et la fiabilité de cette méthode, pour chaque décade étudiée est aussi bonne que les méthodes actuelles utilisées en pratique courante pour déterminer l'âge au décès d'un individu. Cette méthode peut ainsi être utilisée seule, mais également en complément des méthodes anthropologiques physiques pré existantes, utilisées dans ce cadre.

### **1.1.1. Population non adulte**

#### **1.1.1.1. Méthodologie utilisée par Kunos**

Sur la population non adulte (jusqu'à l'âge de 20 ans, lorsque la fusion de la tête costale est incomplète), Kunos a effectué des études métriques et scopiques.

- les **études ostéométriques** consistaient à mesurer l'épaisseur de l'extrémité sternale et à la longueur de la première côte ; des formules de régression étaient ensuite calculées à partir de ces mesures,

- les **études ostéoscopiques** prenaient en considération l'apparence des centres d'ossifications secondaires, leur croissance et leurs modifications morphologiques ; ainsi étaient examinés la tête costale et le tubercule épiphysaire qui pouvaient être fusionnés, en cours de fusion ou totalement fusionnés.

#### **1.1.1.2. Résultats de l'étude de Kunos**

Pour les **méthodes ostéométriques**, des formules de régression calculées étaient les suivantes :

- concernant *l'épaisseur de l'extrémité sternale* : âge estimé (en années) =  $11.75 + 4.5 * \text{épaisseur (en mm)}$ , avec un coefficient de corrélation de 0.81,
- concernant *la longueur costale* : âge estimé (en années) =  $16.35 + 0.46 * \text{longueur (en mm)}$ , avec un coefficient de corrélation de 0.91.

Au plan **ostéoscopique**, Kunos indiquait que le noyau d'ossification de la tête apparaissait à l'âge de 14 ans puis fusionnait à un âge compris entre 20 à 22 ans. Le tubercule épiphysaire suivait la même évolution en terme d'apparition, mais sa fusion était ensuite plus précoce comparée à celle de la tête costale car elle débutait dès l'âge de 14 ans. Sur la

population non adulte, deux critères ostéoscopiques de l'extrémité sternale étaient essentiels pour estimer l'âge au décès d'un individu :

- le début de l'inclinaison antéro-postérieure de l'extrémité sternale qui commençait à l'âge d'environ 12 ans,
- la crête d'ossification supéro-inférieure divisant la surface costale en 2/3 antérieur et un 1/3 postérieur qui apparaissait entre 17 et 20 ans.

Les modifications liées au vieillissement de l'individu affectaient également l'extrémité sternale, la tête et le tubercule épiphysaire.

Concernant l'extrémité sternale, ces modifications touchaient la forme et la topographie de surface, ainsi que la forme des berges (cf. tableau n° II-1) :

- *Avant l'âge de 13 ans* : les modifications étaient rapides à la fois en taille et en forme. La croissance de l'extrémité costale la rendait elliptique, inclinée, avec des crêtes centrales se projetant médialement. La croissance périphérique autour de l'extrémité sternale était plus importante qu'en situation centrale, si bien qu'un anneau était visible.

La croissance en taille de la tête et du tubercule était superposable à celle de l'extrémité sternale. Vers la fin de la première décennie, la tête présentait un aspect discoïde et le tubercule devenait plus saillant.

- *Durant l'adolescence, entre 14 et 20 ans*, les modifications se poursuivaient :
  - o *Entre 13 et 15 ans* : la croissance plus rapide des berges antérieures et de la surface articulaire en situation médiale, entraînait une inclinaison antéro-postérieure de l'extrémité sternale et une meilleure délimitation des berges articulaires.
  - o *Entre 17 et 20 ans* : le tiers postérieur de la surface accélérât sa croissance créant une crête d'ossification supéro-inférieure.

L'ensemble des modifications morphologiques chez les sujets non adultes sont présentées dans le tableau n° A-I fourni en annexe (cf. partie Annexe).

### **1.1.2. Population adulte**

Sur la population adulte, définie par une fusion complète de la tête costale, trois phénomènes étaient à prendre en compte par Kunos :

- l'ossification de l'interface chondro-costale,
- le remodelage de la surface ossifiée et de ses berges,
- les modifications dégénératives de la surface ossifiée et de ses berges.

La détermination de l'âge se fait donc à partir de l'analyse de ces modifications d'aspect de l'extrémité sternale mais aussi celles affectant la tête et le tubercule épiphysaire.

**1.1.2.1. Modifications morphologiques de l'extrémité sternale (cf. tableau n° II-1)**

L'arrêt de croissance à la période tardive de l'adolescence aboutissait chez l'adulte jeune (entre *21 et 25 ans*) à une extrémité sternale plate dans le plan supéro-inférieur, qui se modifiait peu. La surface articulaire était initialement lisse, avec parfois quelques crêtes. Les berges articulaires étaient lisses et mousses.

Le cartilage costal commençait à s'ossifier et à se remodeler à l'âge de 26 ans et ce, jusqu'à la huitième décade.

Ainsi, entre *26 et 30 ans*, un bec osseux, se projetant médialement le long du bord supéro-antérieur de la côte était visible. Cette ossification donnait à la surface articulaire un aspect cribiforme.

Les modifications touchaient ensuite le bord supérieur, ce qui était caractéristique de la *quatrième décade*.

A la *cinquième décade*, de petites exostoses apparaissaient le long du cartilage, et le long des berges articulaires, donnant à l'extrémité sternale un aspect de cavité centrale en forme de « U ». Cette cavité croissait de façon très variable d'un individu à l'autre. Cette ossification et ce remodelage de l'extrémité sternale aboutissaient à un aspect de murs irréguliers.

Les phénomènes de sénescence, à l'âge de *70 ans et plus*, entraînaient un aspect de puits central comblé et une surface externe globuleuse.

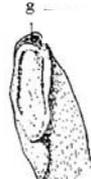
L'ensemble des modifications morphologiques chez les adultes selon Kunos sont présentées de façon exhaustive dans le tableau n° A-2 fourni en annexe (cf. partie Annexe).

**1.1.2.2. Autres modifications morphologiques de la première côte**

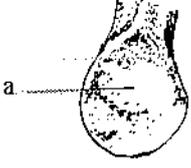
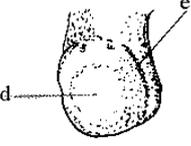
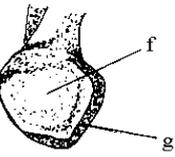
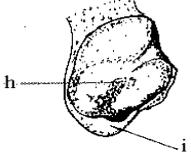
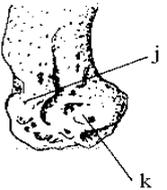
Les principales modifications morphologiques de la tête costale et du tubercule épiphysaire chez les adultes sont présentées dans les tableaux n° II-2 et n° II-3.

L'ensemble des modifications morphologiques du tubercule épiphysaire et de la tête costale chez les sujets adultes sont présentées à titre indicatif de façon exhaustive respectivement dans les tableaux n° A-3 et A-4 fournis en annexe (cf. partie Annexe).

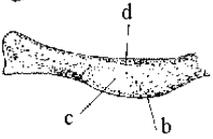
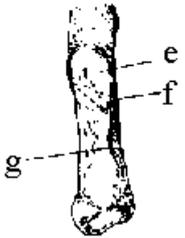
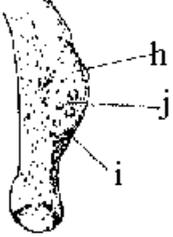
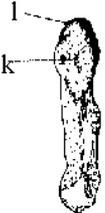
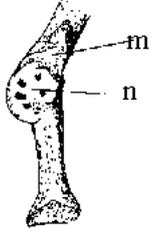
**Tableau n° II-1 - Evolution morpho-chronologique de l'extrémité sternale de la première côte (modifié, d'après Janssens et Perrot (2008) et Kunos et al. (1999)). Intervalles d'âges exprimés en années.**

Aspect	Intervalle d'âge	Evolution morphologique
	1 - 5	Surface lisse, homogène (a) Berges arrondies et floues (b)
	5 - 15	Dépôt osseux sur les berges créant une impression de rebord (c) Orientation antéro-postérieure de l'articulation (d)
	15 - 20	Sillon supéro-inférieur séparant la face articulaire en 2/3 antérieurs et 1/3 postérieur (e) Rebord bien défini et marqué (f)
	20 - 30	Surface et bordure lisses Début de l'ossification costo-chondrale : formation d'un bec osseux au bord supéro-antérieure, qui se projette médialement (g)
	30 - 40	Début de creusement et aspect cribriforme (h) de la surface Ossification du cartilage marginal (i) qui conflue avec le bec osseux (g)
	40 - 55	Profil ovoïde Cartilage encapsulé par des formations de l'os cortical (j) créant une concavité centrale (k)
	55 - 60	Augmentation du creusement de la cavité centrale en forme de « U » lié à l'ossification périphérique (l)
	60 - 70	Surface costale et marges périphériques deviennent rugueuses La cavité commence à se combler
	70 - 80	Augmentation du comblement de la cavité centrale avec une surface externe d'aspect globulaire (m)

**Tableau n° II-2 - Evolution morpho-chronologique de l'épiphyse de la tête de la première côte (modifié, d'après Janssens et Perrot (2008) et Kunos et al. (1999)). Intervalles d'âges exprimés en années.**

Aspect	Intervalle d'âge	Evolution morphologique
	1 - 5	Face sous chondrale immature à surface rugueuse avec ébauche d'une bordure (a)
	5 - 15	Tête devenant progressivement circulaire
	15 - 20	Tête circulaire ou ovoïde Fusion épiphysaire (b) Bordure complète, usée (c)
	20 - 25	Tête circulaire Surface lisse (d) Berges arrondies (e)
	25 - 30	Apparition d'irrégularités sur la surface
	30 - 35	Surface toujours circulaire devenant bombée Augmentation de la robustesse (f)
	35 - 50	Apparition d'un rebord bien marqué, plus ou moins régulier (g)
	50 - 60	Surface de plus en plus irrégulière, poreuse Formation de sillons (h) et d'exostoses le long des berges (i)
	60 - 80	Surface articulaire boursouflée (j) Apparence très irrégulière, comme rongée (k)

**Tableau n° II-3 - Evolution morpho-chronologique du tubercule épiphysaire de la première côte (modifié, d'après Janssens et Perrot (2008) et Kunos et al. (1999)). Intervalles d'âges exprimés en années.**

Aspect	Intervalle d'âge	Evolution morphologique
	1 - 10	En forme de cuvette en croissant entouré d'une bordure relativement saillante (a)
	10 - 20	Aspect saillant (b) Epiphyse fusionnée (c) Bordure émoussée (d)
	20 - 25	Profil lenticulaire (e) Berges douces et arrondies (f)
	25 - 35	Apparition d'une crête aux rebords bien marqués, le long du col en rapport avec le ligament costo-transverse (g)
	35 - 45	Rebord supérieur anguleux (h) Rebord inférieur arrondi et peu distinct (i) Surface du tubercule irrégulière avec de petites boursouflures en gouttes d'eau (j)
	50 - 60	Forme ovale (k) Augmentation de la boursouflure du rebord supérieur (l)
	60 - 80	Rebords gonflés et irréguliers (m) Surface de plus en plus percée de pertuis (n)

## 1.2. Matériel

### 1.2.1. Echantillon d'étude

Nous avons sélectionné de façon rétrospective des examens tomodensitométriques thoraciques de patients ayant bénéficié d'une exploration dans les services de radiologie des Hôpitaux de Toulouse. Les examens étaient enregistrés dans le système d'archivage de l'hôpital sous la forme d'un PACS (Picture Archiving and Communication System) (McKesson Medical Imaging Group, Richmond, BC, Canada).

Les motifs de réalisations étaient variables, le plus fréquemment en rapport avec des traumatismes thoraciques ou à visée cardio-pulmonaire.

Nous avons retenu **160** patients qui ne présentaient les critères d'inclusion suivants :

- absence de modification pathologique de l'extrémité sternale de la première côte droite,
- acquisition tomodensitométrique techniquement correcte :
  - o filtre dur « B 60 » disponible,
  - o épaisseur de coupe inférieure à 2 mm,
  - o intervalle de reconstruction inférieur à 1.5 mm.

Ainsi, la population étudiée comprenait 5 individus par année d'âge entre 15 et 30 ans et pour chaque sexe.

### 1.2.2. Protocole d'imagerie

#### 1.2.2.1. Paramètres d'acquisition (cf. tableau n° II-4)

Les examens sélectionnés ont été réalisés sur deux appareils différents :

- Sensation 16 (Siemens, Erlangen, Allemagne), avec une matrice de 512\*512 pixels,
- Brilliance 16 (Philips Brilliance, Philips Medical Systems, Amsterdam, Pays-Bas), avec une matrice de 1024\*1024 pixels.

**Tableau n° II-4 - Paramètres d'acquisition tomodensitométrique de l'échantillon étudié.**

<b>Epaisseur de coupe – collimation (en mm)</b>	1.0 - 0.5	1.0 - 1.0	2.0 - 1.0	2.0 - 2.0
<b>Nombre d'explorations tomodensitométriques</b>	31	22	61	46

### 1.2.2.2. Paramètres du post traitement des images

Le post traitement a été réalisé sur une console Léonardo (Siemens, Erlangen, Allemagne). Les reconstructions étaient effectuées en deux dimensions par le biais du MPR et en trois dimensions par le biais du mode VRT.

Les reconstructions en mode MPR consistaient en une étude crânio-caudale et une antéro-postérieure de la première côte droite, dans un plan orienté le long du grand axe de son extrémité sternale. Ces reconstructions étaient effectuées en coupe de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 1 mm.

L'étude VRT permettait une analyse tridimensionnelle de l'extrémité sternale de la première côte droite.

## 1.3. Méthodes

### 1.3.1. Méthodes de codage

Elle était composée d'études tri et bidimensionnelles.

#### 1.3.1.1. Etude tridimensionnelle

Elle a consisté en l'analyse de l'extrémité sternale de la première côte droite. Pour ce faire, une transposition des critères ostéoscopiques décrits dans l'article de Kunos a été réalisée sur des reconstructions tomодensitométriques tridimensionnelles (Kunos *et al.*, 1999). Cela nous a permis de décrire, ainsi qu'Iscaan l'avait fait précédemment pour la quatrième côte, plusieurs stades correspondant à un aspect morphologique particulier, évoluant au cours du vieillissement de l'individu.

Trois critères principaux ont été analysés pour cette stadification de l'extrémité sternale de la première côte :

- la forme géométrique,
- la topographie ou le relief de la surface,
- l'aspect des berges.

Ceci a permis la description de **cinq stades différents** dont les caractéristiques sont décrites dans le tableau n° II-5. Les reconstructions tomодensitométriques tridimensionnelles des stades 2 à 5 sont présentées dans la figure n° II-1.

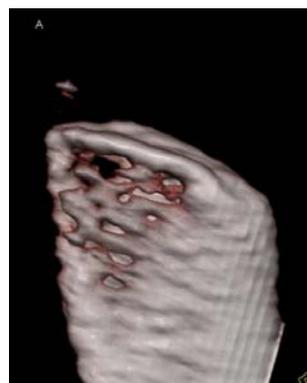
Cette stadification a ensuite été réalisée par deux observateurs en double aveugle.

**Tableau n° II-5 – Critères définissant la stadification à partir des reconstructions tridimensionnelles de l'extrémité sternale de la première côte droite.**

Stade 3D	Forme géométrique	Topographie de la surface articulaire	Forme des berges
<b>1</b>	Aspect antéro-postérieur ovoïde	Immature, lisse Os homogène	Rondes, non définies
<b>2</b>	Inclinaison antéro-postérieure de la surface articulaire	Alternance de discrètes crêtes et dépressions	Dépôt osseux supéro-inférieur sur la berge donnant un aspect d'anneau
<b>3</b>	Sillon supéro-inférieur séparant la face articulaire en 2/3 antérieur et 1/3 postérieur	Crêtes transverses limitées par des cavités ovoïdes	Berges surélevées, bien visibles
<b>4</b>	Bec osseux antérieur, qui se projette médialement  Bec osseux supérieur, qui se projette médialement	Surface devenant plane  Apparition de pertuis ("pittings")	Berges arrondies, fines sauf en regard de l'épaississement antérieur
<b>5</b>	Cartilage encapsulé par une couche de corticale osseuse créant une cavité centrale	Creusement en croissant de la surface	Berges commençant à croître  Couche fine calcifiée se transformant en épaissement local des berges, avec un développement antérieur plus important que le postérieur  Berges irrégulières



**Figure n° II-1 A - Stade 2.**



**Figure n° II-1 B - Stade 3.**



Figure n° II-1 C - Stade 4.

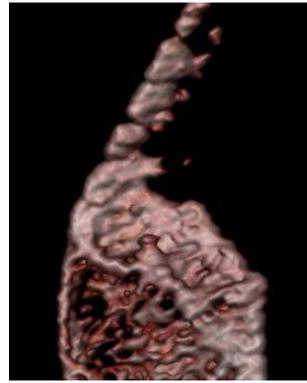


Figure n° II-1 D - Stade 5.

Figures n° II-1 – Stades tridimensionnels de l'extrémité sternale de la première côte droite, obtenus à partir de reconstructions en mode VRT.

### 1.3.1.2. Etude bidimensionnelle

Elle a consisté en l'analyse de becs osseux issus des berges de l'extrémité sternale et de calcifications situées au sein du cartilage sternal. Cet aspect a été nommé **POC**, pour Projections Osseuses et Calciques.

L'étude bidimensionnelle a consisté en la détermination du **nombre** de POC et en l'analyse de l'**aspect** des POC.

Une cotation a été réalisée comme indiqué ci-dessous après analyse des reconstructions MPR antéro-postérieure et crânio-caudale. Le tableau n° II-6 résume les critères d'évaluation à partir des reconstructions tomodensitométriques bidimensionnelles.

Concernant le critère **nombre**, les cotations possibles étaient **0** en l'absence de POC, **1** si une POC était visible et **2** si deux POC étaient présentes.

Concernant le critère **aspect**, lorsque ces POC étaient présentes, leur aspect était étudié et coté comme suit (cf. figure n° II-2) :

- En cas d'aspect linéaire de la POC, une mesure (**L1**) était effectuée :
  - o du segment compris entre l'extrémité terminale du bec osseux et l'extrémité sternale costale,
  - o du segment compris entre l'extrémité médiale de la calcification intra cartilagineuse et l'extrémité sternale costale.

Cette mesure était ensuite comparée entre la distance comprise entre l'extrémité sternale costale et la surface articulaire chondro-costale du sternum (**L2**) :

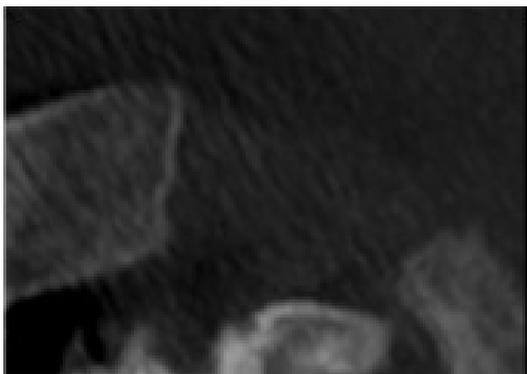
- o lorsque L1 était inférieure à  $L2/2$ , soit inférieure à 50 % de la longueur cartilagineuse costale : la cotation était à hauteur de **1**,

- lorsque L1 était supérieure à L2/2, soit supérieure à 50 % de la longueur cartilagineuse costale : la cotation s'élevait à **2**.
- En cas d'aspect non linéaire de la POC, avec une extension à la face crâniale ou caudale du cartilage costal : la cotation était de **3**.

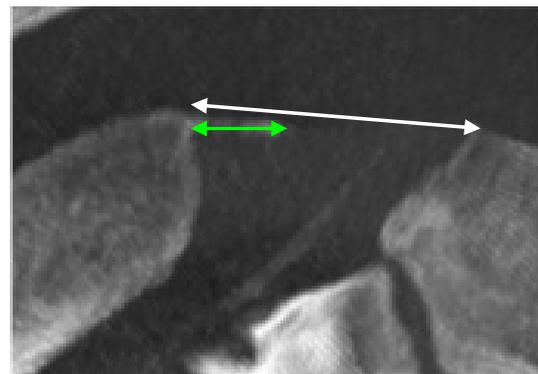
Cette évaluation a été réalisée par deux observateurs en double aveugle.

**Tableau n° II-6 – Evaluation bidimensionnelle de l'extrémité sternale de la première côte droite. NE, non évalué.**

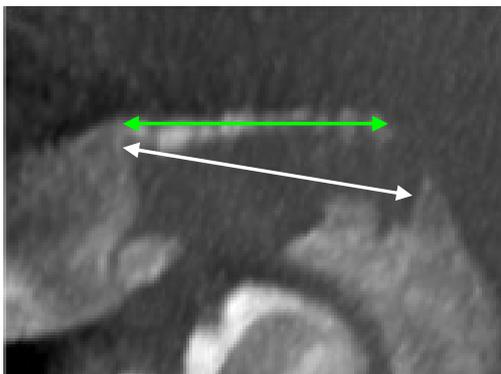
Cotation		0	1	2	3
Projection(s) Osseuse(s) ou Calcique(s) (POC)	Aspect	Absence	Aspect linéaire		Extension inférieure ou supérieure
			< 50 % de la longueur cartilagineuse costale	> 50 % de la longueur cartilagineuse costale	
	Nombre	Absence	1	2	NE



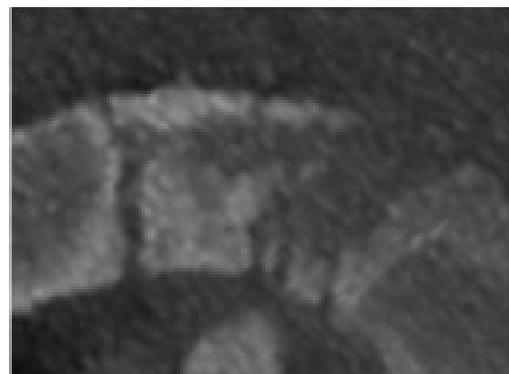
**Figure n° II-2 A – Absence de POC.**



**Figure n° II-2 B – POC linéaire de moins de 50 %.**



**Figure n° II-2 C – POC linéaire de plus de 50 %.**



**Figure n° II-2 D – Extensions supérieure et inférieure.**

**Figures n° II-2 – Projections osseuses ou calciques (POC) en reconstruction MPR crânio-caudale de l'extrémité distale de la première côte droite. La double flèche verte représente L1, soit la longueur maximale de la POC. La double flèche blanche représente L2, soit la longueur maximale du cartilage sternal.**

## 1.4. Méthode d'analyse statistique

L'analyse statistique a été effectuée à l'aide du logiciel R 2.6.2. ([www.r-project.org](http://www.r-project.org)). Deux observateurs ont contribué à ce travail. Chaque extrémité sternale était observée individuellement, à deux reprises par l'observateur n° 1 à environ quinze jours d'intervalle, puis par un autre observateur familiarisé avec la méthode testée (observateur n° 2).

- Une première analyse statistique a été effectuée afin d'estimer les **variabilités intra et inter-observateur** par le calcul du **coefficient Kappa de Cohen** ( $\kappa$ ) (Cohen, 1960). Landis et Koch ont proposé un classement de l'accord en fonction de la valeur du  $\kappa$  (Landis et Koch, 1977) (cf. tableau n° II-7).

**Tableau n° II-7** – *Echelle de concordance en fonction de la valeur du coefficient Kappa de Cohen (d'après (Landis et Koch, 1977)).*

Accord	Valeur du coefficient Kappa de Cohen
Excellent	$\geq 0.81$
Bon	0.80 – 0.61
Modéré	0.60 – 0.41
Médiocre	0.40 – 0.21
Mauvais	$\leq 0.20$

- Une seconde analyse statistique a ensuite été effectuée avec prise en compte du sexe des individus. Ainsi, pour les deux sexes était calculé les différences d'âge :

- entre chaque stade tridimensionnel estimé,
- entre chaque stade des critères bidimensionnels aspect et nombre des projections osseuses ou calciques.

Les moyennes, médianes, déviations standard, les âges minimums et maximums ont ainsi été calculés. La significativité (au seuil de 5 %) des différences d'âge entre chaque stade (bi et tridimensionnel) pour chaque sexe a été étudiée par une analyse de variance (ANOVA).

- Enfin, les différences d'âge en fonction du sexe et des stades décrits (bi et tridimensionnels) étaient étudiées à partir d'une analyse de variance à deux facteurs.

## 1.5. Résultats

### 1.5.1. Variabilités intra et inter-observateur

#### 1.5.1.1. Etude tridimensionnelle

La reproductibilité intra et inter-observateur était bonne, avec des coefficients de Kappa de Cohen calculés respectivement à 0.65 et 0.61 (cf. tableau n° II-8).

#### 1.5.1.2. Etude bidimensionnelle

Les critères nombre et aspect des projections osseuses et calciques présentaient une reproductibilité excellente, avec des coefficients de Kappa de Cohen toujours supérieurs à 0.80 (cf. tableau n° II-8).

**Tableau n° II-8** – Détermination de la variabilité intra et inter-observateur à partir des valeurs du coefficient de Kappa de Cohen. POC, Projections Osseuses et Calciques.

Critère étudié		Variabilité intra-observateur	Variabilité inter-observateur
Stades 3D		0.65	0.61
Stades 2D	Aspect des POC	0.95	0.95
	Nombre de POC	0.94	0.89

### 1.5.2. Etude tridimensionnelle

#### 1.5.2.1. Etude tridimensionnelle et corrélation avec l'âge

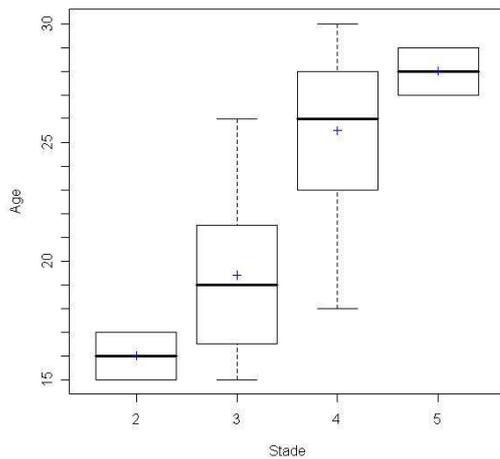
Notre population d'étude s'étendait de 15 à 30 ans, expliquant le fait qu'aucun individu ne présentait de stade tridimensionnel égal à 1.

Le tableau n° II-9 comporte les valeurs minimums, les valeurs maximales, les moyennes et les déviations standard selon le sexe, des stades tridimensionnels 2 à 5.

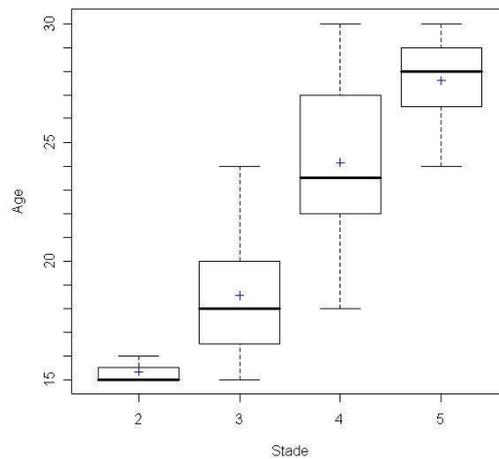
Les résultats sont également présentés sous la forme de boîte à moustache de Tukey pour chaque stade tridimensionnel, individuellement pour les sujets féminins et masculins (cf. figure n° II-3).

**Tableau n° II-9** – Distribution selon le sexe des âges de l'échantillon étudié pour le stade tridimensionnel comportant moyenne, écart-type (SD), intervalle d'âge (exprimé en années) avec l'âge minimum (min) et maximum (max) pour chaque stade.

Stade 3D	Sexe féminin	Sexe masculin
	Moyenne ± SD [min, max]	Moyenne ± SD [min, max]
2	16.0 ± 1.4 [15, 17]	15.3 ± 0.6 [15, 16]
3	19.4 ± 3.4 [15, 26]	18.5 ± 2.7 [15, 24]
4	25.5 ± 3.4 [18, 30]	24.2 ± 3.4 [18, 30]
5	28.0 ± 1.4 [27, 29]	27.6 ± 1.9 [24, 30]
ANOVA	F = 24.7 ; p < 0.01	F = 43.7 ; p < 0.01



**Figure n° II-3 A** – Population féminine.



**Figure n° II-3 B** – Population masculine.

**Figures n° II-3** – Boîtes à moustaches de Tukey de la **stadification tridimensionnelle** : les bordures supérieures et inférieures des boîtes rectangulaires représentent respectivement les percentiles 75 et 25, les barres horizontales les médianes (percentile 50), les croix les moyennes, les barres en T aux deux extrémités des boîtes les valeurs d'âges extrêmes maximums et minimums (avec un intervalle de confiance à 95 %).

### 1.5.2.2. Etude tridimensionnelle et corrélation avec le sexe

En étude tridimensionnelle, l'évolution des stades diffère significativement entre les hommes et les femmes (ANOVA à deux facteurs, p = 0.04).

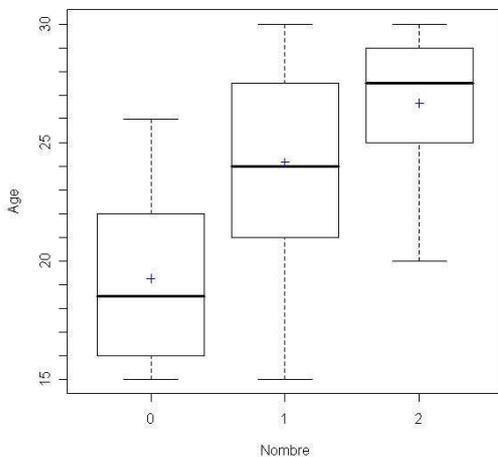
### 1.5.3. Etude bidimensionnelle

#### 1.5.3.1. Etude bidimensionnelle et corrélation avec l'âge

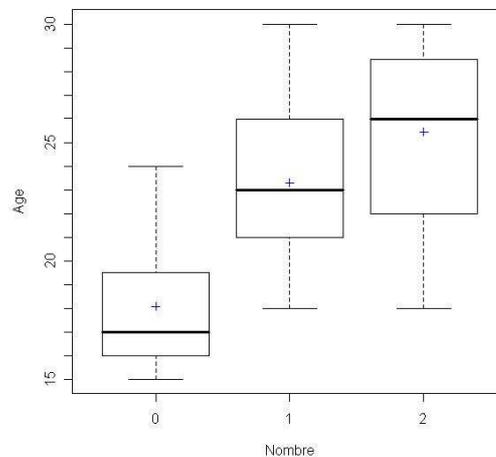
Le tableau n° II-10 présente les résultats obtenus pour le critère **nombre** de POC. Les résultats sont également présentés sous la forme de boîtes à moustaches de Tukey (cf. figure n° II-4).

**Tableau n° II-10** – Distribution selon le sexe des âges de l'échantillon étudié selon le critère bidimensionnel **nombre** de POC : moyenne, écart-type (SD), intervalle d'âge (exprimé en années) avec l'âges minimum (min) et maximum (max) au sein de chaque stade.

Stade 2D : Nombre	Sexe féminin	Sexe masculin
	Moyenne ± SD [min, max]	Moyenne ± SD [min, max]
<b>0</b>	19.2 ± 3.4 [15, 26]	18.1 ± 2.9 [15, 24]
<b>1</b>	24.2 ± 4.1 [15, 30]	23.3 ± 3.5 [18, 30]
<b>2</b>	26.6 ± 2.9 [20, 30]	25.4 ± 3.5 [18, 30]
<b>ANOVA</b>	F = 50.0 ; p < 0.01	F = 72.7 ; p < 0.01



**Figure n° II-5 A** – Population féminine.



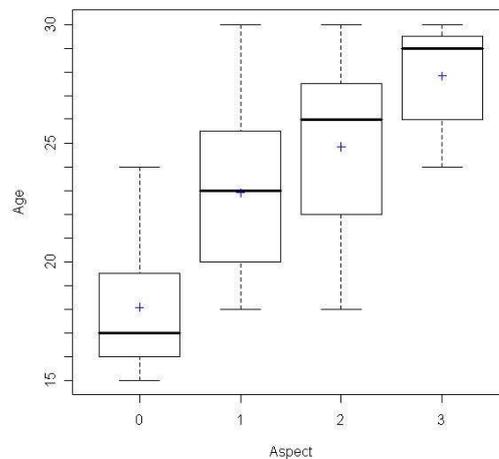
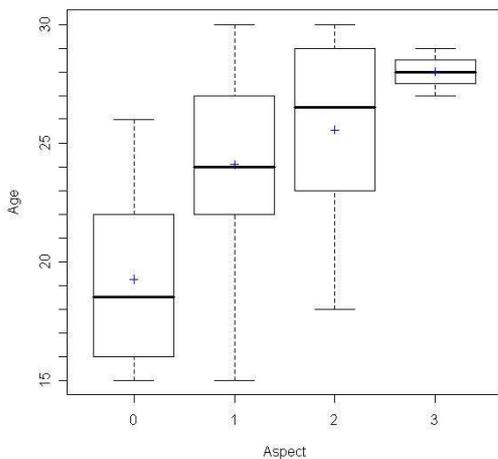
**Figure n° II-5 B** – Population masculine.

**Figures n° II-5** – Boîtes à moustaches de Tukey du critère bidimensionnel **nombre** de POC : les bordures supérieures et inférieures des boîtes rectangulaires représentent respectivement les percentiles 75 et 25, les barres horizontales les médianes (percentile 50), les croix les moyennes, les barres en T aux deux extrémités des boîtes les valeurs d'âges extrêmes maximums et minimums (avec un intervalle de confiance à 95 %).

Le tableau n° II-11 présente les résultats obtenus pour le critère **aspect** des POC. Les résultats sont également présentés sous la forme de boîtes à moustaches de Tukey (cf. figures n° II-5).

**Tableau n° II-11** – Distribution selon le sexe des âges de l'échantillon étudié selon le critère bidimensionnel **aspect** des POC : moyenne, écart-type (SD), intervalle d'âge (exprimé en années) avec l'âges minimum (min) et maximum (max) au sein de chaque stade.

Stade 2D : Aspect	Sexe féminin	Sexe masculin
	Moyenne ± SD [min, max]	Moyenne ± SD [min, max]
<b>0</b>	19.2 ± 3.4 [15, 26]	18.1 ± 2.9 [15, 24]
<b>1</b>	24.1 ± 3.9 [15, 30]	22.9 ± 3.6 [18, 30]
<b>2</b>	25.6 ± 3.8 [18, 30]	24.8 ± 3.2 [18, 30]
<b>3</b>	28.0 ± 1.0 [27, 29]	27.8 ± 2.2 [24, 30]
<b>ANOVA</b>	F = 46.1 ; p < 0.01	F = 95.3 ; p < 0.01



**Figure n° II-6 A** – Population féminine.

**Figure n° II-6 B** – Population masculine.

**Figures n° II-6** – Boîtes à moustaches de Tukey du critère bidimensionnel **aspect** des POC : les bordures supérieures et inférieures des boîtes rectangulaires représentent respectivement les percentiles 75 et 25, les barres horizontales les médianes (percentile 50), les croix les moyennes, les barres en T aux deux extrémités des boîtes les valeurs d'âges extrêmes maximums et minimums (avec un intervalle de confiance à 95 %).

### 1.5.3.2. Etude bidimensionnelle et corrélation avec le sexe

Pour les critères bidimensionnels **nombre** et **aspect** des POC, aucune différence entre les hommes et les femmes n'était statistiquement significative, avec un  $p > 0.05$ .

## 1.6. Discussion sur l'intérêt de l'utilisation de l'imagerie dans l'estimation de l'âge par l'étude de la première côte droite

### 1.6.1. La méthode de Kunos (Kunos *et al.*, 1999)

L'intérêt porté par les anthropologues sur cette première côte est relativement récent. Pourtant, sur des restes humains squelettiques elle est la plus facile des côtes à identifier. Kunos et ses collègues ont précédemment décrit les variations et les modifications macroscopiques morphologiques de la première côte comme étant de bons indicateurs d'âge au décès (Kunos *et al.*, 1999). L'auteur a étudié un échantillon de premières côtes et analysé les modifications liées à l'âge des différents éléments constituant la côte. Ces modifications concernaient la forme géométrique de la surface articulaire de l'extrémité sternale, la topographie de sa surface ainsi que ses berges. Ces différentes caractéristiques et leurs modifications étaient liées à l'âge. L'extrémité sternale de la première côte présentait des modifications morphologiques importantes de la naissance à la quatrième décennie, et plus particulièrement de la seconde à la troisième décennie.

L'auteur, contrairement à d'autres classifications utilisées pour déterminer l'âge d'un individu, que cela soit la quatrième côte (Iskan *et al.*, 1984 a ; 1984 b ; Iskan et Loth, 1986 a ; 1986 b), la symphyse pubienne (Brooks et Suchey, 1990 ; Meindl *et al.*, 1985 ; Katz et Suchey, 1986 ; Todd, 1920) et la surface auriculaire (Buckberry et Chamberlain, 2002 ; Lovejoy *et al.*, 1985), qui présentent toutes de larges chevauchements d'âges entre les différents stades morphologiques, a employé une approche différente : celle de l'âge cible. Malheureusement, cette étude était descriptive, sans étude statistique entre l'âge et les modifications morphologiques que subissait la première côte au cours de vieillissement des sujets. De plus, le sexe des individus étudiés, l'affinité populationnelle n'étaient pas pris en compte et la latéralité de côtes utilisée n'était pas indiquée.

La méthode de Kunos a récemment été modifiée par DiGangi qui a utilisé une approche statistique bayésienne (DiGangi *et al.*, 2008). L'échantillon étudié dans cet article était composé exclusivement d'hommes originaires des Balkans. Ainsi, à partir de 11 critères âges-dépendants de la première côte, ont été générés les âges transitionnels correspondants pour chacun d'entre eux, en fonction de leurs évolutions morphologiques au cours du vieillissement. Sur ces 11 critères, deux étaient les plus robustes, les autres ayant été exclus : la forme géométrique de l'extrémité sternale et la texture de la surface du tubercule épiphysaire. La combinaison de ces deux critères apparaissait à l'auteur comme étant applicable et discriminante jusqu'à la neuvième décennie.

Peu d'études ont testé la méthode décrite par Kunos et encore moins entre la deuxième et la troisième décennie, période où elle est pourtant décrite comme étant la plus performante (Kunos *et al.*, 1999). Schmitt et Murail ont testé la méthode sur une population asiatique d'âge et de sexe connus (Schmitt et Murail, 2004). La méthode étant subjective, les auteurs ont choisis d'estimer à quelles catégories d'âges appartenaient les individus étudiés plutôt que de déterminer un âge précis. Seulement 55 % des individus étudiés étaient classés correctement et les individus de plus de 60 ans étaient sous estimés. Trois explications étaient données par les auteurs concernant ces mauvais résultats :

- soit les modifications de la première côte en fonction de l'âge sont plus variables que ce que Kunos indique dans son étude,
- soit la technique est trop subjective,
- soit il existe une forte incidence de l'origine géographique.

Kurki a également testé cette méthode sur un petit échantillon de 29 individus d'Amérique du Nord (25 individus de sexe masculin, 4 de sexe féminin) (Kurki, 2005). Le coefficient de corrélation ( $r$ ) de la méthode de Kunos était élevé, à 0.69 et le coefficient de détermination ( $r^2$ ) modéré, à 0.47. La précision et la fiabilité étaient comparables à celles des méthodes utilisées en pratique anthropologique courante. Toutefois, la méthode semblait plus performante chez les individus de plus de 60 ans que chez les individus de moins de 50 ans. De plus, elle surestimait l'âge des individus de moins de 60 ans et sous-estimait ceux de plus de 60 ans. L'auteur précisait par ailleurs que des illustrations et explications supplémentaires de la part de Kunos seraient fort appréciées afin de rendre cette méthode utilisable de façon routinière en anthropologie physique.

### 1.6.2. Première côte droite et tomodynamométrie multicoupe

Cette côte est facilement accessible sur des examens d'imagerie tomodynamométrique thoracique. Sur des individus vivants, dans une problématique de détermination de l'âge l'extrémité médiale de la clavicule a déjà fait l'objet de nombreuses publications. Certaines sont basées sur l'analyse radiographique simple (Schmelting *et al.*, 2004 ; Schulz *et al.*, 2008), mais d'autres sur des coupes axiales tomodynamométriques (Kreitner *et al.*, 1998 ; Schulz *et al.*, 2005 ; Schulze *et al.*, 2006).

### 1.6.2.1. Première côte droite et reconstructions tridimensionnelles

Dans notre étude, nous avons mis en évidence une bonne corrélation entre les modifications morphologiques de l'extrémité sternale de la première côte droite et l'âge civil des individus étudiés.

La comparaison entre les hommes et les femmes a démontré une différence statistiquement significative, et ce, pour les différents stades tridimensionnels ( $p = 0.04$ ).

A stade tridimensionnel identique, les femmes étaient plus âgées que les hommes.

Plusieurs résultats nous semblent intéressants pour la pratique médico-légale :

- le **stade 2** était atteint pour les deux sexes avant l'âge de 18 ans (cf. tableau n° II-9 et figures n° II-3),
- le **stade 4** était atteint pour les deux sexes au plus tôt à l'âge de 18 ans (cf. tableau n° II-9 et figures n° II-3).

De plus, cette stadification tridimensionnelle est une technique présentant des variabilités intra et inter-observateur correctes comme en attestent les valeurs des coefficients de Kappa de Cohen (cf. tableau n° II-8).

### 1.6.2.2. Première côte droite et reconstructions bidimensionnelles

L'étude bidimensionnelle s'intéressant aux becs osseux et aux calcifications intra cartilagineuses est également intéressante. Cette analyse, notamment à la recherche de calcifications au sein du cartilage, reliées ou non à la surface sternale de la côte est facilement réalisable en tomodensitométrie. Ces éléments d'information, en cas de calcifications chondrales non reliées à la côte sont des éléments qui ne sont pas accessibles à l'étude sur os secs, car perdus au cours de la préparation des os. Ce critère semi quantitatif nous semble relever d'une grande importance pour la détermination de l'âge d'un individu.

Plusieurs résultats présentent également un intérêt médico-légal :

- chez les individus de sexe masculin, un **score nul** concernant le critère bidimensionnel **aspect** des POC signifie que le sujet a un âge inférieur à 25 ans (cf. tableau n° II-11 et figures n° II-6),
- chez les individus de sexe féminin, la présence d'un **score égal à 2** concernant le critère bidimensionnel **aspect** des POC signifie que le sujet a un âge supérieur à 18 ans (cf. tableau n° II-11 et figures n° II-6),
- la présence de calcifications importantes et extensives, en rapport avec un **score égal à 3** concernant le critère bidimensionnel **aspect** des POC a été mise en

évidence chez des individus de plus de 18 ans chez les hommes et chez les femmes (cf. tableau n° II-11 et figures n° II-6).

- chez les individus de sexe masculin, un **score égal à 1** concernant le critère bidimensionnel **nombre** de POC signifie que le sujet a un âge supérieur à 18 ans (cf. tableau n° II-10 et figures n° II-5),
- chez les individus de sexe féminin et masculin, la présence d'un **score égal à 2** concernant le critère bidimensionnel **nombre** de POC signifie que le sujet a un âge supérieur à 18 ans (cf. tableau n° II-10 et figures n° II-5).

Il n'a pas été mis en évidence de différence statistiquement significative entre les individus de sexe masculin et féminin concernant les critères nombre et aspect des POC.

Enfin, cette stadification bidimensionnelle est une technique présentant un intérêt pratique car ses variabilités intra et inter-observateur sont excellentes.

# Chapitre 2

## La quatrième côte droite

---

A la fin des années 1970, la question de l'estimation de l'âge au décès se posait encore avec de nombreuses incertitudes et surtout certaines difficultés. En effet, si des méthodes existaient déjà, comme l'analyse du degré d'évolution dentaire, la chronologie relative de fusion des extrémités épiphysaires des os longs, la fermeture de la suture sphéno-basilaire ..., il faut noter que les spécialistes connaissaient les limites de chacune de ces méthodes (Ferembach *et al.*, 1979). En effet, à cause des processus de remodelage osseux et des phénomènes de sénescence qui affectent l'os, l'estimation de l'âge devient plus difficile à partir du moment où la maturation osseuse est terminée (Iskan et Loth, 1989). Il est essentiel de connaître la limite entre ce qui correspond à la variabilité et ce qui constitue l'aspect « universel » d'une surface osseuse pour pouvoir proposer des réponses aux questions du modèle et de la séquence de développement. De plus, même aujourd'hui nous avons conscience du fait qu'il existe toujours un décalage entre l'âge chronologique (qui est celui que l'on voudrait connaître) et l'âge biologique (auquel on a réellement accès à partir de l'étude du squelette) et qui est justement soumis à une très grande variabilité.

Compte-tenu des besoins exprimés par la médecine légale et des contraintes liées à l'application de la méthode Iskan, notre étude va tenter d'appliquer cette estimation de l'âge à des reconstructions tomодensitométriques. Les résultats de la comparaison entre les deux supports d'application nous permettront de discuter de la possibilité d'appliquer la méthode ostéologique à des reconstructions tomодensitométriques.

### **2.1. Description de la méthode développée par Iskan et ses collègues**

#### **2.1.1. La méthode sur des populations caucasoïdes**

A partir de leurs observations, Iskan et ses collègues ont présenté dès 1983 une première étude proposant d'évaluer l'âge au décès à partir de l'extrémité sternale de la quatrième côte droite (Iskan *et al.*, 1984 a ; 1984 b ; 1985).

Dans un premier temps cette méthode ne s'intéressait qu'aux individus masculins et décrivait l'évolution de trois composantes de l'os (Iskan *et al.*, 1984 a) :

- la profondeur du puits sternal,
- le profil de ce puits,
- l'aspect du bord et des murs.

Chacune de ces composantes était divisée en **six classes** qui déterminaient **six stades**.

Leur étude montrait que le profil du puits et l'aspect des bords et des murs fournissaient de meilleurs résultats que la profondeur absolue du puits.

Iskan et ses collaborateurs élaboraient plus tard la méthode définitive : elle concernait dans un premier temps uniquement les hommes et présentait en tout **neuf stades** d'évolution morphologique de l'extrémité sternale de la quatrième côte droite (Iskan *et al.*, 1984 b) ; ce descriptif est rappelé dans le tableau n° II-12. L'année suivante ils proposaient la même méthode pour les individus féminins (Iskan *et al.*, 1985). La méthode proposait de déterminer l'appartenance d'un individu à tel ou tel stade d'après les changements observés dans la forme, le profil, la texture et la qualité globale de l'extrémité sternale de la côte. Iskan définit ainsi neuf stades d'évolution pour chaque sexe, présentant les modifications progressives de chaque caractère pris en compte pour la description. De plus il présentait pour chaque stade et pour chaque sexe une série de trois photos qui complètent les descriptions. L'âge était ensuite estimé à partir de la moyenne et de l'intervalle de confiance à 95 % pour chaque phase et pour chaque sexe (Krogman et Iskan, 1986). Ces résultats sont résumés dans le tableau n° II-13. Ces méthodes d'estimation de l'âge ont été établies d'après l'analyse d'un échantillon de 118 hommes « blancs » et 86 femmes « blanches », d'âges connus, dont les extrémités costales ont été prélevées lors d'autopsies. Les côtes avaient été nettoyées de tous les tissus adhérents en les faisant tremper pendant plusieurs semaines dans l'eau puis en les faisant bouillir de 10 à 15 minutes. A la fin de cette préparation, les tissus et le cartilage pouvaient être ôtés facilement du contact de l'os, sans risque de l'abîmer. Les photographies d'os secs des différents stades pour chaque sexe sont présentées dans la figure n° II-6.

**Tableau n° II-12 A - Caractéristiques de la quatrième côte droite permet l'estimation de l'âge d'un individu de sexe masculin (d'après Baccino et al., 1999 ; Bass, 1995 ; Iscan et al., 1984 a ; Loth et al., 1994 ; Oettle et Steyn, 2000 ; Russel et al., 1993 ; Yoder et al., 2001).**

Phase	Caractéristiques			
	Surface articulaire	Bord et festons	Excavation et murs	Qualité de l'os
<b>0</b>	Ondulée	Bord irrégulier avec des angles arrondis	Aucune	Ferme, lisse, très solide
<b>1</b>	Plus ou moins ondulée	Bord lisse, arrondi, légèrement ondulé Festons pouvant débiter aux angles	Début d'excavation	Ferme, lisse, solide
<b>2</b>		Bord festonné ou légèrement en vague avec des angles lisses, arrondis	Augmentation de la profondeur de l'excavation entourée de murs épais et lisses, en forme de « V » formé par les murs antérieurs et postérieurs	Ferme, solide
<b>3</b>		Bord plus irrégulier avec un léger feston résiduel	Excavation en forme de « U » étroit avec des murs épais et des angles arrondis	Ferme, solide
<b>4</b>		Disparition de l'aspect régulier en feston	Creusement de l'excavation avec un aspect en forme de « U » modéré	Diminution du poids et de la fermeté de l'os
<b>5</b>		Bord légèrement plus irrégulier Disparition complète de l'aspect en feston remplacé par des projections osseuses irrégulières	Excavation en forme de « U » +/- évasé avec des murs plus fins et des angles plus tranchants Détérioration de l'os dans l'excavation	Début de signes de porosité Détérioration osseuse dans l'excavation Perte de densité osseuse
<b>6</b>		Bord irrégulier avec des excroissances osseuses naissantes et plus prononcées sur les bords supérieurs et inférieurs	Excavation en forme de « U » plus profonde, plus large. Murs fins avec des angles cassants	Matière osseuse plus légère, plus mince Augmentation de la porosité et de la détérioration de l'os à l'intérieur de l'excavation
<b>7</b>		Bord irrégulier avec des excroissances osseuses importantes	Excavation profonde en forme de « U » large ou très large Murs fins, fragiles, avec des angles tranchants, irréguliers et des excroissances osseuses	Os poreux, léger, fragile, cassant, avec détérioration de sa qualité
<b>8</b>		Bord très irrégulier avec des excroissances osseuses tranchantes, cassantes, fragiles et proéminentes aux bords supérieur et inférieur	Excavation en « U » très large avec des excroissances osseuses naissant du plancher de la cavité Plancher parfois absent ou comblé par des projections osseuses Murs très fins, fragiles et cassants avec des angles tranchants et très irréguliers. Parfois fenêtre dans les murs	L'intérieur de l'excavation montre une extrême porosité et une détérioration évidente de la matière osseuse.

## Deuxième partie : Imagerie en coupe et anthropologie – Chapitre 2

**Tableau n° II-12 B - Caractéristiques de la quatrième côte droite permet l'estimation de l'âge d'un individu de sexe féminin (d'après Baccino et al., 1999 ; Bass, 1995 ; Iscan et al., 1984 b ; Loth et al., 1994 ; Oettle et Steyn, 2000 ; Russel et al., 1993 ; Yoder et al., 2001).**

Phase	Caractéristiques			
	Surface articulaire	Bord et festons	Excavation et murs	Qualité de l'os
<b>0</b>	+/- plate avec des crêtes	Bord irrégulier avec des angles arrondis	Aucune	Ferme, lisse, très solide
<b>1</b>	Début d'une vague entaille Crêtes et ondulations encore visibles	Bord arrondi et irrégulier avec parfois une petite ondulation		Ferme, lisse, solide
<b>2</b>		Bord arrondi, ondulé Quelques festons se forment à l'angle arrondi	Excavation en forme de « V », plus profonde et entourée de murs antérieur et postérieur épais et lisses Substance de crêtes et d'ondulations dans l'excavation	Ferme, solide
<b>3</b>		Bord arrondi avec un aspect festonné, régulier, marqué	Pas ou peu d'augmentation de la profondeur de l'excavation Excavation encore en forme de « V », s'élargit parfois se rapprochant d'un « U » étroit. Murs plus minces. Murs antérieur ou postérieur pouvant montrer un arc central	Ferme, solide
<b>4</b>		Festons rémanents le long du bord arrondi en arc, mais divisions moins prononcées et moins bien définies Angles « usés » en bas	Excavation plus profonde en forme de « V » évasé ou de « U » étroit Murs plus fins mais bord arrondi	Diminution du poids et de la fermeté de l'os
<b>5</b>		Plus de festons rémanents et angles tranchants Bord irrégulier dans sa partie montante L'arc central reste la projection la plus proéminente	Excavation très évasée en forme de « V » ou de « U » Murs encore plus fins Dépôt d'une plaque lisse, dure, couvrant la plus grande partie de l'intérieur de l'excavation	
<b>6</b>		Bord tranchant avec des excroissances osseuses irrégulières L'arc central est moins visible	Excavation encore plus profonde, en forme de « V » ou de « U » plus large Murs plus fins avec des angles tranchants et en bord irrégulier Plaque plus rugueuse et poreuse	Os fin et cassant Augmentation de la porosité et de la détérioration de l'os à l'intérieur de l'excavation
<b>7</b>		Bord irrégulier avec des angles tranchants Arc central toujours présent, mais avec des projections pointant des bords supérieur et inférieur ou tout autour du bord	Excavation en forme de « U » évasé, moins profond qu'en phase 6 Murs très fins avec des bords irréguliers Excroissances osseuses irrégulières naissant du bord et du plancher de l'excavation	Os très léger, mince, cassant et fragile Détérioration notable à l'intérieur de l'excavation
<b>8</b>		Bord très tranchant et irrégulier avec des excroissances cassantes proéminentes aux bords supérieur et inférieur L'arc central est reconnaissable	Excavation en forme de « U » avec un plancher superficiel, très détérioré ou complètement érodé Excroissances osseuses comblant l'excavation Murs très fins, fragiles, poreux, avec des bords très irréguliers et des angles très tranchants Fenestrations parfois dans les murs	L'os est de mauvaise qualité, très fin, léger, cassant et fragile

**Tableau n° II-13** – Moyennes et écart-types par sexe et par phases, exprimés en années de l'échantillon sur lequel Iscan a fondé sa méthode (d'après Krogman et Iscan, 1986).

Phase	Sexe féminin		Sexe masculin	
	Age moyen	Ecart type	Age moyen	Ecart type
<b>0</b>	< 13		< 16	
<b>1</b>	14		17.3	0.5
<b>2</b>	17.4	1.52	21.9	2.13
<b>3</b>	22.6	1.67	25.9	3.5
<b>4</b>	27.7	4.62	28.2	3.83
<b>5</b>	40	12.22	38.8	7
<b>6</b>	50.7	14.93	50	11.17
<b>7</b>	65.2	11.24	59.2	9.52
<b>8</b>	76.4	8.83	71.5	10.27

**2.1.2. Des différences inter ethniques de maturation de l'extrémité sternale de la quatrième côte droite existent t'elles?**

Russell a testé en 1993 la méthode sur la collection de Hamann-Todd (Russel *et al.*, 1993). Elle a conclut par le fait que les américains ayant des descendants africains présentaient une tendance non significative à un retard dans les changements morphologiques de leur quatrième côte droite comparés aux américains descendants d'européens. Ceci est en opposition avec les travaux d'Iscan qui concluait en 1987 que les afro-américains avaient une tendance à avoir des modifications morphologiques plus rapides que les « blancs », spécialement après l'âge de 30 ans (Iscan *et al.*, 1987). Toutefois, Iscan modérait leurs conclusions concernant ces modifications inter ethniques, en précisant que la participation de critères sociaux pouvait être à l'origine de ces différences, mais qu'il n'était pas parvenu à le mettre en évidence (Iscan *et al.*, 1987).



## **2.2. Matériel**

### **2.2.1. Echantillon d'étude**

Alors que l'échantillon initial était composé de **39** individus, l'échantillon d'analyse ne sera constitué que de **36** extrémités sternales de côtes car :

- deux d'entre elles ont été entièrement détériorées par l'étape du décharnement et ne permettaient plus aucune cotation sur os sec,
- la troisième fournissait des cotations diamétralement opposées entre les deux méthodes comparées, et cela pour l'ensemble des observateurs. Elle a donc été exclue de l'échantillon pour ne pas biaiser l'analyse.

Cette étude a donc été réalisée à partir d'un échantillon de **36** extrémités sternales de quatrièmes côtes droites prélevées lors d'autopsies médico-légales dans l'Unité Médico-Judiciaire de l'Hôpital Rangueil-Larrey, CHU Toulouse, dans un but d'identification médico-légale. Tous les individus ont ensuite été identifiés secondairement de façon formelle.

Tous les individus étaient d'affinité populationnelle caucasoïde, d'âge et de sexe connus. Notre échantillon présentait un âge moyen de 41 ans pour les hommes, et de 52 ans pour les femmes, avec un écart-type de 14.4 et 21.4 ans réciproquement. Le tableau n° II-14 et la figure n° II-7 indiquent la répartition de notre population d'étude.

**Tableau n° II-14 - Répartition de l'effectif de l'échantillon étudié.**

Classes d'âges (en années)	Sexe féminin		Sexe masculin		Sexes confondus	
	Effectifs	Pourcentages	Effectifs	Pourcentages	Effectifs	Pourcentages
<b>10 - 19</b>	0	0	1	5.0	1	2.8
<b>20 - 29</b>	3	18.8	3	15.0	6	16.7
<b>30 - 39</b>	3	18.8	7	35.0	10	27.8
<b>40 - 49</b>	4	25.0	3	15.0	7	19.5
<b>50 - 59</b>	2	12.5	4	20.0	6	16.7
<b>60 - 69</b>	1	6.2	1	5.0	2	5.5
<b>70 - 79</b>	1	6.2	1	5.0	2	5.5
<b>80-99</b>	2	12.5	0	0	2	5.5
<b>Total</b>	16	100	20	100	36	100

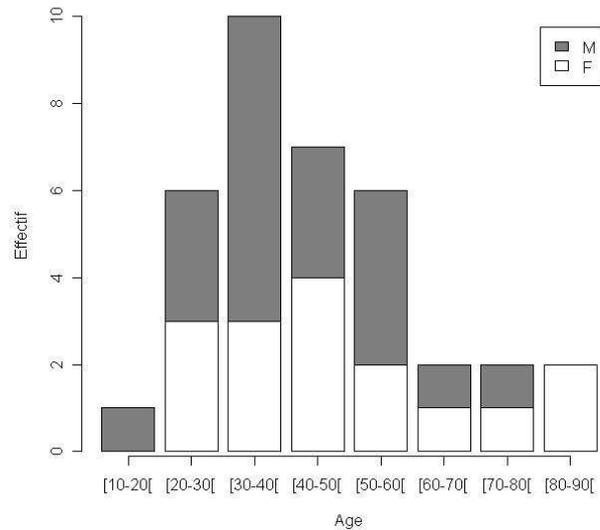


Figure n° II-7 - Histogramme de répartition par âge et sexe de l'échantillon étudié.

## 2.2.2. Protocole d'imagerie

Chaque extrémité sternale de côte droite (prélevée en cours d'autopsie) était placée dans un petit pot en plastique avec tous ses tissus adhérents et une saisie scanner de cette structure était réalisée. Pour cela, les containers étaient disposés les uns à côté des autres dans l'axe longitudinal de la table d'examen. Le scanner réalisait d'abord une saisie globale de l'ensemble des contenants sous la forme d'un topogramme. Ceci permettait par la suite de positionner une fenêtre d'exploration tomодensitométrique sur chaque côte afin que l'acquisition soit réalisée de manière indépendante pour chacune.

### 2.2.2.1. Paramètres d'acquisition tomодensitométrique

L'appareil utilisé était un Siemens Sensation 16 barrettes spiralé (Siemens, Erlangen, Allemagne). Lors des acquisitions étaient appliqués une tension de 120 kV et une intensité de 240 mA. Chaque session d'image était calibrée pour une acquisition en 16 x 0.75 mm (*raw data*).

Les reconstructions axiales chevauchantes étaient ensuite effectuées sous la forme de coupes de 1 mm reconstruites tous les millimètres. Le choix de ces épaisseurs se justifiait par la possibilité d'être applicable sur des scanners spiralés monobarrettes, ce qui étendait le champ d'application de la méthode à des appareils un peu moins récents, tout en fournissant des données d'une précision suffisante.

Deux types de filtres de convolution ont été appliqués lors de la saisie des images :

- un filtre « mou » (B40) utilisé pour les reconstructions tridimensionnelles,
- un filtre « dur » (B70) pour les reconstructions bidimensionnelles.

### 2.2.2.2. Paramètres du post traitement des images

Pour ce faire, nous avons utilisé une console Leonardo Siemens (Siemens, Erlangen, Allemagne).

Le mode **bidimensionnel** nous a permis d'obtenir des coupes dans les plans transverses et frontaux du grand axe des côtes selon le principe de la reconstruction MPR, ceci afin de bien visualiser la morphologie du puits sternal. Toutes les coupes étaient calibrées à 1 mm d'épaisseur ; l'axe principal de coupe étant placé au milieu, les coupes latérales étaient étirées de part et d'autre pour couvrir toute l'épaisseur et la hauteur de la côte dans des plans respectivement crânio-caudal et antéro-postérieur.

Les reconstructions **tridimensionnelles** des extrémités sternales ont été réalisées en mode VRT, à partir des images acquises avec application d'un filtre mou. Plusieurs vues mettant en évidence chacune des faces utiles à l'analyse (vision dorsale, vision ventrale, fond du puits) étaient obtenues en faisant tourner l'image et en modifiant l'orientation d'une source lumineuse virtuelle afin de mettre en valeurs les reliefs.

Les examens et les reconstructions étaient ensuite archivés dans le système d'archivage de l'hôpital sous la forme d'un PACS (Picture Archiving and Communication System) (McKesson Medical Imaging Group, Richmond, BC, Canada).

### 2.2.3. Préparation des côtes après examen tomодensitométrique

Chaque côte prélevée et scannée était ensuite traitée afin de retirer l'ensemble des tissus adhérents à l'os. Pour cela, elles étaient placées dans un bocal, lui-même placé dans un bain-marie. L'opérateur les faisait ensuite cuire très lentement à feu doux, durant huit heures. Pour chaque côte l'opération était répétée trois fois. En fin de cuisson, les côtes étaient nettoyées et identifiées (nom, numéro d'identification, dates de naissance et d'autopsie éventuellement). Elles étaient conservées ensuite quelques jours dans du formol puis rincées et séchées. Le numéro de chaque côte était également écrit sur l'une de ses faces, à l'encre de chine.

## 2.3. Méthodes

### 2.3.1. Méthode de codage

Les deux observateurs ayant participé à ce travail disposaient de la description et des photographies des publications d'Iscan (Iscan *et al.*, 1984 a ; 1984 b ; 1985) pour déterminer le stade, que ce soit à partir de l'os sec ou bien des images tomодensitométriques.

- Dans le cas des **os secs**, chaque extrémité sternale était observée individuellement, à deux reprises par l'observateur n° 1 à environ dix jours d'intervalle, puis par un autre observateur familiarisé avec la méthode testée (observateur n° 2).
- Le codage à partir des **reconstructions tomодensitométriques** était réalisé grâce à un diaporama permettant de visionner les reconstructions. Pour cela une diapositive était consacrée à chaque côte, montrant une vue tridimensionnelle dorsale, une ventrale, une vue du fond du puits sternal ainsi que plusieurs reconstructions bidimensionnelles de la côte (afin d'avoir une information concernant la forme du puits). Les figures n° II-8 illustrent le comparatif entre les os secs et les reconstructions tomодensitométriques.

### 2.3.2. Méthodes d'analyse statistique

L'ensemble des analyses a été réalisé grâce au logiciel R 2.6.2 ([www.r-project.org](http://www.r-project.org)).

L'analyse statistique a été effectuée sans prise en compte du sexe, compte tenu du faible effectif de notre population d'étude.

- L'analyse a testé dans un premier temps **l'erreur intra-observateur** (pour l'observateur n°1) pour chacune des deux méthodes (os secs et reconstructions tomодensitométriques).
- **L'erreur inter-observateur** a également été calculée d'après la méthode de stadification sur os secs puis sur les reconstructions tomодensitométriques.
- Enfin, **l'erreur inter-méthode** à été calculée pour chacun des observateurs.

Les résultats montreront des pourcentages d'observations identiques et d'observations à plus ou moins une phase d'écart. Le **calcul de corrélations de  $\gamma$**  permettra de discuter de la relation entre deux codages car la corrélation  $\gamma$  tient compte des ex-æquo des observations.

Le **calcul du coefficient de Kappa de Cohen** aurait permis de discuter de la concordance des cotations entre les différents observateurs ; cependant, compte tenu de la faible taille de notre échantillon, il existe des probabilités marginales disparates qui produisent des estimations exceptionnellement basses du coefficient Kappa même lorsque la concordance est forte (Nadalin *et al.*, 2003). De plus, toujours à cause de la petite taille de l'échantillon, nous ne pourrions pas comparer les valeurs obtenues (Bonnardel, 1995). Ainsi, il nous a paru alors plus adapté de calculer **l'alpha de Krippendorff** ( $\alpha$  de Krippendorff), connu pour être un indice conservatif de la concordance entre observations (Lombard *et al.*, 2005). Il est en effet considéré comme un indice fiable développé pour mesurer l'accord entre observateurs, juges ... ou instruments de mesures. Il est largement applicable lorsque l'on veut tester deux méthodes ou plus sur un même échantillon et que l'on souhaite savoir à quel

niveau elles s'accordent :  $\alpha$  est alors égal à 1 lorsque l'accord est parfait, il est nul quand les résultats sont dus à la chance et/ou au hasard. Contrairement à d'autres coefficients,  $\alpha$  constitue une généralisation de plusieurs indices de fiabilité ; il peut s'appliquer à un nombre d'observateurs supérieur à deux, à plusieurs catégories, échelles de valeurs ou mesures, à des données métriques ou de niveau (données nominales ou ordinales, intervalles, rapports...) ; son calcul accepte les données manquantes et ne nécessite pas d'effectif minimum, ce qui représente un avantage certain par rapport à notre étude (Krippendorff, 2006). Nous avons donc utilisé le calcul du  $\alpha$  pour des données ordinales. Krippendorff a proposé un classement de l'accord en fonction de la valeur du  $\alpha$  (Krippendorff, 2006) (cf. tableau n° II-15).

**Tableau n° II-15** – Echelle de concordance en fonction de la valeur du  $\alpha$  de Krippendorff (Krippendorff, 2006).

Concordance	Valeur du $\alpha$ de Krippendorff
Très bonne	1 – 0.80
Bonne	0.79 – 0.60
Acceptable	0.59 – 0.40
Faible	0.39 – 0.20
Nulle	$\leq 0.19$

De plus, tout au long de cette partie nous reprendrons les termes utilisés par Neveu et ses collaborateurs pour décrire le niveau d'accord qualitatif entre observations ou entre observateurs (Neveu *et al.*, 2004) :

- Les **accords parfaits** correspondent au nombre d'individus ne présentant aucun écart de phase entre deux observations, deux méthodes ou entre deux codages d'observateurs différents.
- Dans les cas où il y aura plus ou moins une phase d'écart nous parlerons de **désaccords partiels**.
- Les autres cas seront qualifiés de **désaccords** ou **désaccords maximaux**.

## **2.4. Résultats**

### **2.4.1. Variabilité intra-observateur**

#### **2.4.1.1. Sur os secs**

Nous pouvons observer que 50 % des codages fournissent la même phase dans les deux observations, et 80.6 % des observations produisent un écart d'une phase (cf. tableau n° II-16).

**Tableau n° II-16 - Répartition des écarts de phase et effectifs entre deux sessions de codage pour l'observateur n° 1 sur os secs.**

Écarts de phases	Effectifs	Pourcentages	Pourcentage d'accords parfaits et de désaccords partiels
- 2	7	19.4	80.6
- 1	7	19.4	
0	18	50	
+ 1	4	11.2	
<b>Total</b>	36	100	

Le calcul de la corrélation de Gamma fournit une valeur  $\gamma$  de 0.87 avec une valeur de p inférieure à 0.001. La corrélation entre les deux observations est donc très significative. Cette conclusion est confirmée par la valeur du  $\alpha$  de Krippendorff de 0.79, ce qui correspond à un bon niveau de concordance.

Le tableau n° II-17 montre par ailleurs la dispersion de phases entre les deux séries de cotation de l'observateur n° 1. Nous pouvons constater une légère surestimation des phases lors de la deuxième observation par rapport à la première.

**Tableau n° II-17 - Dispersion des phases entre deux sessions de codage par l'observateur n° 1 sur os secs.**

Codage sur os secs	Phases attribuées lors du deuxième codage									Total
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
Phases attribuées lors du premier codage	0	0	1							1
	1	0	0	0	1					1
	2		0	3	0					3
	3			0	0	0	6			6
	4				1	1	3			5
	5					1	7	2		10
	6						1	4	1	6
	7							1	1	2
	8								0	2
<b>Total</b>	0	1	3	2	2	17	7	2	2	36

Légendes : Accords parfaits : Désaccords partiels

#### 2.4.1.2. Sur les reconstructions tomodensitométriques

L'application de la méthode d'Isca en imagerie fournit 86.1 % de codages en accord parfait et en désaccords partiels entre deux codages successifs (avec 47.2 % de codages donnant la même phase) (cf. tableau n° II-18).

La corrélation gamma est à nouveau très significative puisqu'elle fournit une valeur de  $\gamma$  de 0.86 pour un seuil de significativité inférieur à 0.001 et l' $\alpha$  de Krippendorff est de 0.79 : nous avons donc un bon niveau de concordance.

**Tableau n° II-18 - Répartition des écarts de phase et effectifs entre deux sessions de codage pour l'observateur n° 1 en tomodensitométrie.**

Écarts de phases	Effectifs	Pourcentages	Pourcentage d'accord parfait et de désaccords partiels
- 4	1	2.8	86.1
- 3	1	2.8	
- 2	2	5.5	
- 1	13	36.1	
0	17	47.2	
+ 1	1	2.8	
+ 2	1	2.8	
<b>Total</b>	36	100	

Le tableau n° II-19 montre par ailleurs la dispersion de phases entre les deux séries de cotation en tomodensitométrie de l'observateur n° 1. Il met en évidence, tout comme c'était le cas sur os secs, une tendance à surestimer les phases lors de la deuxième observation.

**Tableau n° II-19 - Dispersion des phases entre deux sessions de codage par le même observateur (observateur n° 1) en tomodensitométrie.**

Codage d'après images scanner	Phases attribuées lors du deuxième codage									Total
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
Phases attribuées lors du premier codage	0	0	0							0
	1	0	2	1						3
	2	1	0	0	0		1			2
	3			0	3	2	2		1	8
	4				1	2	3			6
	5					0	3	3		6
	6						0	4	3	7
	7							0	1	1
8								0	2	2
<b>Total</b>	1	2	1	4	4	9	7	5	3	36

Légendes  : Accords parfaits  : Désaccords partiels

## 2.4.2. Variabilité inter-observateur

### 2.4.2.1. Codage sur l'os sec

Les résultats dans le cas de l'erreur inter-observateur (cf. tableau n° II-20) fournissent d'excellentes corrélations entre deux observateurs différents. Les valeurs de  $\gamma$  oscillent entre 0.81 et 0.82, avec dans tous les cas un seuil de significativité  $p$  inférieur à 0.001.

Chaque comparaison des codages entre l’observateur principal et les deux autres observateurs fournit des valeurs du  $\alpha$  de Krippendorff situant la variabilité inter-observateur dans le domaine des bonnes voir très bonnes concordances (0.75 à 0.78).

**Tableau n° II-20 - Synthèse des résultats pour la variabilité inter-observateur sur os secs. Obs, Observateur.**

Comparaison des codages d'après os secs		Ecart maximal de phases	Pourcentages d'accords parfaits	Pourcentages d'accords parfaits et de désaccords partiels	$\gamma$	p	$\alpha$
<b>Première observation</b> Obs 1	<b>Obs 2</b>	3	33.3	91.7	0.81	< 0.001	0.78
<b>Deuxième observation</b> Obs 1	<b>Obs 2</b>	3	50	88.9	0.82	< 0.001	0.75

**2.4.2.2. Codage d’après les reconstructions tomодensitométriques**

Le tableau n° II-21 présente les résultats de la comparaison entre les codages effectués par les deux observateurs d’après le diaporama fournissant les reconstructions tomодensitométriques.

L’erreur inter-observateur reste limitée puisque plus de 80 % des observations présentent un écart de moins d’une phase pour les deux méthodes.

La corrélation gamma est très bonne puisque les valeurs de p sont inférieures à 0.001 pour des  $\gamma$  de 0.82 à 0.88. On peut donc considérer qu’il n’y a pas de différence significative entre les codages des différents observateurs.

La concordance est bonne voire même très bonne puisque les valeurs de l’  $\alpha$  de Krippendorff oscillent entre 0.78 et 0.86.

**Tableau n° II-21 - Synthèse des résultats pour la variabilité inter-observateur en tomодensitométrie.**

Comparaison des codages d'après imagerie		Ecart maximal de phases	Pourcentages d'accords parfaits	Pourcentages d'accords parfaits et de désaccords partiels	$\gamma$	p	$\alpha$
<b>Première observation</b> Obs 1	<b>Obs 2</b>	3	38.9	83.3	0,82	< 0.001	0.80
<b>Deuxième observation</b> Obs 1	<b>Obs 2</b>	3	30.5	86.1	0,82	< 0.001	0.78

### 2.4.3. Erreur inter-méthode

#### 2.4.3.1. Pour l'observateur n° 1

Les tableaux n° II-22 et n° II-23 objectivent la dispersion des phases entre les deux méthodes que l'on veut comparer.

Le tableau n° II-22 souligne que l'estimation de phase d'après les reconstructions tomodensitométriques tend à légèrement sous-estimer les phases âgées, supérieures ou égales à 5, mais surestime les phases inférieures.

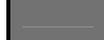
Le tableau n° II-23 illustre le même phénomène des phases 0 à 4, les phases 5 à 8 étant plus dispersées de part et d'autre des accords parfaits.

**Tableaux n° II-22 et n° II-23 - Dispersion des phases illustrant la variabilité inter-méthode (observateur n°1, première session d'observation sur os secs).**

**Tableau n° II-22**

Observateur n° 1	Phases attribuées lors de la première série de codage en tomodensitométrie									Total	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8		
Phases attribuées lors du premier codage sur os secs	0	0	1								1
	1	0	1	0							1
	2		0	1	2						3
	3		1	0	2	0	1	1	1		6
	4				0	3	0	2	0		5
	5			1	4	3	2	0			10
	6						3	3	0		6
	7							1	1	0	2
	8								0	2	2
<b>Total</b>	0	3	2	8	6	6	7	2	2	36	

Légendes

 : Accords parfaits

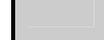
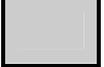
 : Désaccords partiels

Tableau n° II-23

Observateur n° 1	Phases attribuées lors de la deuxième série de codage en tomodensitométrie									Total	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8		
Phases attribuées lors du premier codage sur os secs	0	0	1								1
	1	0	1	0							1
	2	1	0	0	1	1					3
	3			1	1	0	1	1	2		6
	4				0	1	2	0	2		5
	5				2	2	5	1			10
	6						1	4	1		6
	7							1	0	1	2
	8								0	2	2
<b>Total</b>	1	2	1	4	4	9	7	5	3	36	

Légendes  : Accords parfaits  : Désaccords partiels

Le tableau n° II-24 est une synthèse des résultats de la variabilité inter-méthode pour l'observateur n° 1. Il indique que de 66.7 à 80.6 % des individus sont codés en accords parfaits plus désaccords partiels, ce qui, compte tenu de la méthode en elle-même et de son application à un nouveau support, reste très acceptable.

Les corrélations gamma fournissent des valeurs allant de 0.55 à 0.71 avec des seuils p inférieurs à 0.001.

L'  $\alpha$  de Krippendorff situe la concordance entre les estimations sur les deux supports différents à des niveaux acceptables, voire bons.

Les tableaux n° II-25 et n° II-26 illustrent une grande dispersion des phases, notamment pour la phase 5 sur os secs qui présente le plus de variabilité lors du codage à partir des reconstructions tomodensitométriques (six phases sont représentées). De même la phase cotée 3 sur os secs présente une très grande amplitude lors du codage d'après scanner (cotée 1 à 7).

Les tendances signalées précédemment se retrouvent ici globalement, avec quand même une dispersion plus marquée de part et d'autre de l'accord parfait (en sur et sous-estimation) au-delà de la phase 5.

**Deuxième partie : Imagerie en coupe et anthropologie – Chapitre 2**

**Tableau n° II-24 - Synthèse des résultats pour la variabilité inter-méthode pour l'observateur n° 1. obs°, observation.**

Comparaison entre les codages sur os secs et d'après imagerie		Ecart maximal de phases	Pourcentages d'accords parfaits	Pourcentages d'accords parfaits et de désaccords partiels	$\gamma$	p	$\alpha$
1ère obs° sur os secs	1ère obs° en imagerie	4	41.7	69.4	0.60	< 0.001	0.61
	2ème obs° en imagerie	3	36.1	80.6	0.55	< 0.001	0.57
2ème obs° sur os secs	1ère obs° en imagerie	2	36.1	66.7	0.71	< 0.001	0.58
	2ème obs° en imagerie	3	44.4	69.4	0,70	< 0.001	0.64

**Tableaux n° II-25 et II-26 - Dispersion des phases illustrant la variabilité inter-méthode (observateur n° 1, deuxième session d'observation sur os secs).**

**Tableau n° II-25**

Observateur n° 1	Phases attribuées lors de la première série de codage en tomodensitométrie										Total
	0	1	2	3	4	5	6	7	8		
Phases attribuées lors du second codage sur os secs	0	0	0								0
	1	0	1	0							1
	2		0	1	2						3
	3		1	0	0	0		1			2
	4				1	1	0				2
	5		1	1	5	4	3	2	1		17
	6					1	2	4	0		7
	7						1	0	1	0	2
	8								0	2	2
<b>Total</b>	0	3	2	8	6	6	7	2	2	36	

Légendes  : Accords parfaits  : Désaccords partiels

Tableau n° II-26

Observateur n° 1	Phases attribuées lors de la deuxième série de codage en tomodensitométrie									Total	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8		
Phases attribuées lors du second codage sur os secs	0	0	0							0	
	1	0	1	0						1	
	2	1	0	0	1	1				3	
	3		1	0	0	0			1	2	
	4				0	1	1			2	
	5			1	3	2	7	1	3	17	
	6						1	5	1	7	
	7							1	0	1	2
	8								0	2	2
<b>Total</b>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>9</i>	<i>7</i>	<i>5</i>	<i>2</i>	<i>36</i>	

Légendes : Accords parfaits : Désaccords partiels

#### 2.4.3.2. Pour l'observateur n° 2

Pour ce qui est de l'erreur inter-méthode pour l'observateur n° 2 (cf. tableau n° II-27), 80.6 % des observations se situent à plus ou moins une phase d'écart entre les deux méthodes comparées. L' $\alpha$  de Krippendorff est de 0.71 : la concordance entre les deux codages est bonne.

Ce résultat est confirmé par un  $\gamma$  de 0.74 au seuil p inférieur à 0.001 : il n'y a donc pas de différence significative entre les deux méthodes.

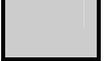
Tableau n° II-27 - Répartition des écarts de phase et effectifs entre méthode scopique et méthode tomodensitométrie pour l'observateur n° 2.

Écarts de phases	Effectifs	Pourcentages	Pourcentage d'accord parfait et de désaccords partiels
- 3	1	2.8	80.6
- 2	4	11.1	
- 1	7	19.4	
0	11	30.6	
+ 1	11	30.6	
+ 2	2	5.5	
<b>Total</b>	<b>36</b>	<b>100</b>	

En examinant le tableau n° II-28 nous pouvons voir qu’il existe une tendance globale à sous-estimer les phases âgées, supérieures ou égales à 4 et surestimer les phases plus jeunes lors du codage d’après images tomodensitométriques (par rapport à l’os sec).

**Tableau n° II-28 - Dispersion de phases entre les codages sur os secs et d’après tomodensitométrie pour l’observateur n° 2.**

Observateur n° 2	Phases attribuées lors du codage en tomodensitométrie										Total
	0	1	2	3	4	5	6	7	8		
Phases attribuées lors du codage sur os secs	0	0	0								0
	1	0	0	1							1
	2		0	0	1	2					3
	3			1	1	1		1			4
	4			1	1	3	0				5
	5				1	5	2	3	2		13
	6						2	4	0		6
	7							1	1	1	3
	8								1	0	1
<b>Total</b>	0	0	3	4	11	4	9	4	1	36	

Légendes  : Accords parfaits  : Désaccords partiels

#### 2.4.4. Performance opérationnelle

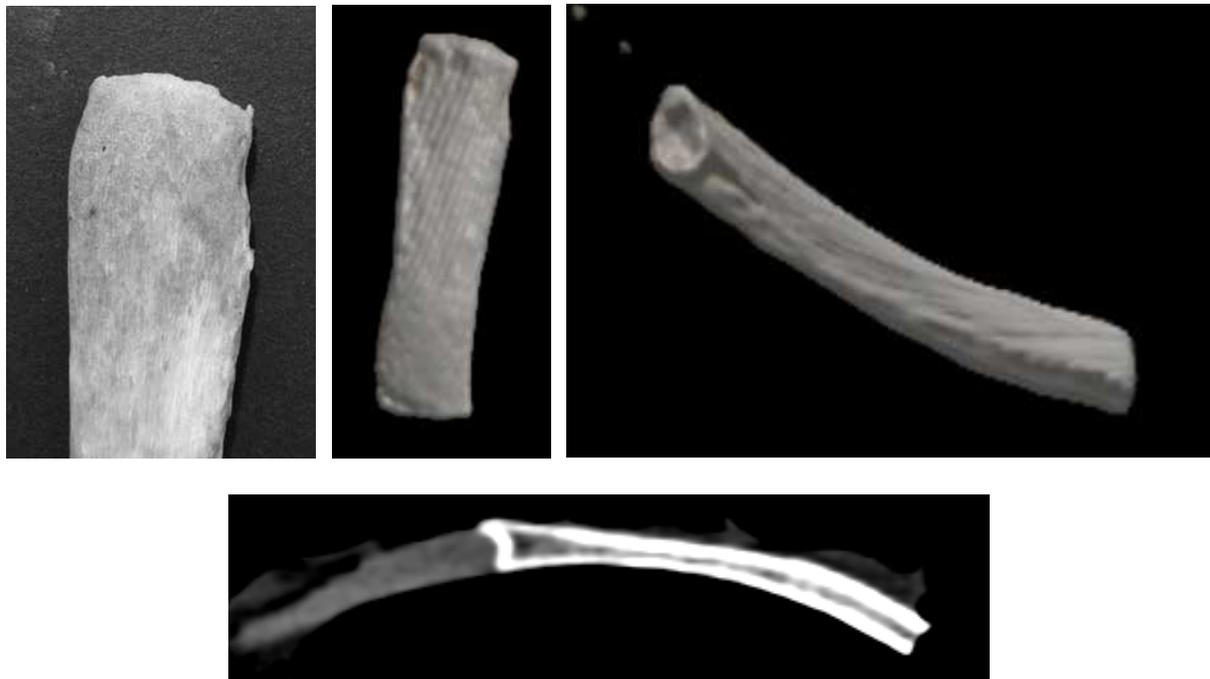
La comparaison entre les intervalles d’âges calculés selon la classification de Iscan a été appliquée à aux os secs et aux reconstructions tomodensitométriques. Ces intervalles d’âges ont été calculés avec un intervalle de confiance à 95 %.

L’âge civil réel était compris dans 21 cas sur 36 pour l’évaluation sur os secs et dans 23 cas sur 36 sur reconstructions tridimensionnelles, ce qui représentait respectivement 58.3 et 63.9 %. Ainsi l’analyse sur reconstructions tomodensitométriques présentait une meilleure performance en termes de détermination d’âge d’un individu.

**Figures n° II-8** - Représentations des différentes phases d'Isca de la quatrième côte droite sur os secs et en tomodynamométrie.



**Figures n° II-8 A** - Phase 1 chez l'homme : photographies de la côte sèche, reconstructions tomodynamométriques tridimensionnelles (vues latérale et supérieure) et bidimensionnelle.



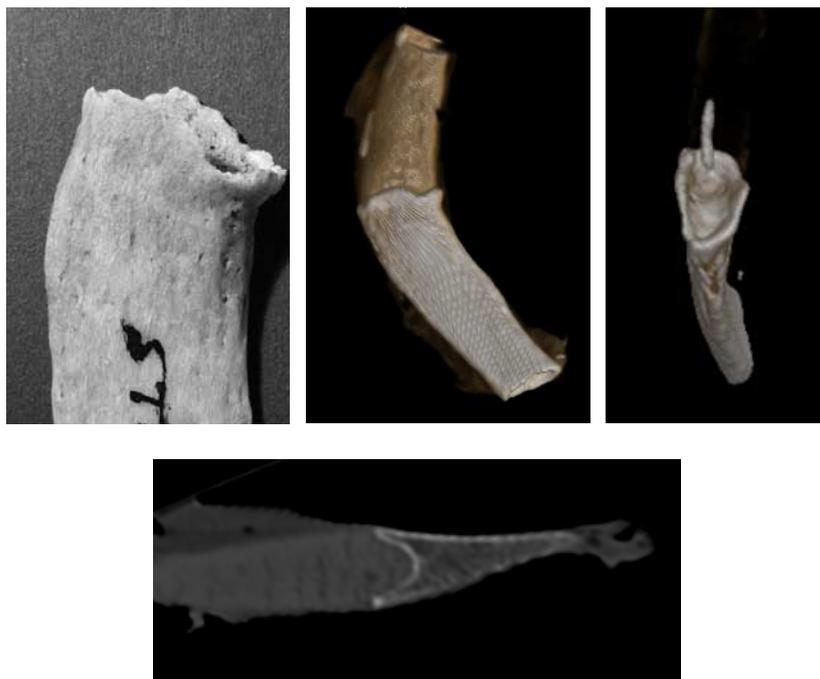
**Figures n° II-8 B** - Phase 2 chez l'homme : photographies de la côte sèche, reconstructions tomodynamométriques tridimensionnelles (vues latérale et supérieure) et bidimensionnelle.



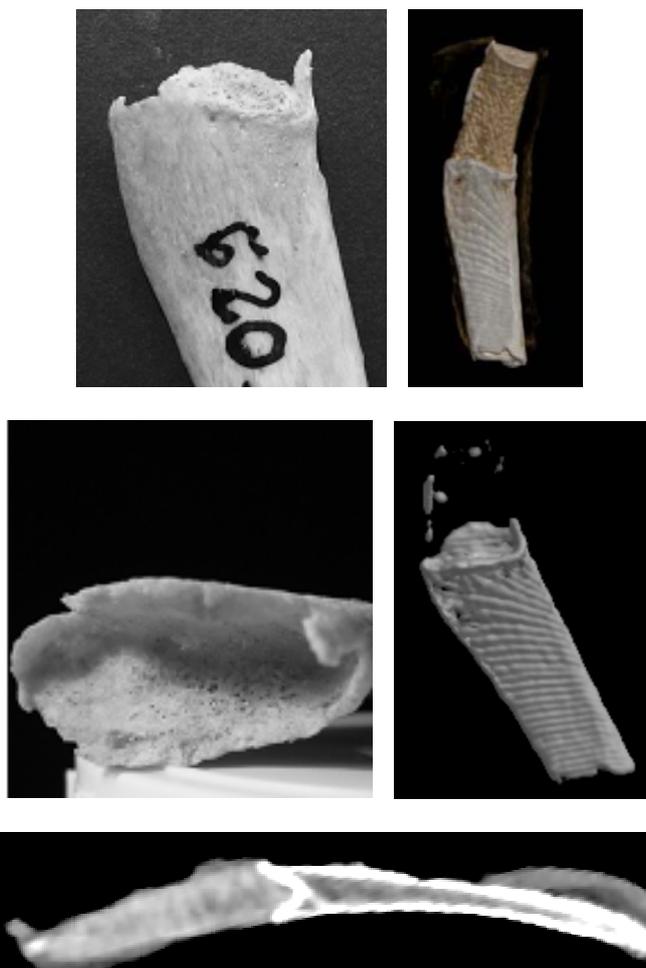
**Figures n° II-8 C** - Phase 3 chez la femme : photographies de la côte sèche, reconstructions tomodensitométriques tridimensionnelles (vues latérale et supérieure) et bidimensionnelle.



**Figures n° II-8 D** - Phase 4 chez l'homme : photographies de la côte sèche, reconstructions tomodensitométriques tridimensionnelles (vues latérale et supérieure) et bidimensionnelle.



Figures n° II-8 E - Phase 5 chez l'homme : photographies de la côte sèche, reconstructions tomographiques tridimensionnelles (vues latérale et supérieure) et bidimensionnelle.



Figures n° II-8 F - Phase 6 chez l'homme : photographies de la côte sèche, reconstructions tomographiques tridimensionnelles (vues latérale et supérieure) et bidimensionnelle.



**Figures n° II-8 F** - Phase 7 chez l'homme : photographies de la côte sèche, reconstructions tomodensitométriques tridimensionnelles (vues latérale et supérieure) et bidimensionnelle.



**Figures n° II-8 G** - Phase 8 chez l'homme : photographies de la côte sèche, reconstructions tomodensitométriques tridimensionnelles (vues latérale et supérieure) et bidimensionnelle.

## 2.5. Discussion sur l'intérêt de l'utilisation de l'imagerie tridimensionnelle dans l'estimation de l'âge par la méthode Iscan

### 2.5.1. La méthode d'Iscan

Selon ses auteurs, cette méthode présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes existantes (symphyse pubienne, sutures crâniennes) (Iscan et Loth, 1989). Elle fournit tout d'abord des résultats plus robustes et plus fiables que l'estimation de l'âge d'après la synostose des sutures crâniennes. Il semblerait par exemple que cette zone osseuse ne soit pas assujettie aux effets mécaniques de la grossesse, de l'accouchement, de la locomotion et du déplacement d'objets lourds. De plus, les caractères utilisés sont reproductibles et fidèles (Schmitt, 2001).

Cependant, nous pouvons noter deux biais qui marquent cette méthode :

- l'effectif de l'échantillon de référence reste faible d'un point de vue statistique (204 individus, tous sexes confondus),
- la reconnaissance de la quatrième côte droite en contexte archéologique, peut poser quelques difficultés. On connaît en effet les problèmes de conservation, de remaniement au sein des sépultures. Ainsi, même s'il existe un moyen d'identifier le numéro (et la latéralité) des côtes lorsque celles-ci sont toutes présentes (Dudar, 1993 ; Owers et Pastor, 2005), et même s'il n'existe pas de différence significative de phase entre la quatrième côte droite et les autres, notamment la troisième et la cinquième (Iscan et Loth, 1989 ; Loth *et al.*, 1994 ; Yoder *et al.*, 2001), cette méthode reste peu utilisée.

De plus, le traitement de la côte pour observation est relativement contraignant et demande plusieurs jours de préparation pour un résultat qui n'est pas toujours exploitable et dont la précision n'est souvent pas suffisante.

L'estimation de l'âge d'après l'extrémité sternale de la quatrième côte droite a souvent été étudiée. Déjà son auteur en proposait un test deux ans après sa publication (Iscan et Loth 1986 a ; 1986 b). Russell montrait lors d'un test indépendant que l'évolution morphologique de la quatrième côte droite était un bon indicateur de l'âge (Russell *et al.*, 1993).

La comparaison de cette méthode avec des méthodes histologiques ne montre pas de différences significatives (Dudar *et al.*, 1993 ; Telmon *et al.*, 2004).

Certains auteurs soulignent cependant qu'il est souvent plus opportun de combiner plusieurs méthodes (Baccino *et al.*, 1999).

### 2.5.2. Les différentes variabilités de notre étude

L'objectif de ce travail était de montrer si, au support osseux, pouvaient se substituer les reconstructions tomodensitométriques. Compte tenu de la faible taille de l'échantillon d'analyse et de l'impossibilité de traiter séparément les deux sexes, nous ne pourrions pas conclure en termes de fiabilité statistique de la méthode.

Nous pouvons tout d'abord voir que nos résultats en matière de **variabilité inter-observateur sur os secs** (donc pour la méthode originale) restent acceptables. La concordance entre deux observateurs est très bonne et la corrélation entre elles est significative. De 88.9 à 91.7 % des cotations regroupent les accords parfaits et les désaccords partiels (soit plus ou moins une phase de désaccord).

Sur les reconstructions tomodensitométriques, la corrélation et la concordance sont superposables à celles de l'os sec, avec de 83.3 à 86.1 % des cotations regroupent les accords parfaits et les désaccords partiels.

Dans le cas de la **variabilité intra-observateur**, nous pouvons conclure de manière équivalente. La part d'accords parfaits est très proche entre les deux supports, passant de 50 % sur os secs à 47.2 % sur les reconstructions tomodensitométriques et le pourcentage d'observations à plus ou moins une phase d'écart est même plus élevé pour les images tomodensitométriques (86.1 %) que pour les observations sur os secs (80.6 %). De plus, les concordances entre deux observations consécutives sont identiques et les corrélations sont très proches.

Concernant **l'erreur inter-méthode**, les résultats varient selon l'observateur considéré. Le pourcentage d'accords parfaits varie de 30.6 à 44.4 %, ce qui constitue des valeurs très faibles. Cependant le pourcentage à plus ou moins une phase d'écart se situe entre 66.7 % (pour l'observateur présentant la plus grande dispersion de phases) et 80.6 %, cette dernière valeur identique à celle obtenue en intra-observateur sur os secs, et appartenant à l'intervalle des valeurs pour la variabilité inter-observateur en utilisant la méthode décrite par Iscan. Les données concernant les concordances entre les deux méthodes indiquent que les valeurs de l' $\alpha$  de Krippendorff sont similaires à ceux calculés pour l'erreur inter-observateur. Dans la mesure où l'on ne peut pas comparer ces valeurs nous ne pouvons que remarquer que l'erreur inter-méthode est de même dimension que l'erreur inter-observateur.

### 2.5.3. Les codages en tomодensitométrie

Lors de la comparaison des codages sur les deux supports différents, il apparaît que les phases définies par l'observation des reconstructions tomодensitométriques ont tendance à être sous-estimées pour les phases codées 4 ou plus d'après l'os sec, alors qu'elles sont globalement surestimées pour les phases plus jeunes. Ceci peut s'expliquer de plusieurs manières :

- l'un des critères de détermination des phases 4 et supérieures est l'amincissement des parois du puits sternal qui n'est pas toujours clairement visible sur le scanner sans avoir accès à l'ensemble des coupes transversales des côtes, et parce que la reconstruction lisse parfois les reliefs lorsqu'ils sont très fins (comme c'est le cas par exemple lorsque le bord du mur devient plus aigu).

- la notion de porosité reste parfois délicate à mettre en évidence : au moment de la reconstruction il faut parfois choisir entre une vision lisible des bords du puits sternal (et donc perdre de l'information sur la densité osseuse), ou une représentation de la dégradation de l'os (qui peut alors faire disparaître certains contours utiles).

- cependant l'un des intérêts des reconstructions tomодensitométriques bi et tridimensionnelles est d'avoir accès à des structures que le mode de traitement pour obtenir un os propre peut éliminer ou endommager, comme par exemple des calcifications ou des ostéophytes fragiles et dont la lecture sur image tomодensitométrique est rendue possible, ce qui provoque parfois une légère surestimation de phase par rapport à l'observation sur os secs.

# Chapitre 3

## La surface auriculaire

---

La partie postérieure de l'os coxal est une région osseuse solide, souvent bien conservée et utilisable lors d'études paléoanthropologiques. Que ce soit dans une perspective d'évaluation d'âge au décès, où l'on s'intéresse à la surface auriculaire et à son environnement immédiat, ou dans une perspective de diagnose de sexe, dans laquelle une plus large aire du pelvis postérieur entre en considération, on comprend l'intérêt porté à cette région anatomique. A titre de comparaison, la surface auriculaire est bien plus souvent retrouvée que la symphyse pubienne, rarement préservée dans plus d'un tiers des cas en contexte paléoanthropologique (Waldron, 1987). La topographie particulière de l'articulation sacro-iliaque, transmettant la charge de l'ensemble du tronc au bassin a été à l'origine d'études déjà anciennes portant tant sur le cartilage que sur l'os sous chondral et qui portent à croire que cette région est un siège électif de manifestations dégénératives. Celles-ci, comportant des altérations morphologique de la surface elle même ainsi que des remaniements arthrosiques péri-articulaires, se poursuivent jusqu'à un âge avancé, ce qui n'est pas le cas pour la symphyse pubienne (Lovejoy *et al.*, 1985 ; Martrille *et al.*, 2007).

Le but de cette étude était l'évaluation de l'apport potentiel de la tomодensitométrie dans l'analyse de surface auriculaire afin de déterminer l'âge au décès d'individus. Cette étude a été effectuée sur des os secs. Elle avait deux objectifs : tout d'abord transposer des critères ostéoscopiques utilisés pour en matière de détermination d'âge par l'étude de la surface auriculaire en tomодensitométrie, mais également décrire des critères tomодensitométriques propres.

### 3.1. Estimation de l'âge au décès basée sur les modifications morphologiques de la surface auriculaire : méthodes existantes

#### 3.1.1. Eléments anatomiques. Histologie des remaniements dégénératifs

Le versant iliaque de l'articulation sacro-iliaque est la surface auriculaire (ou facette auriculaire) de l'os coxal, qui a la forme d'un croissant à concavité postéro-supérieure. Cette surface s'articule avec une surface auriculaire du sacrum inversement conformée.

La surface auriculaire est définie comme l'aire d'os sous chondral située sur le versant iliaque de l'articulation sacro-iliaque. L'aire située en avant de la surface est nommée **région pré auriculaire**. La jonction entre l'extrémité postérieure de la ligne arquée et la surface auriculaire définit l'**apex**. L'apex peut également être considéré comme le point du contour antérieur de la surface auriculaire séparant deux **hémifaces** : hémiface supérieure au dessus de l'apex, hémiface inférieure en dessous. En effet, la forme en croissant de la surface auriculaire, souvent comparée à un « C », un « V » ou un « L » suppose deux « bras ». Dans la suite de cette étude, les termes « bras » ou « hémifaces » seront indifféremment utilisés.

Puisqu'une des hémifaces est antéro-supérieure et que l'autre est postéro-inférieure, il y sera fait référence indifféremment comme à l'hémiface supérieure ou antérieure, et comme à l'hémiface inférieure ou postérieure. La **région rétro auriculaire** est en position postéro-supérieure par rapport à la surface auriculaire, et comprend la tubérosité iliaque et le site d'insertion du ligament sacro-iliaque interosseux.

Morphologiquement, l'articulation sacro-iliaque est classiquement considérée comme une articulation synoviale (diarthrose) (Shibata *et al.*, 2002). Sa faible mobilité associe translation et rotation lors de mouvements de nutation et de contre-nutation. L'articulation sacro-iliaque est constituée d'une syndesmose supérieure et dorsale et d'une articulation ventrale en forme de « C » recouverte de cartilage, et considérée souvent comme une articulation synoviale (Resnick, 2002). Toutefois, une étude récente montre que l'apparence histologique de la portion cartilagineuse de l'articulation évoque plutôt une symphyse, et que seul le versant iliaque du tiers distal de l'articulation évoque une articulation synoviale (avec présence d'un récessus synovial à ce niveau) (Puhakka *et al.*, 2004). Le revêtement des surfaces articulaires est différent sur le versant iliaque et sur le versant sacré de l'articulation. Le cartilage a longtemps été considéré comme plutôt fibro-cartilagineux et fin sur le versant sacré, par rapport au versant iliaque hyalin (Bowen et Cassidy, 1981 ; Sashin, 1930). En fait, le cartilage hyalin est présent sur les deux versants, ceci ne permettant cependant pas de classer l'articulation sacro-iliaque comme synoviale, puisque du cartilage hyalin est présent à la

symphyse pubienne et aux jonctions disco-vertébrales (Puhakka *et al.*, 2004). En parallèle, l'épaisseur du cartilage est supérieure sur le versant iliaque de l'articulation (Salsabili *et al.*, 1995), une étude récente rapportant des épaisseurs moyennes iliaques et sacrées respectivement de 0.7 mm et 1.1 mm (Puhakka *et al.*, 2004). Cette différenciation est à mettre en parallèle avec la prédominance sur le versant iliaque de l'articulation des remaniements morphologiques, qu'ils soient dégénératifs ou pathologiques (Ishimine, 1989 ; Resnick *et al.*, 1975).

Dès 1930, Sashin procède à l'examen *post mortem* de 257 articulations sacro-iliaques et remarque des modifications évidentes liées à l'âge (Sashin, 1930). Bien qu'il s'intéresse initialement à la surface articulaire cartilagineuse, le parallélisme avec la description plus tardive de l'évolution de l'os sous chondral par Lovejoy est flagrant, et ce dernier le souligne (Lovejoy *et al.*, 1985). Ainsi, dans le groupe d'âge inférieur à 30 ans, Sashin décrit la surface cartilagineuse comme striée et présentant des lignes radiaires transverses. Les modifications dans le groupe d'âge compris entre 30 et 59 ans comportent une irrégularité de la surface articulaire, l'apparition de granulations grossières, d'érosions et d'ostéophytes. Il est possible de détecter une altération de la couche superficielle du cartilage dès la troisième décennie, une altération de la couche profonde et l'apparition d'ostéophytes dans la quatrième décennie. Les remaniements dégénératifs atteignent l'os sous chondral durant la cinquième décennie.

### 3.1.2. La méthode développée par Lovejoy et ses collègues

En 1985, Lovejoy et ses collègues se basent sur les modifications de l'os sous chondral de la surface auriculaire pour établir une méthode d'estimation de l'âge au décès (Lovejoy *et al.*, 1985). Différentes composantes morphologiques de la surface, subissant des altérations en rapport avec le vieillissement, sont individualisées par cet auteur. La terminologie choisie par Lovejoy s'étant également imposée dans la plupart des articles ultérieurs, il apparaît nécessaire de rappeler les caractères employés dans l'article fondateur de cet auteur, leurs significations, ainsi que leurs évolutions avec l'âge.

- L'**organisation transverse** est caractéristique d'un jeune âge. Il s'agit d'ondulations ou de striations de la surface auriculaire, organisées perpendiculairement à l'axe respectif des hémifaces. Avec l'âge, cette organisation transverse diminue et disparaît, la surface devenant amorphe d'un point de vue organisationnel.

- Le **grain** de la surface, encore appelé **texture** ou **granulation** correspond à la qualité de la surface visible à l'œil nu. L'évolution typique du grain de la surface se fait d'une granulation

initialement fine, devenant plus grossière avec l'âge puis disparaissant et laissant la place à une surface dense organisée sous forme d'îlots.

- La **porosité** est définie comme l'existence de perforations de l'os sous chondral de la surface auriculaire. Les **macroporosités** sont des perforations ovales ou irrégulières excédant un millimètre de diamètre. En deçà, il s'agit de **microporosités**, fines, visibles à l'oeil nu. Les macroporosités sont visibles sur les surfaces auriculaires âgées, bien qu'inconstantes. Lovejoy les décrit dans son échantillon comme débutant sur un spécimen de 38 ans et devenant plus fréquentes à partir de 50 ans. Occupant une portion significative de la surface auriculaire, elles doivent être distinguées de défauts de l'os sous chondral, présents à tous âges, en règle isolés.

- Le contour de la surface auriculaire à l'apex est le siège de la plupart des remaniements arthrosiques les plus précoces : ceux-ci sont regroupés sous le terme **d'activité apicale**. Net, aigu et distinct avant l'âge de 35 ans d'après Lovejoy, ce contour tend à devenir plus large, mousse, avec parfois formation d'une lèvre (« *lipping* »). On se méfiera de l'élévation globale de la surface ainsi que de l'existence d'un sulcus pré auriculaire, critères de dimorphisme sexuel, qui tendent à rendre aigu et net le contour de l'hémiface postérieure : ces deux caractères ne peuvent rentrer en considération dans l'estimation de l'âge.

Alors que chez le sujet jeune la région rétro auriculaire est peu différenciée et relativement lisse, il apparaît avec l'âge une « activité ». Cette **activité rétro auriculaire** correspond à l'apparition d'une porosité, d'ostéophytes et d'une irrégularité générale de la surface de cette zone. Ces manifestations dégénératives ne constituent pas pour Lovejoy un bon indicateur de l'âge en soit, mais peuvent contribuer à l'estimation en conjonction avec d'autres caractères.

En résumé, les différents auteurs s'accordent sur une vision d'ensemble : avec l'âge, l'organisation transverse s'atténue et disparaît, la surface devient plus poreuse et de texture plus grossière. En parallèle, des remaniements ostéophytiques des structures osseuses jouxtant la surface auriculaire apparaissent. En se basant sur ces modifications, utilisant la collection Hamann-Todd du début du vingtième siècle, Lovejoy sépare **huit phases**, incluant au sein d'une phase les caractéristiques typiques des différents paramètres employés pour la tranche d'âge considérée. Ces dernières sont présentées dans le tableau n° II-29.

**Tableau n° II-29** – Phases typiques d'évolution de la surface auriculaire avec l'âge d'après Lovejoy (Lovejoy et al., 1985).

Phase	Intervalle d'âges (en années)	Caractéristiques morphologiques
<b>Phase 1</b>	20 - 24	Ondulations larges couvrant la totalité de la surface, donnant un aspect d'organisation transverse Pas d'activité rétro auriculaire ou apicale ni de porosité
<b>Phase 2</b>	25 - 29	Les ondulations sont moins marquées et sont remplacées par des stries Pas d'activité rétro auriculaire ou apicale ni de porosité
<b>Phase 3</b>	30 - 34	Lissage de la surface, fines stries Petites surfaces de microporosité Très faible activité rétro auriculaire possible
<b>Phase 4</b>	35 - 39	Aspect granulé de la surface Activité rétro-auriculaire minime Possibles modifications apicales
<b>Phase 5</b>	40 - 44	Les granulations font place à une surface qui se densifie sous la forme d'îlots Activité faible à modérée rétro auriculaire Modifications sensibles de l'apex
<b>Phase 6</b>	45 - 49	Les granulations disparaissent et sont remplacées par de l'os dense Modifications apicales toujours présentes Activité rétro auriculaire modérée
<b>Phase 7</b>	50 - 59	L'irrégularité de la surface est la caractéristique essentielle L'activité rétro auriculaire est marquée avec irrégularité des bords
<b>Phase 8</b>	Plus de 60	La surface est irrégulière avec destruction de l'os sous chondral Les bords deviennent irréguliers avec des modifications de type dégénératif Ostéophytes de la région rétro auriculaire

### **3.1.3. La méthode de Buckberry et Chamberlain**

En 2002, Buckberry et Chamberlain publient une méthode dérivée de celle de Lovejoy tentant de résoudre certaines problématiques liées à la méthode de référence (Buckberry et Chamberlain, 2002). Les auteurs se basent sur les limites de la méthode de Lovejoy :

- tendance à la sous-estimation de l'âge des sujets les plus âgés (Murray et Murray, 1991; Saunders *et al.*, 1992) et à la surestimation de l'âge de des sujets les plus jeunes (Murray et Murray, 1991),
- taux élevés d'erreur inter-observateur d'environ 19 % (Saunders *et al.*, 1992).

D'après Buckberry et Chamberlain, le développement de chaque caractéristique décrivant les modifications de la surface auriculaire est indépendant (Buckberry et Chamberlain, 2002). De fait, la nécessité de faire entrer un individu dans une des 8 phases décrites par Lovejoy lors de l'application de la méthode pose le problème des cas ambigus, ne pouvant être assignés avec certitude à une catégorie d'âge (Saunders *et al.*, 1992). Le développement indépendant de ces différentes caractéristiques explique que l'amplitude de 5 ans choisie par Lovejoy pour chacune des phases soit vraisemblablement trop étroite. L'idée des auteurs est donc de coter chaque critère morphologique de la surface auriculaire indépendamment, et d'établir un score composite à partir duquel l'âge peut être estimé. Les caractères étudiés sont les mêmes que dans l'étude de Lovejoy, à l'exception de l'activité rétro auriculaire qui est exclue.

Ainsi, les critères étudiés sont les suivants :

- **organisation transverse** : étendue de la surface où l'organisation transverse est visible (cinq grades),
- **texture** : étendue respective des textures finement granulaires, grossièrement granulaires et des îlots denses (cinq grades),
- **micro et macroporosités** : absence / présence sur une hémiface / sur les deux hémifaces (trois grades),
- **modifications apicales** (trois grades).

Le **score composite** est défini comme la somme des scores des cinq critères étudiés et une analyse en régression multiple confirme que le développement de chacun des critères morphologiques est indépendant. La méthode apparaît indépendante de la latéralité et du sexe. L'erreur intra-observateur est jugée non significative et l'erreur inter-observateur est jugée faible. La méthode aboutit à la genèse de sept stades, correspondant à différents scores composites, au sein desquels la dispersion de l'âge au décès est large. Ces phases sont plus larges que celle de Lovejoy.

### 3.1.4. La méthode de Schmitt et Broqua

Afin de simplifier la méthode de Lovejoy, les auteurs ont réduit les nombres et les caractères morphologiquement observables et ont retenu **l'organisation transverse**, les **modifications de la surface auriculaire**, les **modifications de l'apex** et les **modifications de la tubérosité ischiatique** (Schmitt et Broqua, 2000 ; Schmitt, 2005). Les variabilités inter-observateurs varient de 0.79 à 0.94 en fonction des critères observés. Le système de cotation est résumé dans le tableau n° II-30. Une analyse bayésienne a ensuite été réalisée car elle

permet de tenir compte de la fréquence de chaque caractère dans chaque classe d'âge et par conséquent donne une vision juste des changements morphologiques qui évoluent avec l'âge. Deux tableaux ont été mis au point et sont reproduits en annexe (cf. tableaux n° A-5 et A-6 de la partie Annexe). Le tableau n° A-5 représente les probabilités *a posteriori* calculées à partir d'une population de référence dont la distribution par âge correspond à une espérance de vie à la naissance de 30 ans. Le tableau n° A-6 présente les probabilités *a posteriori* calculées à partir d'une population de référence dont la distribution est homogène. Les auteurs indiquent que selon la problématique de l'utilisateur, il convient de se référer au tableau correspondant. Les intervalles ont été calculés de façon à obtenir une probabilité globale minimale de 0.8. Des différences entre le côté gauche et le côté droit ont été notées chez un même individu. Les auteurs rappellent qu'il faut utiliser des articulations saines, mais que si les deux côtés sont sains avec des âges chronologiques différents, il faut alors coupler les deux intervalles chronologiques.

**Tableau n° II-30** – Phases typiques d'évolution de la surface auriculaire avec l'âge, d'après Schmitt et Broqua (Schmitt et Broqua, 2000 ; Schmitt 2005).

Critère	Caractéristique macroscopique	Score
<b>Organisation transverse</b>	Présence de stries ou d'ondulations sur la surface articulaire	1
	Absence d'ondulations ou de stries	2
<b>Modifications de la surface auriculaire</b>	Absence de granulations, Présence d'ilots de granulations et de porosités isolées	1
	Surface granulée sur la majorité de la surface, Porosités possibles	2
	Combinaison de granulations grossières et de porosités profondes regroupées sur une aire limitée	3
	Combinaison de granulations grossières et de porosités profondes et nombreuses	4
<b>Modifications de l'apex</b>	Bord fin	1
	Bord émoussé, épais, sous la forme d'une lèvre ou d'une formation osseuse amorphe	2
<b>Modifications de la tubérosité ischiatique</b>	Absence de remaniement osseux	1
	Présence de remaniements osseux	2

### **3.1.5. Vieillessement de l'articulation sacro-iliaque : études radiologiques pré existantes**

La question de l'âge du sujet n'est pas un problème pour le radiologue qui constate les altérations dues au vieillissement chez le vivant, puisque l'âge de l'individu radiographié est

en général connu. Outre le diagnostic positif des affections dites dégénératives, secondaires au vieillissement, se pose le problème du diagnostic différentiel avec les aspects pathologiques. Certaines atteintes dégénératives et pathologiques ont une sémiologie radiographique équivoque. Ainsi, le rappel de la traduction radiologique des remaniements dégénératifs affectant l'articulation sacro-iliaque est utile si l'on envisage d'estimer l'âge à partir de ceux-ci.

### 3.1.5.1. Arthrose sacro-iliaque

Faute de critères de définition précis, l'incidence de l'arthropathie dégénérative sacro-iliaque est difficile à évaluer. Resnick dès 1975 tente d'évaluer les critères **radiologiques** de diagnostic différentiel entre arthrose sacro-iliaque et sacro-iliite inflammatoire par l'étude de radiographies conventionnelles, sur la base d'un échantillon de 90 sujets atteints de spondylarthrite ankylosante (définie par les critères de Rome) et de 60 cadavres (Resnick *et al.*, 1975). L'ostéophytose est définie dans cette étude comme la manifestation principale de l'arthrose sacro-iliaque. Elle prédomine sur le versant antérieur de l'articulation, et notamment à l'apex, et peut enjamber l'interligne réalisant un pont osseux.

L'étude la plus complète et la plus pertinente, portant sur une distribution homogène de 95 patients, est celle de Shibata (Shibata *et al.*, 2002). L'auteur s'intéresse, via une évaluation tomodynamométrique, à la fréquence de survenue des manifestations dégénératives de l'articulation sacro-iliaque par classe d'âge. Une comparaison de la fréquence et de la sévérité des manifestations dégénératives est effectuée en fonction de la latéralité, du sexe, de l'indice de masse corporelle et de la parité. La sévérité des manifestations est cotée en trois grades et concerne le pincement de l'interligne articulaire, la sclérose sous chondrale, l'ostéophytose, la présence de kystes et d'érosions. Il est intéressant de noter que l'ostéophytose correspond à l'activité, et que kystes et érosions s'intègrent dans la macroporosité décrite par Lovejoy. La sclérose est surtout visible à l'apex et les ostéophytes prédominent à l'apex et le long du contour antérieur de l'hémiface antérieure. D'autre part, les productions ostéophytiques sont visibles dès la troisième décennie chez plus d'un tiers des sujets. Les érosions, correspondant aux macroporosités sont peu fréquentes, même chez les sujets âgés (1/3 des cas environ). Toutefois, la résolution de 5 mm des coupes de scanner de cette étude peut expliquer que ces érosions soient peu fréquemment retrouvées. Dans cette étude, la fréquence et la sévérité des manifestations dégénératives étaient plus importantes et plus précoces chez la femme, ce qui n'était pas le cas dans l'étude sur cadavre de Sashin (Sashin, 1930). Celles-ci sont également

plus fréquentes chez les femmes pères (50 % d'atteintes sévères) par rapport aux nullipares (18 % d'atteintes sévères). La physiopathologie évoquée par les auteurs renvoie à la plus grande amplitude de mouvement de l'articulation sacro-iliaque chez la femme et au traumatisme obstétrical.

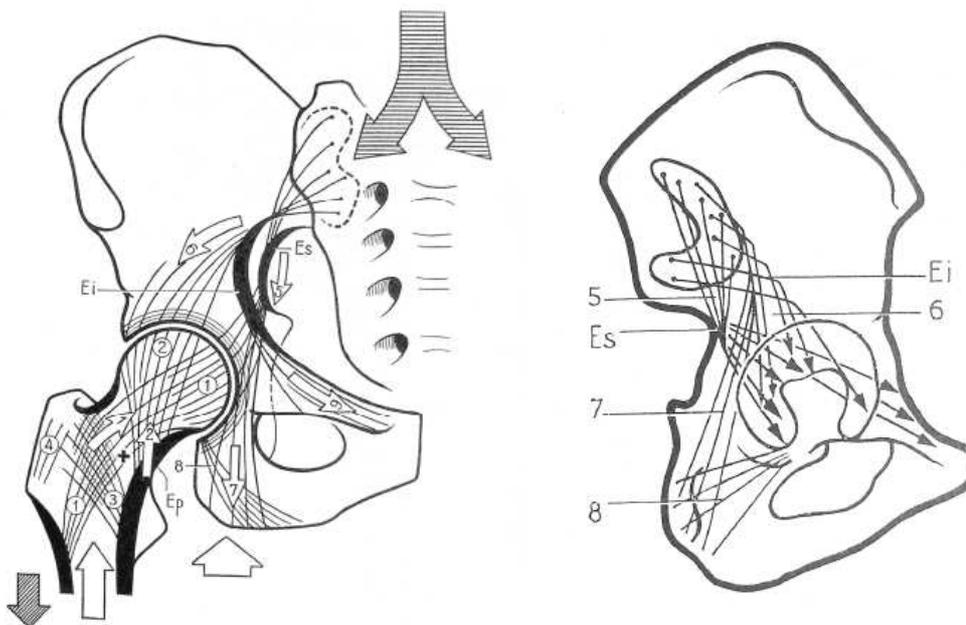
### 3.1.5.2. Pathologies de l'articulation sacro-iliaque

Certains éléments sémiologiques sont communs aux atteintes dégénératives et aux pathologies atteignant l'articulation sacro-iliaque. Les sacro-iliites inflammatoires dans le cadre de **spondylarthropathies** sont fréquentes. La **spondylarthrite ankylosante** (pelvispondylite rhumatismale) est le chef de file des spondylarthropathies. D'autres spondylarthropathies sont liées aux colites inflammatoires, au rhumatisme psoriasique et au syndrome de Reiter. L'interligne se modifie en premier : après une augmentation apparente de l'interligne articulaire, la pathologie évolue vers un amincissement voir une disparition de l'interligne. Les érosions du cartilage et de la lame osseuse sous chondrale, ovalaires ou arrondies, peuvent être jointives, aboutissant parfois à la classique image en timbre poste. Elles provoquent une sclérose réactionnelle de l'os sous chondral. Cette ostéocondensation, intéressant l'os spongieux sous chondral en regard des érosions est de faible densité et ses limites sont floues (raccordement progressif avec le spongieux sain). A terme, apparaissent des ponts osseux intra-articulaires, responsable d'une diminution et d'une disparition de l'interligne (ankylose). Il faut noter que des enthésopathies peuvent intéresser la portion ligamentaire de l'articulation et générer une ankylose à ce niveau. Les autres atteintes inflammatoires, liés aux affections systémiques (polyarthrite juvénile, polyarthrite rhumatoïde, collagénose, arthropathie microcristallines) et les atteintes infectieuses sont moins fréquentes.

### 3.1.6. Architecture de l'os trabéculaire de l'os coxal : organisation et intérêt potentiel dans l'estimation de l'âge au décès

Le transfert du poids du tronc vers les membres inférieurs implique l'articulation sacro-iliaque, l'os coxal et l'articulation coxo-fémorale. Au bassin osseux, les contraintes biomécaniques de la bipédie permanente de l'homme sont à l'origine d'une différenciation tant de l'os cortical que de l'os spongieux. L'os trabéculaire de l'os coxal possède une architecture particulière, qui est une réponse adaptative aux contraintes subies durant la croissance de l'os (Turner *et al.*, 1990). La microarchitecture de l'os spongieux n'est donc pas

aléatoire, isotrope, mais possède une anisotropie définie comme l'orientation préférentielle des trabécules (Chappard *et al.*, 2005). Il est possible de mettre en évidence des faisceaux, secondaires à l'organisation parallèle de cellules de l'os trabéculaire, correspondant d'un point de vue biomécanique aux trajets de transfert de charge depuis l'articulation sacro-iliaque vers la partie inférieure de l'os coxal (Dalstra et Huiskes, 1995). Kapandji décrit ainsi trois trajets de lamelles de pression : deux reliant la surface auriculaire à l'acétabulum dites **auriculo-acétabulaires** ou **sacro-cotyloïdiens**, et un troisième reliant la région auriculaire à l'ischion dite **sacro-ischiatique** (cf. figure n° II-9) (Kapandji, 1985). Les travaux de Correnti basés sur le développement d'études préexistantes analysant l'orientation des trabécules dans l'os spongieux de l'ilium, ont individualisé certains faisceaux dont l'organisation est la conséquence adaptative du transfert de charge qu'implique une démarche bipède (Correnti, 1955). Ce système, dit idiobadismatique, caractéristique de l'organisation trabéculaire secondaire à la bipédie de l'ilium humain, a été confirmé et utilisé par de nombreuses études biomécaniques et anthropologiques récentes (Dalstra et Huiskes, 1995 ; Macchiarelli *et al.*, 1999 ; Rook *et al.*, 1999 ; Tobias, 1998). Il implique un faisceau **sacro-pubien** épais et non divisé, un faisceau **ilio-ischiatique** distinct et un **chiasma** entre ces deux faisceaux situés au dessus de l'acétabulum et dans un plan transverse entre l'incisure sciatique et l'épine iliaque antéro-inférieure (Correnti, 1955 ; Macchiarelli *et al.*, 1999 ; Rook *et al.*, 1999). Ces données ont été étendues aux primates et largement utilisées à la recherche d'arguments pour la bipédie d'hominidés fossiles (Macchiarelli *et al.*, 1999 ; Rook *et al.*, 1999; Tobias, 1998).



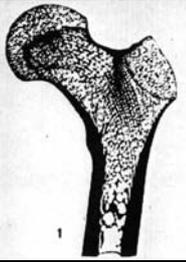
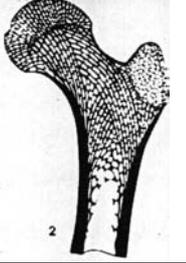
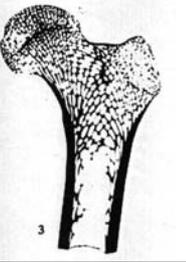
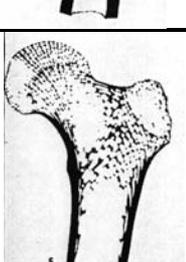
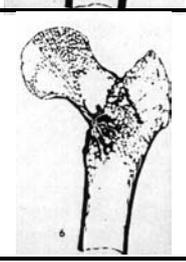
**Figure n° II-9** - Travées du faisceau auriculo-acétabulaire (ou sacro-cotyloïdien) d'après Kapandji (Kapandji, 1985). Le faisceau correspond aux trajets notés Es et Ei.

Les processus dégénératifs altérant la structure de l'os spongieux ont un impact clinique évident. En effet, l'ostéoporose et les fractures ostéoporotiques sont devenues avec l'allongement de l'espérance de vie dans les pays dits développés de véritables problèmes de santé publique. Outre la diminution de densité osseuse, entrant dans la définition de cette affection, les modifications de l'architecture de l'os spongieux sont l'objet d'un intérêt particulier. Celles-ci sont notamment rendues accessibles par le développement du micro-scanner (Boutroy *et al.*, 2005). Les vertèbres et l'extrémité proximale du fémur sont les plus étudiées, puisqu'il s'agit des sites fracturaires de prédilection. Les études concordent en montrant une diminution de l'épaisseur moyenne des trabécules. Il est intéressant de noter que certains auteurs tentent d'extrapoler les analyses des images issues de micro-scanners, à celles obtenues par l'emploi de scanners multidétecteurs utilisés en clinique (Bauer *et al.*, 2004 ; Petersson *et al.*, 2006).

Toutefois, il n'existe pas d'étude s'intéressant aux modifications globales des faisceaux de trabécules correspondant aux transferts de charge au sein de l'ilium. Cette approche a pourtant déjà été utilisée en anthropologie pour l'estimation de l'âge au décès. En se basant sur les travaux de Schranz, Acsadi et Nemeskeri ont développé une échelle comportant six gradations pour décrire l'évolution chronologique de l'architecture de l'os des extrémités proximales humérale et fémorale (Acsadi et Nemeskeri, 1970). Utilisant des radiographies de coupes fines histologiques, les auteurs appréciaient les modifications de la hauteur de l'apex de la cavité médullaire, la structure de l'os trabéculaire, l'apparition de cavités au sein de l'os spongieux et l'amincissement cortical. Pour le fémur, le vieillissement se traduisait par une désorganisation de la structure trabéculaire avec disparition progressive des faisceaux trochantériens et arciformes, faisceaux parfaitement visibles dans les formes les plus jeunes. Le système trabéculaire huméral proximal, initialement radial est remplacé par une organisation ogivale, puis en colonnes. Les données issues de ces travaux et les schémas des auteurs sont reproduits dans le tableau n° II-31.

**Deuxième partie : Imagerie en coupe et anthropologie – Chapitre 3**

**Tableau n° II-31 – Aspect et modification de l'os trabéculaire de l'extrémité supérieure du fémur par phases et par tranches d'âge, d'après Acsadi et Nemeskeri (Acsadi et Nemeskeri, 1970). Les âges moyens et les déviations standard sont exprimées en années. Les intervalles d'âges correspondent avec + ou - 3 fois la valeur de la déviation standard. NE, non évalué.**

Phase	Radiographie	Description	Age moyen	Déviations standard	Intervalle d'âge
<b>Phase 1</b>		Apex de la cavité médullaire en dessous du petit trochanter Système trabéculaire bien marqué : intersection visible à 45° des deux systèmes fasciculaires (faisceau trochantérien et arciforme) avec aspect en toile d'araignée déchirée.	31.4	4.2	18.0 - 52.0
<b>Phase 2</b>		Apex de la cavité médullaire atteignant ou dépassant la limite inférieure du petit trochanter Les deux systèmes fasciculaires commencent à se raréfier sur les bords de la diaphyse et de l'épiphyse	44	2.6	36.2 - 51.8
<b>Phase 3</b>		Apex de la cavité médullaire atteignant la limite supérieure du petit trochanter Evolution de la raréfaction du système trabéculaire plus nette au col fémoral et au grand trochanter	52.6	1.86	47.0 - 58.2
<b>Phase 4</b>		Apex de la cavité médullaire s'étendant au-dessus de la limite supérieure du petit trochanter Cavité de 5 / 10 mm de diamètre en plein milieu du col fémoral Raréfaction du système trabéculaire s'accroissant à la métaphyse, au grand trochanter et à la tête, en particulier à la <i>fovea capitis</i>	56	2.32	49.0 - 63.0
<b>Phase 5</b>		Apex de la cavité médullaire progressant en direction proximale Seuls des vestiges du système trabéculaire originel sont visibles au col Formation d'une cavité de 3 / 5 mm de diamètre dans le grand trochanter Formation de cavités dans la tête vers la <i>fovea capitis</i>	63.3	2.17	56.8 - 69.9
<b>Phase 6</b>		Cavités dans le col et le grand trochanter respectivement de plus de 10 et 5 mm de diamètre Confluence des cavités médiane du col arrive à confluer et médullaire Cortex fin et transparent Relief de la surface extérieure de l'os atrophié	NE	NE	NE

## 3.2. Matériel

Les données nécessaires à l'étude comportaient d'une part l'exploitation des acquisitions tomодensitométriques et d'autre part une analyse sur os secs. Une première évaluation avait pour objectif de déterminer l'applicabilité et la pertinence des critères sélectionnés. A l'issue de celle-ci certains ont été éliminés, d'autres modifiés. Les critères retenus ont été évalués à deux reprises par un premier observateur (observateur n° 1) à un mois d'intervalle et une fois par l'observateur n° 2.

### 3.2.1. Echantillon d'étude

Cette étude a été réalisée à partir d'un échantillon provenant des collections des unités médico-judiciaires de Toulouse. Il était composé de **46** os coxaux de sexes et d'âges connus et comportait 32 os coxaux masculins et 14 os coxaux féminins dont la répartition par classes d'âges est reportée sur la figure n° II-10.

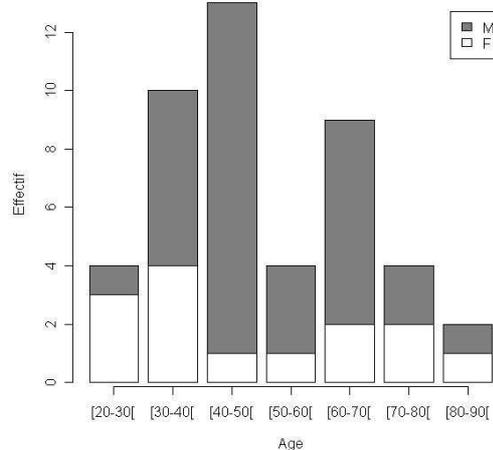


Figure n° II-10 - Histogramme de répartition de l'effectif de l'échantillon étudié.

### 3.2.2. Paramètres d'acquisition tomодensitométrique

Un scanner multidétecteurs à 16 barrettes (Sensation 16, Siemens, Erlangen, Allemagne) a été utilisé pour l'ensemble des acquisitions. Les os coxaux au cours de l'acquisition étaient placés face postéro-externe vers le bas. Un support en polystyrène permettait le positionnement la surface auriculaire dans un plan globalement horizontal. L'acquisition avait pour objectif d'explorer la surface auriculaire et son environnement immédiat avec une bonne résolution spatiale. Le protocole d'acquisition était le suivant :

tension : 140 kV, intensité : 190 à 200 mAs, épaisseur « nominale » : 0.6 mm, reconstruction dans le plan axial en coupes chevauchantes de 0.6 mm tous les 0.3 mm.

L'acquisition était reconstruite après application d'un filtre « mou » (B40) et d'un filtre « dur » (B80). Les images ainsi obtenues étaient enregistrées dans le système d'archivage de l'hôpital sous la forme d'un PACS (Picture Archiving and Communication System) (McKesson Medical Imaging Group, Richmond, BC, Canada).

### 3.2.3. Paramètres du post traitement des images

Les reconstructions dérivées des coupes axiales ont été orientées par les objectifs de l'étude. Les reconstructions bi et tridimensionnelles ont été effectuées sur une station de travail Advantage Window® (GE, Milwaukee, USA). Celles-ci étaient ensuite enregistrées dans le système d'archivage de l'hôpital sous la forme d'un PACS (Picture Archiving and Communication System) (McKesson Medical Imaging Group, Richmond, BC, Canada).

Pour chaque spécimen, deux types de reconstructions ont été réalisés :

- Une étude **bidimensionnelle** à l'aide de reconstructions multiplanaires (MPR) perpendiculaires à l'axe des hémifaces de la surface auriculaire. Ces coupes étaient effectuées avec une orientation perpendiculaire à chaque hémiface, ayant pour corollaire une orientation globalement parallèle à l'hémiface opposée. La reconstruction perpendiculaire à l'hémiface inférieure permettait la visualisation de l'architecture de l'os trabéculaire.

- Une étude **tridimensionnelle** à l'aide de reconstructions en mode VRT de la surface auriculaire et de son environnement immédiat. En premier lieu, les paramètres de reconstructions 3D standardisés ; la participation avec une opacité maximale de toutes les densités supérieures à - 600 UH s'est avérée satisfaisante. La participation de densités inférieures entraînait la visualisation en 3D d'artéfacts présents sur les coupes natives, liés en particulier au phénomène de durcissement de faisceau, avec pour conséquence des densités non aériques (supérieures à - 1000 UH) au voisinage immédiat de l'os. Au dessus de ce seuil de densité de - 600 UH, des défauts n'existant pas en réalité apparaissaient en de nombreux points, secondaires à un phénomène de volume partiel.

### 3.3. Méthodes

Cette étude se proposait d'évaluer la faisabilité d'une méthode tomodensitométrique d'évaluation de l'âge au décès à partir de la partie postérieure du pelvis. A cet effet, des critères dérivés des méthodes macroscopiques existantes ainsi que des critères propres ont été retenus et évalués tant sur les reconstructions bi et tridimensionnelles que sur os secs. Les critères et leurs modalités d'évaluation sont rappelés dans le tableau n° II-32.

**Tableau n° II-32** - Modalités d'évaluation, régions anatomiques ou histologiques concernées et critères d'estimation d'âge au décès.

Mode de reconstruction tomodensitométrique	Région d'intérêt	Critères évalués
<b>Reconstructions 3D</b>	Surface auriculaire	Organisation transverse Texture Macroporosité
	Région péri-auriculaire	Activité apicale Activité rétro auriculaire
<b>Reconstructions 2D</b>	Os cortical	Macroporosité
	Os trabéculaire	Faisceau auriculo-acétabulaire : lignes centrales et juxta-linéaires  Gradient de densité de part et d'autre du faisceau

#### 3.3.1. Méthode de codage et de cotation : approche globale et définition des critères issus des méthodes ostéoscopiques « classiques »

Dans la présente étude, les critères ostéoscopiques retenus étaient évalués en utilisant les reconstructions tomodensitométriques et les données obtenues après étude sur os secs. Les différents critères évalués et côtés sont résumés dans le tableau n° II-33.

**Tableau n° II-33 - Cotation des critères d'estimation tomодensitométriques.**

<b>Critère</b>	<b>Définition</b>	<b>Grade</b>	<b>Cotation</b>
<b>Organisation transverse</b>	Striations ou ondulations disposées transversalement par rapport à la surface auriculaire	Pas d'organisation Quelques stries isolées	Absente
		Organisation discrète/ limitée à une hémiface	Modérée
		Organisation nette, étendue aux deux hémifaces	Importante
<b>Macroporosité</b>	Présence de pores supra-millimétriques dans la corticale de la surface auriculaire	Pas de porosité	Absente
		Porosité sur une hémiface Porosité limitée des deux hémifaces	Modérée
		Porosité étendue affectant les deux hémifaces	Importante
<b>Texture dominante</b>	Type de texture majoritaire	Surface régulière Fines granulations	Surface régulière
		Surface irrégulière Relief nodulaire Granulations ou îlots	Surface irrégulière
<b>Activité apicale</b>	Irrégularités, lèvre osseuse, bordure mousse à l'apex	Apex net, régulier, distinct Pas de remaniements	Absente
		Forme intermédiaire Lèvre discrète Conservation d'un contour régulier	Modérée
		Contour mousse, irrégulier, Lèvre osseuse	Importante
<b>Activité rétro auriculaire</b>	Irrégularités, porosités, ostéophytes et enthésophytes de la région rétro auriculaire	Surface lisse, régulière	Absente
		Forme intermédiaire	Intermédiaire
		Importantes productions osseuses Porosité majeure	Importante

### 3.3.1.1. Porosité

La résolution spatiale maximale de l'imager a permis d'obtenir des coupes chevauchantes de 0.6 mm d'épaisseur. La **microporosité** de la surface, telle que définie par Lovejoy (Lovejoy *et al.*, 1985) (porosité fine, optiquement visible), ou par Chamberlain (Buckberry et Chamberlain, 2002) (pores ayant un diamètre de moins d'un millimètre), peut être visualisée sur l'os sec. A contrario, son ordre de grandeur étant de l'ordre de l'épaisseur de coupe en scanner, les pores infra-millimétriques subissent un moyennage de densité du à

l'effet de volume partiel. Ainsi, les microporosités ne sont pas visualisées sur les coupes scanographiques où la corticale affectée apparaît régulière et continue.

En revanche, la **macroporosité**, définie comme des perforations supra-millimétriques de la corticale, a une traduction scanographique. Sur les os secs et les reconstructions tridimensionnelles, la macroporosité était définie comme des **perforations supra-millimétriques de la corticale mettant à nu l'os spongieux** (cf. figure n° II-11). La macroporosité était cotée :

- **absente** : lorsqu'aucune porosité ne pouvait être mise en évidence,
- **modérée** : lorsqu'une hémiface seule était le siège de porosité ou lorsqu'une porosité très limitée affectait les deux hémifaces,
- **importante** : lorsque de nombreux pores étaient visibles, sur chaque hémiface.

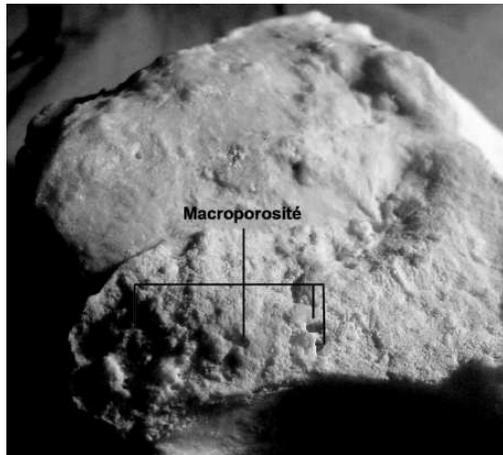


Figure n° II-11 A

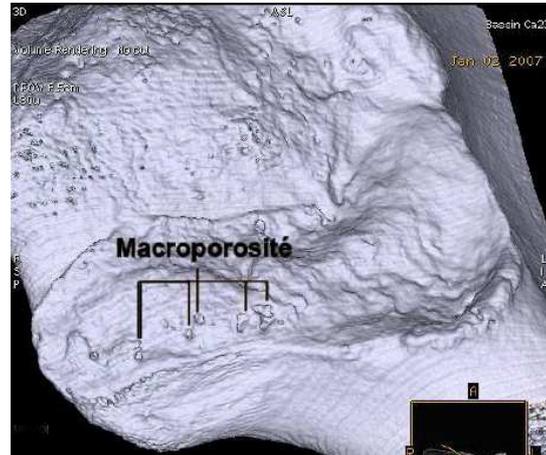


Figure n° II-11 B

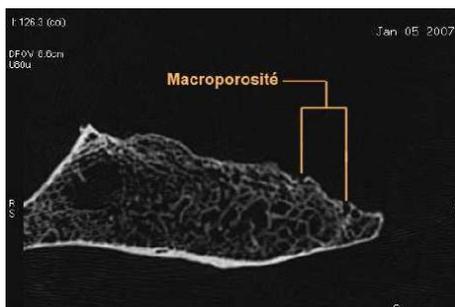


Figure n° II-11 C

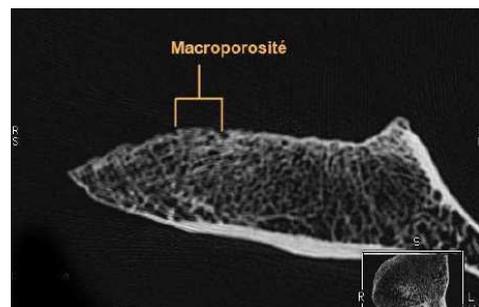


Figure n° II-11 D

**Figure n° II-11 - Macroporosité** – A : visualisation directe des pores en macroscopie ; B : visualisation directe des pores sur les reconstructions VRT ; C : coupe MPR fine, parallèle à l'axe de l'hémiface supérieure, avec présence de défauts de la corticale mettant à nu l'os spongieux ; D : coupe MPR fine, parallèle à l'axe de l'hémiface inférieure, avec présence de défauts de la corticale mettant à nu l'os spongieux.

### 3.3.1.2. Texture

Puisque, du fait même de la technique, il n'était pas possible de considérer les manifestations les plus subtiles de relief et de texture (microporosité et granulations fines), les modifications de texture de la surface auriculaire ont été appréciées en termes de **texture dominante**. Les **granulations grossières** et les **îlots denses** se traduisaient par un aspect irrégulier de la surface. La texture de la surface était donc qualifiée de **régulière** ou d'**irrégulière**.

### 3.3.1.3. Organisation transverse

Elle est constituée par la présence d'**ondulations** ou de **striations radiaires**. Sur les reconstructions tridimensionnelles et les os secs, l'organisation transverse était cotée **importante** lorsque nette et présente sur les deux hémifaces. Lorsque l'organisation transverse était discrète, ou présente sur une hémiface seulement, celle-ci était qualifiée de **modérée**. L'absence manifeste d'organisation transverse était qualifiée par le terme **absence** (cf. figure n° II-12). La présence de quelques stries ou ondulations résiduelles isolées au sein d'une surface amorphe n'était pas considérée comme une organisation.

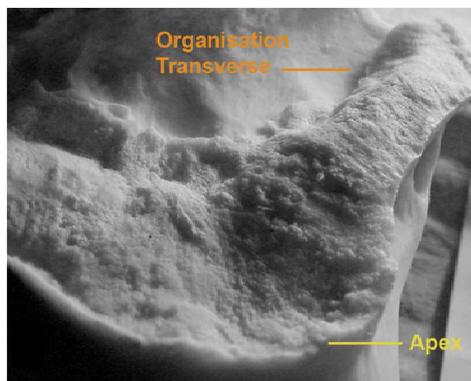


Figure n° II-12 A

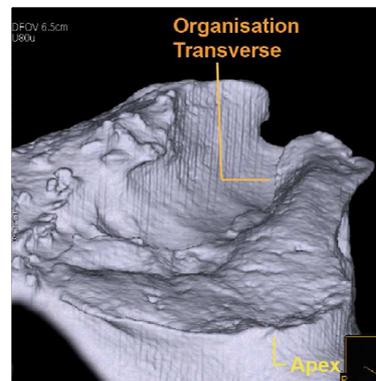


Figure n° II-12 B

**Figure n° II-12** - Organisation transverse sur l'hémiface postérieure d'un sujet de 32 ans – A : striations visibles en macroscopie ; B : striations visibles sur les reconstructions VRT.

### 3.3.1.4. Manifestations dégénératives péri auriculaires

#### 3.3.1.4.1. Activité apicale

A l'apex, le contour de la surface auriculaire est le siège de remaniements quantifiés dans cette étude en termes d'activité. Les éléments évalués comprenaient la régularité et la netteté du contour, le caractère aigu du rebord (triangulaire à la coupe) ainsi que les éventuelles productions osseuses (ostéophytes).

L'épaississement de la bordure, devenant mousse et la formation d'une lèvre (« *lipping* ») étaient appréciés.

Lorsque le contour à l'apex était net, aigu et régulier sans aucune lèvre osseuse, l'activité était considérée comme **absente**. Une nette irrégularité du contour, un aspect mousse et l'existence d'une lèvre osseuse reflétaient une activité **importante**. Les formes intermédiaires étaient le siège d'une activité **modérée** (cf. figure n° II-13).

#### 3.3.1.4.2. Activité rétro auriculaire

La définition de l'activité rétro auriculaire dans cette étude est calquée sur celle de Lovejoy. Dans la région de la tubérosité iliaque, site d'insertion du ligament interosseux sacro-iliaque, la présence de porosités, de productions ostéophytiques et d'irrégularités de la surface, traduit une activité. Celle-ci était qualifiée d'**absente**, de **modérée** ou d'**importante** (cf. figure n° II-13).

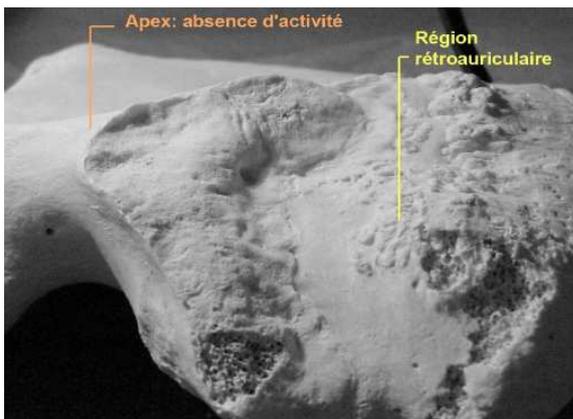


Figure n° II-13 A

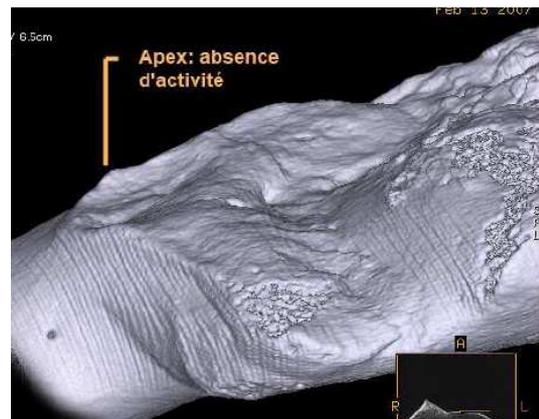


Figure n° II-13 B

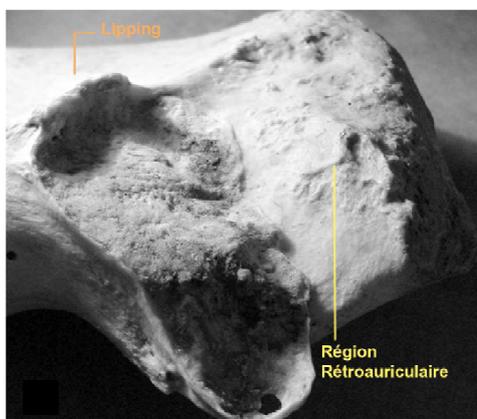


Figure n° II-13 C

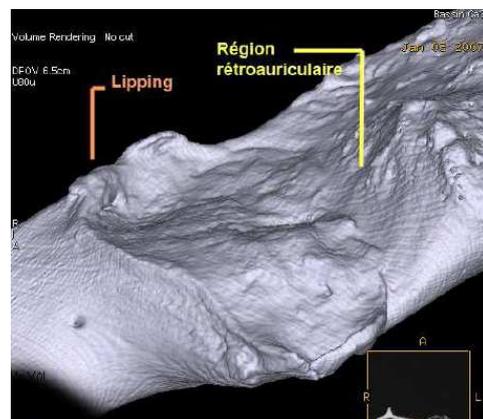


Figure n° II-13 D

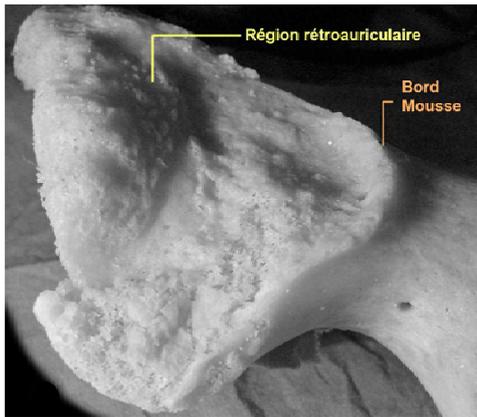


Figure n° II-13 E

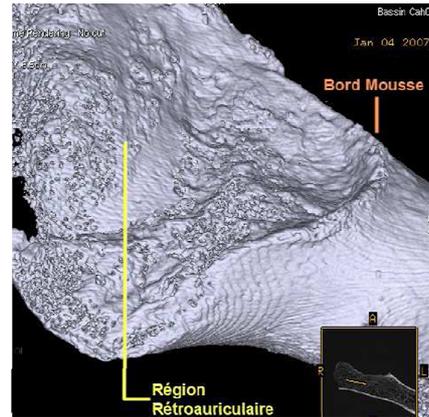


Figure n° II-13 F

Figure n° II-13 - *Activité apicale, os secs (à gauche) et reconstructions VRT (à droite) – A, B : absence d'activité apicale ; C, D : importante activité apicale avec la présence d'une lèvre osseuse ; E, F : importante activité apicale avec un bord apical mousse.*

### 3.3.2. Méthode de codage : critères affectés par les modifications dégénératives de l'architecture de l'os trabéculaire

L'architecture de l'os trabéculaire a été analysée sur les coupes fines centrées sur la partie postérieure du bassin, perpendiculaires à l'axe de l'hémiface inférieure.

#### 3.3.2.1. Visibilité du faisceau auriculo-acétabulaire

De même que pour les extrémités proximales des os longs étudiés par Ascadi et Nemeskeri, l'organisation des faisceaux de trabécules de l'os coxal est affectée par les remaniements dégénératifs. La partie postérieure du faisceau auriculo-acétabulaire, correspondant à une organisation trabéculaire lamellaire, linéaire, orientée en bas et en avant depuis la surface auriculaire vers la région acétabulaire et le pubis, est visible sous la corticale de la surface auriculaire. Ce faisceau est nettement distinct chez les sujets jeunes. Avec l'âge, la visibilité de ce faisceau diminue, l'organisation paraissant à l'extrême isotrope.

La visibilité de la **partie postérieure** du faisceau auriculo-acétabulaire, portion qui nous intéresse dans cette étude, repose sur **deux critères** (cf. figures n° II-14 et II-15) :

- **Ligne centrale du faisceau** : le faisceau comprend une ligne orientée vers le bas naissant en regard du contour supérieur des hémifaces inférieures et supérieures. En regard de l'hémiface inférieure, cette ligne rejoint la corticale de la face latérale de l'ilium, en regard de l'épine iliaque postéro inférieure et le long de l'arc postérieur de la grande incisure sciatique (cf. figure n° II-14 B). En regard de l'hémiface supérieure, le faisceau suit un trajet légèrement plus vertical et devient parallèle aux corticales de l'ilium en avant du fond de l'échancrure sciatique (cf. figure n° II-14 A).

La visualisation de cette ligne était cotée **importante** quand la ligne centrale du faisceau était continue et parfaitement individualisable tant au niveau de l'hémiface supérieure que de l'hémiface inférieure. Lorsque la ligne était discontinue ou invisible par endroit, la visualisation était dite **partielle et discontinue**. Enfin, quand aucune organisation linéaire n'était observée, la visualisation était cotée **absente**.

- **Cellules juxtalinéaires** : dans sa forme typique, le faisceau est formé, outre d'une ligne centrale, de cellules rectangulaires ou ovalaires à la coupe, dont le grand axe suit la direction de la ligne centrale. Ces cellules, chez les sujets jeunes, ont un calibre supérieur à celui des cellules de l'os trabéculaire environnant. L'appréciation de la visualisation du faisceau reposait également sur la perception de ces cellules, cotées **absentes** ou **présentes**.

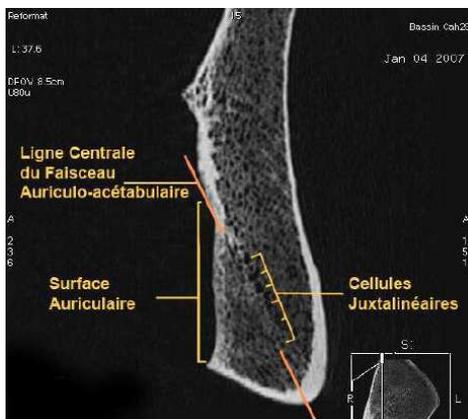


Figure n° II-14 A

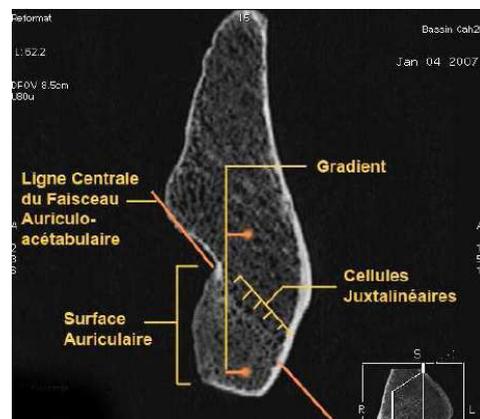


Figure n° II-14 B

**Figure n° II-14** - Architecture de l'os trabéculaire, sujet jeune : coupes MPR fines perpendiculaires à l'hémiface inférieure, en regard de l'hémiface supérieure (A) et plus postérieurement (B). L'orientation du faisceau auriculo-acétabulaire (ligne centrale) et les cellules juxtalinéaires sont bien visibles. Le gradient de densité de part et d'autre du faisceau est net. Les cellules de l'os trabéculaire sous la ligne et les cellules juxtalinéaires sont de petite taille.

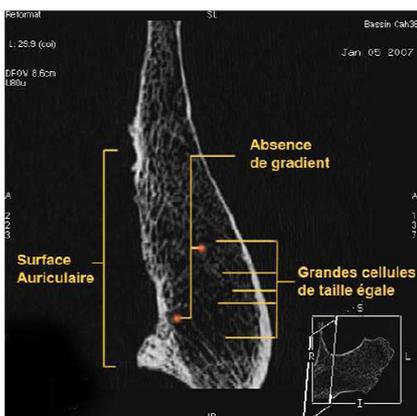


Figure n° II-15 A

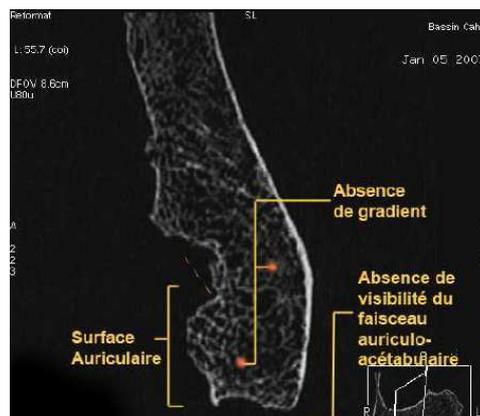


Figure n° II-15 B

**Figure n° II-15** - Architecture de l'os trabéculaire, sujet âgé : coupes MPR fines (0.6 mm) perpendiculaires à l'hémiface inférieure, en regard de l'hémiface supérieure (A) et plus postérieurement (B). Le faisceau auriculo-acétabulaire (ligne centrale et cellules juxtalinéaires) n'est pas visible. Les cellules de l'os trabéculaire de part et d'autre du trajet du faisceau sont de grande taille et aucun gradient de densité n'est individualisable.

### 3.3.2.2. Gradient de densité de l'os trabéculaire

Les remaniements dégénératifs de l'os trabéculaire de la région ne se limitent pas au faisceau lui-même mais impliquent le reste de l'os spongieux. En effet, chez les sujets jeunes, il est possible de visualiser une différence de densité de l'os trabéculaire de part et d'autre du faisceau ce qui se traduit par un **gradient** de densité : sous le trajet du faisceau, l'os trabéculaire tend à être plus dense qu'au dessus. Ceci peut être mis en relation avec le calibre des cellules, mais également avec leur nombre, et avec l'épaisseur des trabécules. Le vieillissement entraîne une disparition de ce gradient, et un aspect isotrope et homogène de l'os spongieux de part et d'autre du faisceau. Le gradient, d'appréciation visuelle, était coté **important** lorsque évident, **modéré** lorsque discret et **absent** lorsqu'aucune différence de densité n'était mise en évidence de part et d'autre du faisceau.

### 3.3.3. Méthode d'analyse statistique

L'ensemble des analyses a été réalisé grâce au logiciel R 2.6.2 ([www.r-project.org](http://www.r-project.org)). L'analyse statistique a été effectuée sans prise en compte du sexe, compte tenu du faible effectif de notre population d'étude.

- Notre analyse a testé dans un premier temps **l'erreur intra-observateur**. Elle a été évaluée à partir des reconstructions bi et tridimensionnelles de l'observateur n° 1. **L'erreur inter-observateur** a été évaluée à partir des conclusions des deux observateurs, issues de l'analyse des reconstructions tomодensitométriques bi et tridimensionnelles. Enfin, une évaluation de la **concordance inter-modalité** pour les différents critères retenus pour l'estimation de l'âge au décès a également été établie. Le calcul du coefficient Kappa ( $\kappa$ ) de Cohen a permis de chiffrer l'accord entre plusieurs observateurs ou méthodes (Cohen, 1960). Landis et Koch ont proposé un classement de l'accord en fonction de la valeur du  $\kappa$  (Landis et Koch, 1977) (cf. tableau n° II-7).

- Dans un second temps, pour chaque critère d'estimation de l'âge au décès retenu, il a été obtenu des **statistiques descriptives** et une **analyse statistique**. Moyennes, fréquences, écarts types ont ainsi été calculés. Les différences d'âge de chaque critère ont été étudiées pour les deux sexes, compte tenu de la taille de l'échantillon, par un test non paramétrique, le test de Kruskal-Wallis.

- Dans un troisième temps, la mise au point de **scores globaux** pour les méthodes de reconstructions tomodensitométriques **bi** et **tridimensionnelles** a été effectuée. Chaque critère retenu a été coté en fonction de son aspect, comme expliqué dans les tableaux n° II-34 et n° II-35. L'addition du score obtenu pour chacun des critères permettait d'obtenir un score global. Chaque critère a été coté de façon croissante avec l'âge, afin que le score global croisse avec le vieillissement.

Ceci a permis d'aboutir à un **score global 3D** pour l'ensemble des critères étudiés sur les reconstructions tomodensitométriques tridimensionnelles, et également à un **score global 2D** pour l'ensemble des critères étudiés sur les reconstructions tomodensitométriques bidimensionnelles. Le score global 3D pouvait être égal au maximum à 9 et le score global 2D au maximum à 7. Pour chaque mode de reconstruction, la valeur limite du score présentant la meilleure sensibilité et spécificité a été déterminée par la réalisation de courbes ROC (*Receiver Operating Characteristic curve*). Celles-ci permettent une analyse graphique de la sensibilité et de la spécificité d'un test (Tasu, 2000).

**Tableau n° II-34 – Score global 3D d'après les reconstructions tomodensitométriques 3D.**

Critère	Valeur	Score
<b>Organisation transverse</b>	Importante	0
	Modérée	1
	Absente	2
<b>Macroporosité</b>	Absente	0
	Modérée	1
	Importante	2
<b>Activité apicale</b>	Absente	0
	Modérée	1
	Importante	2
<b>Activité rétro auriculaire</b>	Absente	0
	Modérée	1
	Importante	2
<b>Texture dominante</b>	Régulière	0
	Irrégulière	1

Tableau n° II-35 – Score global 2D d'après les reconstructions tomodensitométriques 2D.

Critère	Valeur	Score
<b>Macroporosité</b>	Absente	0
	Modérée	1
	Importante	2
<b>Ligne centrale</b>	Nette et continue	0
	Discrète et discontinue	1
	Absente	2
<b>Cellules juxta linéaires</b>	Présentes	0
	Absentes	1
<b>Gradient</b>	Important	0
	Modéré	1
	Absent	2

### 3.4. Résultats

#### 3.4.1. Les différentes variabilités de notre étude

L'objectif de ce travail était de montrer si, au support osseux, pouvaient se substituer des reconstructions tomodensitométriques. Compte-tenu de la faible taille de l'échantillon d'analyse et de l'impossibilité de traiter séparément les deux sexes, nous ne pourrons pas conclure en termes de fiabilité statistique de la méthode.

##### 3.4.1.1. Variabilité intra-observateur

Elle a été évaluée à partir des reconstructions tomodensitométriques bi et tridimensionnelles de l'observateur n° 1. Les résultats sont représentés par les tableaux n° II-36 et n° II-37.

##### 3.4.1.2. Variabilité inter-observateur

Elle a été évaluée à partir des conclusions des deux observateurs, issues de l'analyse des reconstructions tomodensitométriques bi et tridimensionnelles. Les résultats sont représentés par les tableaux n° II-36 et n° II-37.

**Tableau n° II-36** – Variabilités intra et inter-observateur d’après l’analyse des reconstructions tomodensitométriques tridimensionnelles exprimées par le calcul du coefficient de Kappa de Cohen.

Critère	Variabilité intra-observateur	Variabilité inter-observateur
<b>Organisation transverse</b>	0.82	0.82
<b>Macroporosité</b>	0.83	0.65
<b>Activité apicale</b>	0.93	0.93
<b>Activité rétro auriculaire</b>	0.78	0.90
<b>Texture dominante</b>	0.75	0.75

**Tableau n° II-37** – Variabilités intra et inter-observateur d’après l’analyse des reconstructions tomodensitométriques bidimensionnelles exprimées par le calcul du coefficient de Kappa de Cohen.

Critère	Variabilité intra-observateur	Variabilité inter-observateur
<b>Macroporosité</b>	0.83	0.79
<b>Ligne centrale</b>	0.89	0.82
<b>Cellules juxta linéaires</b>	0.77	0.77
<b>Gradient</b>	0.89	0.85

**3.4.1.3. Erreur inter-méthode**

Elle a consisté en la comparaison de la détermination du stade de certains critères retenus entre les reconstructions tridimensionnelles et l’analyse sur os secs, en l’espèce la macroporosité, l’organisation transverse, l’activité apicale et l’activité rétro auriculaire (cf. tableau n° II-38).

Elle a été également effectuée entre les conclusions de stadification des macroporosités déterminées à partir de l’analyse sur os secs et à partir des reconstructions tomodensitométriques bidimensionnelles. Pour ce même critère, le calcul de l’erreur inter-méthode a également été réalisé entre les conclusions effectuées sur les reconstructions tomodensitométriques bi et tridimensionnelles.

**Tableau n° II-38** – Variabilités inter-méthodes pour l’analyse de certains critères sur os secs et sur reconstructions tomodensitométriques exprimées par le calcul du coefficient de Kappa de Cohen.

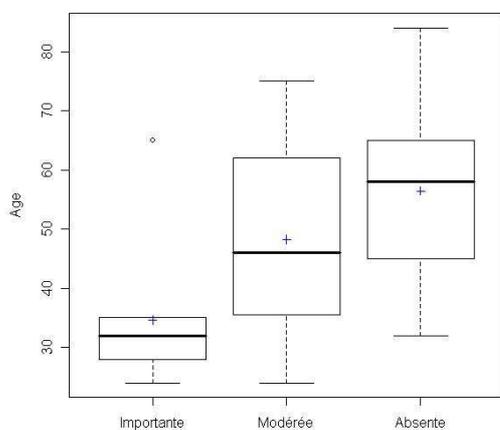
Méthodes	Critères	Concordance
<b>3D et os secs</b>	<b>Macroporosité</b>	0.90
	<b>Organisation transverse</b>	0.73
	<b>Activité apicale</b>	0.63
	<b>Activité rétro auriculaire</b>	0.52
<b>2D et os secs</b>	<b>Macroporosité</b>	0.59
<b>2D et 3D</b>	<b>Macroporosité</b>	0.65

### 3.4.2. Résultats statistiques

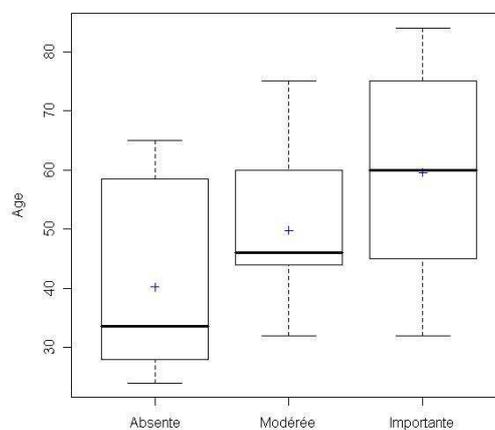
Concernant l'âge au décès, tous les traits évalués se sont avérés significativement corrélés avec l'âge. Ainsi, un trait évalué comme reflétant une morphologie âgée était le plus fréquemment en rapport avec un âge avancé. Les statistiques descriptives et l'analyse statistique issues de la seconde évaluation par l'observateur principal à partir des reconstructions bi et tridimensionnelles sont reportées dans les tableaux n° II-39 et n° II-40. Pour chaque valeur du critère étudié, un graphique de type boîte à moustache de Tukey illustre également les résultats (cf. figures n° II-16 et II-17).

**Tableau n° II-39** – Estimation de l'âge d'après les reconstructions 3D. Moyenne, écart types, valeurs minimum, maximum sont exprimés en années. N, nombre. Min, minimum. Max, maximum. KW, test de Kruskal-Wallis.

Critères	Valeur	N	Moyenne ± SD [min, max]	KW	
				Chi <sup>2</sup>	p
<b>Organisation transverse</b>	Importante	9	34.6 ± 12.0 [24.0, 65.0]	12.9	0.0016
	Modérée	12	48.3 ± 15.0 [24.0, 75.0]		
	Absente	25	56.4 ± 14.4 [32.0, 84.0]		
<b>Macroporosité</b>	Absente	12	40.2 ± 15.9 [24.0, 65.0]	8.4	0.014
	Modérée	21	49.8 ± 12.1 [32.0, 68.0]		
	Importante	13	59.5 ± 17.8 [32.0, 84.0]		
<b>Activité apicale</b>	Absente	10	37.4 ± 11.7 [24.0, 65.0]	9.2	0.009
	Modérée	20	50.4 ± 14.6 [24.0, 75.0]		
	Importante	16	57.4 ± 16.4 [32.0, 84.0]		
<b>Activité rétro auriculaire</b>	Absente	11	43.4 ± 14.9 [24.0, 65.0]	7.2	0.027
	Modérée	20	47.6 ± 15.1 [28.0, 75.0]		
	Importante	13	60.1 ± 15.5 [32.0, 84.0]		
<b>Texture dominante</b>	Régulière	16	38.5 ± 13.8 [24.0, 65.0]	12.2	0.0005
	Irrégulière	30	56.2 ± 14.0 [32.0, 84.0]		



**Figure n° II-16 A** – Organisation transverse.



**Figure n° II-16 B** – Macroporosité.

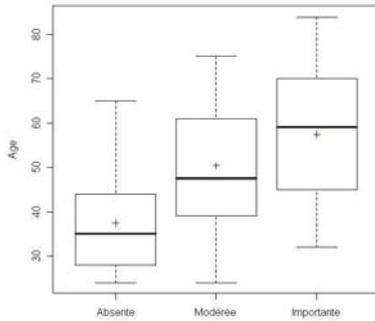


Figure n° II-16 C –  
Activité apicale.

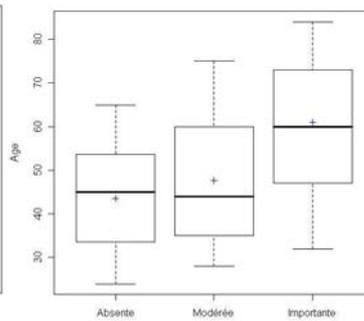


Figure n° II-16 D –  
Activité rétro apicale.

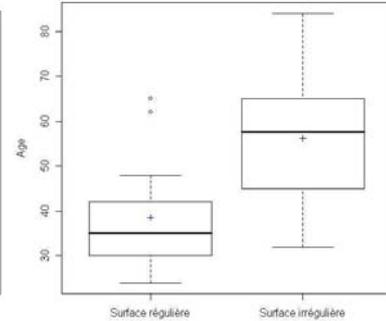


Figure n° II-16 E –  
Texture dominante.

**Figure n° II-16** – Boîtes à moustaches de Tukey de la *stratification tridimensionnelle* de la surface auriculaire : les bordures supérieures et inférieures des boîtes rectangulaires représentent respectivement les percentiles 75 et 25, les barres horizontales les médianes (percentile 50), les croix les moyennes, les barres en T aux deux extrémités des boîtes les valeurs d'âges extrêmes maximums et minimums (avec un intervalle de confiance à 95 %), les cercles (o) les individus aberrants.

**Tableau n° II-40** – Estimation de l'âge d'après les reconstructions 2D. Moyenne, écart types, valeurs minimum, maximum exprimées en années. N, nombre. Min, minimum. Max, maximum. KW, test de Kruskal-Wallis.

Critères	Valeur	N	Moyenne ± SD [min, max]	KW	
				Chi <sup>2</sup>	p
<b>Macroporosité</b>	Absente	22	42.9 ± 13.3 [24.0, 65.0]	10.2	0.0062
	Modérée	11	49.5 ± 10.8 [32.0, 65.0]		
	Importante	13	62.5 ± 17.9 [32.0, 84.0]		
<b>Ligne centrale</b>	Nette et continue	9	37.9 ± 9.5 [28.0, 57.0]	13.6	0.00011
	Discrète et discontinue	20	46.0 ± 14.5 [24.0, 75.0]		
	Absente	17	61.2 ± 14.5 [34.0, 84.0]		
<b>Cellules juxta linéaires</b>	Présentes	28	42.4 ± 13.4 [24.0, 75.0]	14.9	0.0001
	Absentes	18	61.8 ± 13.0 [43.0, 84.0]		
<b>Gradient</b>	Important	9	37.7 ± 11.8 [28.0, 59.0]	13.2	0.0013
	Modéré	12	42.7 ± 12.9 [24.0, 65.0]		
	Absent	25	58.0 ± 14.9 [32.0, 84.0]		

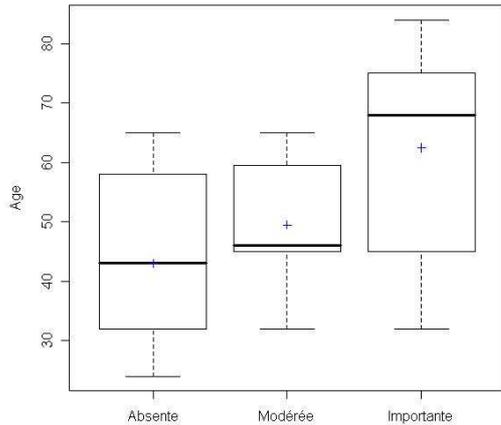


Figure n° II-17 A – Macroporosité.

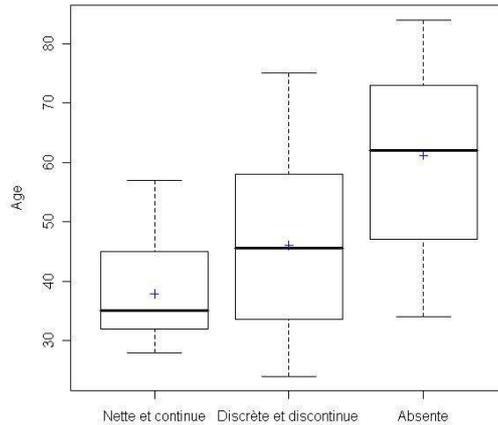


Figure n° II-17 B – Ligne centrale.

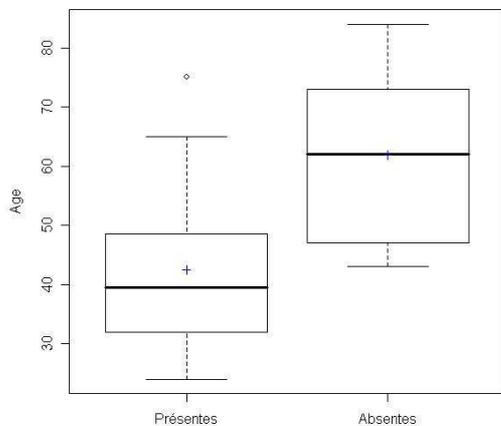


Figure n° II-17 C – Cellules juxta-linéaires.

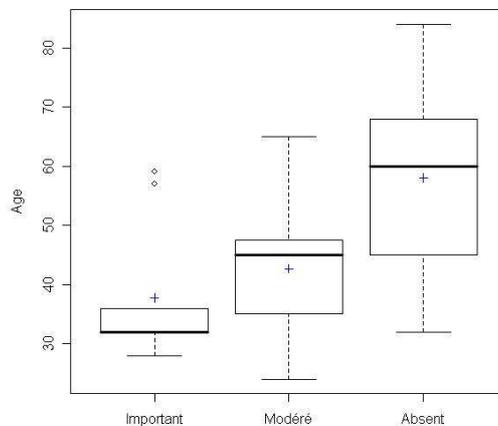


Figure n° II-17 D – Gradient.

Figure n° II-17 – Boîtes à moustaches de Tukey de la *stadification bidimensionnelle* de la surface auriculaire : les bordures supérieures et inférieures des boîtes rectangulaires représentent respectivement les percentiles 75 et 25, les barres horizontales les médianes (percentile 50), les croix les moyennes, les barres en T aux deux extrémités des boîtes les valeurs d'âges extrêmes maximums et minimums (avec un intervalle de confiance à 95 %), les cercles (o) les individus aberrants.

### 3.4.3. Les scores globaux

Une étude de la répartition de la population étudiée a donc été effectuée selon les scores globaux 2D et 3D pour des âges limites arbitraires de 40 et 60 ans. Les résultats sont présentés sous la forme des tableaux n° II-40 et II-41.

Tableau n° II-40 – Répartition des âges de la population étudiée selon le score 3D.

Score global 3D \ Age	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
< 40 ans	2	2	4	4	0	0	0	0	1	0
> 40 ans	0	1	0	2	3	5	1	9	6	4
< 60 ans	2	2	4	5	2	4	0	5	5	0
> 60 ans	0	1	0	1	1	1	1	4	2	4

**Tableau n° II-41**– Répartition des âges de la population étudiée selon le score 2D.

Age \ Score global 2D	Score global 2D							
	0	1	2	3	4	5	6	7
< 40 ans	3	5	4	0	0	1	1	0
> 40 ans	0	1	1	9	5	6	3	7
< 60 ans	3	6	5	7	5	3	1	1
> 60 ans	0	0	0	2	0	4	3	6

Pour chaque mode de reconstruction (bi ou tridimensionnel), et pour chaque âge limite retenu (40 et 60 ans), une analyse de la sensibilité et de la spécificité a été effectuée pour chaque valeur possible du score 3D global et 2D global (soit entre 0 et 9 sur une échelle allant jusqu'à 9 pour le score 3D et de 0 à 7 sur une échelle allant jusqu'à 7 pour le score 2D). Ce test s'est fait sous la forme de courbe de ROC (*Receiver Operating Characteristic curve*), qui permet une analyse graphique de la sensibilité et de la spécificité d'un test (Tasu, 2000). Une courbe ROC a une forme générale curviligne. Se déplacer vers la droite est équivalent à augmenter la sensibilité du test au détriment de la spécificité : le critère diagnostique devient moins strict. A contrario, se déplacer vers la gauche, revient à prendre un caractère plus strict et donc à augmenter la spécificité au détriment de la sensibilité. Le coin droit de la courbe est la zone où tous les tests sont positifs (sensibilité à 100 %). Le coin gauche est celui où tous les tests sont normaux (sensibilité de 0 % et spécificité de 100 %). On peut, à l'aide de la courbe ROC, choisir ensuite le seuil du test pour obtenir une sensibilité et une spécificité désirées. La fraction de faux positifs est équivalente à (« 1- spécificité »). La fraction des vrais positifs est la sensibilité. On peut donc choisir de représenter la courbe ROC comme une fonction de la sensibilité et de la spécificité. On parle alors de courbe « sensibilité – spécificité ». En l'espèce, pour un âge limite de 40 ans, la sensibilité représente la probabilité que le test soit positif chez un sujet de plus de 40 ans et la spécificité la probabilité que le test soit négatif chez les sujets de moins de 40 ans. Les différentes courbes « sensibilité – spécificité » effectuées pour des âges limites de 40 et 60 ans sont présentées pour le score global 3D et 2D sous la forme de figures (respectivement les figures n° II-18 et II-19).

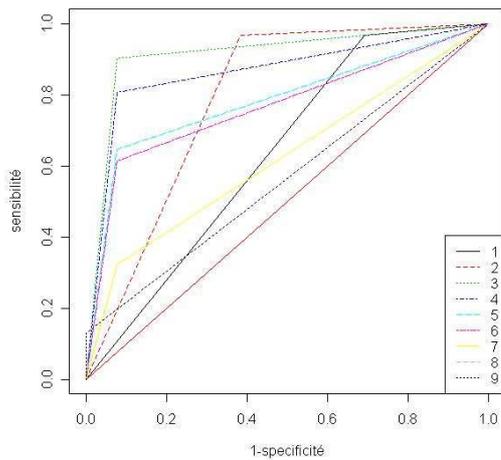


Figure n° II-18 – A

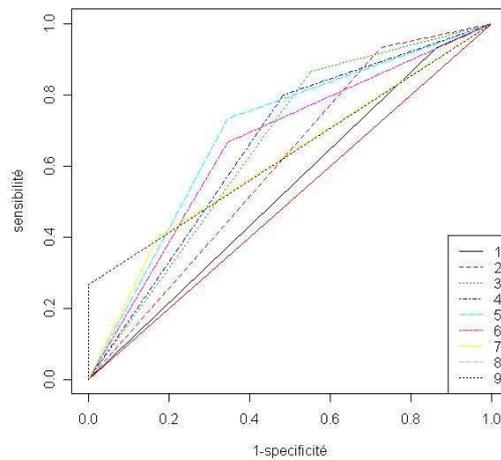


Figure n° II-18 – B

Figure n° II-18 – Courbes de « sensibilité – spécificité » pour le score global 3D. A : avec un âge limite de 40 ans ; B : avec un âge limite de 60 ans.

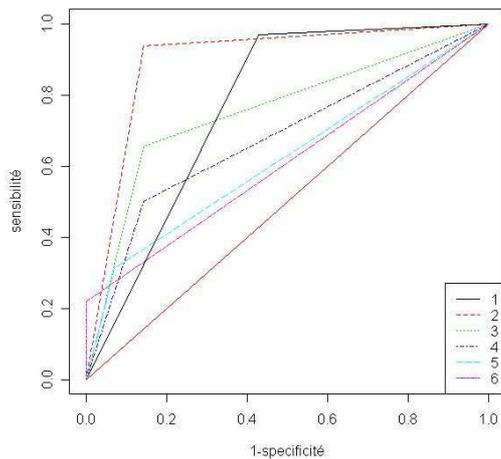


Figure n° II-19 – A

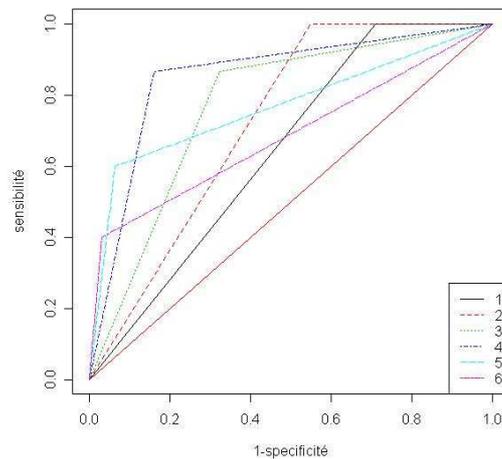


Figure n° II-19 – B

Figure n° II-19 – Courbes de « sensibilité – spécificité » pour le score global 2D. A : avec un âge limite de 40 ans ; B : avec un âge limite de 60 ans.

Pour chacune de ces courbes l'aire sous la courbe a été calculée. Cette valeur pour chaque score 3D et 2D est fournie dans les tableaux n° II-42 et n°II-43.

Tableau n° II-42 – Répartition des aires sous la courbe selon le score 3D.

Age limite \ Score global 3D	1	2	3	4	5	6	7	8
	40 ans	0.64	0.79	<b>0.91</b>	0.86	0.78	0.76	0.62
60 ans	0.53	0.60	0.66	0.66	<b>0.69</b>	0.66	0.61	0.63

**Tableau n° II-43**– Répartition des aires sous la courbe selon le score 2D.

Score global 2D Age limite	1	2	3	4	5	6
<b>40 ans</b>	0.77	<b>0.90</b>	0.76	0.68	0.62	0.61
<b>60 ans</b>	0.64	0.72	0.77	<b>0.85</b>	0.77	0.68

Il apparaît ainsi que les valeurs limites de scores 2D et 3D qui présentent l’aire sous la courbe la plus importante varient en fonction de l’âge limite choisi.

Ainsi, pour le **score 3D** : la limite de **3/9** sera retenue pour déterminer si l’individu a plus ou moins de **40 ans** (sensibilité : 0.90 ; spécificité : 0.92) et de **5/9** pour déterminer si l’individu plus ou moins de **60 ans** (sensibilité : 0.73 ; spécificité : 0.66).

Ainsi, pour le **score 2D** : la limite de **2/7** sera retenue pour déterminer si l’individu a plus ou moins de **40 ans** (sensibilité : 0.94 ; spécificité : 0.86) et de **4/7** pour déterminer si l’individu plus ou moins de **60 ans** (sensibilité : 0.87 ; spécificité : 0.84).

### **3.5. Discussion**

Dans cette étude, l’utilisation de la tomodensitométrie afin d’estimer l’âge au décès à partir de la surface auriculaire et de son environnement a été orientée selon deux approches :

- En premier lieu, la faisabilité de la **transposition de certains critères établis** par des travaux antérieurs, et évalués ici d’après les reconstructions bi et tridimensionnelles a été étudiée. Afin d’établir la validité de cette approche tomodensitométrique, l’étude se devait de comparer l’appréciation de caractères visibles sur l’os sec à leur appréciation sur les reconstructions tridimensionnelles. L’approche est donc plus proche de celle de Buckberry et Chamberlain (Buckberry et Chamberlain, 2002) (détermination de critères puis établissement d’un score composite permettant une estimation de l’âge) que de celle de Lovejoy (Lovejoy *et al.*, 1985) (description de stades types et comparaison de l’échantillon à ces stades).

- Par ailleurs, la recherche et l’évaluation de la pertinence de **critères propres à l’approche tomodensitométrique**, intéressant en particulier l’os trabéculaire a permis de retenir plusieurs traits informatifs, nécessitant une plus large évaluation.

### 3.5.1. Discussion concernant les méthodes pré existantes d'estimation de l'âge au décès par l'étude de la surface auriculaire

#### 3.5.1.1. La méthode de Lovejoy

En 1991, Murray et Murray testaient la méthode de Lovejoy sur un échantillon de 189 individus de la collection Terry afin d'évaluer son applicabilité en médecine légale (Murray et Murray, 1991). Une surestimation de l'âge des individus de moins de 34 ans et une sous-estimation de l'âge des sujets de plus de 40 ans était mise en évidence. Bien que la méthode était alors jugée indépendante du sexe, celle-ci est décrite comme trop imprécise pour être utilisée seule en vue de l'estimation de l'âge. La même tendance à sous-estimer l'âge des plus âgés et surestimer l'âge des individus les plus jeunes a également été mise en évidence (Bedford *et al.*, 1993 ; Saunders *et al.*, 1992 ; Schmitt, 2004). En outre, lorsque l'on tente d'appliquer la méthode à une population historique, Storey rappelle qu'il est nécessaire de réitérer une sériation, c'est-à-dire d'organiser l'échantillon de la surface ayant l'aspect le plus juvénile à celle ayant la morphologie la plus âgée (Storey, 2007).

#### 3.5.1.2. La méthode de Chamberlain et Buckberry

Cette méthode a été sujette à de nombreuses critiques car les probabilités permettant d'estimer l'âge au décès n'ont pas été calculées pour chacun des critères observés, comme Schmitt l'a fait (Schmitt, 2005). En effet, à chaque caractère observé correspond un certain nombre de scores. Les scores de chaque caractère sont additionnés et correspondent à sept stades. A chaque stade correspond la probabilité d'appartenir à telle ou telle classe. Toutefois, cette méthode démontre que les intervalles chronologiques obtenus par le calcul des probabilités sont plus proches de la réalité que ceux proposés par Lovejoy et qu'il n'y a pas de différence entre sexes. Toutefois, les auteurs donnent les probabilités brutes et ne précisent pas comment les traiter pour obtenir un intervalle chronologique. De plus, la performance de cette méthode n'a pas été testée sur un échantillon indépendant pour vérifier sa fiabilité et elle n'a pas été quantifiée sur la population de référence elle-même (Schmitt, 2005).

Deux études récentes ont testé la méthode de Chamberlain et Buckberry :

- Celle réalisée par Mulhern et Jones propose de tester la méthode de Chamberlain et Buckberry sur 309 individus des collections Terry et Huntington (Mulhern et Jones, 2005). Les auteurs confirment que la méthode est applicable indépendamment du sexe. L'échantillon comprenant une distribution équilibrée d'hommes et de femmes d'origine européenne et d'afro-américains, les auteurs concluent que la méthode est indépendante de l'origine

ethnique. La méthode révisée étant comparée à celle de Lovejoy, cette dernière est plus précise pour la tranche d'âge 20-49 ans et moins précise entre 50-69 ans. La méthode de Chamberlain est jugée plus simple d'application et permet en outre de distinguer différentes classes d'âge au delà de 60 ans, ce que ne permet pas la méthode originale, avec toutefois une plus grande inexactitude.

- Falys évalue en 2006 la méthode de Chamberlain et Buckberry sur une population archéologique de 167 individus d'âges connus (Falys *et al.*, 2006). Il met en évidence une précision moindre que celle espérée. En effet, après l'obtention de scores composites, il apparaît que seuls trois stades, correspondant à 3 tranches d'âge, sur les sept proposés par les auteurs sont statistiquement supportés. Toutefois, même si la largeur de classe d'âge découlant de cette nouvelle stadification rend la méthode impropre à une utilisation médico-légale, la classe d'âge la plus âgée (supérieure à 60 ans) est identifiée avec confiance.

### **3.5.2. Discussion concernant la transposition tomодensitométrique tridimensionnelle des critères issus de méthodes existantes**

#### **3.5.2.1. Organisation transverse**

Au début de cette étude, l'**organisation transverse** devait être évaluée à la fois sur les coupes MPR et sur les reconstructions VRT. Lors des analyses préliminaires, l'appréciation de l'**organisation transverse** s'est avérée très délicate et non reproductible sur les coupes multiplanaires 2D. La concordance entre les reconstructions tridimensionnelles et l'étude sur os secs était bonne ( $\kappa = 0,73$ ). Comme le montre la figure n° II-16, la démonstration d'une organisation transverse importante isole les sujets les plus jeunes de ceux présentant une organisation transverse modérée ou absente, avec un très faible chevauchement : la présence d'une organisation transverse nette, visualisée sur les deux hémifaces permet dans cette étude de cibler les sujets de moins de 40 ans. En revanche, la disparition progressive et chronologiquement variable de l'organisation transverse entraîne un fort chevauchement en terme d'âge entre les surfaces présentant une organisation qualifiée de modérée et celles sans organisation résiduelle. Ceci concorde avec l'étude de Lovejoy, qui indiquait qu'un certain degré d'organisation transverse pouvait persister sur des surfaces âgées (Lovejoy *et al.*, 1985).

#### **3.5.2.2. Microporosité**

L'évaluation de la **microporosité** de la surface se heurte aux limites techniques, concernant tant la résolution d'acquisition que l'algorithme de reconstruction. Pour ces

raisons, la microporosité de la surface auriculaire n'est pas accessible à la résolution du scanner 16 barrettes utilisé dans cette étude.

### 3.5.2.3. Macroporosité

Pour les raisons précédemment décrites, l'étude s'est donc concentrée sur la recherche d'une **macroporosité**, évaluée à la fois sur les coupes multiplanaires bidimensionnelles et sur les reconstructions tridimensionnelles.

La comparaison de l'évaluation de la macroporosité par les différentes modalités apporte des renseignements intéressants. Alors que la concordance de l'évaluation d'après les images 3D et les os secs est très bonne pour ce critère ( $\kappa = 0.90$ ), cette concordance est bien moindre entre les études 2D et 3D ( $\kappa = 0.65$ ) et entre les études 2D et sur os secs ( $\kappa = 0.59$ ).

La sensibilité à la porosité est plus importante pour les reconstructions 3D que pour les coupes MPR. En effet, 16 surfaces auriculaires ne présentaient aucune macroporosité en 3D alors que 22 n'en présentaient pas en 2D. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce phénomène :

- L'algorithme de reconstruction en technique de rendu volumique suppose la détermination des densités participant à la formation de l'image, à la manière du fenêtrage en coupe 2D. Dans cette étude, un algorithme attribuant une opacité maximale à toutes les densités supérieures à - 600 UH a été retenu. La logique de cette approche est celle d'un compromis entre participation du maximum de densités osseuses (à priori nettement supérieures à - 600 UH), et suppression du maximum de bruit et d'artéfacts (par exemple de durcissement de faisceau, se traduisant par des densités non strictement aériques, supérieures à - 1000 UH, à proximité de l'échantillon). Malgré cela, quand la corticale est très fine, la densité des voxels correspondant peut être inférieure au seuil, et ceci est à l'origine de faux positifs de porosité en 3D. Ce phénomène ne semble toutefois pas entraîner de différence notable en terme d'information quand à l'âge de décès, si l'on considère la très bonne concordance avec les évaluations effectuées sur os secs. Il est possible qu'une corticale très fine subissant l'artéfact décrit et qu'une porosité visible macroscopiquement ne soient que deux états proches dans l'évolution dégénérative de la surface.

- La plus faible concordance des reconstructions 3D avec les reconstructions 2D est plus vraisemblablement en rapport avec la définition même de la porosité. Sur les reconstructions 2D, la mise à nu de l'os trabéculaire est sans ambiguïté et un relief négatif n'ayant pas cette caractéristique ne sera pas considéré comme une porosité. En revanche, sur

les os secs ou les reconstructions 3D, il est possible qu'un défaut soit à tort qualifié de pore sans pour autant que l'os trabéculaire sous jacent ne soit visible.

- L'imagerie en coupe MPR permet la différenciation entre les pores dégénératifs et les défauts liés à des trous nourriciers, reconnus par le trajet corticalisé du vaisseau qui s'y rattache : dans cette étude ceux-ci n'étaient pas considérés comme porosité sur les coupes MPR.

### 3.5.2.4. Texture de surface

Selon Lovejoy, l'évolution typique de la **texture de la surface** se fait d'une granulation initialement fine, devenant plus grossière avec l'âge puis disparaissant et laissant la place à une surface dense organisée sous forme d'îlots. Chamberlain fixe la limite entre la granulation fine et grossière à un calibre de 0.5 mm (Buckberry et Chamberlain, 2002). De même que pour la microporosité, les granulations fines ne sont pas accessibles à l'examen tomodensitométrique du fait d'un calibre de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de coupe. Ainsi, les fines granulations n'altèrent pas la régularité apparente de la corticale. En revanche, les dimensions des granulations plus grossières, et des îlots denses ont une traduction tomodensitométrique. Lors des analyses préliminaires, l'évaluation de la texture de la surface a donc été appréciée selon deux critères : d'une part, **l'importance de la surface couverte par les îlots denses**, en reprenant ainsi le critère de Buckberry et Chamberlain, d'autre part le **type de texture dominante**.

- Le critère concernant l'importance de la surface couverte par les îlots denses s'est montré inapproprié car non reproductible, que ce soit d'une modalité à l'autre ou d'un observateur à l'autre.

- Pour le critère concernant la texture dominante, trois gradations étaient initialement prévues, correspondant à une surface lisse et régulière, une dominante de granulations grossières ou une dominante d'îlots denses. Il s'est avéré que le chevauchement et l'interpolation fréquente de ces deux types de textures les rendaient non informatifs l'un vis-à-vis de l'autre pour l'estimation de l'âge. Ces deux textures, correspondant à une surface irrégulière ont donc été regroupées au sein d'un même grade : *in fine*, la **texture** était considérée comme **régulière** ou **irrégulière**, quelque soit le type d'irrégularités présentes.

Cette simplification aboutit à un critère moins informatif mais qui isole correctement les sujets les plus jeunes devant la constatation d'une texture régulière.

### 3.5.2.5. Activités apicales et rétro auriculaire

Les activités apicale et rétro auriculaire sont considérées par Lovejoy comme des critères secondaires, mais potentiellement informatifs. Les résultats démontrent un fort chevauchement entre les activités modérées et importantes.

### 3.5.3. Recherche et évaluation de critères propres : architecture de l'os trabéculaire

L'intérêt porté aux modifications de l'architecture de l'os trabéculaire dans l'estimation de l'âge au décès repose sur les constatations d'Acsadi et Nemeskeri (Acsadi et Nemeskeri, 1970). Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'architecture trabéculaire de l'os coxal. La constatation d'une orientation privilégiée des trabécules en faisceaux a été mise en relation avec les transferts de charges impliquant l'os trabéculaire du bassin. Ceci a été utilisé d'abord pour déterminer quels étaient les faisceaux correspondant à des différenciations adaptatives à la bipédie (Correnti, 1955), puis pour rechercher des arguments en faveur de la bipédie de tel ou tel hominidé fossile (Rook *et al.*, 1999; Tobias, 1998). Mais aucune étude ne s'est intéressée à l'altération dégénérative de ces mêmes faisceaux au cours de la vie. Dans le cadre de cette étude, se proposant de participer à l'estimation de l'âge au décès à partir du pelvis postérieur, les acquisitions tomодensitométriques ont permis de mettre en évidence une altération du faisceau auriculo-acétabulaire décrit par Kapandji, se superposant avec le faisceau sacro-pubien de Correnti. L'acquisition tomодensitométrique centrée sur la surface auriculaire, visualisant la partie postérieure du faisceau auriculo-acétabulaire était propice à cette étude du fait de sa résolution spatiale supérieure et du filtre ultra dur employé (B 80).

#### 3.5.3.1. Le faisceau auriculo-acétabulaire

L'intégrité du faisceau auriculo-acétabulaire dans sa partie postérieure était évaluée par la visibilité d'une part **de la ligne centrale** et d'autre part **de cellules orientées selon sa direction** et présentes à son contact, nommées **cellules juxtalinéaires**.

Elle s'avère avoir une très bonne corrélation avec l'âge, en particulier pour la visibilité des cellules du faisceau. Ainsi l'association de cellules juxtalinéaires visibles et d'une ligne centrale continue ne présente qu'un très faible chevauchement avec l'association de ligne absente et de cellules absentes (cf. figure n° II-17). De fait, la perte du caractère net et continu de la ligne centrale associée à la disparition des cellules juxtalinéaires, permet d'isoler correctement les individus de plus de 50 ans.

En outre, la reproductibilité est très bonne et témoigne de la facilité d'utilisation du critère : les coefficients kappa de concordance intra et inter observateurs sont respectivement de 0.89 et 0.82 pour la ligne centrale et de 0.77 et 0.77 pour les cellules juxtalinéaires.

### 3.5.3.2. Le gradient

Cette étude confirme par ailleurs qu'il existe chez les sujets les plus jeunes une **différence de densité de part et d'autre du trajet du faisceau**, et que ce critère peut être utilisé dans l'estimation de l'âge au décès. Ce **gradient** a été évalué visuellement et donc sujet à une part de subjectivité. On peut objecter que la tomodensitométrie aurait pu permettre de mesurer au sein d'une région d'intérêt par la mesure des densités absolues de l'os trabéculaire. Toutefois, une évaluation visuelle telle que celle choisie dans cette étude se justifie pour plusieurs raisons :

- La densité de l'os trabéculaire dépend en effet non seulement de la nature des travées de l'os (densité spatiale, épaisseur, degré de minéralisation) mais aussi du contenu des cellules. Or, ce contenu, composé essentiellement de tissus de densité grasseuse chez le vivant, est progressivement remplacé en *post mortem* par de l'air. Ce phénomène peut être à l'origine d'une variation d'atténuation et donc de variation de densités absolues au sein des cellules de l'os trabéculaire.

- Au cours même du vieillissement le contenu grasseux de la moelle osseuse évolue, constituant un des biais à la reproductibilité des mesures en tomodensitométrie quantitative dans l'étude de l'ostéoporose (Dreux et Delmas, 2001).

- La mesure d'une densité suppose que soient définies les régions d'intérêt et que celles-ci soient reproductibles. L'appréciation nécessitant d'intégrer l'éventuelle différence de densité observée sur l'étendue de la surface auriculaire, ceci plaide pour une analyse visuelle plutôt que la définition de multiples régions d'intérêt. La variabilité intra et inter-observateur du gradient est bonne (concordances respectives de 0.89 et 0.85), malgré le choix d'une quantification à trois grades. Cette bonne reproductibilité plaide *a posteriori* pour la conservation de cette évaluation visuelle du gradient.

Dans cette étude, la visualisation du faisceau auriculo-acétabulaire et le gradient de densité de l'os trabéculaire autour du faisceau sont aptes à identifier avec confiance les individus de plus de 50 ans. Cette possibilité d'identifier correctement les sujet les plus âgés est peut être l'intérêt majeur de la méthode de Lovejoy, comme le confirme une comparaison récente entre

différentes techniques (Martrille *et al.*, 2007), où la méthode de Lovejoy s'avère la plus précise dans le groupe « 41 - 60 ans ».

### 3.5.4. Concordances et divergences des différentes modalités

Cette étude confirme, au vu de la bonne concordance entre les évaluations sur os secs et les reconstructions 3D, que la qualité des reconstructions tridimensionnelles est suffisante pour une évaluation satisfaisante de **l'organisation transverse**.

L'évaluation de la **porosité** malgré les réserves exprimées quand à la surestimation potentielle de celle-ci en reconstruction 3D montre également une bonne concordance ( $\kappa = 0.73$ ) et une bonne reproductibilité.

A contrario, les éléments macroscopiques définissant la **texture** sur l'os sec n'étant pas correctement visualisés sur les reconstructions, une appréciation plus simple, mais moins informative a été préférée. Cette simplification n'est toutefois pas en opposition avec les données récentes de la littérature, en particulier l'étude de Falys qui remet en cause la précision obtenue par Buckberry et Chamberlain (Buckberry et Chamberlain, 2002 ; Falys *et al.*, 2006). Pour Falys, seules trois catégories d'âge peuvent être distinguées d'après le score composite obtenu par la méthode de Buckberry et Chamberlain : jeunes (avec un âge moyen de 38.6 ans), intermédiaires (avec un âge moyen de 52.3 ans) et âgés (avec un âge moyen de 65.7 ans) (Falys *et al.*, 2006).

### 3.5.5. Performance opérationnelle des scores globaux 3D et 2D

Les scores globaux permettent une utilisation pratique de la méthode de détermination d'âge au décès à partir de l'étude de la surface auriculaire décrite dans cette thèse.

Les valeurs limites de scores 2D et 3D qui permettent de déterminer si le sujet étudié a plus ou moins de 40 ans ou plus ou moins de 60 ans sont variables en fonction du choix de cet âge limite.

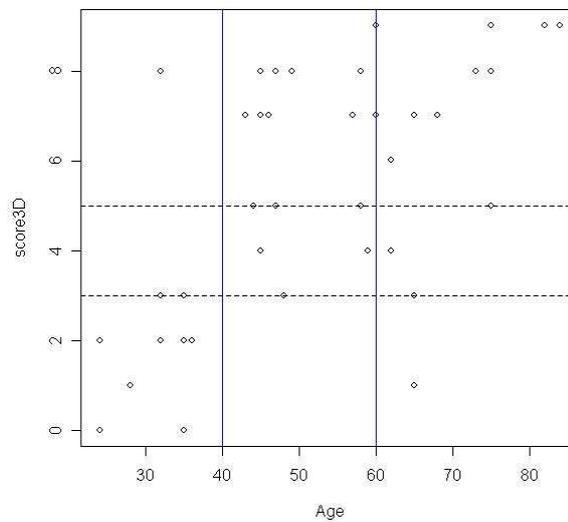
Ainsi, pour le **score 3D**, la limite de **3/9** sera retenue pour déterminer si l'individu a plus ou moins de **40** ans (sensibilité : 0.90 ; spécificité : 0.92) et de **5/9** pour déterminer si l'individu plus ou moins de **60** ans (sensibilité : 0.73 ; spécificité : 0.66).

Concernant le **score 2D**, la limite de **2/7** sera retenue pour déterminer si l'individu a plus ou moins de **40** ans (sensibilité : 0.94 ; spécificité : 0.86) et de **4/7** pour déterminer si l'individu plus ou moins de **60** ans (sensibilité : 0.87 ; spécificité : 0.84).

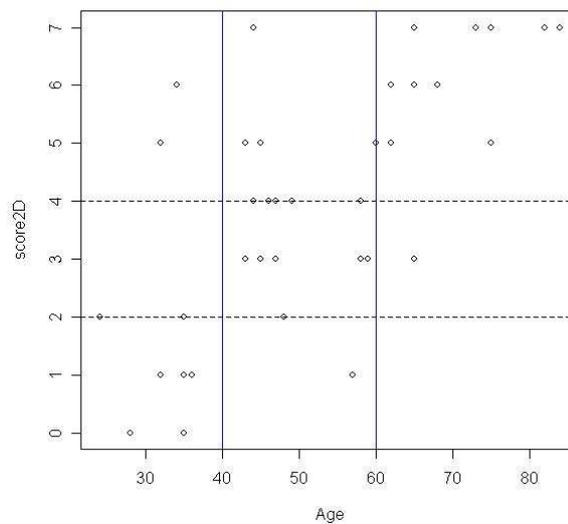
On note que les deux méthodes de reconstruction tri et bidimensionnelles présentent une meilleure sensibilité et spécificité si la question concerne un âge supérieur ou inférieur à 40 ans.

Si l'âge limite est de 60 ans, les deux modes de reconstruction, bien que moins performants, ont tout de même des sensibilités et des spécificités correctes. Dans ce cadre, le score 2D présente tout de même une sensibilité et une spécificité supérieure à celle du score 3D.

La représentation graphique de la répartition des scores 3D et 2D en fonction de l'âge est fournie dans les figures n° II-20 et n°II-21. Ces figures permettent de visualiser la répartition des sujets de la population étudiée en fonction des âges limites retenus de 40 et 60 ans.



**Figure n° II-20** – Score global 3D, représentation graphique. Les barres verticales continues représentent les âges limites de 40 et 60 ans ; les barres horizontales discontinues représentent des scores globaux 3D égaux à 3 et 5.



**Figure n° II-21** – Score global 2D, représentation graphique. Les barres verticales continues représentent les âges limites de 40 et 60 ans ; les barres horizontales discontinues représentent des scores globaux 2D égaux à 2 et 4.

# Chapitre 4

## La symphyse pubienne

---

L'intérêt de la symphyse pubienne pour estimer l'âge au décès est bien connu en anthropologie et plus particulièrement en anthropologie médico-légale. C'est une méthode qui peut s'appliquer chez des sujets adultes de tout âge. Néanmoins, il faut cependant tenir compte du fait que les phénomènes de maturation et de sénescence varient d'un individu à l'autre et d'une population à une autre (Hoppa, 2000 ; Pal et Tamankar, 1983 ; Rougé *et al.*, 1992). Ils peuvent être influencés par des facteurs physiologiques (comme la grossesse) ou pathologiques (Meindl *et al.*, 1985 ; Todd, 1920). La maturation est également moins variable que les processus dégénératifs qui lui succèdent (Schmitt, 2001). A partir de 40 ans, les changements de la symphyse pubienne sont aléatoires surtout chez la femme et les méthodes d'estimation de l'âge deviennent moins précises (Hanihara et Susuki, 1978 ; Kimmerle *et al.*, 2008 ; Konigsberg *et al.*, 2008 ; Suchey *et al.*, 1986).

Compte-tenu des besoins exprimés par la médecine légale et des contraintes liées à l'application de la méthode de Suchey-Brooks, notre étude va tenter d'appliquer cette estimation de l'âge selon différents types de reconstructions : à partir d'images axiales présentant une épaisseur de 2 mm (épaisseur utilisée en routine clinique), d'images axiales présentant une épaisseur de 0.6 mm (épaisseur non utilisée en pratique clinique car trop irradiante pour le sujet scanographié), avec application de filtres de reconstruction dit « dur » (destiné en pratique clinique à l'étude des structures osseuses) et dit « mou » (destiné en pratique clinique à l'étude des parties molles et des organes). L'apport possible des reconstructions bidimensionnelles dans le cadre de la détermination de la stadification de Suchey-Brooks a également été recherché. Les résultats de la comparaison entre les différents types de reconstructions bi et tridimensionnelles nous permettront de discuter de la possibilité d'appliquer la méthode ostéologique à des reconstructions tomodensitométriques.

## 4.1. La symphyse pubienne en anthropologie

### 4.1.1. Méthodes antérieures à celle de Suchey-Brooks

**Todd** en 1920 a décrit la première véritable méthode d'estimation de l'âge à partir de l'étude morphologique de 306 symphyses pubiennes de sujets caucasoïdes (Todd, 1920-1921). Il a établi un système comportant **dix phases**, caractérisées chacune par l'association de certains caractères morphologiques : rides horizontales et sillons sur la surface symphysaire, délimitation des extrémités supérieure et inférieure, construction du rempart ventral, apparition d'un rebord symphysaire, soulèvement du bord dorsal, ostéophytes, érosion osseuse, ... . A chaque phase était attribuée une fourchette d'âge et une moyenne. L'échantillon d'étude était cependant mal équilibré avec une sur représentation des 35-60 ans. De plus, il existait un problème dans l'âge exact des squelettes car beaucoup de certificats de décès étaient aléatoires. A l'issue de cette étude, Todd concluait qu'il s'agissait d'une méthode fiable jusqu'à 40 ans, l'estimation devenant plus imprécise ensuite. Il soulignait qu'il existait une certaine variabilité dans la maturation de la symphyse (rendant certains os inclassables) et que cette maturation peut être modifiée (accélérée ou ralentie) par diverses pathologies. Il étudiera par la suite un échantillon féminin et soulignant des différences sexuelles, a déterminé une grille spécifique avec des tranches d'âge un peu différentes de celles des hommes pour chaque phase.

En 1955, **Brooks** a réévalué la série de Todd. Elle mit également en évidence des différences selon le sexe, ses résultats étant moins bons pour les femmes. Ses résultats globaux étaient décevants avec seulement 54 % de détermination correcte chez l'homme et 31 % chez la femme. Elle modifia les limites d'âge des phases car la méthode avait tendance à surestimer l'âge des individus.

En 1957, **McKern** et **Stewart** qui trouvaient le système de Todd difficile à appliquer en pratique, ont proposé un système différent établi sur un échantillon de 349 hommes décédés lors de la guerre de Corée, âgés de moins de 28 ans (McKern et Stewart, 1957). Il s'agissait d'un système qui côtoit l'évolution de trois composants (partie ventrale de la symphyse, partie dorsale et anneau symphysaire) avec **six stades** pour chacun. La somme des scores obtenus pour chaque élément constituait un score total auquel étaient attribué une fourchette et une moyenne d'âge. Stewart évoquait la différence de maturation de la symphyse selon le sexe et constatait que l'application d'un système établi à partir d'un échantillon masculin sur des squelettes féminins aboutissait à des erreurs d'estimation d'âge au décès (Stewart, 1957).

En 1960, **Nemeskéri, Harsanyi et Ascadi** étudiaient chez 105 sujets le seul aspect de la face symphysaire. Cinq phases caractérisaient cette méthode. La tranche d'âge 35-60 ans était cependant sur-représentée dans cet échantillon.

En 1973, **Gilbert et McKern**, en accord avec les constatations de Stewart sur la différence de maturation entre les sexes (notamment en raison de l'influence des grossesses), développaient une méthode spécifique pour l'estimation de l'âge des squelettes féminins (Gilbert, 1973). Cette méthode était analogue à celle de McKern et Stewart établie pour les hommes, et reposait sur un échantillon de 103 sujets d'âge et de maternité connus. Ils montraient que l'utilisation d'une méthode établie sur un échantillon masculin surestimait l'âge des femmes au delà de 40 ans. Cette méthode sera évaluée par **Suchey** en 1979, qui obtient des résultats moins satisfaisants que les auteurs, soulignant la difficulté de définir le stade de développement de chaque composant (problème de la construction ou destruction du rempart ventral) notamment pour un observateur peu expérimenté (Suchey, 1979).

En 1983, alors que les méthodes de McKern Stewart pour les hommes et Gilbert McKern pour les femmes étaient les plus utilisées, **Snow** tentait de les rendre un peu plus précises et plus rapides en pratique en utilisant des équations de régression, permettant une estimation de l'âge à partir d'un score (Snow, 1983).

En 1985, **Meindl** évaluait la précision des méthodes existantes sur un échantillon de la collection de Todd et constatait que la méthode de Todd est la plus fiable (Meindl *et al.*, 1985). Il pensait qu'un système évaluant la symphyse de façon globale était plus près de la réalité biologique et donc plus juste qu'un système côtant indépendamment plusieurs caractères morphologiques, ce dernier étant cependant plus facile à utiliser. Il soulignait également la nécessité de reconnaître la variabilité des critères de maturation et la différence entre les sexes avec l'influence des grossesses sur la morphologie symphysaire. Enfin, au vu de la relative imprécision des méthodes utilisant la symphyse pubienne comme indicateur d'âge, il lui paraissait impératif d'utiliser tous les indicateurs disponibles sur le squelette pour obtenir une estimation la plus juste possible.

### 4.1.2. Description de la méthode développée par Suchey et Brooks

#### 4.1.2.1. Principes de la méthode de Suchey et Brooks

Au début des années 70, **Suchey** jugeait le système de Todd critiquable sur le plan de la méthodologie (âges réels mal connus, forte concentration de sujets de plus de 40 ans, sélection des squelettes). Le système de Gilbert-McKern lui paraissait trop difficile à utiliser,

ce qu'elle confirmait en 1979 par la réalisation d'une étude inter-observateur qui donnait des résultats décevants : sur 11 pubis féminins d'âges connus analysés par 23 anthropologues et médecins légistes, seuls 51 % des participants donnaient une estimation correcte de l'âge au décès (Suchey, 1979). Suchey concluait qu'une nouvelle méthode était nécessaire, plus simple à utiliser, et moins soumise aux erreurs inter-observateurs. C'est la méthode de Todd modifiée qui allait donner jour à la méthode de Suchey-Brooks. Elle définit tout d'abord sur un vaste échantillon de pubis masculins six phases, issues d'un regroupement des phases de Todd.

La méthode de Suchey-Brooks a l'avantage d'être basée sur un large échantillon multiethnique bien équilibré dans les différentes tranches d'âges, et représentatif d'une population actuelle (Suchey et Katz, 1998). Ceci minimise les biais méthodologiques car l'âge estimé dépend en effet étroitement de la composition par âge de l'échantillon sur lequel a été établie la méthode utilisée (Masset, 1976). L'évolution de la symphyse pubienne avec l'âge peut être décomposée en **quatre phases** biologiques : une phase pré-épiphysaire, une phase d'épiphysation active, une phase post-épiphysaire immédiate et une phase dégénérative (Meindl *et al.*, 1985). Cette méthode a été élaborée sur de grands échantillons, composés de 739 hommes et 273 femmes (Brooks et Suchey, 1990 ; Katz et Suchey, 1986 ; Suchey *et al.*, 1986 ; Suchey et Katz, 1998). Ces échantillons comportaient des individus de différentes ethnies qui sont représentatifs d'une population moderne sur le plan socio-économique. Les os étaient issus d'autopsies réalisées à l'institut médico-légal de Los Angeles, prélevés par Suchey ou les techniciens à l'aide d'une scie, pendant ou après l'autopsie. Un maximum de parties molles avait été enlevé au bistouri, puis les os avaient macéré dans l'eau pendant plusieurs mois (sans les faire bouillir et sans utilisation de produit chimique) préservant ainsi les éléments les plus fragiles (crêtes et nodules osseux). Les âges réels étaient rigoureusement vérifiés par les certificats de naissance ou de décès. Aucun individu n'a été exclu, même ceux dont le type morphologique de la symphyse ne concordait pas avec l'âge chronologique.

L'échantillon était bien équilibré, avec des âges s'échelonnant de 14 à 92 ans pour l'échantillon masculin et de 13 à 99 ans pour l'échantillon féminin. Le maximum d'individus se situait entre 20 et 30 ans, la tranche d'âge 30-50 ans étant également bien représentée.

Suchey a étudié l'échantillon masculin selon la méthode de Todd puis de McKern Stewart, les résultats ont ensuite été analysés par Katz à l'aide de différentes méthodes statistiques (Katz et Suchey, 1986 ; Suchey *et al.*, 1986). Suchey a ensuite mené des études inter-observateurs afin d'évaluer la capacité pour les observateurs à différencier les phases (Ross *et al.*, 1987). Katz et Suchey en ont conclu que la meilleure méthode était la modification du système de

Todd en un système à **six phases**. Ces phases ont été précisément définies par Suchey et Brooks et des os ont été sélectionnés afin de servir de modèles pour chaque phase.

En 1988, Suchey et Brooks définissent pour les femmes un système à six phases, semblable à celui décrit pour les hommes (Suchey *et al.*, 1988). Deux différences sont notées dans la morphologie symphysaire : la présence chez la femme d'une aire entre le rempart ventral et le bord ventral de la face symphysaire, et des modifications de la face dorsale en rapport avec la grossesse et l'accouchement (et non directement en rapport avec l'âge).

Par la suite, pour chaque sexe, des photographies couleur de chaque phase puis des sets de plâtres réalisés par D. France, servant de modèles de référence ont été diffusés afin d'aider les chercheurs dans l'utilisation de la méthode (Suchey, 1987).

#### **4.1.2.2. Description des six phases**

A partir de **cinq** critères que sont les **crêtes**, la **délimitation des extrémités**, la construction du **rempart ventral**, l'**anneau symphysaire**, et les **éléments de destruction**, Suchey et Brooks donnent les définitions suivantes pour chaque phase. Le tableau n° II-44 résume les caractéristiques macroscopiques des symphyses pubiennes en fonction de la phase. Le tableau n° II-45 représente des photographies de l'hémi symphyse gauche de sujets de sexe masculin selon la classification de Suchey-Brooks.

La démarche utilisée dans la méthode de Suchey-Brooks (Brooks et Suchey, 1990 ; Suchey et Katz, 1998) est l'attribution pour chaque phase morphologique d'un âge moyen, d'un écart type et d'un intervalle de confiance à 95 % (cf. tableau n° II-46). Les descriptions des phases ont été faites de façon à pouvoir utiliser ce système aussi bien chez l'homme que chez la femme, les déviations standard plus importantes chez les femmes traduisant seulement la plus haute variabilité du pubis de ces dernières.

**Deuxième partie : Imagerie en coupe et anthropologie – Chapitre 4**

**Tableau II-44 - Caractéristiques pubiennes permettant l'estimation de l'âge au décès d'un individu.**  
(d'après Suchey et Brooks, 1990).

Phase	Caractéristiques					
	Surface symphysaire	Extrémités supérieure et inférieure	Plateau dorsal	Rempart ventral	Nodules d'ossification	Calcifications Exostoses osseuse
<b>I</b>	En vague, ondulée Crêtes et sillons s'étendent et comprennent le tubercule pubien Crêtes horizontales bien marquées Biseau ventral pouvant commencer à se former	Absence de délimitation des extrémités supérieure et inférieure			Peuvent apparaître à l'extrémité supérieure	
<b>II</b>	Présence possible de crêtes en développement	Commencent à délimiter la surface articulaire, avec ou sans nodules		Débutant		
<b>III</b>	Possibilité de crêtes distinctes ou surface lisse Présence d'une extrémité inférieure	Inférieure à la surface	Complet Absence de bord dorsal symphysaire	En voie de complétion	Poursuite de la fusion des nodules formant l'extrémité supérieure le long de l'arc ventral	Absence de <i>lipping</i> Absence de calcification
<b>IV</b>	Périmètre ovale complet mais un hiatus peut subsister à la partie supérieure du bord ventral Surface finement granuleuse avec possibilité de reliquat de crêtes et de sillons Tubercule pubien séparé de la face symphysaire par la formation de l'extrémité supérieure Face symphysaire pouvant avoir un bord distinct		Possibilité d'un <i>lipping</i> sur le bord dorsal	Persistance d'un hiatus dans la partie crâniale du bord ventral		Excroissance de calcification ligamentaire pouvant apparaître à la portion inférieure, adjacente à la surface symphysaire du pubis Possible <i>lipping</i> faible et localisé sur le bord dorsal
<b>V</b>	Bord complet avec quelques légères dépressions en rapport avec le bord Présence ou non d'érosion du bord		<i>Lipping</i> modéré sur le bord dorsal	Une dépression peut apparaître à la partie supérieure du bord ventral Excroissances osseuses		Excroissances de calcification ligamentaire sur le bord ventral
<b>VI</b>	Bord érodé et face avec une dépression continue Tubercule pubien apparaissant comme une protubérance séparée Forme irrégulière de la surface Surface avec des cavités ou pouvant être poreuse Apparence d'effondrement					Insertions ligamentaires marquées dans la région ventrale Apparition de crénulations

**Tableau II-45** – Photographies de la surface articulaire symphysaire pubienne gauche permettant l'estimation de l'âge au décès d'un individu (d'après Suchey et Brooks, 1990).

Phase	Vue de face	Vue de ¾ ventral
I		
II		
III		
IV		
V		
VI		

Tableau n° II-46 - Statistiques de la méthode de Suchey-Brooks (d'après Suchey et Katz, 1998).

Phase	Sexe masculin		Sexe féminin	
	Age moyen	Ecart type	Age moyen	Ecart type
I	18.5	2.1	19.4	2.6
II	23.4	3.6	25.0	4.9
III	28.7	6.5	30.7	8.1
IV	35.2	9.4	38.2	10.9
V	45.6	10.4	48.1	14.6
VI	61.2	12.2	60	12.4

### 4.1.3. La symphyse pubienne en tomodensitométrie

Pasquier utilisait dans son analyse scanographique du pubis une méthode métrique, qui paraît complexe et fastidieuse à utiliser en pratique (Pasquier *et al.*, 1999).

En 2005, une étude a porté sur l'application tomodensitométrique de la méthode de Suchey et Brooks à partir de reconstructions tridimensionnelles (Telmon *et al.*, 2005). Le but de cette étude était donc d'appliquer la méthode scopique de Suchey-Brooks à des reconstructions tomodensitométriques de la symphyse pubienne et de vérifier si la qualité des images réalisées était suffisamment bonne pour obtenir des résultats similaires à ceux obtenus à partir de l'observation directe de l'os. L'échantillon était composé de 21 symphyses pubiennes (7 os secs et 14 comportant les parties molles péri symphysaires) comportant 7 femmes et 14 hommes âgés de 20 à 93 ans. Les pièces osseuses ont été scanographiées puis des reconstructions en trois dimensions ont été effectuées. La méthode de Suchey-Brooks avait été appliquée à ces reconstructions d'une part, et aux pièces osseuses d'autre part, puis les résultats avaient été comparés. L'**erreur intra-observateur** était peu différente entre les deux méthodes (Kappa de Cohen égal à 0.94 sur os secs et 0.91 pour les reconstructions tridimensionnelles). En ce qui concernait l'**erreur inter-observateur**, elle était plus importante sur les reconstructions tridimensionnelles (Kappa de Cohen égal à 0.84 pour les reconstructions tridimensionnelles et 0.90 sur os secs). Concernant l'**erreur inter-méthode**, le Kappa de Cohen était égal à 0.86 pour l'observateur n° 1 (observateur expérimenté), ce qui correspondait à un accord qui pouvait être qualifié d'excellent. L'erreur inter-méthode était un peu plus importante pour l'observateur n° 2 (observateur étudiant), avec un Kappa de Cohen égal à 0.82. La concordance des résultats entre les deux méthodes semblait donc augmenter avec l'expérience de l'observateur. La comparaison de la pièce osseuse et de la reconstruction tomodensitométrique tridimensionnelle montrait que cette dernière est une représentation relativement fidèle de l'os. En effet, certains critères étaient particulièrement bien visualisés

sur le scanner. Ainsi, une analyse critère par critère montrait que les observations les plus concordantes dans un ordre décroissant étaient :

- les crêtes et la délimitation des extrémités (21/21),
- les ostéophytes (20/21),
- la texture osseuse globale de l'os (19/21) : les erreurs se faisaient dans le sens d'une sous-estimation de la porosité sur l'image,
- le creusement de la face symphysaire (19/21) : les erreurs se faisaient dans le sens d'une surestimation du creusement sur l'image,
- l'anneau symphysaire (18/21),
- le rempart ventral (17/21) paraissait plus difficile à évaluer.

## **4.2. Matériel**

### **4.2.1. Echantillon d'étude**

Alors que l'échantillon initial était composé de **16** individus, l'échantillon d'analyse ne sera constitué que de **15** symphyses pubiennes car l'une d'entre elle avait été prélevée de telle sorte que la surface articulaire était en partie manquante.

Cette étude a donc été réalisée à partir d'un échantillon de **15** symphyses pubiennes prélevées lors d'autopsies médico-légales dans l'Unité Médico-Judiciaire de l'Hôpital Rangueil-Larrey, CHU Toulouse, dans un but d'identification médico-légale. Les symphyses étaient prélevées à la scie, par section des branches ilio et ischio-pubiennes de chaque côté, emportant les parties molles adhérentes (afin de ne pas fausser l'image tomodensitométrique dans l'optique d'une application chez le vivant). Elles ont ensuite été congelées.

Tous les individus ont ensuite été identifiés secondairement de façon formelle. Tous les individus étaient d'affinité populationnelle caucasoïde, d'âge et de sexe connus. Notre échantillon présentait un âge moyen de 43.2 ans pour les hommes, et de 58.3 ans pour les femmes, avec un écart-type de 17.1 et 21.4 ans réciproquement. Le tableau n° II-47 et la figure n° II-22 indiquent la répartition de notre population d'étude.

Tableau n° II-47 - Répartition de l'effectif de l'échantillon étudié.

Classes d'âges (en années)	Sexe masculin		Sexe féminin		Sexes confondus	
	Effectifs	Pourcentages	Effectifs	Pourcentages	Effectifs	Pourcentages
10 – 19	0	0	1	16.6	1	6.6
20 – 29	2	22.2	0	0	2	13.2
30 – 39	2	22.2	0	0	2	13.2
40 – 49	1	11.1	1	16.6	2	13.2
50 – 59	1	11.1	0	0	1	6.6
60 – 69	3	33.4	2	33.4	5	33.0
70 – 79	0	0	2	33.4	2	13.2
80 – 99	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>9</b>	<b>100</b>	<b>6</b>	<b>100</b>	<b>15</b>	<b>100</b>

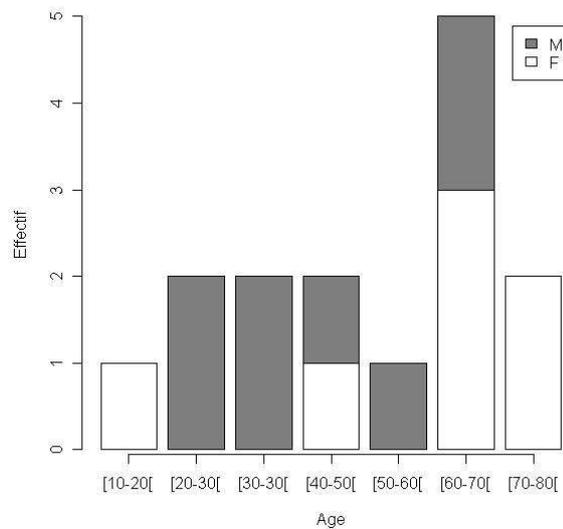


Figure n° II-22 - Histogramme de répartition par âge et sexe de l'échantillon étudié.

#### 4.2.2. Protocole d'imagerie

Chaque symphyse pubienne prélevée en cours d'autopsie était placée dans un sachet en plastique avec tous ses tissus adhérents et une saisie scanner de cette structure était réalisée. Pour cela, les sachets étaient disposés les uns à côté des autres dans l'axe longitudinal de la table d'examen. Le scanner réalisait d'abord une saisie globale de l'ensemble des contenants sous la forme d'un topogramme. Ceci permettait par la suite de positionner une fenêtre d'exploration tomодensitométrique sur chaque symphyse pubienne afin que l'acquisition soit réalisée de manière indépendante pour chacune.

#### 4.2.2.1. Paramètres d'acquisition tomодensitométrique

L'appareil utilisé était un Siemens Sensation 16 barrettes spiralé (Siemens, Erlangen, Allemagne). Lors des acquisitions étaient appliqués une tension de 120 kV et une intensité de 240 mAs. Chaque session d'image était calibrée pour une acquisition en 16 x 0.75 mm (*raw data*).

Deux types de reconstructions axiales chevauchantes ont ensuite été effectués :

- sous la forme de coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm,
- sous la forme de coupes de 0.6 mm d'épaisseur reconstruites tous les 0.3 mm.

Deux types de filtres de convolution sont appliqués lors de la saisie des images :

- un filtre « mou » (B40),
- un filtre « dur » (B70).

#### 4.2.2.2. Paramètres du post traitement des images

Pour ce faire, nous avons utilisé une console Leonardo Siemens (Siemens, Erlangen, Allemagne).

Les reconstructions **tridimensionnelles** des symphyses pubiennes ont été réalisées en mode VRT, à partir des quatre séries d'images acquises pour une seule et même symphyse. Plusieurs vues mettant en évidence chacune des faces utiles à l'analyse (vision dorsale, vision ventrale, vision articulaire) étaient obtenues en faisant tourner l'image et en modifiant l'orientation d'une source lumineuse virtuelle afin de mettre en valeur les reliefs.

Le mode **bidimensionnel** nous a permis d'obtenir des coupes dans les plans transverses et frontaux du grand axe des symphyses pubiennes selon le principe de la reconstruction MPR ; l'axe principal de coupe étant placé au milieu, les coupes latérales étaient étirées de part et d'autre pour couvrir toute l'épaisseur et la hauteur de la côte dans des plans respectivement crânio-caudal et antéro-postérieur. Cette reconstruction était effectuée sur le type de reconstruction tridimensionnel présentant les meilleurs résultats en termes de variabilité inter-méthode par rapport à la stadification de Suchey-Brooks effectués sur os secs. Les examens et les reconstructions étaient ensuite archivés dans le système d'archivage de l'hôpital sous la forme d'un PACS (Picture Archiving and Communication System) (McKesson Medical Imaging Group, Richmond, BC, Canada).

### **4.2.3. Préparation des symphyses pubiennes après examen tomодensitométrique**

Chaque symphyse pubienne prélevée et scannée était ensuite traitée afin de retirer l'ensemble des tissus adhérents à l'os. Pour cela, elles étaient placées dans un bocal, lui-même placé dans un bain-marie. L'opérateur les faisait ensuite cuire très lentement à feu doux, durant huit heures. En fin de cuisson, les côtes étaient nettoyées et identifiées. Elles étaient conservées ensuite quelques jours dans du formol puis rincées et séchées. Le numéro de chaque symphyse pubienne était également écrit sur l'une de ses faces, à l'encre de chine.

## **4.3. Méthodes**

### **4.3.1. Méthode de codage**

Les deux observateurs ayant participé à ce travail disposaient de la description et des photographies des publications de Suchey et Brooks pour déterminer le stade, que ce soit à partir de l'os sec ou bien des reconstructions tomодensitométriques (Suchey et Brooks, 1990). Dans le cas des **os secs**, chaque symphyse pubienne était observée collégialement par deux observateurs.

Le codage à partir des **reconstructions tomодensitométriques** était réalisé également de façon collégiale grâce à un diaporama permettant de visionner les reconstructions. Pour cela une diapositive était consacrée à chaque symphyse, montrant une vue tridimensionnelle dorsale, une ventrale, une vue latérale ainsi que plusieurs reconstructions bidimensionnelles de la symphyse pubienne. Les figures n° II-23 illustrent le comparatif entre les os secs et les reconstructions tomодensitométriques.

#### **4.3.1.1. Codage à partir des reconstructions tridimensionnelles**

Les critères pris en compte pour l'analyse étaient les suivants : les crêtes, la délimitation des extrémités supérieure et inférieure, l'aspect du rempart ventral, de l'anneau symphysaire, le creusement de la surface symphysaire, les ostéophytes, et la texture osseuse. Au terme de cette analyse, un stade de maturité de la symphyse observée était donné.

#### **4.3.1.2. Codage à partir des reconstructions bidimensionnelles**

Les critères pris en compte pour l'analyse étaient les suivants : les crêtes, la délimitation des extrémités supérieure et inférieure, l'aspect du rempart ventral, de l'anneau symphysaire, le creusement de la surface symphysaire, les ostéophytes.

### 4.3.2. Méthodes d'analyse statistique

L'ensemble des analyses a été réalisé grâce au logiciel R 2.6.2 ([www.r-project.org](http://www.r-project.org)).

L'analyse statistique a été effectuée sans prise en compte du sexe, compte tenu du faible effectif de notre population d'étude.

La technique de transposition des critères pubiens de Suchey-Brooks ayant été déjà précédemment validée sur des reconstructions tomodensitométriques tridimensionnelles (Telmon *et al.*, 2005), cette étude à partir des reconstructions tridimensionnelles a porté essentiellement sur la détermination de l'**erreur inter-méthode** concernant l'évaluation des phases de Suchey-Brooks. Elle a ainsi été calculée pour chacun des observateurs par le **calcul du coefficient de Kappa de Cohen** ( $\kappa$ ) (Cohen, 1960). Landis et Koch ont proposé un classement de l'accord en fonction de la valeur du  $\kappa$  (Landis et Koch, 1977) (cf. tableau n° II-7).

Concernant l'étude effectuée à partir des reconstructions bidimensionnelles, pour chaque critère étudié, a été calculé la corrélation entre l'aspect morphologique de ce critère et la phase de Suchey Brooks déterminée sur les os secs. Ceci, compte tenu de la petite taille de l'échantillon a été effectué à partir du test non paramétrique exact de Fischer.

## 4.4. Résultats

### 4.4.1. Etude tridimensionnelle

Les résultats de la stadification selon Suchey-Brooks sont présentés pour chacun des quatre différents paramètres de reconstruction (cf. tableau n° II-48).

L'analyse statistique de ces résultats est présentée dans le tableau n° II-49. L'échantillon total étant de petite taille, l'analyse des résultats ne nous permet pas de faire d'affirmation, de plus, il n'est pas possible de dire si les différences entre les coefficients de concordance sont significatives, mais il est tout de même possible de faire ressortir quelques points (Donner, 1998). La plus faible variabilité inter-méthode entre l'os sec et un paramètre de reconstruction est celle entre l'os sec et les reconstructions tridimensionnelles effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm, en filtre dur, avec un Kappa de Cohen égal à 0.72, ce qui est bon (Landis et Koch, 1977). Viennent ensuite les reconstructions tridimensionnelles effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm, en filtre mou, avec Kappa de Cohen égal à 0.70, ce qui est également bon (Landis et Koch, 1977). Les reconstructions tridimensionnelles effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes

**Deuxième partie : Imagerie en coupe et anthropologie – Chapitre 4**

de 0.6 mm d'épaisseur reconstruites tous les 0.3 mm, en filtre mou ou dur, ont respectivement des valeurs de Kappa de Cohen égales à 0.57, ce qui est modéré, et de 0.33, ce qui est médiocre (Landis et Koch, 1977).

**Tableau n° II-48** - Répartition des phases de Suchey Brooks entre l'os sec et les quatre types de reconstructions tridimensionnelles.

Identifiant	Phases de Suchey-Brooks				
	Os secs	3D 2 mm Filtre mou	3D 2 mm Filtre dur	3D 0.6 mm Filtre mou	3D 0.6 mm Filtre dur
1	III	III	III	III	III
2	II	III	III	II	II
3	IV	IV	IV	III	III
4	V	V	V	V	VI
5	IV	IV	IV	IV	IV
6	V	V	V	V	V
7	I	I	I	I	I
8	IV	V	V	V	V
9	V	V	V	VI	VI
10	II	III	II	II	III
11	IV	IV	IV	IV	IV
12	IV	IV	IV	IV	IV
13	IV	IV	IV	IV	IV
14	IV	IV	IV	V	V
15	IV	IV	III	III	III

**Tableau n° II-49** - Distribution des valeurs du Kappa de Cohen entre l'os sec et les quatre paramètres de reconstructions tridimensionnelles.

	Os secs	3D 2 mm Filtre mou	3D 2 mm Filtre dur	3D 0.6 mm Filtre mou	3D 0.6 mm Filtre dur
Os secs		0.70	0.72	0.57	0.33
3D 2 mm Filtre mou	0.70		0.81	0.47	0.40
3D 2 mm Filtre dur	0.72	0.81		0.65	0.41
3D 0.6 mm Filtre mou	0.57	0.47	0.65		0.75
3D 0.6 mm Filtre dur	0.33	0.40	0.41	0.75	

#### 4.4.2. Etude bidimensionnelle

Compte tenu des résultats obtenus à partir des reconstructions tridimensionnelles, en l'espèce de la valeur du coefficient Kappa de Cohen la plus élevée entre la détermination des phases de Suchey-Brooks effectuée sur os secs et à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm en filtre dur, l'étude bidimensionnelle a été effectuée à partir de l'acquisition effectuée selon cette même modalité. Le tableau n° II-50 présente pour chacune des symphyses étudiées la distribution des différents critères morphologiques étudiés selon leurs aspects macroscopiques.

**Tableau n° II-50** - Distribution des critères étudiés à partir des reconstructions bidimensionnelles pour chacune des phases de Suchey-Brooks, exprimée en pourcentage. Les valeurs p significatives sont en gras.

Critère	Aspect du critère	Phases de Suchey-Brooks					p
		I	II	III	IV	V	
Crêtes	Absentes	0	0	9.1	63.6	27.3	<b>0.018</b>
	Discrètes	0	0	0	100	0	
	Visibles	0	100	0	0	0	
	Importantes	100	0	0	0	0	
Délimitation extrémité supérieure	Absente	100	0	0	0	0	0.057
	Débutante	0	100	0	0	0	
	Présente	0	7.7	7.7	61.5	23.1	
Délimitation extrémité inférieure	Absente	50.0	50.0	0	0	0	0.57
	Présente	0	7.7	7.7	61.5	23.1	
Rempart ventral	Incomplet	0	25.0	0	75.0	0	0.13
	Eperon osseux	25.0	25.0	25.0	25.0	0	
	Complet	0	0	0	57.1	42.9	
Anneau symphysaire	Incomplet	20.0	40.0	20.0	20.0	0	<b>0.047</b>
	Incomplet avec hiatus	0	0	0	100	0	
	Complet	0	0	0	57.1	42.9	
Aspect de la surface articulaire	Convexe	50	0	50	0	0	<b>0.011</b>
	Plat	0	50.0	0	50.0	0	
	Concave	0	0	0	66.7	33.3	
Ostéophytes	Absents	9.1	18.2	9.1	45.5	18.2	1
	Présents	0	0	0	75.0	25.0	

L'échantillon étudié étant de petite taille et ne comportant pas d'individu de phase VI, l'analyse des résultats ne nous permet pas de faire d'affirmation, de plus, il n'est pas possible de dire si les différences entre les coefficients de concordance sont significatives, mais il est tout de même possible de faire ressortir quelques points (Donner, 1998) :

- le critère **crête** présente des modifications morphologiques significativement liées aux stades de Suchey-Brooks, avec une valeur  $p < 0.05$ . Ainsi, les crêtes observées au sein de la surface articulaire, dites *visibles* ou *importantes* sont présentes dans 100 % des phases I et II de Suchey-Brooks. L'*absence* de crêtes est observée dans 100 % des phases supérieures ou égales à la phase III de Suchey-Brooks,

- le critère **anneau symphysaire** présente des modifications morphologiques significativement liées aux stades de Suchey-Brooks, avec une valeur  $p < 0.05$ . Ainsi, un anneau *complet* est observé dans 100 % des phases supérieures ou égales à la phase IV de Suchey-Brooks. Un anneau *incomplet avec un hiatus* est observé dans 100 % des phases égales à la phase IV de Suchey-Brooks,

- le critère **aspect de la surface articulaire** présente des modifications morphologiques significativement liées aux stades de Suchey-Brooks, avec une valeur  $p < 0.05$ . Ainsi, une surface *concave* est observée dans 100 % des phases supérieures ou égales à la phase IV de Suchey-Brooks.

Même si les autres critères étudiés présentent une valeur  $p > 0.05$ , il est intéressant de noter que :

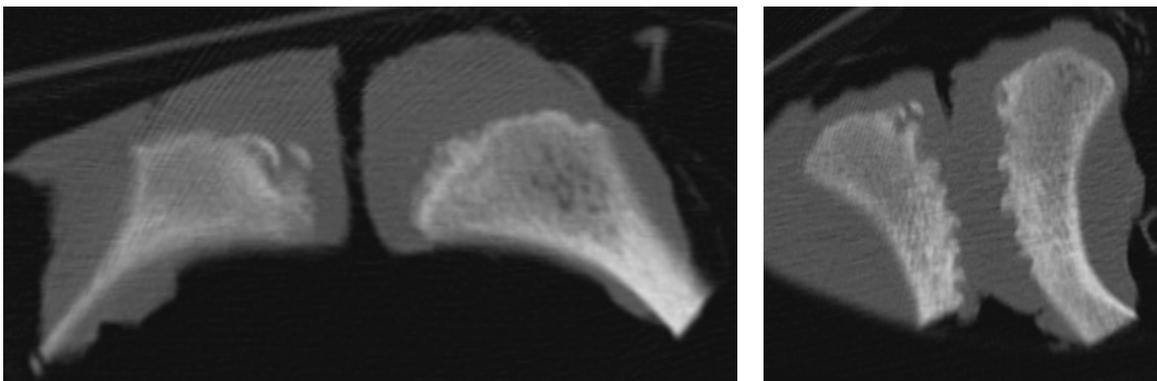
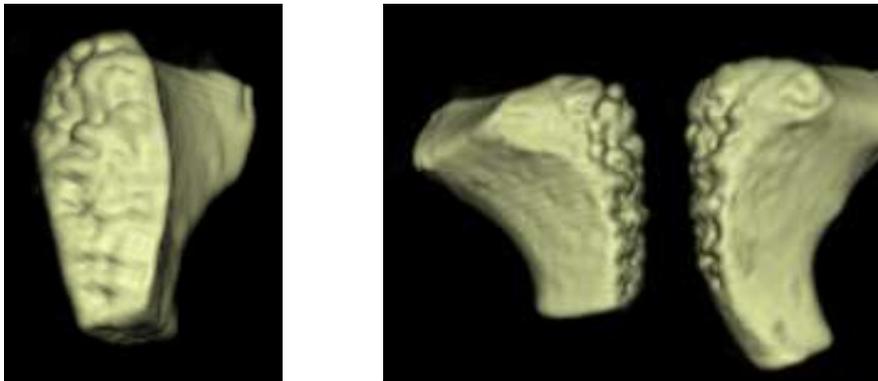
- la **délimitation de l'extrémité supérieure** lorsqu'elle est *absente* ou *débutante* est le plus fréquemment observée pour des phases inférieures ou égales à la phase II de Suchey-Brooks,

- le **rempart ventral** lorsqu'il est *complet* est observé pour des phases supérieures ou égales à la phase IV de Suchey-Brooks,

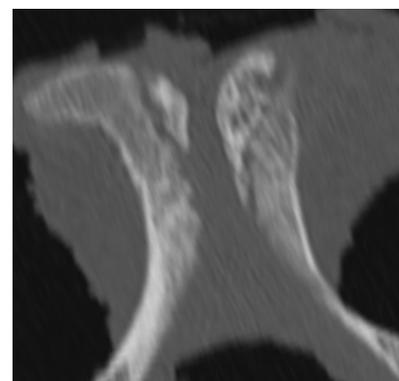
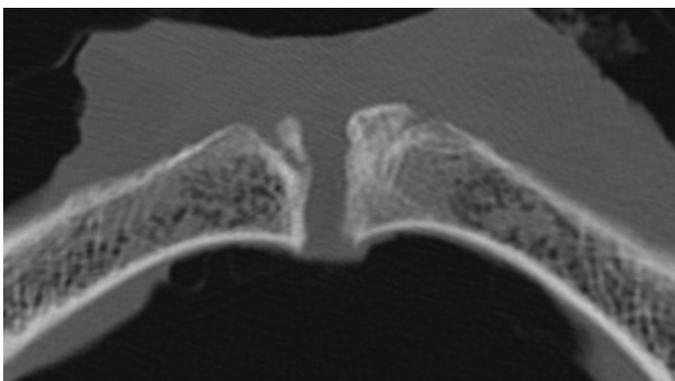
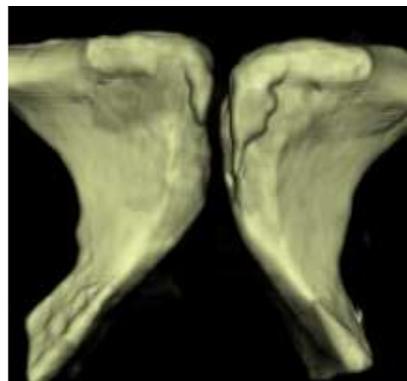
- les **ostéophytes** lorsqu'ils sont *présents* sont observés pour des phases supérieures ou égales à la phase IV de Suchey-Brooks,

- la **délimitation de l'extrémité inférieure** lorsqu'elle est *présente* est le plus fréquemment observée pour des phases inférieures ou égales à la phase III de Suchey-Brooks.

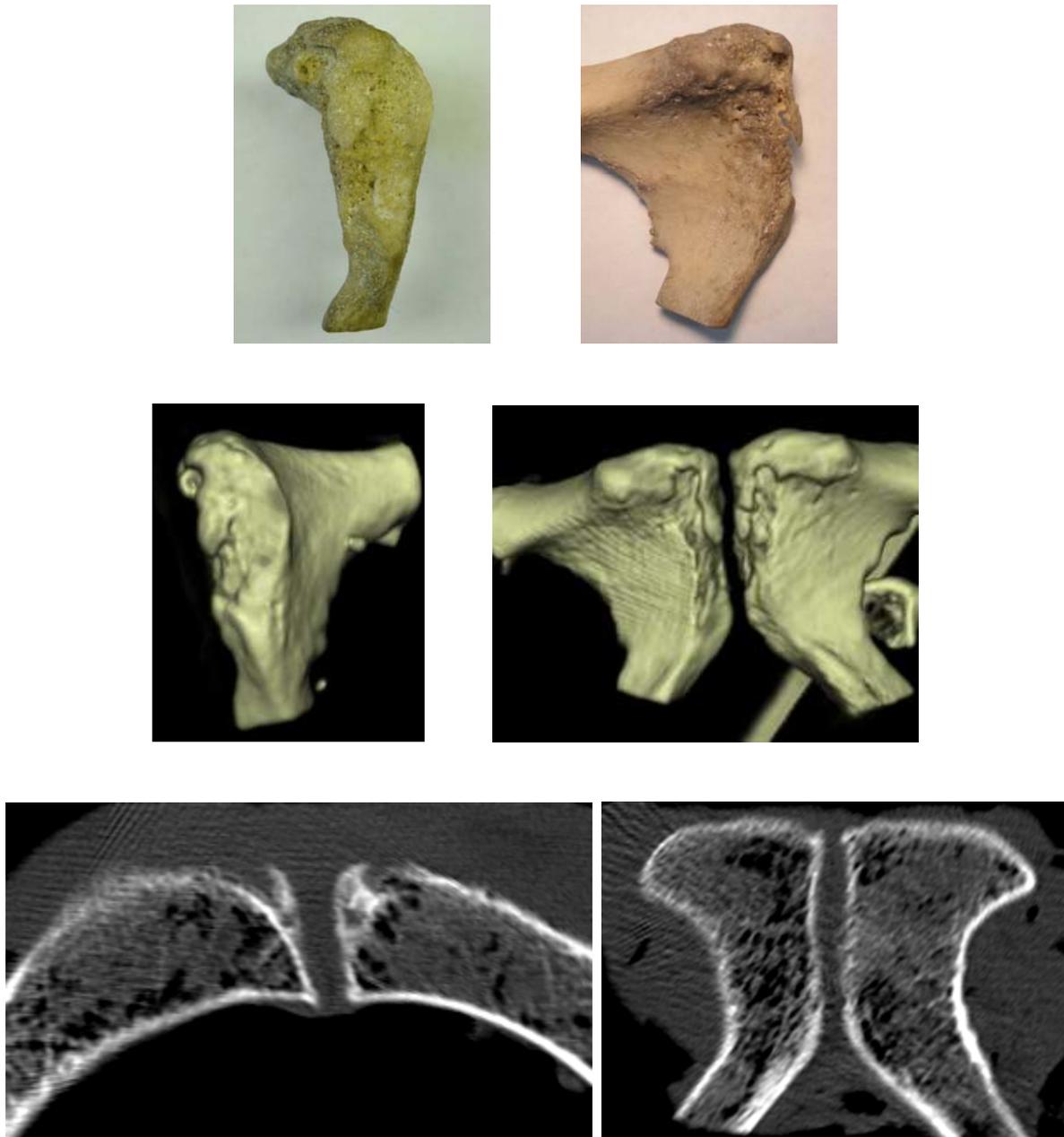
Figures n° II-23 - Représentations des différentes phases de Suchey et Brooks de la symphyse pubienne sur os secs et en tomodynamométrie.



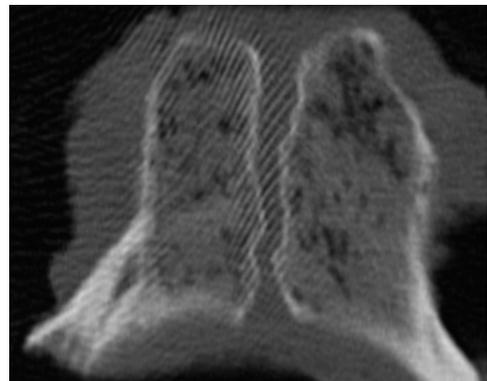
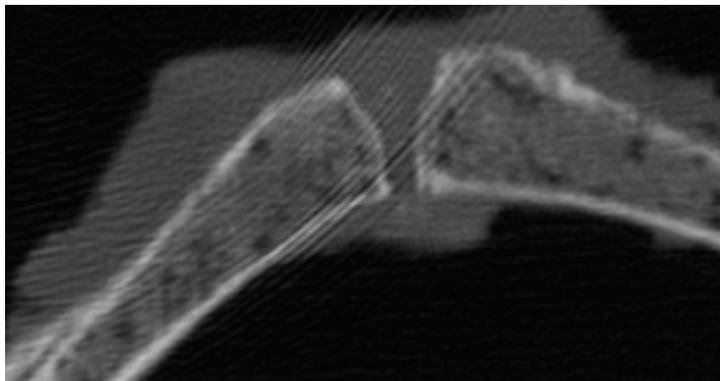
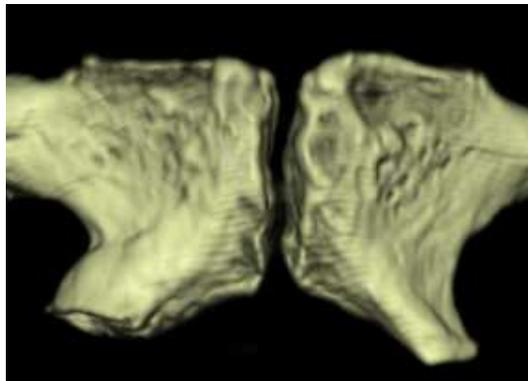
Figures n° II-23 A - Phase I chez un individu de sexe féminin : photographies de l'hémi symphyse droite sur os secs : vues de la surface articulaire de face et de la face ventrale ; reconstructions tridimensionnelles : vues de la surface articulaire de face et de la face ventrale ; reconstructions bidimensionnelles : coupes dans le plan axial et le plan frontal.



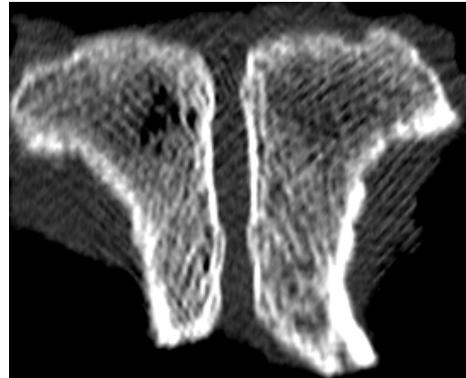
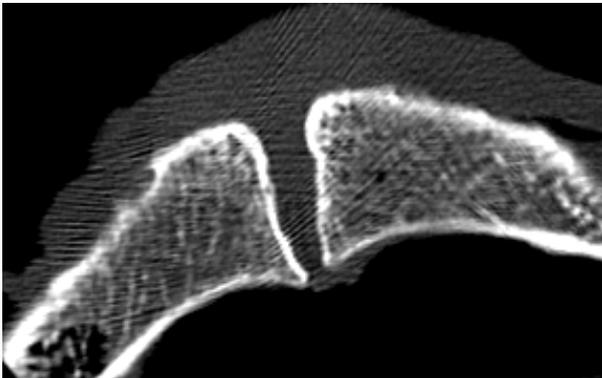
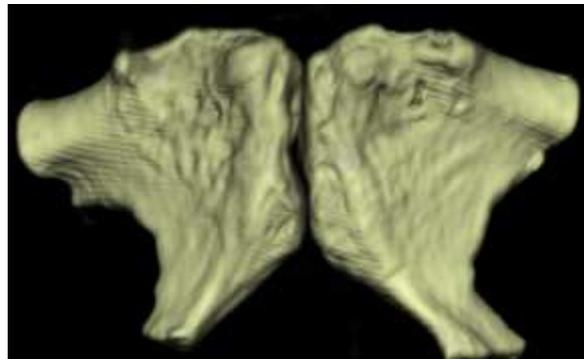
**Figures n° II-23 B** - Phase II chez l'homme : photographies de l'hémi symphyse droite sur os secs : vues de la surface articulaire de face et de la face ventrale ; reconstructions tridimensionnelles : vues de la surface articulaire de face et de la face ventrale ; reconstructions bidimensionnelles : coupes dans le plan axial et le plan frontal.



**Figures n° II-23 C** - Phase III chez l'homme : photographies de l'hémi symphyse droite sur os secs : vues de la surface articulaire de face et de la face ventrale ; reconstructions tridimensionnelles : vues de la surface articulaire de face et de la face ventrale ; reconstructions bidimensionnelles : coupes dans le plan axial et le plan frontal.



**Figures n° II-23 D** - Phase IV chez la femme : photographies de l'hémi symphyse droite sur os secs : vues de la surface articulaire de face et de la face ventrale ; reconstructions tridimensionnelles : vues de la surface articulaire de face et de la face ventrale ; reconstructions bidimensionnelles : coupes dans le plan axial et le plan frontal.



**Figures n° II-23 E** - Phase V chez l'homme : photographies de l'hémi symphyse droite sur os secs : vues de la surface articulaire de face et de la face ventrale ; reconstructions tridimensionnelles : vues de la surface articulaire de face et de la face ventrale ; reconstructions bidimensionnelles : coupes dans le plan axial et le plan frontal.

## 4.5. Discussion

### 4.5.1. La méthode Suchey-Brooks

La méthode Suchey-Brooks a été testée de nombreuses fois sur des collections différentes de la collection de référence (Baccino *et al.*, 1999 ; Hoppa, 2000 ; Klepinger *et al.*, 1992). Les résultats montraient que l'évolution morphologique avec l'âge était variable d'une population à l'autre et que l'estimation de l'âge est très imprécise. Les fourchettes des phases IV à VI 6 étaient presque similaires. Les tests de reproductibilité donnaient aussi de mauvais résultats (Baccino *et al.*, 1999 ; Suchey, 1979). La méthode de Suchey Brooks a été comparée aux autres méthodes de détermination de l'âge au décès par l'étude de la symphyse pubienne en 1992 par Klepinger (Klepinger *et al.*, 1992). Elle s'avérait être la plus performante. Il ressortait également de cette étude que la méthode était plus performante pour les sujets jeunes que pour les sujets vieux et pour les sujets de sexe masculin que pour ceux de sexe féminin. C'est la méthode la moins critiquable sur le plan de la méthodologie (Rougé, 1993). Pour ces raisons, c'est actuellement la méthode de détermination de l'âge à partir du pubis la plus utilisée.

Elle donne des informations intéressantes sur l'âge surtout dans les trois premières phases, ces phases correspondant à l'achèvement de la maturation de la symphyse. A partir de 40 ans, les changements de la symphyse pubienne sont aléatoires surtout chez la femme et les méthodes d'estimation de l'âge deviennent moins précises (Hanihara et Susuki, 1978 ; Kimmerle *et al.*, 2008 ; Konigsberg *et al.*, 2008 ; Suchey *et al.*, 1986).

Konigsberg a effectué une analyse transitionnelle afin de déterminer les âges limites entre deux phases de Suchey-Brooks (Konigsberg *et al.*, 2008). Pour ce faire, il a étudié 1766 pubis masculins d'âges connus qui provenaient de multiples collections osseuses : celle de Los Angeles sur laquelle la méthode de Suchey-Brooks a été mise au point, la collection anatomique de Terry, une collection de victimes durant la guerre du Vietnam, durant la guerre dans les Balkans, et enfin la collection anatomique de l'université de Chiang Mai. Ces résultats sont présentés dans le tableau n° II-51.

Tableau n° II-51 – Distribution de l’analyse transitionnelle des différentes phases de Suchey-Brooks chez les individus de sexe masculin (d’après Konigsberg et al., 2008).

Collection étudiée Phases	Age de la transition					
	Toute collection confondue	Toute collection confondue (hors Balkans)	Balkans	Los Angeles	Terry	Guerre de Corée
Phase I à II	20.6	20.8	18.5	20.4	16.3	22.3
Phase II à III	26.7	27.2	21.0	25.7	24.7	27.0
Phase III à IV	30.2	30.5	27.5	28.6	28.7	28.8
Phase IV à V	44.6	45.1	43.0	39.6	55.2	34.3
Phase V à VI	71.4	71.7	66.1	65.5	100.3	41.3

#### 4.5.2. L’étude tomодensitométrique de Telmon *et al.* (2005)

L’objectif de ce travail était de déterminer si la méthode de Suchey-Brooks est applicable à une représentation tomодensitométrique en trois dimensions de la symphyse pubienne, et ce dans le but d’éviter la longue phase de préparation des pièces osseuses, leur dégradation, et aussi d’envisager une utilisation chez le vivant. L’acquisition tomодensitométrique avait été effectuée sur un appareil spiralé monobarrette (Somaton, Siemens, Erlangen). Les paramètres d’acquisition retenus étaient les suivants : mode hélicoïdal, épaisseur nominale de coupe de 1 mm avec un pitch de 1.5 mm. Le filtre de convolution était un filtre dur osseux. Les coupes axiales étaient reconstruites tous les 0.8 mm.

Plusieurs éléments pouvaient expliquer la concordance malgré tout imparfaite des méthodes (le petit nombre de cas ne permettait pas de raisonner de façon statistique mais uniquement au cas par cas) :

- En ce qui concernait la **texture osseuse**, l’aspect granuleux de la face symphysaire, observé sur les pièces osseuses dans les phases V notamment, n’était jamais visible sur les reconstructions tridimensionnelles, où cette face apparaît lissée. La porosité restait cependant visible sur le reste du corps du pubis. Le choix du seuil de densité lors de la reconstruction tridimensionnelle intervenait également dans l’aspect de la texture osseuse : plus il est élevé et plus elle apparaît porotique. Enfin, les auteurs notaient que la texture osseuse pouvait aussi être modifiée sur les pièces osseuses pendant la phase de préparation, une préparation agressive augmentant la porosité.

- L'observation du **creusement** de la surface symphysaire était également variable :

- sur les reconstructions tridimensionnelles tout d'abord, son appréciation différait selon l'incidence étudiée et dépendait donc de la sélection des images sur l'objet virtuel obtenu (le creusement était particulièrement bien observé sur les vues tangentielles et de  $\frac{3}{4}$  dorsal),

- plus le rebord symphysaire était soulevé et plus l'observateur avait tendance à surestimer le creusement de la face. Or, l'image montrait mieux le *lipping* dorsal que la pièce osseuse, expliquant que le creusement puisse être majoré sur l'image.

- L'étude du **rempart ventral** retrouvait une concordance moindre car la confluence et la fusion des nodules osseux était difficile à visualiser, et parce que ces nodules étaient particulièrement vulnérables lors de la phase de préparation.

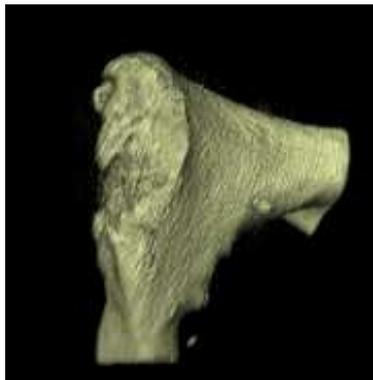
Au total, les erreurs observées se faisaient indifféremment en plus ou en moins : il était donc impossible de dire si le scanner avait tendance à sur ou sous-estimer les phases de Suchey-Brooks, d'autant plus que l'échantillon était de petite taille. Les auteurs concluaient en indiquant que la méthode basée sur l'analyse des reconstructions tomodensitométriques tridimensionnelles semblait aussi fiable que la méthode de Suchey-Brooks classique.

### **4.5.3. Notre étude**

#### **4.5.3.1. Etude tridimensionnelle**

L'objectif de ce travail était de montrer si, au support osseux, pouvaient se substituer les reconstructions tomodensitométriques. Compte tenu de la faible taille de l'échantillon d'analyse et de l'impossibilité de traiter séparément les deux sexes, nous ne pourrions pas conclure en termes de fiabilité statistique de la méthode. Toutefois, il apparaît que les reconstructions tridimensionnelles effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 0.6 mm d'épaisseur reconstruites tous les 0.3 mm, en filtre mou ou dur ne sont pas plus performantes pour déterminer la phase de Suchey-Brooks que les reconstructions effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm. La plus faible variabilité inter-méthode entre l'os sec et un paramètre de reconstruction correspond à celle calculée entre l'os sec et les reconstructions tridimensionnelles effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm, en filtre dur, avec une valeur du Kappa de Cohen égal à 0.72, ce qui est bon. Viennent ensuite les reconstructions tridimensionnelles effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur

des coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm, en filtre mou, avec une valeur du Kappa de Cohen égal à 0.70, ce qui est également bon. Ainsi, les reconstructions tridimensionnelles effectuées à partir du filtre dur permettaient une meilleure stadification que celles effectuées à partir du filtre mou, même si, visuellement, les reconstructions en filtre mou ont un aspect iconographique plus esthétique, car plus lissé et moins bruité (cf. figure n° II-24). Cet avantage esthétique est un inconvénient en termes d'analyse car le lissage fait disparaître ou adoucit des différences de reliefs.



**Figure n° II-24 A** – *Filtre dur.*



**Figure n° II-24 B** – *Filtre mou.*

**Figures n° 24-** *Reconstructions tridimensionnelles à partir d'une acquisition effectuée sur des coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm, en filtre dur (A) et en filtre mou(B) : vues de la surface articulaire de face.*

Les résultats obtenus au cours de cette étude ne sont pas en opposition avec ceux obtenus par Telmon *et al.* . Les meilleurs résultats obtenus en matière d'erreur inter-méthode par Telmon *et al.* peuvent être expliqués par le fait que notre population d'étude était plus âgée, avec un âge moyen de l'échantillon étudié par Telmon *et al.* de 40.7 ans contre 50.3 ans dans la présente étude, mais également plus homogène en terme de représentativité de chaque décade d'âge, de sexe et de phases de Suchey Brooks.

Par ailleurs les paramètres d'acquisition choisis (coupes de 1 mm d'épaisseur reconstruits tous les 0.8 mm) sont peut être plus optimaux que les nôtres. En effet, les reconstructions effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 0.6 mm d'épaisseur reconstruites tous les 0.3 mm sont délétères en terme de classification par rapport aux reconstructions effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm. En suivant le même raisonnement, il est possible de supposer que les reconstructions effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm sont moins performantes en terme de

classification par rapport aux reconstructions effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 1 mm d'épaisseur reconstruites tous les 0.8 mm.

Cette étude confirme cependant que le choix du filtre de reconstruction est important. Ainsi, il apparaît que pour les reconstructions tridimensionnelles, le filtre dur soit plus indiqué que le filtre mou, indépendamment de l'épaisseur de coupe choisie. Il est important d'avoir également à l'esprit le fait que cette étude sur la symphyse pubienne n'était qu'une étude préliminaire. La mise en évidence que des reconstructions tomodensitométriques tridimensionnelles effectuées à partir d'acquisitions effectuées en coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm en filtre dur sont suffisamment précises pour déterminer correctement le stade de maturation de la symphyse pubienne en utilisant la classification de Suchey-Brooks ouvre une autre voie de recherche qui est celle de l'utilisation d'examen tomodensitométriques effectués en clinique, tel que cela a été fait dans cette thèse pour la première côte droite. La plupart des examens tomodensitométriques abdomino-pelviens étant effectués en coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm, ceci permettrait une étude avec des effectifs beaucoup plus importants que dans la présente étude.

### 4.5.3.2. Etude bidimensionnelle

L'apport possible de reconstructions bidimensionnelles de symphyses pubiennes dans la détermination de leur phase de Suchey-Brooks n'avait, à notre connaissance, jamais été évalué auparavant. L'échantillon étudié étant de petite taille et ne comportant pas d'individu de phase VI, l'analyse des résultats ne nous permet pas de faire d'affirmation, de plus, il n'est pas possible de dire si les différences entre les coefficients de concordance sont significatives.

Afin de comprendre ce que les reconstructions bidimensionnelles apportent en termes d'évaluation du vieillissement de l'articulation symphysaire, on rappellera que l'évolution de la symphyse pubienne avec l'âge peut être décomposée en quatre phases biologiques : une phase pré-épiphysaire, une phase « d'épiphysation » active, une phase post-épiphysaire immédiate et une phase dégénérative (Meindl *et al.*, 1985).

La phase **pré-épiphysaire** (20-29 ans) se présente avec une symphyse pubienne constituée de crêtes et de sillons bien marqués, caractéristiques de la plaque de croissance. Avec l'âge (vers 25 ans), ces reliefs s'estompent peu à peu et donnent place à des nodules osseux. Les changements morphologiques de la face symphysaire sont accompagnés par la formation du rempart ventral. Chez les sujets jeunes, le bord ventral correspond au bord de la surface ventrale du pubis. Pendant la maturation de l'épiphyse, une surface étroite apparaît entre la surface de la symphyse et le bord ventral (Hanihara et Suzuki, 1978). Le rempart ventral se

développe du versant caudal au versant crânial. Son acquisition fait partie du processus de maturation de la symphyse pubienne. Le rempart apparaît de façon variable avec l'âge, entre 20 et 40 ans (Brooks et Suchey, 1990 ; Katz et Suchey, 1986 ; Meindl *et al.*, 1985 ; Todd, 1920 ; Suchey, 1979). L'extrémité inférieure commence à se délimiter.

La phase **post-épiphysaire immédiate** (36-40 ans) présente un rempart ventral le plus souvent complet. Un hiatus est par contre parfois présent notamment dans sa moitié crâniale.

Il se produit un changement dans la texture osseuse qui devient granuleuse, ce changement pouvant être plus précoce chez la femme (32-33 ans).

Les phases **pré dégénérative et dégénérative** (> 40 ans) sont atteintes lorsque les processus de maturation sont terminés. Après une période de quiescence variable, apparaissent les premiers changements dus à un processus dégénératif : soulèvement du bord dorsal, puis ostéophytes des insertions tendineuses, notamment sur la branche ischio-pubienne. Enfin, la surface symphysaire s'érode et se creuse. Ce processus est très variable d'un individu à l'autre, il est en général contemporain de la ménopause chez la femme et son évolution suit celle de l'ostéoporose du squelette.

Ainsi, l'étude de la symphyse pubienne et de son vieillissement au cours du temps par les critères symphysaires bidimensionnels permet de retrouver des éléments ostéoscopiques permettant la classification en quatre phases biologiques. Ainsi, on note que :

- le critère **crête** présente des modifications morphologiques significativement liées aux stades de Suchey-Brooks, avec des crêtes *visibles* ou *importantes* présentes dans 100 % des phases I et II de Suchey-Brooks et *absentes* dans 100 % des phases supérieures ou égales à la phase III de Suchey-Brooks. Ce critère permet donc d'isoler correctement les individus les plus jeunes, en phase pré-épiphysaire,

- la **délimitation de l'extrémité supérieure** lorsqu'elle est *absente* ou *débutante*, est le plus fréquemment observée pour des phases inférieures ou égales à la phase II de Suchey-Brooks, permettant donc d'isoler les individus les plus jeunes, en phase pré-épiphysaire,

- la **délimitation de l'extrémité inférieure** lorsqu'elle est *présente* est le plus fréquemment observée pour des phases inférieures ou égales à la phase III de Suchey-Brooks, permettant donc d'isoler des individus relativement jeunes,

- le critère **anneau symphysaire** présente des modifications morphologiques significativement liées aux stades de Suchey-Brooks ; lorsqu'il est *complet*, il est observé dans 100 % des phases supérieures ou égales à la phase IV de Suchey-Brooks, correspondants

aux phases pré dégénératives ou dégénératives. Un anneau *incomplet avec un hiatus* est observé dans 100 % des phases IV de Suchey-Brooks,

- le critère **aspect de la surface articulaire** présente des modifications morphologiques significativement liées aux stades de Suchey-Brooks ; une surface *concave* est observée dans 100 % des phases supérieures ou égales à la phase IV de Suchey-Brooks, correspondantes aux phases pré dégénératives ou dégénératives,

- le **rempart ventral** lorsqu'il est *complet*, est observé pour des phases supérieures ou égales à la phase IV de Suchey-Brooks, correspondantes aux phases pré dégénératives ou dégénératives,

- les **ostéophytes** lorsqu'ils sont *présents*, sont observés pour des phases supérieures ou égales à la phase IV de Suchey-Brooks, correspondantes aux phases pré dégénératives ou dégénératives.

De la même façon que pour les reconstructions tomodensitométriques tridimensionnelles, il faut noter que cette étude sur la symphyse pubienne n'était qu'une étude préliminaire. Les reconstructions bidimensionnelles semblent être capables, par les changements morphologiques de certains critères au cours du vieillissement d'isoler les individus en phase pré épiphysaire et ceux en phase dégénérative. Ceci ouvre également une voie de recherche supplémentaire qui est celle de l'utilisation d'examen tomodensitométriques effectués en clinique. Ceci permettra une étude avec des effectifs beaucoup plus importants que dans la présente étude et la validation des différents critères bidimensionnels étudiés lors de ce travail.

# Chapitre 5

## Les fusions métaphyso-épiphysaires fémoro-tibiales

---

Cette étude présente une utilisation possible de l'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) en anthropologie. L'IRM est un moyen diagnostique radiologique qui n'utilise pas les rayons X. Pour plus de détails concernant la technique IRM elle-même, le lecteur est prié de se reporter au chapitre 3 de la première partie de cette thèse.

Le problème de l'exposition des rayons X sur des individus vivants lors de l'évaluation de leur âge a déjà été posé par le Conseil Consultatif National d'Éthique pour les Sciences de la Vie et de la Santé (Avis n° 88, 2005). En effet, les techniques radiographiques standard, exposent l'individu radiographié aux rayons X, ce qui n'est pas anodin. Cette utilisation radiographique n'est pas de plus effectuée à visée diagnostique, avec une potentielle sanction thérapeutique, mais tout simplement pour déterminer l'âge de ce même individu. La technique la plus employée à travers le monde en matière de radiographies simples est à l'heure actuelle celle de Greulich et Pyle (Greulich et Pyle, 1959). L'IRM apparaît donc en théorie comme une technique de premier choix dans cette préoccupation des techniques non irradiantes pouvant être utilisées afin de déterminer l'âge d'un individu.

Le site anatomique exploré par la technique IRM dans cette étude est le genou. Le genou est en effet après les explorations neuroradiologiques (crâne et rachis) la zone anatomique la plus explorée en IRM.

Le but de cette étude est la mise au point d'une stadification selon le degré de fusion métaphyso-épiphysaire des extrémités distales fémorales et proximales tibiales ainsi que de la détermination de la corrélation entre cette stadification et l'âge civil des individus étudiés.

### 5.1. Apports des études radiographiques de l'articulation fémoro-tibiale dans la détermination de l'âge d'un individu

L'étude des os constituant l'articulation du genou paraît être tout à fait intéressante dans le cadre de la détermination de l'âge d'un individu vivant. En effet, chez l'enfant en cours de croissance, la longueur des membres inférieurs est due à la croissance fémorale distale pour 57 % de la croissance longitudinale du genou et pour 43 % au versant tibial proximal (Moseley *et al.*, 1996). L'étude radiographique la plus exhaustive de l'articulation

du genou est celle effectuée par Pyle et Hoerr (Pyle et Hoerr, 1955). Les radiographies d'individus féminins et masculins sont présentées sous la forme d'un atlas, tout comme l'atlas de Greulich et Pyle (Greulich et Pyle, 1969). Cet atlas contient donc une radiographie type pour chaque sexe et âge de genou droit dans des incidences de face et de profil. Le principe est d'apprécier le degré de maturation physique du genou et de les comparer à celui de l'atlas du même sexe. Pour les deux sexes, il existe une planche de référence tous les trois ou quatre mois environ avant l'âge de trois ans, puis passé cet âge tous les ans. L'âge osseux est celui de la radiographie de l'atlas qui se rapproche le plus du cliché à interpréter. Le résultat est habituellement donné sous la forme d'un écart compris entre l'âge correspondant à la radiographie d'avant et celle d'après celle choisie.

### 5.1.1. Versant physique fémoral distal

L'extrémité fémorale distale est l'épiphyse la plus large et la plus rapide en terme de croissance du corps humain (Scheuer et Black, 2000). L'extrémité fémorale distale est responsable de 70 % de la croissance longitudinale du fémur (Anderson *et al.*, 1963 ; Digby, 1915 ; Gill et Abbott, 1942 ; Ogden, 1984). L'aspect radiologique de l'extrémité fémorale distale a été étudié en détail par Pyle et Hoerr dans un atlas radiologique (Pyle et Hoerr, 1955).

Il existe un dimorphisme sexuel prononcé sur le versant fémoral distal de l'articulation du genou. A la naissance, la maturation chez les sujets de sexe féminin est plus avancée d'environ deux semaines par rapport aux individus de sexe masculin. Cet écart augmente avec l'âge, de sorte que, à la puberté, les individus de sexe féminin présente une maturité squelettique fémorale distale en avance de deux ans sur les individus de sexe masculin (Scheuer et Black, 2000).

La fusion métaphyso-épiphyse de l'extrémité fémorale distale coïncide avec l'arrêt de la croissance en taille de l'individu car les épiphyses situées sur les deux versants de l'articulation du genou sont les dernières épiphyses à croître au niveau des membres inférieurs. La plupart des observations radiographiques indiquent que cette fusion apparaît entre **14 et 18** ans chez les filles et **16 à 19** ans chez les garçons (Davies et Parsons, 1927 ; Flecker, 1932 ; Hansman, 1962 ; Paterson, 1929). Pour Pyle et Hoerr, il existe une fusion métaphyso-éphysaire centrale à l'âge de **14.5** ans chez les filles et **17** ans chez les garçons (Pyle et Hoerr, 1955). Le cartilage de conjugaison est remplacé par des lignes de fusion à l'âge de **15.5** ans pour les filles et **18** ans chez les garçons (Pyle et Hoerr, 1955).

### 5.1.2. Versant physaire tibial proximal

Il existe également un dimorphisme sexuel prononcé sur le versant tibial proximal de l'articulation du genou. La maturation et la croissance de l'extrémité tibiale proximale en situation post-natale sont plus précoces chez les individus de sexe féminin que masculin. Si cette différence n'est que de deux semaines à la naissance, elle atteint deux à trois ans à l'adolescence (Scheuer et Black, 2000).

La fusion métaphyso-épiphysaire de l'extrémité tibiale proximale coïncide avec l'arrêt de croissance en taille de l'individu car les deux épiphyses situées sur les deux versants de l'articulation du genou sont les dernières à croître aux membres inférieurs.

L'extrémité tibiale proximale est responsable d'environ 57 % de la croissance en longueur du tibia (Anderson *et al.*, 1963 ; Digby, 1915 ; Gill et Abbott, 1942 ; Ogden et McCarthy, 1983).

Dans l'atlas de Pyle et Hoerr, la fusion métaphyso-épiphysaire de l'extrémité tibiale proximale débute à l'âge de **13** ans pour les filles et de **15.5** ans chez les garçons (Pyle et Hoerr, 1955). La fusion métaphyso-épiphysaire de l'extrémité tibiale proximale est complète 1.5 ans plus tard, soit à **14.5** ans chez les filles et **18** ans chez les garçons. D'autres observations rapportent des temps de fusion complet plus tardifs, s'étendant jusqu'à l'âge de **17** ans pour les filles et **19.5** ans chez les garçons (Scheuer et Black, 2000).

## 5.2. Matériel

### 5.2.1. Population d'étude

Nous avons sélectionné de façon rétrospective des examens IRM de genoux de patients ayant bénéficié d'une exploration dans les services de radiologie des Hôpitaux de Toulouse. Les examens étaient enregistrés dans le système d'archivage de l'hôpital sous la forme d'un PACS (Picture Archiving and Communication System) (McKesson Medical Imaging Group, Richmond, BC, Canada).

Cette recherche a été effectuée sur des individus dont l'âge était compris entre 10 et 25 ans.

Les patients retenus devaient présenter les critères d'inclusion suivants :

- visualisation complète sur la même exploration des extrémités distales fémorales et proximales tibiales,
- acquisition en densité de proton avec saturation de graisse,
- acquisition dans un plan coronal.

Les patients retenus ne devaient pas présenter les critères d'exclusion suivants :

- flou cinétique en rapport avec des mouvements intempestifs au cours de l'acquisition (mouvement du genou au sein de l'antenne),
- présence d'une tumeur épiphysaire,
- évènement traumatique direct récent du genou,
- contexte d'infection, d'arthrose, d'inflammation ou de dysplasie du genou.

Ainsi, **185** patients ont été retenus (94 individus de sexe masculin et 91 de sexe féminin). Les âges s'étendaient de 8.8 ans à 24.8 ans, avec un âge moyen de 17.4 ans.

L'origine populationnelle n'était pas prise en compte pour cette étude rétrospective car seuls les noms et dates de naissance étaient disponibles dans le système d'archivage. La latéralité du genou étudié n'était également pas prise en compte.

La répartition du sexe et de l'âge de l'échantillon étudié sont présentés sous la forme d'histogramme (cf. figure n° II-25).

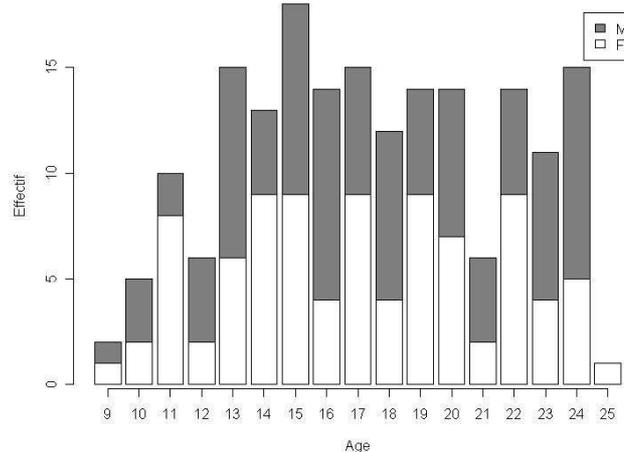


Figure n° II-25 - Histogramme de répartition par âge et sexe de l'échantillon étudié.

### 5.2.2. Protocole d'imagerie

Toutes les acquisitions ont été effectuées sur un appareil Philips Intera® avec un champ de 1.5 tesla (Philips Medical System, Best, Pays-Bas).

L'antenne utilisée pour ces examens était une antenne dite genou, spécialement conçue pour une utilisation clinique permettant une exploration optimale de l'articulation étudiée.

Les paramètres d'acquisition étaient les suivants :

- images pondérées en densité de proton en fast spin-écho avec saturation de graisse,
- temps de répétition (TR) compris entre 2500 et 4000 ms,

- temps d'écho (TE) compris entre 25 et 50 ms,
- épaisseur de coupe comprise entre 3.5 et 4 mm.

Plusieurs incidences étaient effectuées au cours de l'exploration :

- coupes axiales,
- coupes sagittales,
- coupes frontales.

## **5.3. Méthodes**

### **5.3.1. Méthodes de codage**

Les explorations ont été analysées par un observateur radiologue (observateur n° 1) et un observateur non radiologue (observateur n° 2) en double aveugle.

Les explorations ont porté de façon indifférente sur des genoux droits et gauches.

Afin d'estimer le degré de maturation des extrémités distales fémorales et proximales tibiales, une classification en **5 stades** a été mise au point par l'observateur n° 1.

Cette stadification était obtenue après analyse de l'ensemble des coupes d'examen mise à notre disposition, dans un plan frontal strict.

Les 5 stades s'étendaient du stade 1 au stade 5 et étaient définis par les critères suivants :

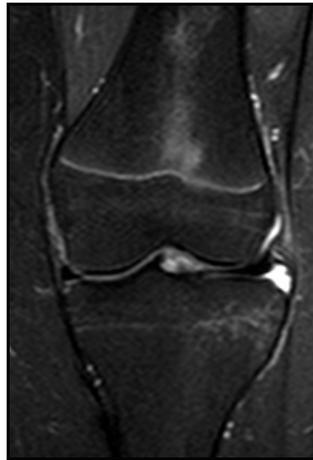
- **Stade 1** (cf. figure n° II-26 A) :
  - signal cartilagineux complet (sans interruption de son extrémité latérale à son extrémité médiale),
  - sous la forme d'une bande horizontale de plus de 1.5 mm de hauteur,
  - présentant un aspect multi-lamellaire,
  - composée par une alternance dans un plan vertical : d'hyposignal frontal, d'hypersignal frontal, d'hyposignal frontal, d'hypersignal frontal, et d'un hyposignal frontal,
  - correspondant à l'écran à l'alternance verticale suivante : bande frontale noire, bande frontale blanche, bande frontale noire, bande frontale blanche et bande frontale noire.

- **Stade 2** (cf. figure n° II-26 B) :
  - signal cartilagineux complet (sans interruption de son extrémité latérale à son extrémité médiale),
  - sous la forme d'une bande horizontale de plus de 1.5 mm de hauteur,
  - sans aspect lamellaire,
  - composée par une alternance dans un plan vertical d'hyposignal frontal, d'hypersignal frontal, et d'hyposignal frontal,
  - correspondant à l'écran à l'alternance verticale suivante : bande frontale noire, bande frontale blanche et bande frontale noire.
  
- **Stade 3** (cf. figure n° II-26 C) :
  - signal cartilagineux complet (sans interruption de son extrémité latérale à son extrémité médiale),
  - sous la forme d'une ligne horizontale fine, de moins de 1.5 mm de hauteur,
  - composée par un hypersignal frontal,
  - correspondant à l'écran à une ligne blanche frontale.
  
- **Stade 4** (cf. figure n° II-26 D) :
  - signal cartilagineux incomplet (avec une alternance d'absence et de présence cartilagineuse de son extrémité latérale à son extrémité médiale),
  - sous la forme d'une ligne horizontale discontinue fine, de moins de 1.5 mm de hauteur,
  - composée par une alternance linéaire fine, de moins de 1.5 mm de hauteur sur un plan frontal, de la situation latérale vers la situation médiale d'hypersignaux et d'isosignaux,
  - correspondant à l'écran à une ligne frontale présentant une alternance de segments blancs et gris.
  
- **Stade 5** (cf. figure n° II-26 E) :
  - absence de signal cartilagineux,
  - sans distinction de bande ou de ligne,
  - la physe apparaît homogène, sans hypersignal, en isosignal par rapport à l'os spongieux métaphysaire et épiphysaire.

**Figure n° II-26**– *IRM du genou, coupes frontales, images pondérées en densité de proton en fast spin-écho avec saturation de graisse. Stades IRM de la physe distale fémorale.*



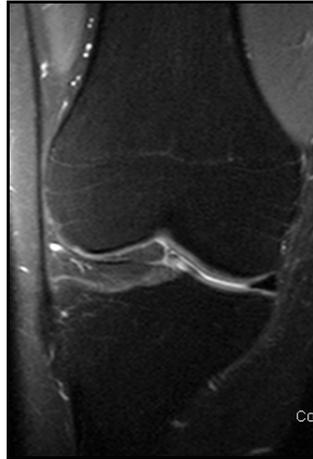
**Figure n° II-26 A** – *Stade 1 de la physe distale fémorale avec un cartilage se présentant sous la forme d'une bande lamellaire complète de plus de 1.5 mm d'épaisseur.*



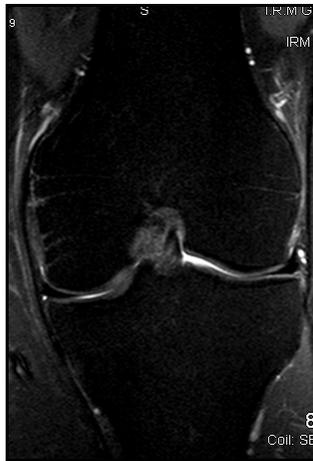
**Figure n° II-26 B** - *Stade 2 de la physe distale fémorale avec un cartilage se présentant sous la forme d'une bande complète sans aspect lamellaire de plus de 1.5 mm d'épaisseur.*



**Figure n° II-26 C** - *Stade 3 de la physe distale fémorale avec un cartilage se présentant sous la forme d'une ligne en hypersignal de moins de 1.5 mm d'épaisseur.*



**Figure n° II-26 D** - Stade 4 de la physe distale fémorale avec un cartilage se présentant sous la forme d'une ligne en hypersignal, discontinue, non lamellaire, de moins de 1.5 mm d'épaisseur.



**Figure n° II-26 E** - Stade 5 de la physe distale fémorale avec l'absence d'hypersignal physaire à la jonction métaphyso-épiphysaire.

### 5.3.2. Méthode d'analyse statistique

Les extrémités distales fémorales et proximales tibiales ont été stadifiées selon la classification précédemment décrite par deux observateurs.

Une analyse descriptive puis une analyse statistique ont été effectuées à l'aide du logiciel R 2.6.2. ([www.r-project.org](http://www.r-project.org)).

- Une première analyse statistique a été effectuée afin d'estimer les **variabilités intra et inter-observateur** par le calcul du **coefficient Kappa de Cohen ( $\kappa$ )** (Cohen, 1960). Landis et Koch ont proposé un classement de l'accord en fonction de la valeur du  $\kappa$  (Landis et Koch, 1977) (cf. tableau n° II-7).

- Une seconde analyse statistique a été réalisée avec prise en compte du sexe des individus. Ainsi, pour les deux sexes étaient calculées les différences d'âge en fonction de l'estimation du stade IRM. Les moyennes, médianes, déviations standard, les âges minimums et

maximums ont ainsi été calculés pour chacun des sexes et des stades IRM. Les différences d'âge entre chaque stade pour chaque sexe ont été étudiées, compte tenu de la taille de l'échantillon, par un test non paramétrique, le test de Kruskal-Wallis.

- Une troisième analyse statistique, de type analyse transitionnelle, a ensuite été effectuée (Boldsen *et al.*, 2002). Ce type d'analyse a déjà été utilisé en anthropologie dans le cadre de l'étude de la symphyse pubienne (Kimmerle *et al.*, 2008 ; Konigsberg *et al.*, 2008). Cette méthode paramétrique permet de modéliser le passage d'individus d'un stade de développement à un autre stade ou grade plus important dans une séquence croissante de grades ou de stades. Un modèle probit a été appliqué aux 185 individus, par catégorie de sexe et de phase explorés (Agresti, 1990 ; Long, 1997). Pour la représentation graphique des résultats, une transformation logarithmique a été effectuée à partir du modèle probit cumulé de l'âge, permettant de représenter plus d'une transition, et ce pour les deux sexes sur une même figure (Kimmerle *et al.*, 2008 ; Konigsberg *et al.*, 2008).

## **5.4. Résultats**

### **5.4.1. Variabilités intra et inter-observateur**

Le calcul du coefficient du Kappa de Cohen révélait une excellente reproductibilité **intra-observateur** ( $\kappa = 0.96$ ).

La **variabilité inter-observateur** était de 0.84 pour l'évaluation phasaire fémorale et de 0.63 pour l'évaluation phasaire tibiale. Ces résultats sont présentés dans le tableau n° II-52.

**Tableau n° II-52** - Variabilités intra et inter-observateur exprimées par le calcul du coefficient de Kappa de Cohen.

<b>Versant phasaire</b>	<b>Variabilité intra - observateur</b>	<b>Variabilité inter - observateur</b>
<b>Fémoral</b>	0.96	0.80
<b>Tibial</b>	0.96	0.63

### **5.4.2. Résultats statistiques**

Les tableaux n° II-53 et n° II-54 résument les résultats des extrémités distales fémorales et proximales tibiales.

Tous les examens inclus ont pu être stadifiés.

## Deuxième partie : Imagerie en coupe et anthropologie – Chapitre 5

Les différences de résultats entre les hommes et les femmes étaient significatives pour tous les stades ( $p < 0.05$ ).

Lorsque les 5 stades étaient comparés aux différents groupes d'âge, des différences significatives étaient mises en évidence. Les modifications de l'aspect physique des extrémités distales fémorales et proximales tibiales étaient corrélées à l'âge, et ce, aussi bien pour les individus de sexe masculin et féminin.

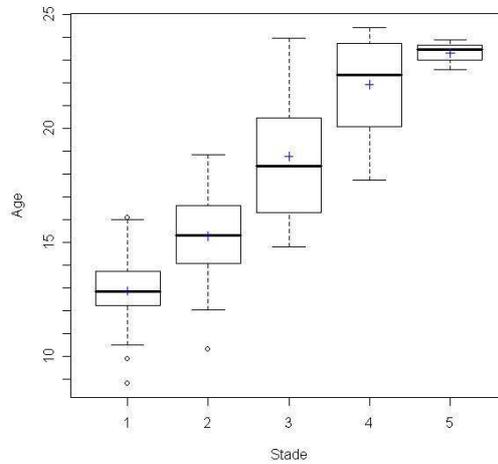
**Tableau n° II-52** - Distribution selon le sexe, des âges de l'échantillon étudié selon le stade IRM fémoral : moyennes, écart-types (SD), intervalles d'âges (exprimés en années) avec les âges minimums (min) et maximums (max) ; N, nombre de sujets ; KW, test de Kruskal-Wallis.

Stade fémoral	Sexe masculin		Sexe féminin	
	N	Moyenne $\pm$ SD [min, max]	N	Moyenne $\pm$ SD [min, max]
1	21	12.9 $\pm$ 1.9 [8.8, 16.1]	13	11.3 $\pm$ 1.3 [9.1, 13.6]
2	21	15.3 $\pm$ 2.0 [10.3, 18.9]	16	13.6 $\pm$ 1.3 [11.0, 15.7]
3	24	18.8 $\pm$ 2.6 [14.8, 24.0]	25	17.1 $\pm$ 2.6 [13.6, 23.8]
4	25	22.0 $\pm$ 2.0 [17.7, 24.4]	33	20.3 $\pm$ 2.1 [16.6, 24.2]
5	3	23.3 $\pm$ 0.65 [22.6, 23.9]	4	23.7 $\pm$ 1.2 [22.1, 24.8]
KW	Chi <sup>2</sup>	70.56	69.43	
	P	< 0.001	< 0.001	

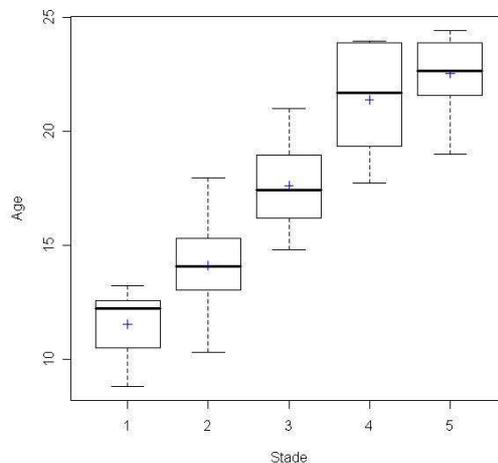
**Tableau n° II-53** - Distribution selon le sexe, des âges de l'échantillon étudié selon le stade tibial : moyennes, écart-types (SD), intervalles d'âges (exprimés en années) avec les âges minimums (min) et maximums (max) ; N, nombre de sujets ; KW, test de Kruskal-Wallis.

Stade tibial	Sexe masculin		Sexe féminin	
	N	Moyenne $\pm$ SD [min, max]	N	Moyenne $\pm$ SD [min, max]
1	9	11.6 $\pm$ 1.5 [8.8, 13.3]	5	10.8 $\pm$ 0.6 [9.9, 11.4]
2	25	14.1 $\pm$ 1.8 [10.3, 18.0]	21	12.7 $\pm$ 1.7 [9.1, 15.7]
3	28	17.6 $\pm$ 1.8 [14.8, 21.0]	18	16.2 $\pm$ 2.9 [13.6, 23.8]
4	10	21.4 $\pm$ 2.5 [17.7, 24.0]	25	19.0 $\pm$ 2.1 [15.6, 24.2]
5	22	22.5 $\pm$ 1.5 [19.0, 24.4]	22	21.4 $\pm$ 2.1 [17.0, 24.8]
KW	Chi <sup>2</sup>	77.09	67.17	
	P	< 0.001	< 0.001	

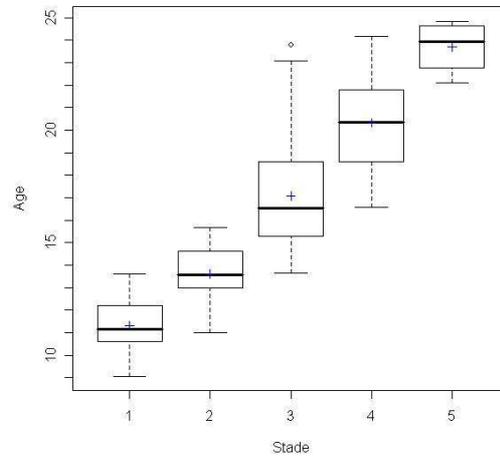
Les résultats sont également présentés sous la forme de boîtes à moustaches de Tukey pour les deux versants physiques et chaque sexe dans les figures ci-dessous (cf. figure n° II-27).



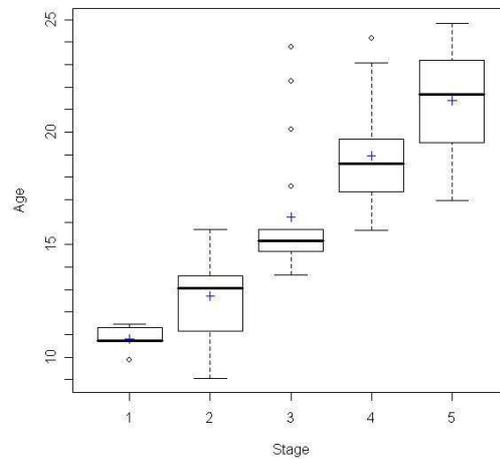
**Figure n° II-27 A** – Boîtes à moustaches de Tukey de la *stadification masculine physique fémorale distale* : les bordures supérieures et inférieures des boîtes rectangulaires représentent respectivement les percentiles 75 et 25, les barres horizontales les médianes (percentile 50), les croix les moyennes, les barres en T aux deux extrémités des boîtes les valeurs d'âges extrêmes maximums et minimums (avec un intervalle de confiance à 95 %), les cercles (o) les individus aberrants.



**Figure n° II-27 B** – Boîtes à moustaches de Tukey de la *stadification masculine physique tibiale proximale* : les bordures supérieures et inférieures des boîtes rectangulaires représentent respectivement les percentiles 75 et 25, les barres horizontales les médianes (percentile 50), les croix les moyennes, les barres en T aux deux extrémités des boîtes les valeurs d'âges extrêmes maximums et minimums (avec un intervalle de confiance à 95 %), les cercles (o) les individus aberrants.



**Figure n° II-27 C** – Boîtes à moustaches de Tukey de la *stadification féminine* physaire fémorale distale : les bordures supérieures et inférieures des boîtes rectangulaires représentent respectivement les percentiles 75 et 25, les barres horizontales les médianes (percentile 50), les croix les moyennes, les barres en T aux deux extrémités des boîtes les valeurs d'âges extrêmes maximums et minimums (avec un intervalle de confiance à 95 %), les cercles (o) les individus aberrants.



**Figure n° II-27 D** – Boîtes à moustaches de Tukey de la *stadification féminine* physaire tibiale proximale : les bordures supérieures et inférieures des boîtes rectangulaires représentent respectivement les percentiles 75 et 25, les barres horizontales les médianes (percentile 50), les croix les moyennes, les barres en T aux deux extrémités des boîtes les valeurs d'âges extrêmes maximums et minimums (avec un intervalle de confiance à 95 %), les cercles (o) les individus aberrants.

Ainsi, pour l'échantillon **masculin**, il était possible de dire :

- Versant physaire fémoral distal :
  - Le stade 1 est en faveur d'un âge inférieur à 16 ans.
  - Le stade 2 est en faveur d'un âge inférieur à 19 ans.
  - Le stade 3 est en faveur d'un âge supérieur à 14 ans.
  - Le stade 4 est en faveur d'un âge supérieur à 17 ans.
  - Le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 22 ans.
  
- Versant physaire tibial proximal :
  - Le stade 1 est en faveur d'un âge inférieur à 14 ans.
  - Le stade 2 est en faveur d'un âge inférieur à 18 ans.
  - Le stade 3 est en faveur d'un âge supérieur à 14 ans.
  - Le stade 4 est en faveur d'un âge supérieur à 17 ans.
  - Le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 19 ans.

Pour l'échantillon **féminin**, il était possible de dire :

- Versant physaire fémoral distal :
  - Le stade 1 est en faveur d'un âge inférieur à 14 ans.
  - Le stade 2 est en faveur d'un âge inférieur à 16 ans.
  - Le stade 3 est en faveur d'un âge supérieur à 13 ans.
  - Le stade 4 est en faveur d'un âge supérieur à 16 ans.
  - Le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 22 ans.
  
- Versant physaire tibial proximal :
  - Le stade 1 est en faveur d'un âge inférieur à 12 ans.
  - Le stade 2 est en faveur d'un âge inférieur à 16 ans.
  - Le stade 3 est en faveur d'un âge supérieur à 13 ans.
  - Le stade 4 est en faveur d'un âge supérieur à 15 ans.
  - Le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 17 ans.

### 5.4.3. Analyse transitionnelle

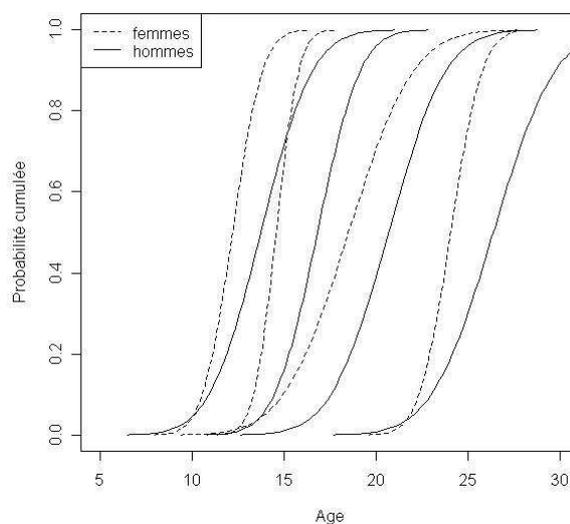
Les tableaux n° II-54 et n° II-55 résument les résultats de la détermination des âges transitionnels pour les extrémités distales fémorales et proximales tibiales. Les résultats sont également présentés sous la forme de graphiques (cf. figures n° II-28 et II-29).

**Tableau n° II-54** - Distribution selon le sexe des âges transitionnels de l'échantillon étudié en fonction des stades IRM fémoraux. SD, écart-types, exprimés en années ; âges moyens de transition exprimés en années.

Stade fémoral	Sexe masculin		Sexe féminin	
	Age moyen de transition	SD	Age moyen de transition	SD
1 à 2	13.8	2.2	12.2	1.3
2 à 3	16.8	1.8	14.6	1.0
3 à 4	20.7	2.4	18.5	2.8
4 à 5	26.3	2.6	24.0	1.3

**Tableau n° II-55** - Distribution selon le sexe des âges transitionnels de l'échantillon étudié en fonction des stades IRM tibiaux. SD, écart-types, exprimés en années ; âges moyens de transition exprimés en années.

Stade tibial	Sexe masculin		Sexe féminin	
	Age moyen de transition	SD	Age moyen de transition	SD
1 à 2	11.7	1.7	10.2	1.6
2 à 3	15.7	1.3	14.1	1.0
3 à 4	19.7	1.7	17.0	2.8
4 à 5	21.6	2.4	20.8	2.7



**Figure n° II-28** – Distribution des âges transitionnels pour la *physe fémorale distale* pour chaque sexe.

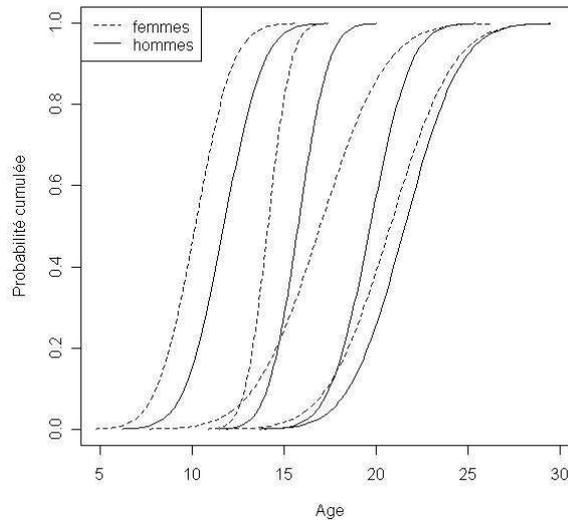


Figure n° II-29 – Distribution des âges transitionnels pour la *physe tibiale proximale* pour chaque sexe.

## 5.5. Discussion

### 5.5.1. L'atlas de Pyle et Hoerr

L'atlas créé par Pyle et Hoerr permet de déterminer l'âge d'individus féminins de un mois à 16 ans et masculins de un mois à 19 ans en fonction de l'aspect radiologique du genou droit de l'individu étudié (Pyle et Hoerr, 1955). La méthodologie comparative est immédiate, rapide, simple, mais cette comparaison globale tient compte de multiples facteurs entraînant une subjectivité. De plus, dans cet atlas squelettique, tous les os d'une même planche ont le même âge squelettique car sont présentés sur une radiographie qui comporte l'âge de l'individu à laquelle cette dernière a été pratiquée. Cet atlas a été établi de 1927 à 1945 sur une population d'enfants nord-américains qui n'est pas comparable à la population de l'Europe occidentale du XXIème siècle.

#### 5.5.1.1. Extrémité fémorale distale

Selon Pyle et Hoerr, il existait une fusion métaphyso-éphysaire centrale de l'extrémité fémorale distale à l'âge de **14.5** ans chez les filles et **17** ans chez les garçons (Pyle et Hoerr, 1955). Le cartilage de conjugaison était ensuite remplacé par des lignes de fusion à l'âge de **15.5** ans pour les filles et **18** ans chez les garçons (Pyle et Hoerr, 1955).

Cependant, McKern et Stewart, à partir d'observation effectuées sur os secs et sur une population d'étude exclusivement masculine, plaçaient l'extrémité fémorale distale dans le groupe II des fusions métaphyso-épiphysaires retardées (McKern et Stewart, 1957). Les auteurs indiquaient que le stade de début fusion métaphyso-épiphysaire centrale de l'extrémité

fémorale distale chez les individus de sexe masculin peut être aussi tardif que l'âge de **20** ans. De plus, la fusion métaphyso-épiphysaire de l'extrémité fémorale distale n'était pas atteinte dans 100 % de leur échantillon jusqu'à l'âge de **22** ans. Le dernier site de fusion était localisé à la partie postéro-médiale de l'épiphyse, sous le condyle médial.

Ainsi, il apparaît que les conclusions radiographiques données par Pyle et Hoerr concernant les âges de début et de fin de fusion de l'extrémité fémorale distale sont discordantes avec celles constatées sur os secs.

#### **5.5.1.2. Extrémité tibiale proximale**

Dans l'atlas de Pyle et Hoerr, la fusion métaphyso-épiphysaire de l'extrémité tibiale proximale débutait à l'âge de **13** ans pour les filles et de **15.5** ans chez les garçons (Pyle et Hoerr, 1955). La fusion métaphyso-épiphysaire de l'extrémité tibiale proximale était complète 1.5 ans plus tard, soit à **14.5** ans chez les filles et **18** ans chez les garçons. D'autres observations rapportaient des temps de fusion complet plus tardifs, s'étendant jusqu'à l'âge de **17** ans pour les filles et **19.5** ans chez les garçons (Scheuer et Black, 2000).

Cependant, McKern et Stewart, à partir d'observation effectuées sur os secs et sur une population d'étude exclusivement masculine, rapportaient qu'il existait 10 et 2 % d'épiphyse proximales à un stade précoce de fusion aux âges respectivement de 17 et 19 ans. Ils constataient également que 100 % de fusions métaphyso-épiphysaires de l'extrémité tibiale proximale n'était pas atteinte jusqu'à l'âge de **24** ans. Le dernier site de fusion était postéro-médial sur l'épiphyse où une dépression osseuse pouvait persister jusqu'à l'âge de 24 ans. Dans la série de squelettes juvéniles de Scheuer et Black (2000), la fusion métaphyso-épiphysaire commençait toujours en situation latérale et médiale mais antérieure, fusionnant finalement à la partie postérieure, sous la facette articulaire fibulaire.

Ainsi, il apparaît que les conclusions radiographiques données par Pyle et Hoerr concernant les âges de fin de fusion de l'extrémité tibiale proximale sont discordantes avec celles constatées sur os secs, pour un échantillon exclusivement masculin par McKern et Stewart.

#### **5.5.2. IRM et détermination de l'âge osseux**

La littérature ne comporte que trois études récentes qui se sont intéressées à la détermination de l'âge d'individus en IRM.

Les deux premières sont multicentriques et étudient le poignet droit de jeunes joueurs de football (Dvorak *et al.*, 2006 ; Dvorak *et al.*, 2007).

La troisième est ciblée sur l'étude *post mortem* d'extrémités interne de clavicules (Schmidt *et al.*, 2007).

Ces trois études ont démontré l'utilité potentielle qu'avait l'IRM en matière d'évaluation de l'âge d'individus, qu'ils soient morts ou vivants.

### 5.5.3. Détermination de l'âge osseux d'un individu vivant par IRM du genou

Nos résultats démontrent que l'IRM du genou est un examen utilisable pour évaluer l'âge osseux d'individus vivants masculins et féminins au-delà de l'âge de 16 ans.

Tout comme sur os secs, il existe une différence chronologique de maturation entre les physes distales fémorales et proximales tibiales en IRM. La fusion complète se faisant plus précocement sur le versant tibial.

Il existe également une différence significative de maturation sur les deux versants physiques entre les individus de sexe féminin et de sexe masculin, avec une avance des différents stades féminins sur les stades masculins. Ces constatations sont en accord avec la littérature anthropologique (Scheuer et Black, 2000).

Même s'il existe des chevauchements entre les différents stades qu'ils soient physiques fémoraux ou tibiaux, notre étude permet de retenir que la fusion complète (soit l'atteinte du stade 5 de notre classification) est atteinte le plus précocement aux âges suivants :

- pour l'échantillon **masculin** :
  - o versant fémoral distal : le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 23 ans,
  - o versant tibial proximal : le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 19 ans,
- pour l'échantillon **féminin** :
  - o versant fémoral distal : le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 22 ans,
  - o versant tibial proximal : le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 17 ans.

Ces résultats concernant les âges les plus précoces auxquels la fusion complète est atteinte, que cela soit sur les versants fémoraux ou tibiaux est en désaccord avec les âges fournis par Pyle et Hoerr. Il existe donc un désaccord entre les conclusions radiographiques de Pyle et Hoerr et les résultats en IRM. Il apparaît donc que la fusion complète a été décrite par Pyle et Hoerr comme pouvant être acquise plus précocement qu'en IRM. Par contre, on note que les conclusions faites sur os secs par McKern et Stewart sont compatibles avec celle de notre

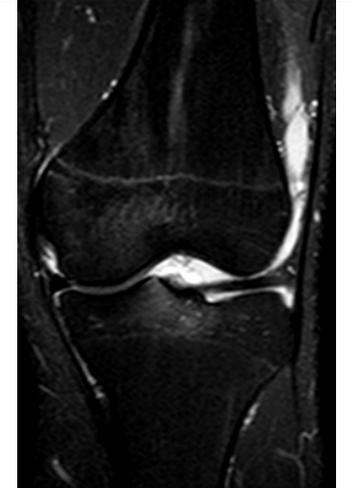
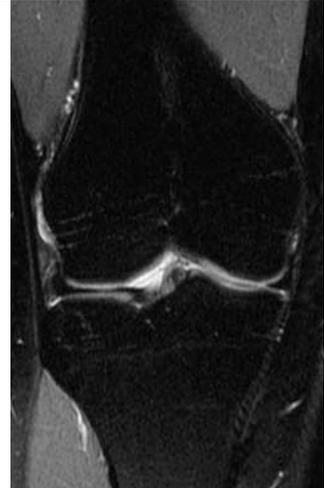
étude. Ainsi, les résultats en IRM sont en accord avec ceux secondaires à une analyse sur os secs.

L'explication la plus probable concernant le désaccord entre la radiographie et l'IRM est que dans les cas où la radiographie permet le diagnostic d'une fusion complète, l'IRM, de part sa meilleure résolution spatiale et en contraste est plus discriminante et peut permettre de différencier parmi ces individus des stades IRM 3, 4 ou 5. Plusieurs exemples permettent de comprendre ce phénomène (cf. tableau n° II-56). La résolution en contraste de l'IRM permet facilement le diagnostic d'œdème et donc d'hypersignal à la jonction métaphyso-épiphysaire, zone où la radiographie simple peut diagnostiquer de façon erronée une fusion métaphyso-épiphysaire complète.

Nos résultats permettent également de constater une plus faible variabilité inter-observateur concernant la stadification de l'extrémité fémorale distale par rapport à l'extrémité tibiale proximale. Il est également important de constater que la stadification est applicable de façon fiable par un médecin non radiologue, préalable indispensable si l'on souhaite que cette technique soit utilisée et diffusée largement.

La principale critique de cette étude est l'absence de renseignement concernant l'origine géographique de la population étudiée. Toutefois, Schmeling a déjà démontré que l'origine ethnique ne joue pas de rôle dans la maturation squelettique, contrairement aux conditions socio-économiques auxquelles le sujet est soumis (Schmeling *et al.*, 2000). Dès lors, l'ensemble de la population étudiée ayant bénéficié d'une IRM dans les Hôpitaux de Toulouse, on peut penser que tous les individus étaient de la région toulousaine, et présentaient donc au plan socio-économique une relative homogénéité, en tous les cas au moins superposable à celle du territoire français d'une façon générale.

**Tableau n° II-56** - Confrontation entre les radiographies et les IRM de genoux obtenues chez des individus présentant en radiographie standard du genou de face, un aspect de fusion complète au versant fémoral, identique pour l'ensemble des individus. L'IRM du genou permet chez ces mêmes individus de constater que leur stade de maturation au versant physaire fémoral est différent : l'individu de la figure A présente un stade fémoral IRM 3, l'individu B un stade 4, et l'individu C un stade 5.

	Individu A	Individu B	Individu C
<b>Radiographies de genou, incidence de face</b>			
<b>IRM correspondante, coupe frontale</b>			

# Troisième partie

---

## *Discussion générale*

# Chapitre 1

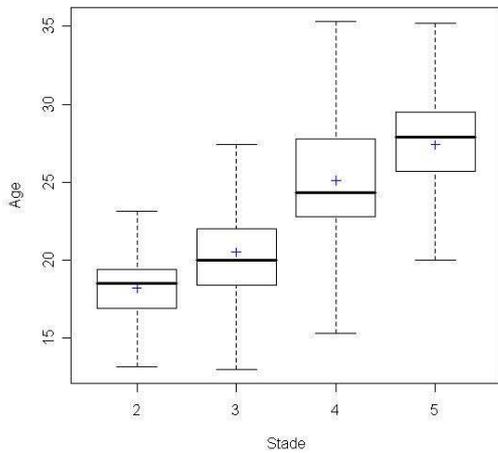
## Applicabilité des méthodes d'imagerie en coupe concernant la détermination de l'âge chez le vivant

Sur des individus vivants, dans une problématique de détermination de l'âge l'extrémité médiale de la clavicule a déjà fait l'objet de nombreuses publications. Certaines sont basées sur l'analyse radiographique simple (Schmeling *et al.*, 2004 ; Schulz *et al.*, 2008), mais d'autres sur l'analyse tomодensitométrique (Kreitner *et al.*, 1998 ; Schulz *et al.*, 2005 ; Schulze *et al.*, 2006).

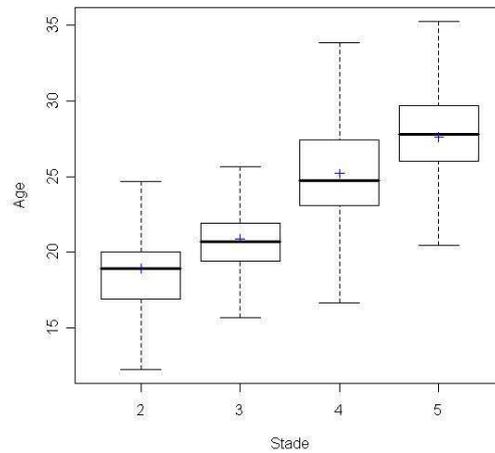
Le tableau n° III-1 et la figure n° III-1 résume les différents paramètres statistiques en fonction de l'état de fusion métaphyso-épiphysaire de l'extrémité interne des clavicules.

**Tableau n ° III-1-** Paramètres statistiques exprimés en années et par sexe de l'ossification de l'extrémité interne de la clavicule des stades tomодensitométriques 2 à 5 (d'après Schulze *et al.*, 2006). SD, déviation standard ; min, âge minimum ; max, âge maximum.

Stade TDM	Sexe féminin		Sexe masculin	
	Moyenne $\pm$ SD [min, max]	Médiane, quartile inférieur, quartile supérieur	Moyenne $\pm$ SD [min, max]	Médiane, quartile inférieur, quartile supérieur
2	18.2 $\pm$ 1.6 [15.0, 21.6]	18.5, 16.9, 19.4	18.9 $\pm$ 1.7 [15.2, 23.9]	18.9, 16.9, 20.0
3	20.5 $\pm$ 2.7 [16.6, 28.6]	20.0, 18.4, 22.0	20.9 $\pm$ 1.9 [17.5, 27.2]	20.7, 19.4, 21.9
4	25.1 $\pm$ 2.8 [21.5, 29.9]	24.3, 22.8, 27.8	25.2 $\pm$ 2.7 [21.2, 30.4]	24.7, 23.1, 27.4
5	27.4 $\pm$ 2.3 [21.9, 30.9]	27.9, 25.7, 29.5	27.6 $\pm$ 2.3 [22.4, 30.9]	27.8, 26.0, 29.7



**Figure n° III-1 A – Population féminine.**



**Figure n° III-1 B – Population masculine.**

**Figures n° III-1** – Boîtes à moustaches de Tukey de la **stadification clavriculaire tomодensitométrique** : les bordures supérieures et inférieures des boîtes rectangulaires représentent respectivement les percentiles 75 et 25, les barres horizontales les médianes (percentile 50), les croix les moyennes, les barres en T aux deux extrémités des boîtes les valeurs d'âges extrêmes maximums et minimums (avec un intervalle de confiance à 95 %) (modifié, d'après Schulze et al., 2006).

Les différents aspects claviculaires internes possibles en fonction de l'état de maturation osseuse sont présentés dans la figure n° III-2.



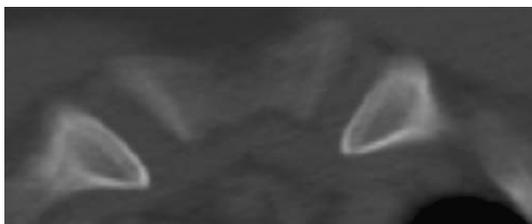
**Figure n° III-2 A- Stade 1.**



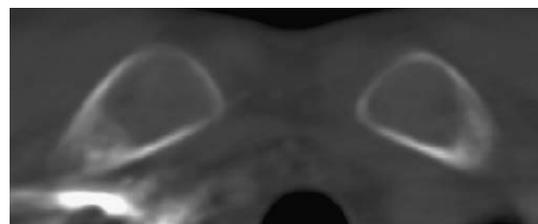
**Figure n° III-2 B- Stade 2.**



**Figure n° III-2 C- Stade 3.**



**Figure n° III-2 D- Stade 4.**



**Figure n° III-2 E- Stade 5.**

**Figures n° III-2** – Stades tomодensitométriques de maturation osseuse des extrémités médiales claviculaires. **A** : stade 1, absence de noyau d'ossification secondaire ; **B** : apparition du noyau d'ossification secondaire ; **C** : stade 3, début de fusion du noyau d'ossification secondaire ; **D** : stade 4, fusion complète du noyau d'ossification secondaire avec persistance d'une cicatrice hyperdense à la jonction métaphyso-épiphyseaire ; **E** : stade 5, fusion complète du noyau d'ossification secondaire sans cicatrice hyperdense à la jonction métaphyso-épiphyseaire (modifié, d'après Schulze et al., 2006).

Dans notre étude, plusieurs éléments anatomiques ont été étudiés en imagerie en coupe : la première côte droite, la quatrième côte droite, la surface auriculaire, la symphyse pubienne et l'articulation fémoro-tibiale. Deux techniques d'imagerie en coupe ont été utilisées : la tomодensitométrie multicoupe et l'imagerie par résonance magnétique nucléaire. Chacun des éléments anatomiques a été étudié dans le but d'estimer son apport possible dans la détermination de l'âge d'un individu. Certains de ces éléments anatomiques comportent des critères de stadifications transposables de l'os sec à l'imagerie en coupe, d'autres présentent des critères propres à l'imagerie en coupe, qui n'avaient jamais été étudiés ou décrits auparavant. Ce chapitre est une discussion générale des différents résultats présentés dans la partie II de cette thèse.

### **1.1. Les critères transposés de l'anthropologie physique à l'imagerie en coupe**

#### **1.1.1. Discussion et limites de l'étude tomодensitométrique de la quatrième côte droite**

L'objectif de ce travail était de montrer si, au support osseux, pouvaient se substituer les reconstructions tomодensitométriques. Compte-tenu de la faible taille de l'échantillon d'analyse et de l'impossibilité de traiter séparément les deux sexes, nous ne pourrions pas conclure en termes de fiabilité statistique de la méthode.

Nous pouvons tout d'abord voir que nos résultats en matière de **variabilité inter-observateur sur os secs** (donc pour la méthode originale) restent acceptables. La concordance entre deux observateurs est très bonne et la corrélation entre elles est significative. De 88.9 à 91.7 % des cotations regroupent les accords parfaits et les désaccords partiels (soit plus ou moins une phase de désaccord). Sur les reconstructions tomодensitométriques, la corrélation et la concordance sont superposables à celles de l'os sec, avec de 83.3 à 86.1 % des cotations regroupent les accords parfaits et les désaccords partiels.

Dans le cas de la **variabilité intra-observateur**, nous pouvons conclure de manière équivalente. La part d'accords parfaits est très proche entre les deux supports, passant de 50 % sur os secs à 47.2 % sur les reconstructions tomодensitométriques et le pourcentage d'observations à plus ou moins une phase d'écart est même plus élevé pour les images tomодensitométriques (86.1 %) que pour les observations sur os secs (80.6 %). De plus, les

concordances entre deux observations consécutives sont identiques et les corrélations sont très proches.

Concernant **l'erreur inter-méthode**, les résultats varient selon l'observateur considéré. Le pourcentage d'accords parfaits varie de 30.6 à 44.4 %, ce qui constitue des valeurs très faibles. Cependant le pourcentage à plus ou moins une phase d'écart se situe entre 66.7 % (pour l'observateur présentant la plus grande dispersion de phases) et 80.6 %, cette dernière valeur identique à celle obtenue en intra-observateur sur os secs, et appartenant à l'intervalle des valeurs pour la variabilité inter-observateur en utilisant la méthode décrite par Iscan. Les données concernant les concordances entre les deux méthodes indiquent que les valeurs de l' $\alpha$  de Krippendorff sont similaires à ceux calculés pour l'erreur inter-observateur. Dans la mesure où l'on ne peut pas comparer ces valeurs nous ne pouvons que remarquer que l'erreur inter-méthode est de même dimension que l'erreur inter-observateur.

Lors de la **comparaison des codages** sur les deux supports différents, il apparaît que les phases définies par l'observation des reconstructions tomодensitométriques ont tendance à être sous-estimées pour les phases codées 4 ou plus d'après l'os sec, alors qu'elles sont globalement surestimées pour les phases plus jeunes. Ceci peut s'expliquer de plusieurs manières :

- l'un des critères de détermination des phases 4 et supérieures est l'amincissement des parois du puits sternal qui n'est pas toujours clairement visible sur le scanner sans avoir accès à l'ensemble des coupes transversales des côtes, et parce que la reconstruction lisse parfois les reliefs lorsqu'ils sont très fins (comme c'est le cas par exemple lorsque le bord du mur devient plus aigu).

- la notion de porosité reste parfois délicate à mettre en évidence : au moment de la reconstruction il faut parfois choisir entre une vision lisible des bords du puits sternal (et donc perdre de l'information sur la densité osseuse), ou une représentation de la dégradation de l'os (qui peut alors faire disparaître certains contours utiles).

- cependant l'un des intérêts des reconstructions tomодensitométriques bi et tridimensionnelles est d'avoir accès à des structures que le mode de traitement pour obtenir un os propre peut éliminer ou endommager, comme par exemple des calcifications ou des ostéophytes fragiles et dont la lecture sur image tomодensitométrique est rendue possible, ce qui provoque parfois une légère surestimation de phase par rapport à l'observation sur os secs.

Les limites de cette étude sont liées en partie à son petit effectif et à son affinité populationnelle exclusivement caucasoïde. Il serait intéressant de prolonger cette étude sur

une population plus importante en terme de nombre d'individu étudiés et également multi-ethnique. De plus, la validation de la transposabilité de la méthode Iscan sur la quatrième côte droite étant démontrée, il serait intéressant de prolonger cette étude sur l'analyse d'extrémités sternales de quatrièmes côtes droites à partir d'exams tomodensitométriques cliniques, comme cela a été fait dans ce travail de thèse pour la première côte droite, mais sur une population plus générale concernant l'âge des sujets étudiés et non pas focalisé sur une tranche d'âge d'étude particulière. Ceci pourrait permettre, compte-tenu des progrès en imagerie médicale, de préciser l'applicabilité de la méthode décrite par Iscan et d'y apporter certaines modifications afin d'adapter les critères morphologiques aux images disponibles. Il est aussi envisageable de définir des critères propres à l'imagerie médicale, comme par exemple l'utilisation de données métriques exploitées par la suite de manière morphométrique et par méthode procruste sur la morphologie du puits sternal.

### 1.1.2. Discussion et limites de l'étude tomodensitométrique de la surface auriculaire

Plusieurs critères ostéoscopiques ont été **transposés**, parmi ceux-ci, on retiendra :

#### - L'organisation transverse :

Au début de cette étude, elle devait être évaluée à la fois sur les coupes MPR et sur les reconstructions VRT. Lors des analyses préliminaires, l'appréciation de l'organisation transverse s'est avérée très délicate et non reproductible sur les coupes multiplanaires 2D. La concordance entre les reconstructions tridimensionnelles et l'étude sur os secs était bonne ( $\kappa = 0,73$ ). La présence d'une organisation transverse importante isole les sujets les plus jeunes de ceux présentant une organisation transverse modérée ou absente, avec un très faible chevauchement : la présence d'une organisation transverse nette, visualisée sur les deux hémifaces permet dans cette étude de cibler les sujets de moins de 40 ans. En revanche, la disparition progressive et chronologiquement variable de l'organisation transverse entraîne un fort chevauchement en terme d'âge entre les surfaces présentant une organisation qualifiée de modérée et celles sans organisation résiduelle. Ceci concorde avec l'étude de Lovejoy, qui indiquait qu'un certain degré d'organisation transverse pouvait persister sur des surfaces âgées (Lovejoy *et al.*, 1985).

#### - La macroporosité :

La comparaison de l'évaluation de la macroporosité par les différentes modalités apporte des renseignements intéressants. Alors que la concordance de l'évaluation d'après les images 3D

et les os secs est très bonne pour ce critère ( $\kappa = 0.90$ ), cette concordance est bien moindre entre les études 2D et 3D ( $\kappa = 0.65$ ) et entre les études 2D et sur os secs ( $\kappa = 0.59$ ).

La sensibilité à la porosité est plus importante pour les reconstructions 3D que pour les coupes MPR. En effet, 16 surfaces auriculaires ne présentaient aucune macroporosité en 3D alors que 22 n'en présentaient pas en 2D.

### - La **texture de surface** :

Selon Lovejoy, l'évolution typique de la **texture de la surface** se fait d'une granulation initialement fine, devenant plus grossière avec l'âge puis disparaissant et laissant la place à une surface dense organisée sous forme d'îlots. Chamberlain fixe la limite entre la granulation fine et grossière à un calibre de 0.5 mm (Buckberry et Chamberlain, 2002). Lors d'analyses préliminaires, l'évaluation de la texture de la surface a donc été appréciée selon deux critères : d'une part, **l'importance de la surface couverte par les îlots denses**, en reprenant ainsi le critère de Buckberry et Chamberlain, d'autre part le **type de texture dominante**. Le critère concernant l'importance de la surface couverte par les îlots denses s'est montré inapproprié car non reproductible, que ce soit d'une modalité à l'autre ou d'un observateur à l'autre. Pour le critère concernant la texture dominante, trois gradations étaient initialement prévues, correspondant à une surface lisse et régulière, une dominante de granulations grossières ou une dominante d'îlots denses. Il s'est avéré que le chevauchement et l'interpolation fréquente de ces deux types de textures les rendaient non informatifs l'un vis-à-vis de l'autre pour l'estimation de l'âge. Ces deux textures, correspondant à une surface irrégulière ont donc été regroupées au sein d'un même grade : *in fine*, la **texture** était considérée comme **régulière** ou **irrégulière**, quelque soit le type d'irrégularités présentes. Cette simplification aboutit à un critère moins informatif mais qui isole correctement les sujets les plus jeunes devant la constatation d'une texture régulière.

### - Les **activités apicales et rétro auriculaire** :

**Les activités apicale et rétro auriculaire** sont considérées par Lovejoy comme des critères secondaires, mais potentiellement informatifs. Les résultats démontrent un fort chevauchement entre les activités modérées et importantes.

Plusieurs critères ostéoscopiques n'ont pu être **transposés** :

- La **microporosité** de la surface auriculaire n'est pas accessible à la résolution du scanner 16 barrettes utilisé dans cette étude.

- Les **granulations fines** rentrant dans le cadre de l'évaluation de la texture osseuse ne sont pas accessibles à l'examen tomодensitométrique du fait d'un calibre de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de coupe.
- Le critère concernant l'importance de la **surface couverte par les îlots denses** pour l'étude de la texture de la surface s'est montré inapproprié car non reproductible, que ce soit d'une modalité à l'autre ou d'un observateur à l'autre.

Les limites de cette étude sont liées en partie à son petit effectif et à son affinité populationnelle exclusivement caucasoïde. Il serait intéressant de prolonger cette étude sur une population plus importante en terme de nombre d'individu étudiés et également multi-ethnique. De plus, la résolution d'acquisition utilisée ici nécessite toutefois un protocole particulier qui serait à l'origine d'une irradiation supplémentaire, inacceptable car non justifiée dans l'approche diagnostique chez le patient. Même si les évolutions des imageurs permettent, sans les limites techniques précédemment décrites, une résolution suffisante et une meilleure adaptation de la dose délivrée, il est peu probable de pouvoir utiliser des acquisitions de routine pour constituer un échantillon plus important. En revanche, l'autopsie virtuelle fournit un contexte privilégié pour poursuivre cette voie de recherche. En effet, l'irradiation est alors sans objet et toutes les méthodes existantes pourront être mise en œuvre afin de déterminer l'âge et le sexe de l'individu sous réserve que le corps soit retrouvé dans sa totalité.

Les possibilités de **segmentation** offertes par le scanner permettent la décoaptation virtuelle de grosses articulations telles que la hanche ou le genou. Ceci est facile pour les diarthroses de type énarthrose ou condylienne, du fait de structures osseuses nettement séparées par l'interposition d'une lame liquidienne synoviale. Dans le cas de l'articulation sacro-iliaque toutefois, la proximité des structures osseuses et l'existence de ponts osseux (intra ou extra articulaires) ou de productions osseuses reliant les berges articulaires rendent l'opération hasardeuse, et les essais réalisés n'ont pas conclus à la faisabilité en un temps acceptable d'une telle décoaptation virtuelle, dans l'état actuel des techniques de segmentation. Toutefois cette perspective mérite d'être gardée à l'esprit, au vu de l'intérêt potentiel des informations dérivées de la surface auriculaire afin d'estimer l'âge du sujet de façon préférentielle, sinon exclusive dans un contexte d'**autopsie virtuelle** sur des sujets présentant un interligne articulaire sacro-iliaque important, comme cela peut être le cas secondairement aux phénomènes taphonomiques sur des individus momifiés. Cette étude de la surface auriculaire, dans ce cadre d'utilisation bien spécifique est intéressante car le score global 3D permet une

utilisation pratique de la méthode de détermination d'âge au décès à partir de l'étude de la surface auriculaire. Les valeurs limites de ce score permettent de déterminer si le sujet étudié a plus ou moins de 40 ans ou plus ou moins de 60 ans. Elles sont variables en fonction du choix de cet âge limite. Ainsi, la limite de **3/9** sera retenue pour déterminer si l'individu a plus ou moins de **40** ans (sensibilité : 0.90 ; spécificité : 0.92) et de **5/9** pour déterminer si l'individu plus ou moins de **60** ans (sensibilité : 0.73 ; spécificité : 0.66).

### **1.1.3. Discussion et limites de l'étude tomодensitométrique de la symphyse pubienne**

L'objectif de ce travail était de montrer si, au support osseux, pouvaient se substituer les reconstructions tomодensitométriques. Compte tenu de la faible taille de l'échantillon d'analyse et de l'impossibilité de traiter séparément les deux sexes, nous ne pourrions pas conclure en termes de fiabilité statistique de la méthode. Toutefois, il apparaît que les reconstructions tridimensionnelles effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 0.6 mm d'épaisseur reconstruites tous les 0.3 mm, en filtre mou ou dur ne sont pas plus performantes pour déterminer la phase de Suchey-Brooks que les reconstructions effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm. La plus faible variabilité inter-méthode entre l'os sec et un paramètre de reconstruction correspond à celle calculée entre l'os sec et les reconstructions tridimensionnelles effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm, en filtre dur, avec une valeur du Kappa de Cohen égal à 0.72, ce qui est bon. Viennent ensuite les reconstructions tridimensionnelles effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm, en filtre mou, avec une valeur du Kappa de Cohen égal à 0.70, ce qui est également bon. Ainsi, les reconstructions tridimensionnelles effectuées à partir du filtre dur permettaient une meilleure stadification que celles effectuées à partir du filtre mou, même si, visuellement, les reconstructions en filtre mou ont un aspect iconographique plus esthétique, car plus lissé et moins bruité. Cet avantage esthétique est un inconvénient en termes d'analyse car le lissage fait disparaître ou adoucit des différences de reliefs.

Les résultats obtenus au cours de cette étude ne sont pas en opposition avec ceux obtenus par Telmon *et al.* . Les meilleurs résultats obtenus en matière d'erreur inter-méthode par Telmon *et al.* peuvent être expliqués par le fait que notre population d'étude était plus âgée, avec un âge moyen de l'échantillon étudié par Telmon *et al.* de 40.7 ans contre 50.3 ans dans la

présente étude, mais également plus homogène en terme de représentativité de chaque décade d'âge, de sexe et de phases de Suchey Brooks.

Par ailleurs les paramètres d'acquisition choisis (coupes de 1 mm d'épaisseur reconstruits tous les 0.8 mm) sont peut être plus optimaux que les nôtres. En effet, les reconstructions effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 0.6 mm d'épaisseur reconstruites tous les 0.3 mm sont délétères en terme de classification par rapport aux reconstructions effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm. En suivant le même raisonnement, il est possible de penser que les reconstructions effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm sont moins performantes en terme de classification par rapport aux reconstructions effectuées à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 1 mm d'épaisseur reconstruites tous les 0.8 mm.

Cette étude confirme cependant que le choix du filtre de reconstruction est important. Ainsi, il apparaît que pour les reconstructions tridimensionnelles, le filtre dur soit plus indiqué que le filtre mou, indépendamment de l'épaisseur de coupe choisie. Il est important d'avoir également à l'esprit le fait que cette étude sur la symphyse pubienne n'était qu'une étude préliminaire. La mise en évidence que des reconstructions tomodensitométriques tridimensionnelles effectuées à partir d'acquisitions effectuées en coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm en filtre dur sont suffisamment précises pour déterminer correctement le stade de maturation de la symphyse pubienne en utilisant la classification de Suchey-Brooks ouvre une autre voie de recherche qui est celle de l'utilisation d'exams tomodensitométriques effectués en clinique, tel que cela a été fait dans cette thèse pour la première côte droite. Les limites de cette étude sont liées en partie à son petit effectif et à son affinité populationnelle exclusivement caucasöide. Il serait intéressant de prolonger cette étude sur une population plus importante en terme de nombre d'individu étudiés et également multiethnique. La plupart des exams tomodensitométriques abdomino-pelviens étant effectués en coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm, ceci permettrait une étude avec des effectifs beaucoup plus importants que dans la présente étude.

## 1.2. Les critères propres à l'imagerie en coupe

### 1.2.1. Discussion et limites de l'étude tomодensitométrique de la première côte droite

Cette côte est facilement accessible sur des examens d'imagerie tomодensitométrique thoracique. Sur des individus vivants, dans une problématique de détermination de l'âge l'extrémité médiale de la clavicule a déjà fait l'objet de nombreuses publications. Certaines sont basées sur l'analyse radiographique simple (Schmeling et *al.*, 2004 ; Schulz et *al.*, 2008), mais d'autres sur des coupes axiales tomодensitométriques (Kreitner et *al.*, 1998 ; Schulz et *al.*, 2005 ; Schulze et *al.*, 2006).

#### - Reconstructions tridimensionnelles :

Dans notre étude, nous avons mis en évidence une bonne corrélation entre les modifications morphologiques de l'extrémité sternale de la première côte droite et l'âge civil des individus étudiés. La comparaison entre les hommes et les femmes a démontré une différence statistiquement significative, et ce, pour les différents stades tridimensionnels. A stade tridimensionnel identique, les femmes étaient plus âgées que les hommes.

Plusieurs résultats nous semblent intéressants pour la pratique médico-légale :

- le **stade 2** était atteint pour les deux sexes avant l'âge de 18 ans,
- le **stade 4** était atteint pour les deux sexes au plus tôt à l'âge de 18 ans.

De plus, cette stadification tridimensionnelle est une technique présentant des variabilités intra et inter-observateur correctes comme en attestent les valeurs des coefficients de Kappa de Cohen.

#### - Reconstructions bidimensionnelles :

L'étude bidimensionnelle s'intéressant aux becs osseux et aux calcifications intra cartilagineuses est également intéressante. Cette analyse, notamment à la recherche de calcifications au sein du cartilage, reliées ou non à la surface sternale de la côte est facilement réalisable en tomодensitométrie. Ces éléments d'information, en cas de calcifications chondrales non reliées à la côte sont des éléments qui ne sont pas accessibles à l'étude sur os secs, car perdus au cours de la préparation des os. Ce critère semi quantitatif nous semble relever d'une grande importance pour la détermination de l'âge d'un individu.

Plusieurs résultats présentent également un intérêt médico-légal :

- chez les individus de sexe masculin, un **score nul** concernant le critère bidimensionnel **aspect** des POC signifie que le sujet a un âge inférieur à 25 ans (cf. tableau n° II-11 et figures n° II-6),
- chez les individus de sexe féminin, la présence d'un **score égal à 2** concernant le critère bidimensionnel **aspect** des POC signifie que le sujet a un âge supérieur à 18 ans (cf. tableau n° II-11 et figures n° II-6),
- la présence de calcifications importantes et extensives, en rapport avec un **score égal à 3** concernant le critère bidimensionnel **aspect** des POC a été mise en évidence chez des individus de plus de 18 ans chez les hommes et chez les femmes (cf. tableau n° II-11 et figures n° II-6).
  
- chez les individus de sexe masculin, un **score égal à 1** concernant le critère bidimensionnel **nombre** de POC signifie que le sujet a un âge supérieur à 18 ans (cf. tableau n° II-10 et figures n° II-5),
- chez les individus de sexe féminin et masculin, la présence d'un **score égal à 2** concernant le critère bidimensionnel **nombre** de POC signifie que le sujet a un âge supérieur à 18 ans (cf. tableau n° II-10 et figures n° II-5).

Il n'a pas été mis en évidence de différence statistiquement significative entre les individus de sexe masculins et féminins concernant les critères nombre et aspect des POC.

Enfin, cette stadification bidimensionnelle est une technique présentant un intérêt pratique car ses variabilités intra et inter-observateur sont excellentes.

Les limites de cette étude sont liées en partie à son affinité populationnelle exclusivement caucasioïde. Il serait intéressant de prolonger cette étude sur une population plus importante en terme de nombre d'individus étudiés et également multiethnique. De plus, cette étude s'est concentrée sur l'étude de la première côte droite. Les différents auteurs qui ont étudié précédemment cet os ne précisent pas la latéralité de l'os examiné car indiquent qu'il n'existe pas de différence significative entre la côte droite et la côte gauche. Cette étude s'est également focalisée sur une tranche d'âge particulière, qui pourra par la réalisation d'études ultérieures, être élargie. Il est également à noter que le recueil d'images natives a été effectué à partir d'appareils différents, présentant des matrices différentes, avec des collimations différentes. Toutefois, l'adaptation tomодensitométrique des descriptions de Kunos en différents stades est une technique qui apparaît comme étant non seulement corrélée à l'âge mais également reproductible. Les études tri et bidimensionnelles apparaissent comme

étant complémentaires puisque apportant des renseignements morphologiques différents. L'analyse 3D permet une étude de l'extrémité sternale de la première côte et la 2D de la quantification de productions osseuses à point de départ costal ou bien de calcifications intra cartilagineuses, l'ensemble de ces critères étant corrélé à l'âge.

### 1.2.2. Discussion et limites de l'étude tomодensitométrique de la surface auriculaire

L'intérêt porté aux modifications de l'architecture de l'os trabéculaire dans l'estimation de l'âge au décès repose sur les constatations d'Acsadi et Nemeskeri (Acsadi et Nemeskeri, 1970). Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'architecture trabéculaire de l'os coxal. La constatation d'une orientation privilégiée des trabécules en faisceaux a été mise en relation avec les transferts de charges impliquant l'os trabéculaire du bassin. Cependant, aucune étude ne s'est intéressée à l'altération dégénérative de ces mêmes faisceaux au cours de la vie. Dans le cadre de cette étude, se proposant de participer à l'estimation de l'âge au décès à partir du pelvis postérieur, les acquisitions tomодensitométriques ont permis de mettre en évidence une altération du faisceau auriculo-acétabulaire décrit par Kapandji, se superposant avec le faisceau sacro-pubien de Correnti. L'acquisition tomодensitométrique centrée sur la surface auriculaire, visualisant la partie postérieure du faisceau auriculo-acétabulaire était propice à cette étude du fait de sa résolution spatiale supérieure et du filtre ultra dur employé (B 80).

Les critères décrits en tomодensitométrie à partir des reconstructions bidimensionnelles sont les suivants :

#### - Le faisceau auriculo-acétabulaire :

L'intégrité du faisceau auriculo-acétabulaire dans sa partie postérieure était évaluée par la visibilité d'une part **de la ligne centrale** et d'autre part **de cellules orientées selon sa direction** et présentes à son contact, nommées **cellules juxtalinéaires**. Elle s'avère avoir une très bonne corrélation avec l'âge, en particulier pour la visibilité des cellules du faisceau. Ainsi l'association de cellules juxtalinéaires visibles et d'une ligne centrale continue ne présente qu'un très faible chevauchement avec l'association de ligne absente et de cellules absentes. De fait, la perte du caractère net et continu de la ligne centrale associée à la disparition des cellules juxtalinéaires, permet d'isoler correctement les individus de plus de 50 ans. En outre, la reproductibilité est très bonne et témoigne de la facilité d'utilisation du critère : les coefficients kappa de concordance intra et inter observateurs sont respectivement de 0.89 et 0.82 pour la ligne centrale et de 0.77 et 0.77 pour les cellules juxtalinéaires.

- Le **gradient osseux** de part et d'autre du faisceau auriculo-acétabulaire :

Cette étude confirme par ailleurs qu'il existe chez les sujets les plus jeunes une **différence de densité de part et d'autre du trajet du faisceau**, et que ce critère peut être utilisé dans l'estimation de l'âge au décès. Ce **gradient** a été évalué visuellement et donc sujet à une part de subjectivité. La mesure d'une densité suppose que soient définies les régions d'intérêt et que celles-ci soient reproductibles. L'appréciation nécessitant d'intégrer l'éventuelle différence de densité observée sur l'étendue de la surface auriculaire, ceci plaide pour une analyse visuelle plutôt que la définition de multiples régions d'intérêt. La variabilité intra et inter-observateur du gradient est bonne (concordances respectives de 0.89 et 0.85), malgré le choix d'une quantification à trois grades. Cette bonne reproductibilité plaide *a posteriori* pour la conservation de cette évaluation visuelle du gradient.

Dans cette étude, la visualisation du faisceau auriculo-acétabulaire et le gradient de densité de l'os trabéculaire autour du faisceau sont aptes à identifier avec confiance les individus de plus de 50 ans. Cette possibilité d'identifier correctement les sujets les plus âgés est peut être l'intérêt majeur de la méthode de Lovejoy, comme le confirme une comparaison récente entre différentes techniques (Martrille *et al.*, 2007), où la méthode de Lovejoy s'avère la plus précise dans le groupe « 41 - 60 ans ».

Les limites de cette étude sont liées en partie à son petit effectif et à son affinité populationnelle exclusivement caucasoïde. Il serait intéressant de prolonger cette étude sur une population plus importante en terme de nombre d'individu étudiés et également multi-ethnique. De plus, la résolution d'acquisition utilisée ici nécessite toutefois un protocole particulier qui serait à l'origine d'une irradiation supplémentaire, inacceptable car non justifiée dans l'approche diagnostique chez le patient. Toutefois, comme nous le verrons dans le chapitre 2 suivant, cette évaluation semble applicable sur des examens effectués en coupe de 2 mm reconstruits tous les 2 mm. Ceci, bien que constaté sur un nombre très réduit de cas est particulièrement intéressant car ouvre une possibilité d'études ultérieurs à partir d'examens tomodensitométriques cliniques, avec pour corolaire un grand nombre d'individus potentiellement étudiables.

Cette étude de la surface auriculaire, dans ce cadre d'utilisation bien spécifique est intéressante car le score global 2D permet une utilisation pratique de la méthode de détermination d'âge au décès à partir de l'étude de la surface auriculaire. Les valeurs limites de ce score permettent de déterminer si le sujet étudié a plus ou moins de 40 ans ou plus ou

moins de 60 ans. Elles sont variables en fonction du choix de cet âge limite. Ainsi, la limite de **2/7** sera retenue pour déterminer si l'individu a plus ou moins de **40** ans (sensibilité : 0.94 ; spécificité : 0.86) et de **4/7** pour déterminer si l'individu plus ou moins de **60** ans (sensibilité : 0.87 ; spécificité : 0.84). On note que la méthode de reconstruction bidimensionnelle présente une meilleure sensibilité et spécificité si la question concerne un âge supérieur ou inférieur à 40 ans. Ainsi, au-delà de l'adaptation de critères classiques, la présente recherche a permis d'individualiser des critères propres à cette approche tomodynamométrique de l'estimation de l'âge au décès. Intéressant l'évolution de l'architecture en faisceaux de l'os trabéculaire présente au niveau du bassin, ces critères, rappelant ceux d'Acsadi et Nemeskeri, s'avèrent informatifs quand à l'âge au décès, et potentiellement prometteurs pour l'identification des sujets les plus âgés. La reproductibilité des critères d'estimation d'âge au décès est satisfaisante, et leur lecture, simple, ne requiert pas d'expérience particulière. Toutefois, les critères de l'os trabéculaire, plus encore que ceux transposés des méthodes développées sur l'os sec, nécessitent une évaluation plus poussée, en utilisant un échantillon différent de l'échantillon de référence. Dans cette étude, il n'était pas possible d'évaluer l'influence du sexe sur l'altération des structures étudiées, et encore moins de prendre en compte d'éventuelles variations inter-populationnelles. L'intérêt de la tomodynamométrie est toutefois majeur dans l'étude des remaniements de l'os trabéculaire, au vu de la facilité, de la rapidité et du caractère non invasif de la mise en œuvre, par rapport aux techniques historiques qui s'en rapprochent telles que celles d'Acsadi et Nemeskeri. Cette approche non destructive est particulièrement souhaitée en paléanthropologie. En parallèle, l'approche non invasive tomodynamométrique de l'estimation de l'âge et de la détermination du sexe est en passe de devenir un outil pertinent et reproductible d'identification en médecine légale, ce que reflète l'essor de l'autopsie virtuelle. Cette étude, visant à évaluer la faisabilité d'une approche tomodynamométrique à mettre en évidence de nouveaux critères, dévoile des perspectives, notamment en ce qui concerne l'os trabéculaire. Une évaluation sur un échantillon plus important, indépendant, en veillant à la distribution par âge de l'échantillon, permettra de conclure en proposant une probabilité d'âge *a posteriori*.

### **1.2.3. Discussion et limites de l'étude tomodynamométrique de la symphyse pubienne**

L'échantillon étudié étant de petite taille et ne comportant pas d'individu de phase VI, l'analyse des résultats ne nous permet pas de faire d'affirmation, de plus, il n'est pas possible

de dire si les différences entre les coefficients de concordance sont significatives. Toutefois, l'étude de la symphyse pubienne et de son vieillissement au cours du temps par les critères symphysaires bidimensionnels permet de retrouver des éléments ostéoscopiques permettant la classification en quatre phases biologiques. Ainsi, on note que :

- le critère **crête** présente des modifications morphologiques significativement liées aux stades de Suchey-Brooks, avec des crêtes *visibles* ou *importantes* présentes dans 100 % des phases I et II de Suchey-Brooks et *absentes* dans 100 % des phases supérieures ou égales à la phase III de Suchey-Brooks. Ce critère permet donc d'isoler correctement les individus les plus jeunes, en phase pré-épiphysaire,

- la **délimitation de l'extrémité supérieure** lorsqu'elle est *absente* ou *débutante*, est le plus fréquemment observée pour des phases inférieures ou égales à la phase II de Suchey-Brooks, permettant donc d'isoler les individus les plus jeunes, en phase pré-épiphysaire,

- la **délimitation de l'extrémité inférieure** lorsqu'elle est *présente* est le plus fréquemment observée pour des phases inférieures ou égales à la phase III de Suchey-Brooks, permettant donc d'isoler des individus relativement jeunes,

- le critère **anneau symphysaire** présente des modifications morphologiques significativement liées aux stades de Suchey-Brooks ; lorsqu'il est *complet*, il est observé dans 100 % des phases supérieures ou égales à la phase IV de Suchey-Brooks, correspondants aux phases pré dégénératives ou dégénératives. Un anneau *incomplet avec un hiatus* est observé dans 100 % des phases IV de Suchey-Brooks,

- le critère **aspect de la surface articulaire** présente des modifications morphologiques significativement liées aux stades de Suchey-Brooks ; une surface *concave* est observée dans 100 % des phases supérieures ou égales à la phase IV de Suchey-Brooks, correspondantes aux phases pré dégénératives ou dégénératives,

- le **rempart ventral** lorsqu'il est *complet*, est observé pour des phases supérieures ou égales à la phase IV de Suchey-Brooks, correspondantes aux phases pré dégénératives ou dégénératives,

- les **ostéophytes** lorsqu'ils sont *présents*, sont observés pour des phases supérieures ou égales à la phase IV de Suchey-Brooks, correspondantes aux phases pré dégénératives ou dégénératives.

Les limites de cette étude sont liées en partie à son petit effectif et à son affinité populationnelle exclusivement caucasoïde. Il serait intéressant de prolonger cette étude sur

une population plus importante en terme de nombre d'individu étudiés et également multi-ethnique. Les reconstructions bidimensionnelles des symphyses pubiennes semblent être capables, par les changements morphologiques de certains critères au cours du vieillissement, d'isoler les individus en phase pré épiphysaire et ceux en phase dégénérative. Ceci ouvre également une voie de recherche supplémentaire qui est celle de l'utilisation d'examen tomographiques effectués en clinique puisque cette étude préliminaire a été réalisée à partir de l'acquisition effectuée sur des coupes de 2 mm d'épaisseur reconstruites tous les 2 mm en filtre dur. Ceci permettra une étude avec des effectifs beaucoup plus importants que dans la présente étude et la validation des différents critères bidimensionnels étudiés lors de ce travail.

### 1.2.4. Discussion et limites de l'étude en imagerie par résonance magnétique tomographique de l'articulation fémoro-tibiale

Cet élément anatomique est le seul qui a bénéficié d'une étude par IRM. Nos résultats démontrent que l'IRM du genou est un examen utilisable pour évaluer l'âge osseux d'individus vivants masculins et féminins au-delà de l'âge de 16 ans.

Tout comme sur os secs, il existe une différence chronologique de maturation entre les physes distales fémorales et proximales tibiales en IRM. La fusion complète se faisant plus précocement sur le versant tibial.

Il existe également une différence significative de maturation sur les deux versants physaires entre les individus de sexe féminin et de sexe masculin, avec une avance des différents stades féminins sur les stades masculins. Ces constatations sont en accord avec la littérature anthropologique (Scheuer et Black, 2000).

Même s'il existe des chevauchements entre les différents stades qu'ils soient physaires fémoraux ou tibiaux, notre étude permet de retenir que la fusion complète (soit l'atteinte du stade 5 de notre classification) est atteinte le plus précocement aux âges suivants :

- pour l'échantillon **masculin** :
  - versant fémoral distal : le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 23 ans,
  - versant tibial proximal : le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 19 ans,
- pour l'échantillon **féminin** :
  - versant fémoral distal : le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 22 ans,

- versant tibial proximal : le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 17 ans.

Ces résultats concernant les âges les plus précoces auxquels la fusion complète est atteinte, que cela soit sur les versants fémoraux ou tibiaux est en désaccord avec les âges fournis par Pyle et Hoerr. Il existe donc un désaccord entre les conclusions radiographiques de Pyle et Hoerr et les résultats en IRM. Il apparaît donc que la fusion complète a été décrite par Pyle et Hoerr comme pouvant être acquise plus précocement qu'en IRM. Par contre, on note que les conclusions faites sur os secs par McKern et Stewart sont compatibles avec celle de notre étude. Ainsi, les résultats en IRM sont en accord avec ceux secondaires à une analyse sur os secs. L'explication la plus probable concernant le désaccord entre la radiographie et l'IRM est que dans les cas où la radiographie permet le diagnostic d'une fusion complète, l'IRM, de part sa meilleure résolution spatiale et en contraste est plus discriminante et peut permettre de différencier parmi ces individus des stades IRM 3, 4 ou 5. La résolution en contraste de l'IRM permet en effet facilement le diagnostic d'œdème et donc d'hypersignal à la jonction métaphyso-épiphysaire, zone où la radiographie simple peut diagnostiquer de façon erronée une fusion métaphyso-épiphysaire complète.

La limite principale de cette étude est l'absence de renseignement concernant l'origine géographique de la population étudiée. Toutefois, Schmeling a déjà démontré que l'origine ethnique ne joue pas de rôle dans la maturation squelettique, contrairement aux conditions socio-économiques auxquelles le sujet est soumis (Schmeling et *al.*, 2000). Dès lors, l'ensemble de la population étudiée ayant bénéficié d'une IRM dans les Hôpitaux de Toulouse, on peut penser que tous les individus étaient de la région toulousaine, et présentaient donc au plan socio-économique une relative homogénéité, en tous les cas au moins superposable à celle du territoire français d'une façon générale. Il est également important de noter qu'au cours de cette étude, la latéralité du genou n'a pas été prise en compte. Toutefois, l'IRM du genou semble être une possibilité intéressante de détermination d'âge chez le vivant. Notre étude a permis la mise en évidence le caractère robuste, reproductible de la méthode, utilisable même par des non radiologues. Son caractère non irradiant en termes de rayons X est un avantage manifeste, comparé aux techniques radiographiques traditionnelles utilisées actuellement. Cette nouvelle application sur l'IRM devra être testée sur d'autres articulations mais également sur des populations ayant des niveaux socio-économiques différents plutôt que sur des individus d'affinités populationnelles différentes.

## Chapitre 2

### **Etude tomодensitométrique en anthropologie médico-légale : illustration pratique de la détermination de l'âge d'individus non identifiés à partir de deux exemples**

---

Ce chapitre est une illustration pratique des possibilités offertes par la tomодensitométrie en médecine légale et en anthropologie qui ont été détaillées dans la deuxième partie de cette thèse en matière de détermination d'âge au décès.

Deux exemples ont donc été choisis pour leur intérêt pratique dans le cadre de l'identification de personnes. Le premier exemple est un cas pratique d'identification anthropologique contemporain sur un sujet qui habitait la région toulousaine. Le second un cas concerne une momie naturelle sibérienne du XIX<sup>ème</sup> siècle.

**L'ensemble de ces deux cas n'est pas présenté dans ce chapitre.** En effet, le travail effectué sur des deux individus s'intégrait dans un cadre exhaustif d'identification, dépassant la thématique de détermination de l'âge au décès.

## **2.1. Autopsie virtuelle et identification médico-légale – Application pratique : à propos d'un cas contemporain**

L'utilisation *post mortem* de la tomodensitométrie multicoupe et de l'imagerie par résonance magnétique est en constante croissance (Plattner *et al.*, 2003 ; Thali *et al.*, 2002 ; 2003 a ; 2003 b ; 2003 c). Ces techniques d'imagerie en coupe ont de nombreux avantages comparés à l'autopsie conventionnelle : elles sont non invasives, permettent une visualisation de l'intérieur du corps sans endommager son aspect extérieur. De plus les données peuvent être stockées et réinterprétées à n'importe quel moment dans le temps.

Le cas présenté illustre les possibilités de la tomodensitométrie *post mortem*. D'un point de vue médico-légal, il est possible de déterminer les causes de la mort, de diagnostiquer des pathologies non mortelles ; d'un point de vue anthropologique, il est possible d'estimer l'âge d'une victime non identifiée et révéler des éléments d'identification potentiels.

### **2.1.1. Matériel et méthodes**

#### **2.1.1.1. L'histoire du cas**

Le corps d'une femme âgée a été découvert au sein d'une écluse, dans la région toulousaine. Après que cette dernière ait été extraite de l'eau par les pompiers à l'aide d'une corde autour du cou, un examen externe réalisé sur place a permis de constater la présence de multiples plaies contuses du scalp. Compte tenu de ce contexte et de l'absence d'identité de l'intéressée, une autopsie médico-légale ainsi qu'une étude anthropologique étaient décidées.

#### **2.1.1.2. Protocole d'imagerie**

L'anonymat du défunt était préservé et le corps contenu dans deux housses radio-transparentes. Une exploration tomodensitométrique a été effectuée, corps entier, excluant cependant pour des raisons techniques les membres inférieurs, en 16 \* 0.75 mm sur un appareil 16 barrettes (Siemens, Erlangen, Allemagne).

L'étude anthropologique a été effectuée à partir de critères déterminés et utilisés sur os secs. L'intégrité du corps permettait en effet de calculer son âge, son sexe, sa stature et son affinité populationnelle. La symphyse pubienne était donc virtuellement extraite à partir des images natives et les surfaces articulaires médiales examinées. Il en fut fait de même pour la quatrième côte droite. L'âge osseux de l'intéressé fut donc évalué à partir de la symphyse pubienne en utilisant la méthode de Suchey et Brooks et à partir de la quatrième côte droite

avec la méthode d'Isca (Suchey *et al.*, 1988 ; Isca, 1985). Une analyse de l'os trabéculaire des deux surfaces auriculaires d'après les résultats présentés en partie II de cette thèse fut également effectuée, même si l'épaisseur de coupe pratiquée pour cet examen était millimétrique, donc supérieure et sous optimale par rapport à celle pratiquée dans la partie II de cette thèse. Des reconstructions en deux (2D) et en trois (3D) dimensions furent effectuées sur une console de post-traitement (Leonardo, Siemens, Allemagne). Les reconstructions bidimensionnelles étaient effectuées en mode MPR (Reconstructions Multi Planaires), les reconstructions tridimensionnelles en mode MIP (Maximum Intensity Projection) et VRT (Technique de Rendu Volumique).

Le temps d'acquisition était de 10 minutes, suivi d'une heure environ de reconstruction et d'interprétation par un radiologue.

### 2.1.1.3. Etudes autopsique et anthropologique

L'autopsie médico-légale était réalisée de façon complète, examinant l'extrémité céphalique, les cavités thoracique et abdomino-pelvienne. La symphyse pubienne et l'extrémité sternale de la quatrième côte étaient prélevées au cours de l'autopsie. Ces pièces osseuses bénéficiaient par la suite d'une préparation soignée à base d'alternance de bains marie et de décharnement.

## 2.1.2. Résultats

### 2.1.2.1. Anthropologie virtuelle

La symphyse pubienne, selon la classification féminine de Suchey et Brooks correspondait à une phase V (Suchey *et al.*, 1988) (cf. figure n° III-3). Ceci correspondait à un âge moyen de 48.1 ans avec une déviation standard de 14.6 ans et un intervalle d'âge s'étendant de 25 à 83 ans pour un intervalle de confiance à 95 %.

La quatrième côte droite présentait des projections osseuses à la fois sur les murs du puits sternal et également au fond du puits (cf. figure n° III-4). Les contours étaient très irréguliers et aigus. Le puits était large, en forme de « U ». Ces éléments étaient attribués à une phase VII de la stadification féminine d'Isca (Isca, 1985). Ceci correspondait à un âge moyen de 65.2 ans avec une déviation standard de 11.2 ans et un intervalle d'âge s'étendant de 42.7 à 87.7 ans pour un intervalle de confiance à 95 %.

L'analyse de la surface auriculaire en reconstructions tridimensionnelles ne fut pas réalisée du fait de la bonne congruence des articulations sacro-iliaques et de l'impossibilité

d'isoler correctement la surface auriculaire par le biais de la segmentation semi-automatique disponible sur la console de post-traitement utilisée pour ce travail. Toutefois, sur les reconstructions bidimensionnelles en mode MPR de l'os trabéculaire des surfaces auriculaires, il était possible de mettre en évidence la ligne centrale du faisceau auriculo-acétabulaire qui était discrète et discontinue (cf. figure n° III-5). Aucun gradient au sein de l'os spongieux n'était mis en évidence de part et d'autre du faisceau. Aucune cellule juxta-linéaire n'était visible. Cependant, aucune macroporosité n'était visible. L'ensemble de ces constatations permettait de dire que de score global 2D de la surface auriculaire de cette personne était de 4/7. Ceci était compatible avec un âge supérieur à 60 ans (sensibilité : 0.87 ; spécificité : 0.84).

#### 2.1.2.2. Etude anthropologique sur os secs

La symphyse pubienne, selon la classification féminine de Suchey et Brooks correspondait à une phase V (Suchey *et al.*, 1988) (cf. figure n° III-3).

La quatrième côte droite correspondait à une phase VI de la stadification féminine d'Iscan (Iscan, 1985) (cf. figure n° III-4).

#### 2.1.3. Epilogue : confirmation de l'identité

Un avis de recherche fut publié dans les journaux locaux, sans succès. Environ cinq mois plus tard, les enquêteurs apprirent qu'une vieille femme de 71 ans avait disparu depuis environ cinq mois. La famille de l'intéressée indiquât que cette personne avait bénéficié d'une chirurgie du tibia droit, environ deux ans avant de disparaître. Une comparaison des radiographies *ante et post mortem* permis une identification de la défunte.

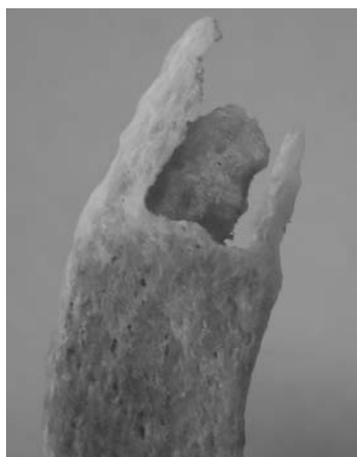


Figure n° III-3 A



Figure n° III-3 B

**Figure n° III-3** – Surface symphysaire pubienne – A : os sec ; B : reconstruction tomodensitométrique en mode VRT.

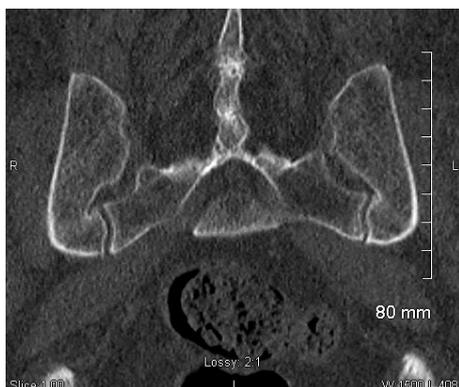


**Figure n° III-4 A**



**Figure n° III-4 B**

**Figure n° III-4** – *Quatrième côte droite* – A : *os sec* ; B : *reconstruction tomodensitométrique en mode MIP.*



**Figure n° III-5 A**



**Figure n° III-5 B**

**Figure n° III-5** – *Surfaces auriculaires, mode MPR* – A : *faisceau auriculo-acétabulaire discrètement visible ; aucune cellule juxta-linéaire n'est visible ; B : absence de gradient au sein de l'os spongieux de part et d'autre du faisceau ; aspect cependant homogène de l'os trabéculaire.*

## 2.2. Etude anthropologique virtuelle d'une momie naturelle sibérienne du XIX<sup>ème</sup> siècle

### 2.2.1. Contexte de découverte de la momie - la momie et sa tombe

La République de Sakha (Iakoutie) est une des plus grandes républiques autonome de la Fédération de Russie. Elle est située dans la partie centrale de la Sibérie Orientale. Plus de 40 % de son territoire est situé au delà du cercle polaire. Le site de fouille était localisé dans la région de Tchouraptcha. Cette région est très hostile, avec des températures oscillant entre - 65° Celsius en période hivernale et plus de 35° Celsius l'été. Cette région a été tout d'abord étudiée dès 2004 par une équipe franco-russe afin d'y effectuer des prélèvements ADN et d'étudier ainsi l'histoire de son peuplement. Depuis 2004, environ une soixantaine de tombes ont été découvertes. Les cadavres étaient dans un état de conservation variable, allant du squelette au corps congelé. Les tombes ont bénéficié d'une datation par le carbone 14 et d'une étude dendrochronologique ; elles s'étendaient du XIV<sup>ème</sup> au XIX<sup>ème</sup> siècle.

En juillet 2006, une tombe isolée sur un promontoire appelé « *Kyys Ounouogha* », littéralement la tombe de la jeune fille en langage Iakoute fut mise à jour. L'emplacement de cette tombe était inhabituel car le cercueil fut découvert à 1m30 de profondeur, ce qui représente une grande profondeur compte tenu des efforts nécessaires à creuser le sol gelé. Le cercueil contenant le corps de la jeune fille était composé de deux hémi tronc de bouleaux. L'étude dendrochronologique déterminât que les deux arbres avaient été coupés en 1728.

Le corps était celui d'une jeune fille, complètement déshydraté, et qui présentait l'apparence d'une momie naturelle (cf. figure n° III-6). Elle portait des habits et des bijoux magnifiques ; ses manches étaient cousues à leurs extrémités distales, recouvrant les mains de l'intéressée. Les habits étaient brodés avec des perles d'importation chinoises et présentaient une influence Bouriate (Crubézy et Alexeev, 2007). Des cordelettes de cuir étaient présentes autour du corps. Plusieurs hypothèses étaient alors possibles, mais les scientifiques privilégiaient celle d'une mauvaise mort : soit une mort par suicide tel que la pendaison, soit la mort d'un personnage craint tel qu'une *udagan*. Les *udagan* étaient des jeunes filles vierges, d'environ 18 ans considérées comme ayant des pouvoirs supérieurs à ceux des chamanes masculins (Gmelin, 1752).

Pour toutes les raisons présentées ci-dessus la réalisation d'un examen tomodensitométrique corps entier était décidée, précédant l'autopsie et l'étude anthropologique. Ces études étaient effectuées dans un but d'identification (détermination du sexe, de l'âge, de l'affinité populationnelle, stature, poids, statut de virginité) et si possible la

cause de décès et des pathologies non mortelles. Cette étude avait donc deux objectifs : autopsique et anthropologique. Nous rappelons que l'objet de cette thèse étant la détermination de l'âge des individus, seule cette thématique sera traitée.

## 2.2.2. Matériel et méthode

### 2.2.2.1. Matériel

L'étude tomodynamométrique fut effectuée à Iakoutsk, capitale de Iakoutie, dans le service de radiologie sur un appareil Somaton 4 Plus (Siemens, Erlangen, Allemagne) en 4\* 0.75 mm. La momie y fut acheminée par hélicoptère du site de fouille. Les reconstructions ont été effectuées sur une console Leonardo (Siemens, Erlangen, Allemagne) et à l'aide du logiciel Amira 4.1 (Amira Mercury Computer Systems Solutions, Chelmsford, MA). Des reconstructions en deux (MPR) et en trois dimensions (VRT et MIP) ont été effectuées.

### 2.2.2.2. Méthodes

#### 2.2.2.2.1. Anthropologie virtuelle

L'étude anthropologique devait contribuer à la détermination du sexe, de l'âge au décès, de l'affinité populationnelle, de la stature et du poids du sujet. Seules les méthodes concernant l'âge osseux sont présentées dans le tableau n° III-2.

**Tableau n° III-2-** Méthodes tomodynamométriques utilisées dans le cadre de l'estimation de l'âge au décès de l'individu étudié. E évalué, NE non évalué.

Evaluation	Sites anatomiques étudiés	Nom des auteurs des méthodes utilisées	Etude TDM	Etude os secs
Âge osseux	Extrémités médiales des clavicules	Schulz <i>et al.</i> , 2005	E	E
	Quatrième côte droite	Iscan <i>et al.</i> , 1985	E	NE
	Première côte droite	Présente Thèse, 2009	E	NE
	Symphyse pubienne	Suchey, 1979	E	NE
	Crêtes iliaques	Webb et Suchey, 1985	E	E
	Surface auriculaire	Présente Thèse, 2009	E	NE
	Main et poignet gauches	Greulich et Pyle, 1959	E	E

#### 2.2.2.2.2. Etude anthropologique sur os secs

Une autopsie complète était réalisée à Iakoutsk. Elle permit à son décours l'analyse de plusieurs éléments anatomiques afin de déterminer l'âge au décès de l'intéressée.

L'évaluation de l'âge osseux fut effectuée sur l'état de fusion des épiphyses (Bass, 1995 ; Scheuer et Black, 2000).

### 2.2.3. Résultats

Seuls sont présentés ici les résultats concernant la détermination de l'âge au décès de la momie par les méthodes osseuses.

#### 2.2.3.1. Etude tomодensitométrique : estimation de l'âge osseux

Pour ce faire, différents éléments anatomiques osseux ont été étudiés et stadifiés (cf. tableau n° III-3) :

- Extrémités claviculaires médiales (cf. figure n° III-7) :
  - o Côté gauche : on notait la présence d'un petit noyau d'ossification secondaire fusionné à la métaphyse (stade 3).
  - o Côté droit : aucun noyau d'ossification secondaire n'était individualisé. Deux hypothèses étaient possibles : un stade 1 (pas de noyau) ou un stade 2 (noyau non fusionné, avec chute taphonomique du noyau).

Pour déterminer l'âge de l'individu on se servi seulement, compte tenu de ces constatations, du côté gauche (cf. tableau n° III-3).
  
- Extrémité sternale de la première côte droite (cf. figure n° III-8) : on notait un aspect compatible avec un stade 3 de notre classification exposée dans la partie II chapitre 1 de cette thèse. Aucune calcification chondro-sternale n'était visible, de par la désolidarisation taphonomique entre l'extrémité sternale de la côte et le cartilage sternal adjacent. Les berges de l'extrémité sternale étaient surélevées et un sillon supéro-inférieur séparant la surface en 2/3 antérieurs et 1/3 postérieur était visible. Cet aspect correspondait, selon nos résultats exposés dans la partie II chapitre 1 de cette thèse, à un âge de  $19.4 \pm 3.4$  ans.
  
- Extrémité sternale de la quatrième côte droite (cf. figure n° III-9) : l'aspect était compatible avec un stade 2 de la classification féminine d'Isan (Dedouit *et al.*, 2008 ; Isan *et al.*, 1985). Aucune calcification chondro-sternale n'était visible, de par la désolidarisation taphonomique entre l'extrémité sternale de la côte et le

cartilage sternal adjacent. Le puits était peu profond avec des murs épais. L'âge correspondant est détaillé dans le tableau n° III-3.

- Symphyse pubienne (cf. figure n° III-10) : aspect très jeune, compatible avec un stade I de la classification de Suchey-Brooks, avec de nombreuses crêtes visibles sur la surface articulaire, l'absence de rempart ventral et d'extrémités supérieure ou inférieure (Suchey, 1979 ; Telmon *et al.*, 2005). L'âge correspondant est détaillé dans le tableau n° III-3.
  
- Surface auriculaire :
  - o Etude en deux dimensions (cf. figure n° III-11) : on notait la bonne visibilité de la ligne centrale du faisceau auriculo-acétabulaire, qui était nette et continue ainsi que la visibilité de quelques cellules juxta-linéaires. Le gradient de part et d'autre de ce faisceau était important. Il n'était pas noté de macroporosité. Cet aspect était compatible d'après nos résultats exposés dans la partie II chapitre 3 de cette thèse, avec un score global 2D de 0/7, soit très vraisemblablement avec un âge inférieur à 40 ans (sensibilité : 0.94 ; spécificité : 0.86).
  - o Etude en trois dimensions (cf. figure n° III-12) : on notait l'absence d'activité apicale ou rétro auriculaire, avec une organisation transverse importante, et une texture dominante régulière. Aucune macroporosité n'était visible. Cet aspect était compatible d'après nos résultats exposés dans la deuxième partie, chapitre 3 de cette thèse, avec un score global 3D de 0/9, soit très vraisemblablement avec un âge inférieur à 40 ans (sensibilité : 0.90 ; spécificité : 0.92).
  
- Main et poignet gauche (cf. figure n° III-13 A) : les extrémités distales ulnaires et cubitales présentaient une fusion métaphyso-épiphysoaire complète, correspondant selon l'atlas de Greulich et Pyle à un âge de 18 ans pour un individu de sexe féminin (Greulich et Pyle, 1959).
  
- Crêtes iliaques (cf. figure n° III-13 B) : une fusion quasi complète des crêtes iliaques à l'ilium était visible, sauf à la partie postérieure de ces dernières. Cet

aspect était compatible avec un âge compris entre 14 et 23 ans selon la méthode de Webb et Suchey (Webb et Suchey, 1985).

Pour déterminer l'âge osseux de l'individu étudié, le **maximum de vraisemblances** fut calculé à partir des moyennes et écarts types des stades déterminés pour la clavicule gauche, le pubis et la quatrième côte droite (Garel, 2002). Il s'élevait à 18.8 ans.

**Tableau n° III-3** - Distribution de l'âge osseux des indicateurs étudiés en tomодensitométrie. Les âges moyens, les déviations standard et les intervalles d'âges sont exprimés en années. Les intervalles d'âge sont donnés avec un intervalle de confiance de 95 %.

Indicateur	Classification ou méthode utilisée	Stade	Age moyen	Déviatiоn standard	Intervalle d'âge
Clavicule gauche	Schulz	3	20.5	1.6	17.3 - 23.7
Quatrième côte droite	Iscan	2	17.4	1.5	20.5 - 24.7
Symphyse pubienne	Suchey	1	19.4	2.6	14.2 - 24.6

### 2.2.3.2. Etude anthropologique sur os secs : détermination de l'âge osseux

L'aspect fusionné des épiphyses des os longs, en particulier distales cubitale et ulnaire orientait vers un individu adulte jeune (Bass, 1995 ; Scheuer et Black, 2000). La synchondrose sphéno-occipitale était complètement fusionnée. Cependant, les extrémités internes des deux clavicules présentaient des caractères d'immaturation en termes de fusion métaphyso-épiphysaire, ainsi que la partie postérieure des deux crêtes iliaques.



**Figure n° III-6 A**



**Figure n° III-6 B**

**Figure n° III-6** – Photographies de la momie – A : momie dans son cercueil ; B : photo per autopsique.

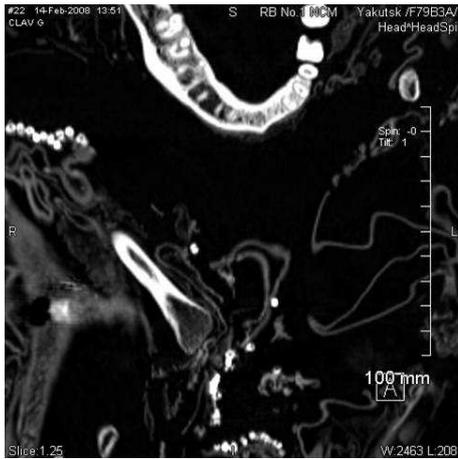


Figure n° III-7 A

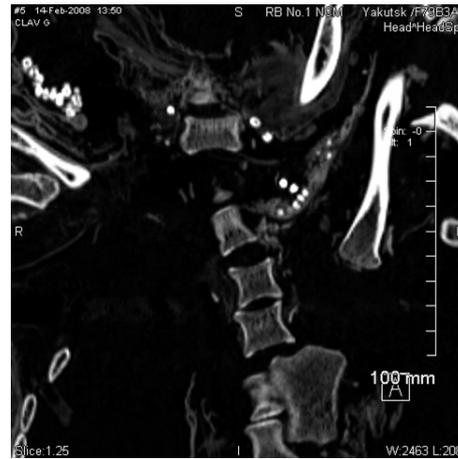


Figure n° III-7 B

Figure n° III-7 – Reconstructions tomодensitométriques en mode MPR des clavicules – A : clavicule droite ; B : clavicule gauche.



Figure n° III-8 A



Figure n° III-8 B

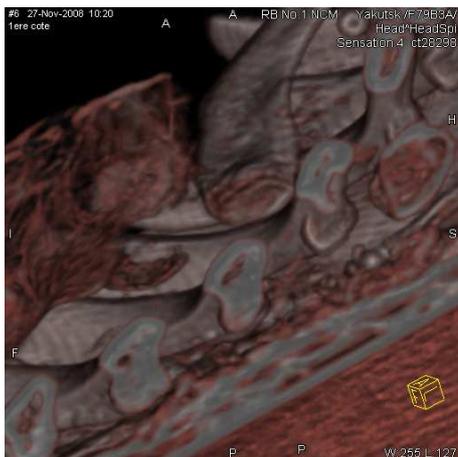


Figure n° III-8 C

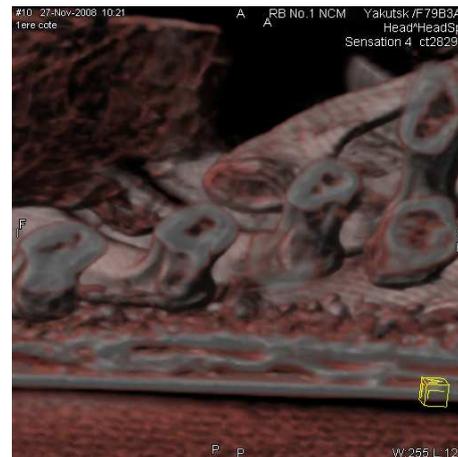


Figure n° III-8 D

Figure n° III-8 – Reconstructions tomодensitométriques de la première côte droite – A : plan axial, mode MPR; B : plan frontal, mode MPR; C et D : surface articulaire, mode VRT.

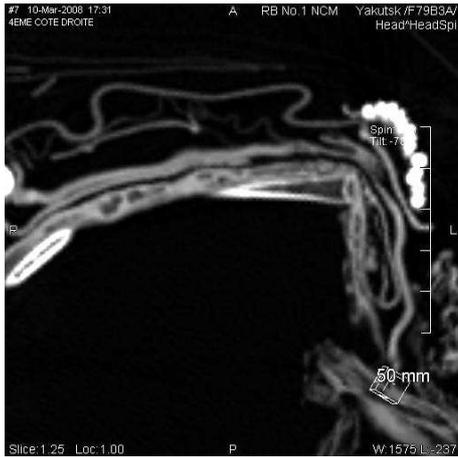


Figure n° III-9 A

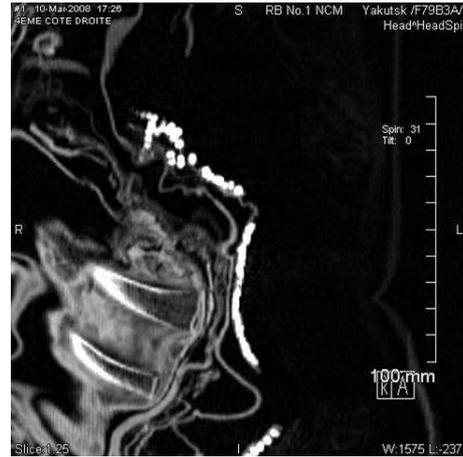


Figure n° III-9 B

Figure n° III-9 – Reconstitutions tomodensitométriques en mode MPR de la quatrième côte droite – A : plan axial ; B : plan frontal.

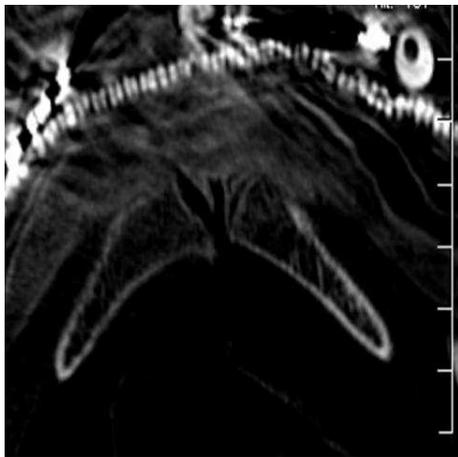


Figure n° III-10 A

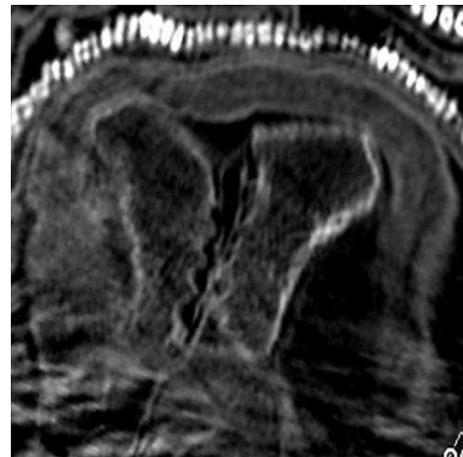


Figure n° III-10 B

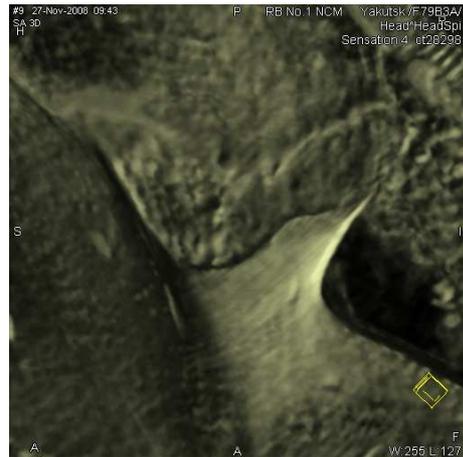
Figure n° III-10 – Reconstitutions tomodensitométriques en mode MPR de la symphyse pubienne – A : plan axial ; B : plan frontal.



Figure n° III-11 – Reconstitutions tomodensitométriques bidimensionnelles en mode MPR de la surface auriculaire droite – faisceau auriculo-acétabulaire présent et continu ; important gradient de densité de part et d'autre du faisceau ; des cellules de part et d'autre du faisceau sont visibles ; aucune macroporosité n'était visible.

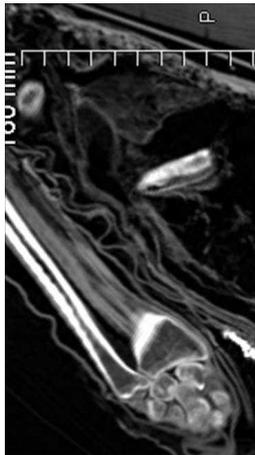


**Figure n° III-12 A**

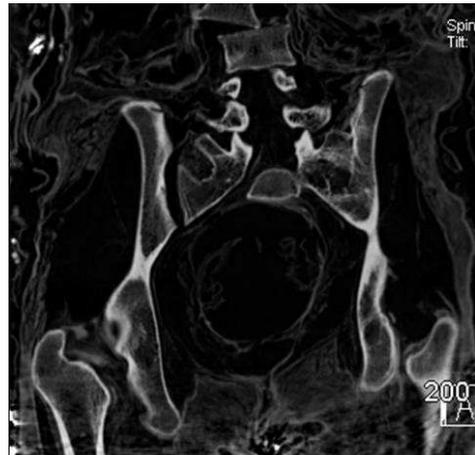


**Figure n° III-12 B**

**Figure n° III-12** – Reconstitutions tomodynamométriques tridimensionnelles en mode VRT de la surface auriculaire droite – A : vue interne : bord antérieur net et aigu, sans émoussement de la lèvre, traduisant l'absence d'activité apicale ; organisation transverse présente de façon importante ; B : vue interne et supérieure : organisation transverse visible ; absence d'activité rétro auriculaire ; la texture dominante est régulière.



**Figure n° III-13 A**



**Figure n° III-13 B**

**Figure n° III-13** – Reconstitutions tomodynamométriques en mode MPR – A : poignet gauche ; B : crêtes iliaques.

# Chapitre 3

## Réflexions concernant la détermination de l'âge

---

### 3.1. Estimer l'âge au décès, un véritable casse-tête méthodologique !

Les méthodes d'estimation de l'âge au décès des individus adultes se basent surtout sur des indicateurs de la sénescence, exception faite de la synostose des sutures crâniennes et de la modification de la symphyse pubienne qui s'apparentent, en partie, à des processus de maturation osseuse (Schmitt, 2002).

#### 3.1.1. Les limites des méthodes classiques

La recherche dans la thématique de la détermination de l'âge au décès se heurte à de nombreux écueils méthodologiques.

Ainsi, Schmitt listait (Schmitt, 2002) :

- la condition primordiale de fidélité et reproductibilité des caractères décrits et étudiés,
- l'interdiction d'utiliser des échantillons de référence d'âge au décès inconnu,
- la nécessité de valider la fiabilité des méthodes sur des échantillons indépendants,
- analyser la relation entre l'âge chronologique et les indicateurs de l'âge en déterminant le coefficient de corrélation, de détermination ainsi que la valeur du « p »,
- bannir l'utilisation de techniques non appropriées.

Pour éviter ces écueils méthodologiques, elle préconisait de (Schmitt, 2002) :

- choisir des indicateurs selon leur relation à l'âge,
- choisir des populations de référence identifiées,
- choisir des effectifs représentatifs,
- veiller à la distribution par âge de l'échantillon de référence,
- traiter les données en tenant compte de la variabilité.

L'utilisation des phases morphologiques est également très critiquable (Kimmerle *et al.*, 2008 ; Schmitt, 2002). Le traitement par phases ou stades correspond à des classes d'âge ne se

chevauchant pas, comme les méthodes d'Isca pour la quatrième côte droite, la surface auriculaire selon Lovejoy et la symphyse pubienne selon Suchey et Brooks. Ce traitement ne reflète pas la réalité, car il suppose que les erreurs données par phase morphologique ou par classe d'âge sont fixes pour tous les individus, ce qui ne tient pas compte de la vraie variabilité des phénomènes morphologiques (Schmitt, 2002). Dans les études de recrutement funéraire, le biais fondamental est l'attraction de la moyenne que l'on observe dans les prédictions par régression linéaire et par âge moyen d'une phase morphologique. L'âge des individus vieux est ainsi sous-estimé et celui des jeunes surestimé (Martrille *et al.*, 2007 ; Schmitt, 2002 ).

#### 3.1.2. Une solution statistique ?

Dans le domaine de l'anthropologie, deux approches sont communément utilisées : la **vraisemblance maximale**, et l'approche **bayésienne**.

##### 3.1.2.1. Différences entre la méthode statistique traditionnelle et l'approche bayésienne

L'approche bayésienne est de plus en plus employée en anthropologie (Braga *et al.*, 2005 ; Foti *et al.*, 2003 ; Kimmerle *et al.*, 2008). Elle est basée sur trois concepts :

- le **concept de probabilité *a priori*** qui réside dans l'utilisation des informations antérieures sur les valeurs possibles des inconnus, pour obtenir une distribution a priori des paramètres à mesurer dans le modèle étudié,

- le **concept de vraisemblance** qui représente le lien entre les paramètres à mesurer et les données ainsi que la conformité entre les données et les valeurs particulières du paramètre.

- la **probabilité *a posteriori*** qui est obtenue par la combinaison des informations à priori.

Dans les statistiques déductives, on pose une hypothèse à partir de laquelle, on prévoit ce que nous devrions observer, si l'hypothèse est vraie. La déduction est objective, dans le sens que les prédictions sur ce que nous croyons sont toujours vraies, si les hypothèses sont vraies. Ces probabilités sont calculées par des formules mathématiques qui décrivent les fréquences de tous les résultats possibles, si l'expérience est répétée plusieurs fois. Les méthodes statistiques traditionnelles, s'avèrent très utiles si ce sont les statisticiens qui interprètent les valeurs, sinon, les résultats seront erronés, si on ne tient pas compte des hypothèses sous-jacentes. Le

facteur bayésien est l'alternative aux méthodes statistiques traditionnelles ; il n'est pas une probabilité, mais un taux de probabilité qui varie entre 0 et l'infini.

#### 3.1.2.2. Application à l'âge individuel

La **vraisemblance** d'un modèle est la probabilité que les observations ou les données calculées adoptent le modèle. Pour un modèle particulier, plusieurs échantillons différents des données peuvent être obtenus, mais certains sont plus probables que d'autres. Cette approche permet de trouver les valeurs des variables qui ont plus de chances d'être avérées. En matière de détermination de l'âge, la question posée est la suivante : étant donné la variabilité des indicateurs d'âge, quelle est la chance de classer un individu dans une classe d'âge par rapport à une autre, compte tenu d'une distribution bien précise par âge. Dans ce cas l'approche bayésienne est adaptée. Lucy *et al.* ont proposé une application pour obtenir un âge individuel dans leur modèle (Lucy *et al.*, 1996). La **probabilité a priori** est la probabilité pour une personne d'appartenir à une classe d'âge donnée (l'individu est assimilé à l'échantillon de référence). Le calcul des probabilités est seulement une étape pour estimer un âge précis et qui correspond à l'âge médian de distribution des **probabilités a posteriori**, avec un intervalle de confiance de 95 %. L'analyse se fait par une approche bayésienne en plusieurs étapes :

- le choix de la distribution de la population de référence, avec une espérance de vie à la naissance de 30 ans pour avoir une distribution uniforme,
- la population est séparée en deux parties de façon aléatoire en un échantillon de référence et un échantillon test complémentaire indépendant,
- après répartition par classe de l'échantillon de référence, on calcule la fréquence de chaque caractère morphologique par classe d'âge pour tout l'échantillon.
- on calcule les probabilités *a posteriori*, pour chaque individu de l'échantillon test, pour obtenir une distribution des probabilités *a posteriori*.
- la dernière étape consiste à analyser la distribution des probabilités, qui permet d'étudier le comportement des caractères morphologiques entre eux, pour analyser les combinaisons d'indicateurs (sur une représentation graphique en courbe bimodale ou unimodale).

#### 3.1.2.3. La vraisemblance maximale

L'utilisation du maximum de vraisemblance est également utilisée en anthropologie (Dedouit *et al.*, 2007 ; Konigsberg *et al.*, 1998). Cette méthode ne fait pas référence aux

incertitudes des mesures qui correspondent soit à un écart-type soit à une étendue. Aussi pour les méthodes pour lesquelles nous disposons d'estimations exprimées en moyenne et écart-type pour chaque phase, la moyenne des estimations a été remplacée par le maximum de vraisemblance, c'est-à-dire l'âge le plus vraisemblable en fonction des différentes moyennes et écart-type.

Pour une méthode  $i$ , la phase estimée donne pour une moyenne  $m_i$  et pour écart type  $s_i$ , l'âge estimé ( $x$ ) suit une fonction :

$$f_i(x) = \frac{1^e \frac{-(x-m_i)^2}{2s_i^2}}{\sqrt{2\pi s_i^2}}$$

Si l'on dispose de plusieurs méthodes, la vraisemblance dans l'observation totale est représentée par le produit des différentes fonctions  $f_i$

$$\prod_i f_i(x)$$

Il existe une valeur de  $x$  qui maximise ce produit. Cette valeur représente l'âge le plus vraisemblable compte tenu des différentes phases observées.

On peut démontrer que cette valeur de  $x$  est égale à :

$$x = \frac{\sum_i \frac{m_i}{2s_i^2}}{\sum_i \frac{1}{2s_i^2}}$$

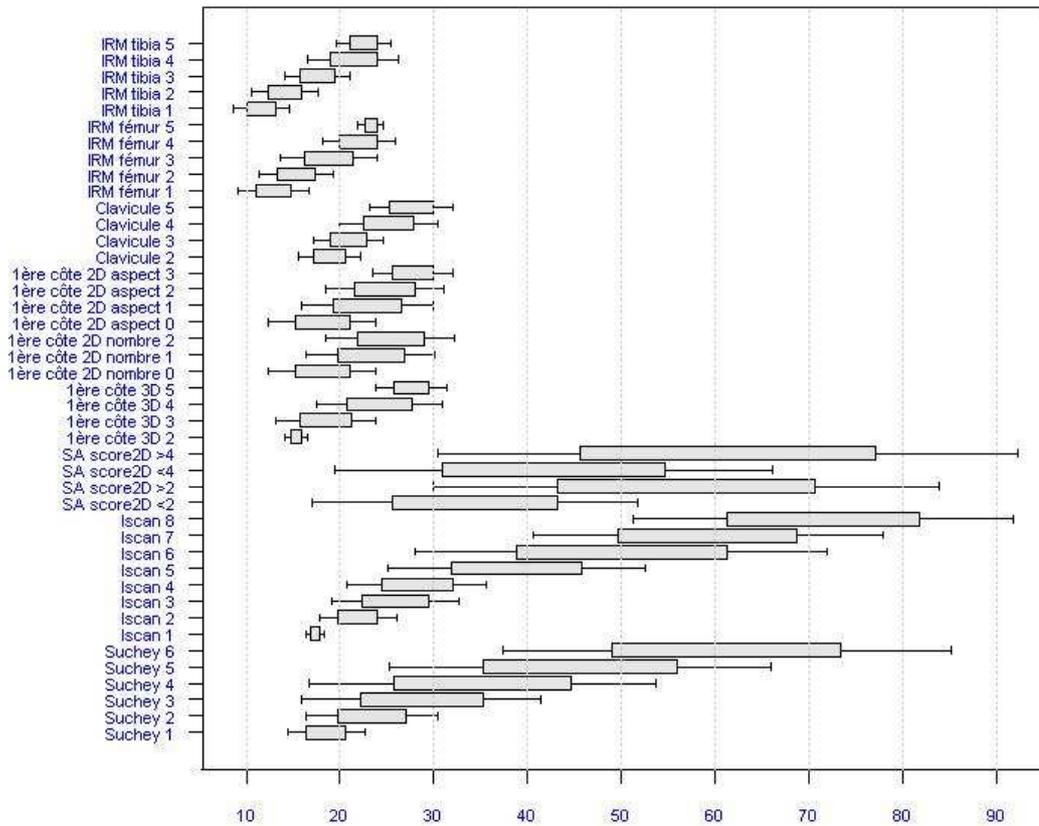
Cette méthode tient compte des incertitudes des mesures.

### 3.2. Réflexion sur une approche multicritère de la détermination de l'âge au décès en imagerie

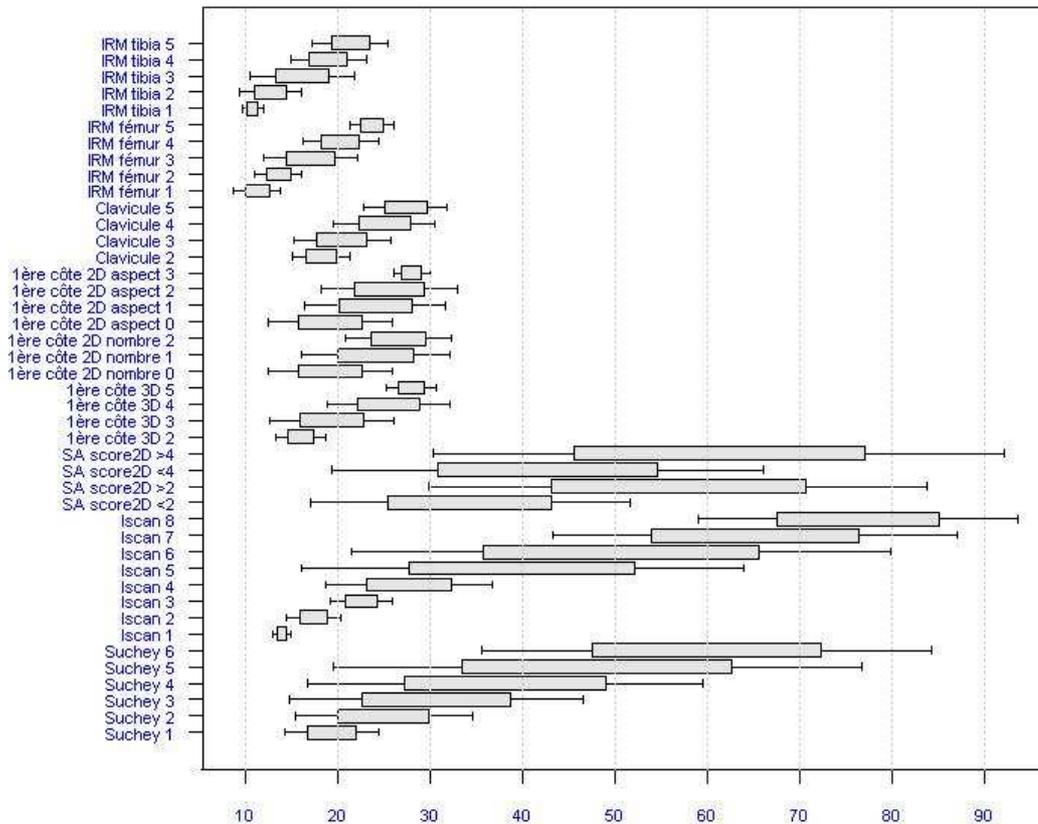
Concernant une approche multi-factorielle, l'utilisation de plusieurs critères est de plus en plus conseillée (Baccino *et al.*, 1999 ; Iscan et Boldsen, 1995 ; Meindl et Russel, 1997 ; Ubelaker, 2000). L'hypothèse de départ est que plus nous analysons d'indicateurs, plus nous avons d'informations. Mais, ces approches ont été testées et ne sont pas plus performantes que les méthodes utilisant des indicateurs isolés (Bocquet-Appel *et al.*, 1978 ; Martrille *et al.*, 2007 ; Molleson et Cox, 1993 ; Saunders *et al.*, 1992 ; Schmitt, 2001 ). La première raison est la variabilité des phénomènes de sénescence selon les différentes parties du squelette (Kemkes-Grottenthaler, 1996). La seconde est l'utilisation de standards élaborés sur des populations de référence différentes pour chaque indicateur (Baccino *et al.*, 1991). En effet, dans ce cas, les biais et les inexactitudes des différentes méthodes se cumulent (Iscan et Loth, 1989 ; Milner *et al.*, 2000).

Les figures n° III-14 et 15 reprennent l'ensemble des boîtes à moustaches de Tukey de plusieurs éléments anatomiques utilisés et décrits dans cette thèse afin de déterminer l'âge d'un individu inconnu, respectivement les individus de sexe masculin et de sexe féminin,. Ainsi, sont présentés de haut en bas :

- Stades IRM de la physe tibiale proximale,
- Stades IRM de la physe fémorale proximale,
- Stades tomодensitométriques claviculaires internes,
- Stades tomодensitométriques bidimensionnels selon le critère aspect de la première côte droite,
- Stades tomодensitométriques bidimensionnels selon le critère nombre de la première côte droite,
- Stades tomодensitométriques tridimensionnels de la première côte droite,
- Score global 2D de la surface auriculaire,
- Stades tomодensitométriques bi et tridimensionnels de la quatrième côte droite à partir des critères d'Iscan,
- Stades tomодensitométriques tridimensionnels de la symphyse pubienne à partir des critères de Suchey-Brooks.



**Figures n° III-14** – Boîtes à moustaches de Tukey des stadifications utilisées et déterminées au cours de cette thèse sur une population *masculine* : les bordures supérieures et inférieures des boîtes rectangulaires représentent respectivement les percentiles 75 et 25, les barres en T aux deux extrémités des boîtes les valeurs d'âges extrêmes maximums et minimums (avec un intervalle de confiance à 95 %).



**Figures n° III-15** – Boîtes à moustaches de Tukey des stadifications utilisées et déterminées au cours de cette thèse sur une population **féminine** : les bordures supérieures et inférieures des boîtes rectangulaires représentent respectivement les percentiles 75 et 25, les barres en T aux deux extrémités des boîtes les valeurs d'âges extrêmes maximums et minimums (avec un intervalle de confiance à 95 %).

Il convient de noter que l'ensemble des sites anatomiques n'est pas utilisable à tout âge. Ainsi, les méthodes dites classiques telles les études de la quatrième côte droite ou la symphyse pubienne, présentent des écarts-types qui sont de plus en plus importants avec l'âge croissant des sujets.

Parmi les moyens d'étude décrits dans cette thèse, l'IRM de l'articulation fémoro-tibiale n'apparaît pas comme étant utilisable sur des individus momifiés. Des études ultérieures seront également nécessaires concernant l'applicabilité de cette technique sur des individus décédés.

Il est également à noter que l'étude de la surface auriculaire en trois dimensions et le calcul du score 3D, lorsque la congruence de l'articulation sacro-iliaque est conservée et/ou que des ponts osseux sacro-iliaques existent, ne sont actuellement pas réalisables.

Le score 2D de la surface auriculaire s'applique à déterminer, tel qu'explicité dans le chapitre 3 de la deuxième partie de cette thèse, si la personne à plus ou moins de 40 ans ou plus ou moins de 60 ans.

L'étude tomodynamométrique de la quatrième côte droite, tout comme Baccino l'avait déjà mis en évidence sur os sec est déterminable de façon fiable à plus ou moins une phase d'écart par rapport à la phase réelle (Baccino *et al.*, 1991).

La bonne transposabilité tomodynamométrique tridimensionnelle des critères de Suchey Brooks pour la symphyse pubienne ayant précédemment été démontrée, cette stadification pourrait servir de premier « filtre » notamment pour déterminer si l'individu à plus ou moins de 40 ans (Baccino *et al.*, 1991 ; Telmon *et al.*, 2005). Ainsi pour ces individus, l'IRM de l'articulation fémoro-tibiale et la tomodynamométrie de la clavicule et de la première côte pourrait permettre d'affiner cette estimation de l'âge.

Si l'on prend pour exemple la détermination courante en pratique clinique du « *plus ou moins de 18 ans* », l'IRM fémoro-tibiale semble pouvoir permettre une réponse formelle avec un intervalle de confiance à 95 %. Bien sûr, la possibilité d'utilisation en pratique courante de cette dernière technique engendre plusieurs remarques, notamment celle de son coût et de son surcout comparativement utilisée en pratique courante. L'étude de la première côte droite en complément de l'étude par IRM apparaît comme pouvant également être utile, notamment par l'utilisation de la stadification 3D.

Il apparaît également que, tout comme cela a déjà constaté sur os secs, la problématique de détermination de l'âge des individus de plus de 60 ans est non résolue, même si, en anthropologie physique, l'étude dentaire pour les individus de plus de 40 ans est une aide précieuse (Baccino *et al.*, 1991).

# Conclusion

---

L'utilisation de nouvelles techniques d'imagerie en coupe en anthropologie est une nouvelle voie d'application de l'imagerie que la communauté radiologique se doit de connaître, de développer et d'ajouter aux multiples palettes de son activité. Les applications anthropologiques principalement de la tomodensitométrie multicoupe sont multiples.

Le concept d'anthropologie virtuelle, rejoint celui d'autopsie virtuelle. Les techniques d'imagerie en coupe sont en effet de plus en plus utilisées en pratique routinière en thanatologie pour l'étude des cadavres, une meilleure compréhension et un meilleur diagnostic des causes de la mort. De façon complémentaire, l'étude anthropologique en tomodensitométrie peut être effectuée en complément d'une étude à visée autopsique, notamment sur des individus non identifiés. La tomodensitométrie permet la mise en évidence d'antécédents personnels du cadavre, la plupart du temps chirurgicaux (prothèse orthopédique, pace maker, dispositif intra utérin, ...). Elle peut également, tout comme les radiographies standard être utilisée dans un but comparatif entre des examens *ante* et *post mortem*. Ceci peut permettre une identification comparative positive, la plupart du temps par une superposition parfaite des deux études concernant des particularités anatomiques du sujet, le plus souvent osseuses (lombalisation et sacralisation vertébrales, lyse isthmique, calcifications ligamentaires, calcifications cartilagineuses costales, antécédents fracturaires, particularités concernant l'os trabéculaire, ...). Une étude anthropologique peut également être effectuée sous la forme d'une véritable étude squelettique virtuelle du cadavre à partir de critères dérivant de l'anthropologie physique osseuse. Il est ainsi possible de déterminer l'affinité populationnelle, le sexe, et surtout l'âge d'un individu en transposant des méthodes ostéoscopiques et ostéométriques traditionnellement effectuées sur os secs. Ainsi dans une problématique de détermination de l'âge, l'analyse de l'extrémité interne des clavicules, de l'extrémité sternale de la quatrième côte droite, de la surface articulaire de la symphyse pubienne sera privilégiée. L'un des challenges de la potentialité de la tomodensitométrie en anthropologie qui a déjà été démontré est, à côté de la vérification de la bonne transposabilité des méthodes réalisées sur os secs en tomodensitométrie, celle de la recherche de nouveaux critères tomodensitométriques propres (notamment concernant l'évaluation de l'âge d'un

individu). Ces techniques sont donc utilisables sur des cadavres complets ou non, bien conservés ou non.

Tout comme en autopsie virtuelle, la réalisation d'examen en coupe à visée anthropologique présente de nombreux avantages. Les images sont stockables, interprétables et réinterprétables a posteriori, les images transférables par le biais d'internet ou l'envoi de supports (cédérom, DVD). Il est également un autre avantage qui peut permettre de valider complètement l'adage radiologique du « *couper fin et reconstruire dans tous les plans* » du fait de l'absence de problème relatif à l'irradiation du sujet étudié ou du segment anatomique étudié. Le caractère non invasif de la technique revêt également tout son intérêt dans le cas d'étude de pièces rares voire exceptionnelles, que cela soit au niveau archéologique ou anthropologique. Concernant l'étude de cadavres non squelettiques comportant encore des parties molles, la tomodensitométrie présente l'avantage d'éviter une préparation et un nettoyage long et fastidieux des pièces osseuses à étudier qui peut parfois aboutir à la dégradation accidentelle de ces dernières. Ainsi, l'étude de restes contemporains, fossiles, humains ou non est possible sans risque de dégradation physique de la pièce. De plus, les reconstructions effectuées peuvent être, si elles sont rassemblées sur un site internet un véritable musée virtuel ou une véritable ostéothèque virtuelle.

Ceci est particulièrement vrai pour l'étude de momies, qu'elles soient artificielles ou naturelles. Les législations internationales et nationales rendent maintenant impossibles le transport et le voyage de momies ou de pièces osseuses à travers le monde. Ces dernières restent confinées la plupart du temps dans leur pays de découverte ou le musée dans lequel elles séjournent depuis des années (voir des siècles ...), importée par leur découvreur à une époque où la législation ne s'y opposait pas. L'analyse anthropologique présente l'avantage de pouvoir être effectuée à distance à la fois dans le temps et dans l'espace, si les acquisitions radiologiques ont été effectuées sur place comme c'est le cas la plupart du temps. Il est important d'indiquer qu'il est possible d'effectuer les examens tomodensitométriques dans le pays d'origine de la momie ou de la pièce, que cela soit en Chine ou dans des contrées plus reculées telle que la Sibérie ! De plus, l'amélioration et l'innovation technologique en matière d'appareil de tomodensitométrie mobile, transportable au plus près du site de découverte ou de fouille présente un avantage concret et considérable. L'étude des momies est probablement le plus bel exemple de réussite en matière d'apports de l'imagerie en anthropologie. En effet, il est en une acquisition possible d'effectuer une étude autopsique virtuelle, mais également une étude anthropologique exhaustive qui sera adaptée en fonction de l'état de conservation de la momie. De façon traditionnelle l'affinité populationnelle peut être faite sur des critères

scopiques mais également craniométriques. La détermination du sexe pourra être effectuée de façon préférentielle par l'analyse du crâne et du bassin. L'estimation de l'âge pourra être faite en utilisant les régions d'études décrites plus haut. Il est également possible d'estimer la stature de l'individu à partir de l'adaptation de tables disponibles pour chaque grand groupe populationnel. Une étude paléo pathologique pourra également être réalisée, à la recherche de traumatismes, de pathologies infectieuses, tumorales, inflammatoires, nutritionnelles. Ceci est un point d'examen fondamental car présente un intérêt sur la connaissance du mode de vie de ces populations passées. Toutes ces études sur momies pourront être effectuées sans détérioration de ces dernières et permettra, sans qu'elles soient détériorées, d'améliorer considérablement les connaissances sur leur mode de vie et parfois la façon dont le sujet étudié est décédé. Certains auteurs ont également décrit la pratique de prélèvements ou de biopsies ciblées sous contrôle tomодensitométrique sur des momies. Ceci est également important car les prélèvements effectués de façon peu invasive évitent un véritable dépeçage des momies tel qu'il a été effectué pendant des siècles. Ces prélèvements permettent par exemple, après analyses à visée génétique, histologique ou micro-biologique, la détermination du sexe de la momie et peuvent apporter la preuve d'affections et d'infections qu'a pu rencontrer l'individu au cours de sa vie. Elles peuvent également être intéressantes dans le cadre de diagnostic de pathologies pré existantes, d'états morbides, véritables reflets de l'état sanitaire de la population et de l'époque auxquelles l'individu étudié appartenait.

Les innovations technologiques informatiques jouent également un rôle important en termes d'exploitation des images obtenues. A côté des traditionnelles reconstructions en deux et en trois dimensions, des outils informatiques et des logiciels permettent une analyse des pièces osseuses étudiées. Il est ainsi possible de segmenter une pièce osseuse, de reconstruire virtuellement une pièce osseuse multi fragmentée pour obtenir une reconstruction *ad integrum* de la pièce, tel que cela peut être fait lors de la reconstitution d'un puzzle. Des comparaisons de pièces osseuses sont également possibles par des recalages rigides ou non, après avoir apposé des points de repères sur les surfaces à étudier. Ceci est particulièrement utile dans l'étude crânienne et la différenciation possible entre des crânes modernes et fossiles.

A côté de techniques traditionnelles tomодensitométriques, le micro-scanner trouve également de nombreuses applications en anthropologie. L'étude de fragments osseux ou de dents qu'ils soient contemporains ou fossiles est possible, avec une définition spatiale supérieure aux appareils utilisés en radiologie clinique. Les épaisseurs de coupe atteignent en effet au maximum les 40  $\mu\text{m}$ .

Il apparaît très important que les équipes de radiologie s'organisent de façon à initier cette activité, ceci, bien évidemment avec le matériel et les structures existantes. Sans obligatoirement aller jusqu'à l'option d'appareillages dédiés, il faut que le parc d'imagerie lourde soit suffisant pour pouvoir ouvrir des plages horaires accessibles à ce type d'activité. Il est également important qu'au sein d'une équipe de radiologie, un ou plusieurs radiologues aient une formation en médecine légale et / ou en anthropologie de façon à faire l'interface nécessaire entre les différentes spécialités. Il apparaît en effet indispensable que les radiologues effectuant des examens tomodensitométriques en coupe à visée anthropologique aient connaissance et sachent reconnaître, lorsque cela est possible, les phénomènes taphonomiques inhérents à l'évolution du cadavre et du squelette.

Les perspectives d'avenir se calquent sur l'évolution technologique des techniques d'imagerie en coupe. On peut enfin imaginer que toutes les possibilités technologiques dont nous disposons favorisent, outre l'essor des indications de l'imagerie médico-judiciaire, le développement d'une imagerie anthropologique nouvelle.

# Références bibliographiques

---

## Références bibliographiques

Acsadi G, Nemeskeri L (1970) History of Human Life Span and Mortality. Budapest: Akademiai Kiado.

Adamsbaum C, Aït Ameer A, Besosman SM, André C, Kalifa G (2002) Âge osseux et diagnostics des troubles de la croissance. *Encycl Méd Chir, Radiodiagnostic – Squelette normal* 30-480-A-20: 8 p.

Agresti A (1990) *Categorical data analysis*. New York: John Wiley.

Albers-Schoenberg HE (1904) Röntgenbilder einer seltenen Koncherkrankung. *Muench Med Wschr* 51: 365.

Anderson M, Green WT, Messner MB (1963) Growth and the predictions of growth in the lower extremities. *J Bone Jt Surg* 45A: 1-14.

Baccino E, Tavernier JC, Lamendin H, Frammery D, Nossintchouk R, Humbert JF (1991) Recherche d'une méthode multifactorielle simple pour la détermination de l'âge des cadavres adultes. *J Méd Lég Droit Méd* 34: 27-33.

Baccino E, Ubelaker DH, Hayek LA, Zerilli A (1999) Evaluation of seven methods of estimating age at death from mature human skeletal remains. *J Forensic Sci* 44: 931-936.

Barrett JF, Keat N (2004) Artifacts in CT: recognition and avoidance. *Radiographics* 24: 1679-1691.

Bass WM. *Human osteology* (1995) A laboratory and field manual. Fourth edition. Columbia: Missouri Archaeological Society.

Bauer JS, Issever AS, Fischbeck M, Burghardt A, Eckstein F, Rummeny EJ, Majumdar S, Link TM (2004) Multislice-CT for structure analysis of trabecular bone - a comparison with micro-CT and biomechanical strength. *Rofo* 176: 709-718.

## Références bibliographiques

Beauthier JP, Boxho P, Crèvecoeur JM, Leclercq M, Lefèvre P, Vogels L (2000) Mission du team belge au Kosovo, science et justice à la rencontre du drame humain – premiers résultats. *Biom Hum Anthropol* 18: 43-48.

Beauthier JP (2007) *Traité de médecine légale*. Bruxelles: De Boeck.

Bedford ME, Russell KF, Lovejoy CO, Meindl RS, Simpson SW, Stuart-Macadam PL (1993) Test of the multifactorial aging method using skeletons with known ages-at death from the Grant Collection. *Am J Phys Anthropol* 91: 287-297.

Blum A, Walter F, Ludig T, Zhu X., Roland J (2000) Scanners multicoupes : principes et nouvelles applications scanographiques. *J Radiol* 81: 1597-1614.

Bocquet-Appel JP, Masset C (1996) Paleodemography: expectancy and false hope. *Am J Phys Anthropol* 99: 571-583.

Boldsen JL, Milner GR, Konigsberg LW, Wood JM (2002) Transition analysis: a new method for estimating age from skeletons. In: Hoppa RD, Vaupel JW (eds) : *Paleodemography: age distributions from skeletal samples*. New York, NY: Cambridge University Press, pp. 73-106.

Bonnardel P (1995) Le coefficient Kappa.  
[http://kappa.chez-alice.fr/Kappa\\_2juges\\_sign\\_kappa.htm](http://kappa.chez-alice.fr/Kappa_2juges_sign_kappa.htm).

Boutroy S, Bouxsein ML, Munoz F, Delmas PD (2005) In vivo assessment of trabecular bone microarchitecture by high-resolution peripheral quantitative computed tomography. *The J of Clin Endocrinol metab* 90: 6508-6515.

Bowen V, Cassidy JD (1981) Macroscopic and microscopic anatomy of the sacroiliac joint from embryonic life until the eighth decade. *Spine* 6: 620-628.

Braga J, Heuzé Y, Chabadel O, Sonan NK, Gueramy A (2005) Non-adult dental age assessment: correspondence analysis and linear regression versus Bayesian predictions. *Int J Legal Med* 119: 260-274.

## Références bibliographiques

Brooks S (1955) Skeletal age at death: the reliability of cranial and pubic age indicators. *Am J Phys Anthropol* 13: 567-597.

Brooks S, Suchey JM (1990) Skeletal age determination based on the os pubis: a comparison of the Ascadi-Nemeskeri and Suchey-Brooks methods. *Hum Evol* 5: 227-238.

Buckberry JL, Chamberlain AT (2002) Age estimation from the auricular surface of the ilium: a revised method. *Am J Phys Anthropol* 119: 231-239.

Cattaneo C, Baccino E (2002) A call for anthropology in Europe. *Int J Legal Med* 116: N1-N2.

Cesarani F, Martina MC, Ferraris A, Grilletto R, Boano R, Marochetti EF, Donadoni AM, Gandii G (2003) Whole-body three-dimensional multidetector CT of 13 Egyptian human mummies. *Am J Roentgenol* 180: 597-606.

Chappard C, Brunet-Imbault B, Lemineur G, Giraudeau B, Basillais A, Harba R, Benhamou CL (2005) Anisotropy changes in post-menopausal osteoporosis: characterization by a new index applied to trabecular bone radiographic images. *Osteoporos Int* 16: 1193-1202.

Chhem RK, Brothwell DR (2008) *Paleoradiology: imaging mummies and fossils*. Heidelberg: Springer.

Cohen J (1960) A coefficient of agreement for nominal scales. *Educ Psychol Meas* 20: 27-46.

Comité Consultatif National d’Ethique pour les Sciences de la Vie et de la Santé (2005) Avis n° 88 Sur les méthodes de détermination de l’âge à des fins juridiques, [http://www.educationsansfrontieres.org/IMG/pdf/CCNE\\_avis088.pdf](http://www.educationsansfrontieres.org/IMG/pdf/CCNE_avis088.pdf).

Correnti V (1955) Le basi morfomeccaniche della struttura dell’osso iliaco. *Riv Antrop* 42: 289-336.

Crubezy E, Tiller AM, Vandermeersch B (1993) Croissance et vieillissement : tendances et méthodes en anthropologie. *Bull Mem Soc Anthropol Paris* 5: 5-6.

## Références bibliographiques

- Crubezy E, Alexeev A (2007) *Chamane: Kyys, jeune fille des glaces*. Paris: Editions Errance.
- Culin S (1898) An archaeological application of the Roentgen rays. *Bulletin of the Free Museum of Science Department of Archaeology and Palaeontology, University of Pennsylvania* 4: 182–183.
- Dalstra M, Huiskes R (1995) Load transfer across the pelvic bone. *J Biomech* 28: 715-724.
- Damadian R, Goldsmith M, Minkoff L (1978) NMR in cancer: XXI. FONAR scan of the live human abdomen. *Physiol Chem Phys* 10: 561-563.
- Davies DA, Parsons FG (1927) The age order of the appearance and union of the normal epiphyses as seen by X-rays. *J Anat* 62: 58-71.
- Dedekind A (1896) A novel use for the Roentgen rays. *Br J Photogr* 131.
- Dedouit F, Telmon N, Costagliola R, Otal P, Joffre F, Rougé D (2007) Virtual anthropology and forensic identification: report of one case. *Forensic Sci Int* 172: 182-187.
- Dedouit F, Bindel S, Gainza D, Blanc A, Joffre F, Rougé D, Telmon N (2008) Application of the Iscan method to two- and three-dimensional imaging of the sternal end of the right fourth rib. *J Forensic Sci* 53: 288-295.
- Digby KH (1915) The measurement of diaphysial growth in proximal and distal directions. *J Anat* 50: 187-188.
- DiGangi EA, Bethard JD, Kimmerle EH, Konigsberg LW (2008) A new method for estimating age-at death from the first rib. *Am J Phys Anthropol* doi: 10.1002/ajpa.20916.
- Donner A (1998) Sample size requirements for the comparison of two or more coefficients of inter-observer agreement. *Statistics in Medicine* 17: 1157-1168.

## Références bibliographiques

Doran GH, Dickel DN, Ballinger Jr WE, Agee OF, Laipis PJ, Hauswirth WW (1986) Anatomical, cellular and molecular analysis of a 8000-yr-old human brain tissue from the Windover archaeological site. *Nature* 323: 803–806.

Doyon D, Domengie F (2000) Imagerie 3D – Le scanner à rayons X. In: Doyon D, Cabanis EA, Frija J, Halimi P, Roger B (eds.) : *Scanner à rayons X - Tomodensitométrie*. Paris : Masson, pp. 1-36.

Dreux C, Delmas PD (2001) Les méthodes de mesure de la densité minérale osseuse (DMO) et des marqueurs du remodelage osseux dans le dépistage de l'ostéoporose. *Bull Acad Natle Méd* 185: 1-16.

Dudar JC (1993) Identification of rib number and assessment of intercostal variation at the sternal rib end. *J Forensic Sci* 38: 788-797.

Durigon M (1983) Identification à partir des os. Bilan des méthodes actuelles. *Bull Mem Soc Anthropol Paris* 10: 385-392.

Dvorak J, George J, Junge A, Hodler J (2007) Age determination by magnetic resonance imaging of the wrist in adolescent male football players. *Br J Sports Med* 41: 45-52.

Dvorak J, George J, Junge A, Hodler J (2007) Application of MRI of the wrist for age determination in international U-17 soccer competitions. *Br J Sports Med* 41: 497-500.

Falys CG, Schutkowski H, Weston DA (2006) Auricular surface aging: worse than expected? A test of the revised method on a documented historic skeletal assemblage. *Am J Phys Anthropol* 130: 508-513.

Fawcitt RA, Jarvis H, Isherwood I (1984) X-raying the Manchester mummies. In: David R, Tapp E (eds.) : *Evidence embalmed. Modern medicine and the mummies of ancient Egypt*. Manchester, England: Manchester University Press.

Ferembach, D, Schwidetzky I, Stloukal M (1979) Recommandations pour déterminer l'âge et le sexe sur le squelette. *Bull Mem Soc Anthropol Paris* 6: 7-45.

## Références bibliographiques

Foti B, Adalian P, Lalys L, Chaillet N, Leonetti G, Dutour O (2003) Approche probabiliste de l'estimation de l'âge chez l'enfant à partir de la maturation dentaire. *Comptes Rendus Biologies* 326: 441-448.

Flecker H (1932) Roentgenographic observations of the times of appearance of epiphyses and their fusion with the diaphyses. *J Anat* 67: 118-164.

Gardiner JH (1904) Radiographien von Mumien. The London Roentgen Society. 7. IV. *Fortschr a.d. Gebiet der Roentgenstr* 7: 133.

Gilbert BM (1973) Misapplication to females of the standard for aging the male os pubis. *Am J Phys Anthrop* 38: 39-40.

Gill CG, Abbott C (1942) Practical method of predicting the growth of the femur and tibia in the child. *Arch Surg* 45: 286-315.

Gmelin GJ (1752) *Reise durch Siberien von dem Jahr 1733-1743*. Göttingen: Abraham Vandenhoecks.

Gorjanovic-Kramberger K (1901, 1902) Der palaeolithische Mensch und seine Zeitgenossen aus dem Diluvium von Krapina in Kroatien. *Mitteilungen der Anthropologischen Gesellschaft in Wien* 1901, 31: 164-97 (4 plates) ; 1902, 32: 189-216 (4 plates).

Grabherr S, Cooper C, Ulrich-Bochsler S, Uldin T, Ross S, Oesterhelweg L, Bollinger S, Christe A, Schnyder P, Mangin P, Thali MJ (2008) Estimation of sex and age of "virtual skeletons"- a feasibility study. *Eur Radiol* DOI 10.1007/s00330-008-1155-y.

Grannell PK, Mansfield P (1975) Microscopy in vivo by nuclear magnetic resonance. *Phys Med Biol* 20: 477-482.

Greulich W, Pyle S (1959) *Radiographic atlas of skeletal development of the hand and wrist*. Stanford: Stanford University Press.

Gustafson G (1950) Age determination on teeth. *J Am Dent Assoc* 41: 45-54.

## Références bibliographiques

Hanihara K, Susuki T (1978) Estimation of age from the pubic symphysis by means of multiple regression analysis. *Am J Phys Anthropol* 48: 233-240.

Hansman CF (1962) Appearance and fusion of ossification centers in the human skeleton. *Am J Roentgenol* 88: 476-482.

Harris JE, Wente EF (1980) *An X-ray atlas of the royal mummies*. Chicago: Chicago University Press.

Harwood-Nash DC (1979) Computed tomography of ancient Egyptian mummies, *J Comput Assist Tomogr* 3: 768-773.

Hoppa RD (2000) Population variation in osteological aging criteria: an example from the pubic symphysis. *Am J Phys Anthropol* 111: 185-191.

Hoffman H, Torres WE, Ernst RD (2002) Paleoradiology: advanced CT in the evaluation of nine Egyptian mummies. *Radiographics* 22: 377-385.

Holland T (1937) X-rays in 1896. *Liverpool Medico-Chir J* 45: 61.

Hounsfield GN (1973) Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system. *Br J Radiol* 46: 1016-1022.

Iscan M, Loth SR, Wright RK (1984 a) Metamorphosis at the sternal rib end: a new method to estimate age at death in white males. *Am J Phys Anthropol* 65: 147-156.

Iscan M, Loth SR, Wright RK (1984 b) Age estimation from the rib by phase analysis: white males. *J Forensic Sci* 29: 1094-1104.

Iscan M, Loth SR, Wright RK (1985) Age estimation from the rib by phase analysis: white females. *J Forensic Sci* 30: 853-863.

Iscan M, Loth SR (1986 a) Determination of age from the sternal rib in white males: a test of the phase method. *J Forensic Sci* 31: 122-132.

## Références bibliographiques

Iscan M, Loth SR (1986 b) Determination of age from the sternal rib in white females: a test of the phase method. *J Forensic Sci* 31: 990-999.

Iscan M, Loth SR, Wright RK (1987) Racial variation in the sternal extremity of the rib and its effect on age determination. *J Forensic Sci* 32: 452-466.

Iscan M, Loth SR (1989) Osteological manifestations of age in the adult. In: Iscan MY, Kennedy KAR (eds.) : *Reconstruction of life from the skeleton*. New-York: Wiley-Liss, pp. 23-40.

Iscan MY, Boldsen JL (1995) A statistical model of the rib phase method. *Rivista di Antropologia (Roma)* 73: 21-29.

Ishimine T (1989) Histopathological study of the aging process in the human sacroiliac joint. *Nippon Seikeigeka Gakkai Zasshi* 63: 1074-1084.

Janssens P, Perrot R (2008) <http://anthropologie-et-paléopathologie.univ-lyon.fr/>.

Kapandji IA (1985) *Physiologie articulaire, volume II, 5ème édition*. Paris : Maloine.

Kastler B, Vetter D, Patay Z, Germain P (2006) *Comprendre l'IRM Manuel d'auto-apprentissage*. Paris : Masson.

Katz D, Suchey JM (1986) Age determination of the male os pubis. *Am J Phys Anthropol* 69: 427-435.

Karlik SJ, Bartha R, Kennedy K, Chhem RK (2007) MRI and multinuclear NMR spectroscopy of a 3200 year old Egyptian mummy brain. *Am J Roentgenol* 189: W105-110.

Kemkes-Grottenthaler A (1996) Critical evaluation of osteomorphognostic methods of estimate adult age at death: a test of the complex method. *Homo* 46: 280-292.

## Références bibliographiques

Kimmerle E, Konigsberg L, Jantz R, Baraybar J (2008) Analysis of age-at-death estimation through the use of pubic symphyseal data. *J Forensic Sci.* 53 doi: 10.1111/j.1556-4029.2008.00711.x.

Klepinger LL, Katz D, Micozzi MS, Carroll L (1992) Evaluation of cast methods for estimating age from the os pubis. *J Forensic Sci* 37: 763-770.

Knight B (1991) *Forensic Pathology*. London: Arnold, pp. 87-122.

Koenig W (1896) 14 Photographien von Roentgen-Strahlen aufgenommen im Physikalischen Verein zu Frankfurt a. M. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.

Konigsberg L, Hens S, Jantz L, Jungers W (1998) Stature estimation and calibration: bayesian and maximum likelihood perspectives in physical anthropology. *Yearbook of Physical Anthropology* 41: 65-92.

Konigsberg L, Hermann N, Wescott D, Kimmerle E (2008) Estimation and evidence in forensic anthropology: age at death. *J Forensic Sci.* 53 doi: 10.1111/j.1556-4029.2008.00710.x.

Kreitner KF, Schweden FJ, Riepert T, Nafe B, Thelen M (1998) Bone age determination based on the study of the medial extremity of the clavicle. *Eur Radiol* 8: 1116-1122.

Krippendorff K (2006) Krippendorff's alpha reliability.  
<http://www.asc.upenn.edu/usr/krippendorff/webreliability2.pdf>.

Krogman WM, Iscan NY (1986) *The human skeleton in forensic Medicine*. Springfield, IL: Thomas.

Kunos CA, Simpson SW, Russell KF, Hershkovitz I (1999) First rib metamorphosis: its possible utility for human age-at-death estimation. *Am J Phys Anthropol* 110: 303-323.

Kurki H (2005) Use of the first rib for adult age estimation: a test of one method. *Int J Osteoarchaeol* 15: 342-350.

## Références bibliographiques

Laborier B (2002) Le défaut d'identification d'un corps : disparition – absence / aspects juridiques. *J Méd Lég Droit Méd* 45: 127-129.

Lamendin H, Baccino E, Humbert JF, Tavernier JC, Nossintchouk R, Zerilli A (1992) A simple technique for age estimation in adult corpses: the two criteria dental method. *J Forensic Sci* 37: 1373-1379.

Landis JR, Koch GG (1977) A one-way components of variance model for categorical data. *Biometrics* 33: 671-679.

Leonetti G, Piercecchi MD, Vareilles F, Cianfarani F (1995) La détermination de l'âge chez le vivant. Intérêt et méthodes. *J Méd Lég Droit Méd* 38: 345-357.

Lewin PK, Harwood-Nash DC (1977 a) X-ray computed axial tomography of an ancient Egyptian brain. *ICRS Med Sci* 5: 78.

Lewin PK, Harwood-Nash DC (1977 b) Computerized axial tomography in medical archaeology. *Paleopathol Newsl* 17: 8-9.

Lombard M, Snyder-Duch J, Bracken CC (2005) Practical resources for assessing and reporting intercoder reliability in content analysis research project. <http://www.temple.edu/mmc/reliability/#Why%20should%20content%20analysis%20researchers%20care%20about%20intercoder%20reliability>.

Londe A (1897) Les rayons Roentgen et les momies. *La Nature* 25: 103-105.

Long JS (1997) Regression models for categorical and limited dependant variables. Thousand Oaks, CA: Sage publications.

Loth SR, Iscan M, Scheuerman EH (1994) Intercostal variation at the sternal end of the rib. *Forensic Sci Int* 65: 135-143.

## Références bibliographiques

Lovejoy CO, Meindl RS, Pryzbeck TR, Mensforth RP (1985) Chronological metamorphosis of the auricular surface of the ilium: a new method for the determination of adult skeletal age at death. *Am J Phys Anthropol* 68: 15-28.

Lucy D, Aykroyd RG, Pollard A M, Solheim T (1996) A Bayesian approach to adult human age estimation from dental observations by Johansons age changes. *J Forensic Sci* 41: 189-194.

Lynnerup N, Thomsen JL, Frohlich B (1998) Intra- and inter-observer variation in histological criteria used in age at death determination based on femoral cortical bone. *Forensic Sci Int* 91: 219-30.

Lynnerup N, Frohlich B, Thomsen JL (2006) Assessment of age at death by microscopy: unbiased quantification of secondary osteons in femoral cross sections. *Forensic Sci Int* 159 Suppl 1: S100-3.

Macchiarelli R, Bondioli L, Galichon V, Tobias PV (1999) Hip bone trabecular architecture shows uniquely distinctive locomotor behaviour in South African australopithecines. *J Hum Evol* 36: 211-232.

Magid D, Bryan BM, Drebin RA, Ney D, Fishman EK (1989) Three-dimensional imaging of an Egyptian mummy. *Clin Imag* 13: 239–240.

Martrille L, Ubelaker DH, Cattaneo C, Seguret F, Tremblay M, Baccino E (2007) Comparison of four skeletal methods for the estimation of age at death on white and black adults. *J Forensic Sci* 52: 302-307.

Marx M, D'Auria SH (1988) Three-dimensional CT reconstructions of an ancient human Egyptian mummy. *Am J Roentgenol* 150: 147–149.

Masset C (1976) Sur quelques fâcheuses méthodes de détermination de l'âge des squelettes. *Bull Mem Soc Anthropol Paris* 3: 329-336.

## Références bibliographiques

McErlain DD, Chhem RK, Granton P, Leung A, Nelson A, White C, Holdsworth D (2007) Micro-computed tomography imaging of an Egyptian mummy brain. Abstract, VI World Congress on Mummy Studies, 20–24 February, Lanzarote.

McKern TW, Stewart TD (1957) Skeletal age changes in young american males. Technical report EP-45. Natick, MA: U.S Army Quartermaster Research and Development Center, Environmental Protection Research Division.

Meindl RS, Lovejoy CO, Mensforth RP, Walker RA (1985) A revised method of age determination using the os pubis, with a review and tests of accuracy of other current methods of pubic symphyseal aging. *Am J Phys Anthropol* 68: 28-45.

Meindl RS, Russel KF (1997) Recent advances in method and theory in paleodemography. *Annual Review of Anthropology* 27: 375-399.

Melcher AH, Holowka S, Pharoah M, Lewin PK (1997) Noninvasive computed tomography and three-dimensional reconstruction of the dentition of a 2800-year-old Egyptian mummy exhibiting extensive dental disease. *Am J Phys Anthropol* 103: 329–340.

Molleson T, Cox M (1993) The Spitafields project (volume 2-Anthropology). CBA Research Report 86: 167-179.

Milner GR, Wood JW, Boldsen JL (2000) Paleodemography. In Katzenberg MA, Saunders SR (eds.): *Biological anthropology of the human skeleton*, Wiley-Liss, New York, pp. 467-497.

Miras A, Mali M, Malicier D (1998) *L'identification médico-légale*. Paris : Eska.

Molleson T, Cox M (1993) The Spitafields project (volume 2-Anthropology). CBA Research Report 86: 167-179.

## Références bibliographiques

Moseley CF (1996) Leg length discrepancy and angular deformity of the lower limbs. In: Morrissy RT, Weinstein SL (eds.): Lovell and Winter's pediatric orthopaedics. Vol 2. Philadelphia, Pa: Lippincott-Raven, pp. 849-901.

Mulhern DM, Jones EB (2005) Test of revised method of age estimation from the auricular surface of the ilium. *Am J Phys Anthropol* 126: 61-65.

Murray KA, Murray T (1991) A test of the auricular surface aging technique. *J Forensic Sci* 36: 1162-1169.

Nadalín V, Cotterchio M, McKeown-Eyssen G, Gallinger S (2003) Concordance entre les données obtenues de tiers et les données obtenues de cas au moyen du questionnaire épidémiologique auto-administré du registre du cancer familial du côlon de l'Ontario. *Maladies chroniques au Canada* 24: 1-9.

Nedden DZ, Knapp R, Wicke K, Judmaier W, Murphy WA Jr, Seidler H, Platzer W (1994) Skull of a 5300-year-old mummy: reproduction and investigation with CT-guided stereolithography. *Radiology* 193: 269-272.

Nemeskeri J, Harsanyi L, Ascadi G (1960) Methoden zur diagnose der lebensalters von skelettfunden. *Anthrop Anz* 24: 70-95.

Neveu D, Aubas P, Seguret F, Kramar A, Dujols P (2004) Mode d'emploi des statistiques kappa dans l'estimation de l'accord qualitatif inter-observateur pour des tables 3x3. In : XXXVIe Journées de statistique (24-28 mai 2004). Montpellier, Société Française de Statistique.

Notman NH, Tashjian J, Aufderheide AC, Cass OW, Shane OC III, Berquist TH, Gedgudas E (1986) Modern imaging and endoscopic biopsy techniques in Egyptian mummies. *Am J Roentgenol* 146: 93-96.

Oettle AC, Steyn M (2000) Age estimation from sternal ends of ribs by phase analysis in South African Blacks. *J Forensic Sci* 45: 1071-1079.

## Références bibliographiques

Ogden JA (1984) The uniqueness of growing bones. In Rockwood CA, Wilkins KE, King RE (eds.) : Fractures in Children. PA: Lippincott, pp. 1-86.

Ogden JA, McCarthy SM (1983) Radiology of post-natal development. VIII. Distal tibia and fibula. *Skeletal Radiol* 10: 209-220.

Ohtani S, Matsushima Y, Kobayashi Y, Yamamoto T (2002) Age estimation by measuring the racemization of aspartic acid from total amino acid content of several types of bone and rib cartilage: a preliminary account. *J Forensic Sci* 47: 32-38.

Olze A, van Niekerk P, Schmidt S, Wernecke KD, Rösing FW, Geserick G, Schmeling A (2006) Studies on the progress of third-molar mineralisation in a Black African population. *Homo* 57: 209-217.

Owers SK, Pastor RF (2005) Analysis of quantitative methods for ribs seriation using the spitalfields documented skeletal collection. *Am J Phys Anthropol* 127: 210-218.

Pasquier E, De Saint Martin Pernot L, Burdin V, Mounayer C, Le Rest C, Colin D, Mottier D, Roux C, Baccino E (1999) Determination of age at death: assessment of an algorithm of age prediction using numerical three-dimensional CT data from pubic bones. *Am J Phys Anthropol* 108: 261-268.

Paterson RS (1929) A radiological investigation of the epiphyses of the long bones. *J Anat* 64: 28-46.

Petersson J, Brismar T, Smedby O (2006) Analysis of skeletal microstructure with clinical multislice CT. *Med Image Comput Assist Interv Int Conf Med Image Comput Assist Interv* 9: 880-887.

Petrie WMF (1898) Deshasheh, 1897. Fifteen memoirs of the Egypt exploration fund. The Offices of the Egypt Exploration Fund, London.

Piepenbrink H, Frahm J, Haase A, Matthaei D (1986) Nuclear magnetic resonance imaging of mummified corpses. *Am J Phys Anthropol* 70: 27-28.

## Références bibliographiques

Plattner T, Thali MJ, Yen K, Sonnenschein M, Stoupis C, Vock P, Zwygart-Brügger K, Kilchör T, Dirnhofer R (2003) Virtopsy-postmortem multislice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI) in a fatal scuba diving incident. *J Forensic Sci* 48: 1347–1355.

Puhakka KB, Melsen F, Jurik AG, Boel LW, Vesterby A, Egund N (2004) MR imaging of the normal sacroiliac joint with correlation to histology. *Skeletal Radiol* 33: 15-28.

Pyle SI, Hoerr NL (1955) *Radiographic Atlas of Skeletal Development of the Knee*. Springfield, Il: Thomas.

Quatrehomme G, Cotin S, Alunni-Perret V, Garidel Y, Grévin G, Bailet P, Ollier A (1998) La superposition, la restauration et la reconstruction faciales : une aide à l'identification médico-légale. *J Méd Lég Droit Méd* 42: 11-22.

Resnick D (2002) *Articular anatomy and histology. Diagnosis of bone and joint disorders*. Philadelphia: W.B. Saunders. p 688–707.

Resnick D, Niwayama G, Goergen TG (1975) Degenerative disease of the sacroiliac joint. *Invest Radiol* 10: 608-621.

Rook L, Bondioli L, Kohler M, Moya-Sola S, Macchiarelli R (1999) *Oreopithecus* was a bipedal ape after all: evidence from the iliac cancellous architecture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96: 8795-8799.

Röntgen WC (1895) Ueber eine neue art von strahlen, Sitzgber. *Physik-Med. Ges. Würzburg*, December, 132.

Ross CA, Segee SK, Suchey JM (1987) Determination of age in the male os pubis, Interobserver error studies. Paper presented at the 39<sup>th</sup> Annual Meeting of the American Academy of Forensic Sciences, San Diego.

## Références bibliographiques

Rougé D, Telmon N, Larrouy G, Duday H, Crubezy E, Arbus L (1992) Comparaison des critères visuels du pubis lors de la détermination de l'âge des individus au moment de la mort. *J Med Lég Droit Méd* 35: 359-363.

Rougé D (1993) Détermination du sexe et de l'âge de l'adulte au décès à partir de restes osseux : apports méthodologiques appliqués à l'étude de nécropoles médiévales. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse.

Ruhli FJ, Hodler J, Böni T (2002) Technical note: CT-guided biopsy: a new diagnostic method for paleopathological research. *Am J Phys Anthropol* 117: 272–275.

Rühli FJ, von Waldburg H, Nielles-Vallespin S, Böni T, Speier P (2007) Clinical magnetic resonance imaging of ancient dry human mummies without rehydration. *JAMA* 298: 2618-2620.

Russell KF, Simpson SW, Genovese J, Kinkel MD, Meindl RS, Lovejoy CO (1993) Independent test of the fourth rib aging technique. *Am J Phys Anthropol* 92: 53-62.

Salsabili N, Valojerdy MR, Hogg DA (1995) Variations in thickness of articular cartilage in the human sacroiliac joint. *Clinical Anat New York, NY* 8: 388-390.

Sashin D (1930) A critical analysis of the anatomy and the pathologic changes of the sacroiliac joints. *J Bone Joint Surg* 22: 891–910.

Saunders S, Fitzgerald C, Rogers T, Dunder C, McKillop H (1992) A test of several methods of skeletal age estimation using a documented archaeological sample. *Can Soc Forensic Sci J* 30: 49–60.

Sauvegrain J, Nahum H, Bronstein H (1962) Etude de la maturation osseuse du coude. *Ann Radiol* 5: 21-28.

Scheuer L, Black S (2000) *Developmental juvenile osteology*. San Diego: Academic Press.

## Références bibliographiques

Schmeling A, Reisinger W, Loreck D, Vendura K, Markus W, Geserick G (2000) Effects of ethnicity on skeletal maturation—consequences for forensic age estimations, *Int. J. Legal Med.* 113: 253–258.

Schmeling A, Schulz R, Reisinger W, Muhler M, Wernecke KD, Geserick G (2004) Studies on the time frame for ossification of the medial clavicular epiphyseal cartilage in conventional radiography. *Int J Legal Med* 118: 5-8.

Schmeling A, Geserick G, Reisinger W, Olze A (2007) Age estimation. *Forensic Sci Int* 165: 178-181.

Schmidt S, Mühler M, Schmeling A, Reisinger W, Schulz R (2007) Magnetic resonance imaging of the clavicular ossification. *Int J Legal Med* 121: 321-324.

Schmitt A, Broqua C (2000) Approche probabilistique pour estimer l'âge au décès à partir de l'ilium. *Bull Mém Soc Anthropol Paris*, 12: 279-301.

Schmitt A (2001) Variabilité de la sénescence du squelette humain. Réflexions sur les indicateurs de l'âge au décès : à la recherche d'un outil performant. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I.

Schmitt A (2002) Estimation de l'âge au décès des sujets adultes à partir du squelette: des raisons d'espérer. *Bull Mém Soc Anthropol Paris*, 14: 51-73.

Schmitt A, Murail P (2004) Is the first rib a reliable indicator of age at death assessment? Test of the method developed by Kunos et al (1999). *Homo* 54: 207-214.

Schmitt A (2004) Age-at-death assessment using the os pubis and the auricular surface of the ilium: a test on an identified Asian sample. *Int J Osteoarchaeol* 14: 1–6.

Schmitt A (2005) Une nouvelle méthode pour estimer l'âge au décès des adultes à partir de la surface sacro-pelvienne iliaque. *Bull Mém Soc Anthropol Paris* [En ligne], 17. Disponible sur : <http://bmsap.revues.org/document943.html>.

## Références bibliographiques

Schulz R, Mühler M, Mutze S, Schmidt S, Reisinger W, Schmeling A (2005) Studies on the time frame for ossification of the medial epiphysis of the clavicle as revealed by CT scans. *Int J Legal Med* 119: 142-145.

Schulz R, Mühler M, Reisinger W, Schmidt S, Schmeling A (2008) Radiographic staging of ossification of the medial clavicular epiphysis. *Int J Legal Med* 122: 55-58.

Schulze D, Rother U, Fuhrmann A, Richel S, Faulmann G, Heiland M (2006) Correlation of age and ossification of the medial clavicular epiphysis using computed tomography. *Forensic Sci Int* 158: 184-189.

Shibata Y, Shirai Y, Miyamoto M (2002) The aging process in the sacroiliac joint: helical computed tomography analysis. *J Orthop Sci* 7: 12-18.

Snow CC (1983) Equations for estimating age at death from the pubic symphysis: a modification of the McKern-Stewart method. *J Forensic Sci* 28: 864-870.

Solheim T (1988) Dental attrition as an indicator of age. *Gerodontology* 4: 299-304.

Stewart TD (1957) Distortion of the pubic symphyseal surface in females and its effects on age determination. *Am J Phys Anthropol* 15: 9-18.

Storey R (2007) An elusive paleodemography? A comparison of two methods for estimating the adult age distribution of deaths at late Classic Copan, Honduras. *Am J Phys Anthropol* 132: 40-47.

Suchey JM (1979) Problems in the aging of females using the os pubis. *Am J Phys Anthropol* 51: 467-470.

Suchey JM, Wiseley DV, Katz D (1986) Evaluation of the Todd and McKern-Stewart methods for aging the male os pubis. In Reichs KJ (ed.): *Forensic osteology: Advances in the identification of human remains*. Springfield, IL: Thomas, pp. 33-67.

## Références bibliographiques

Suchey JM (1987) Male pubis age determination-instructional casts. Typescript materials distributed with the Suchey-Brooks male instructional casts. Bellvue, Colorado: France Casting.

Suchey JM, Brooks ST, Katz D (1988) Instructional materials accompanying female pubic symphyseal models of the Suchey-Brooks system, distributed by France Casting (Diane France, 2190 West Drake Road, Suite 259, Fort Collins, Colorado 80526).

Suchey JM, Katz D (1998) Applications of pubic age determination in a forensic setting. In Reichs KJ (ed.): Forensic osteology: Advances in the identification of human remains. Springfield, IL: Thomas, pp. 204-236.

Tasu JP (2000) La pause statistique - Chapitre IV : la courbe ROC. Feuillet de Radiologie 40: 504-505.

Team RDC (2008) R: A language and environment for statistical computing.

Telmon N, Allery JP, Blanc A, Gainza D, Rougé D (2004) Comparaison de méthodes de détermination histologique et scopique de l'âge à partir de l'extrémité sternale de la 4ème côte. Antropo 7: 203-209.

Telmon N, Gaston A, Chemla P, Blanc A, Joffre F, Rougé D (2005) Application of the Suchey-Brooks method to three-dimensional imaging of the pubic symphysis. J Forensic Sci 50: 507-512.

Thali MJ, Yen K, Plattner T, Schweitzer W, Vock P, Ozdoba C, Dirnhofer R (2002) Charred body: virtual autopsy with multi-slice computed tomography and magnetic resonance imaging. J Forensic Sci 47: 1326-1331.

Thali MJ, Yen K, Schweitzer W, Vock P, Boesch C, Ozdoba C, Schroth G, Ith M, Sonnenschein M, Doernhoefer T, Scheurer E, Plattner T, Dirnhofer R (2003 a) Virtopsy, a new imaging horizon in forensic pathology: virtual autopsy by postmortem multislice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI)-a feasibility study. J Forensic Sci 48: 386-403.

## Références bibliographiques

Thali MJ, Schweitzer W, Yen K, Vock P, Ozdoba C, Spielvogel E, Dirnhofer R (2003 b) New horizons in forensic radiology: the 60-second digital autopsyfull-body examination of a gunshot victim by multislice computed tomography. *Am J Forensic Med Pathol* 24: 22–27.

Thali MJ, Yen K, Schweitzer W, Vock P, Ozdoba C, Dirnhofer R (2003 c) Into the decomposed body-forensic digital autopsy using multislice-computed tomography. *Forensic Sci Int* 134: 109–114.

Tobias PV (1998) Ape-Like Australopithecus After Seventy Years: Was It a Hominid? *The J R Anthropol Inst* 4: 283-308.

Todd TW (1920-21) Ages changes in the pubic bone: I. The white male pubis. *Am J Phys Anthropol* 3: 285-334.

Turner CH, Cowin SC, Rho JY, Ashman RB, Rice JC (1990) The fabric dependence of the orthotropic elastic constants of cancellous bone. *J Biom* 23: 549-561.

Ubelaker DH (2000) Methodological consideration in the forensic applications of human skeletal biology. In Katzenberg MA, Saunders SR (eds.): *Biological anthropology of the human skeleton*, Wiley-Liss, New York, pp. 41-67.

Waldron T (1987) The relative survival of the human skeleton: implication for palaeopathology. In: Boddington GA, Janaway RC (eds) : *Death, decay and reconstruction* Manchester University Press, pp. 55–64.

Webb PA, Suchey JM (1985) Epiphyseal union of the anterior iliac crest and medial clavicle in a modern multiracial sample of American males and females. *Am J Phys Anthropol* 86: 457-466.

Weber GW (2001) Virtual anthropology (VA): a call for glasnot in paleoanthropology. *Anat Rec* 265: 193-201.

Wikipedia (2008) L'imagerie par résonance magnétique.

[http://fr.wikipedia/wiki/Imagerie\\_par\\_r%C3%A9sonance\\_magn%C3%A9tique](http://fr.wikipedia/wiki/Imagerie_par_r%C3%A9sonance_magn%C3%A9tique).

## **Références bibliographiques**

Yardley M, Rutka J (1997) Rescued from the sands of time: interesting otologic and rhinologic findings in two ancient Egyptian mummies from the Royal Ontario Museum. *J Otolaryngol* 26: 379–383.

Yoder C, Ubelaker DH, Powell JF (2001) Examination of variation in sternal rib end morphology relevant to age assessment. *J Forensic Sci* 46: 223-227.

# Annexes

---

**Tableau n° A-1 - Evolution morpho-chronologique de l'extrémité sternale, de l'épiphyse de la tête, et du tubercule épiphysaire de la première côte chez les sujets non adultes (d'après Kunos et al., 1999).**

Chronological age	Rib costal face		
	Geometric shape	General surface topography	General margin form
1	Anteroposterior ovoid	<sup>a</sup> Immature, smooth homogeneous bone	<sup>b</sup> Rounded, undefined
2			
3	Elliptical with central surface projecting medially creating bowed appearance	Slight undulating ridges and depressions	<sup>c</sup> Superoinferior bone deposition about margin creates rimmed appearance
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10	<sup>d</sup> Anteroposterior slanted slanted face	Ruffled, swollen immature bone	Knobby margins with increasing definition
11			
12			
13			
14	<sup>e</sup> Superoinferior groove separating the face into an anterior two-thirds and a posterior one third	Transverse ridges bounded by ovoid cavities	<sup>f</sup> Raised margins, defined
15			
16			
17			
18			
19			
20			

Chronological age <sup>g</sup>	Rib head epiphyseal region		
	Geometric shape	General surface topography	General margin form
1	Tear-drop	<sup>h</sup> Immature subchondral face	Distinct, rounded edge with rough inferior surface
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8	Increasingly discoid		
9			
10			
11	Circular		
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

Chronological age <sup>g</sup>	Rib tubercle epiphyseal region					
	Geometric shape	General surface topography	General margin form			
1	Ellipsoid	<sup>i</sup> Immature, crescent profile when viewed from superior	Rounded			
2						
3						
4						
5						
6	Ellipsoid with defined articular surface					
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14				<sup>j</sup> Ovate, robust profile that swells beyond shaft profile		Defined, sharp edges
15						
16						
17	Lenticular contour	<sup>k</sup> Epiphysis fusing				
18						
19						
20						

<sup>l</sup> Superscript letters denote major landmarks in first rib morphosis.

**Tableau n° A-2 - Evolution morpho-chronologique de l'extrémité sternale de la première côte sur une population adulte (d'après Kunos et al., 1999).**

Chronological age	Geometric shape	Surface topography	Surface texture	Margins of face	Periarticular margins
20					
21					
22					
23	Superoinferior shape of face increases thickness, darning profile				
24		Surface becomes flat, knobby topography is lost			
25			Increasing filamentous subchondral ossification		
26					
27	<sup>1</sup> Ovate, anterior thickening of margin projects medially				
28					
29		Pittings in surface are evident			
30			<sup>2</sup> Cribriform texture		
31					
32					
33					
34		Ridges of cortical bone creates distinct macroprotuberances			
35			Irregular small pits with smooth margins		
36	<sup>3</sup> Ovate, anteroposterior bone deposition creates superior projection medially				
37		Increasing excavation of surface topography			
38					
39					
40	<sup>4</sup> Ovoid profile, cartilage encapsulated by shell of cortical bone creating a central concave cavity				
41					
42					
43					
44					
45					
46					
47					
48	Ovoid profile, U-shaped cavity deepens as shell expands from sternal face				
49		<sup>5</sup> Occasional irregular osteophytic spikes emanating from surface projecting medially			
50					
51					
52					
53					
54					
55					
56					
57					
58					
59					
60					
61					
62					
63					
64					
65					
66					
67					
68					
69					
70					
71					
72					
73					
74					
75					
76					
77					
78					
79					
80					

<sup>1</sup>Superscript letters denote major landmarks in first rib morphoforms.

**Tableau n° A-3 - Evolution morpho-chronologique de l'épiphyse de la tête de la première côte sur une population adulte (d'après Kunos et al., 1999).**

Chronological age	Shape of head	Surface topography	Surface texture	Margins of rib head	Periarticular margins
20	Circular profile of head	Convex surface	<sup>4</sup> Fused remodeled epiphysis, smooth articular surface	<sup>1</sup> Rounded	Smooth
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27	Local rugosities occur	Beginning of surface irregularities	Smooth articular surface	Dorsal outer margin becomes continuous with neck	Initial irregularities especially in anterior margin
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					
35					
36					
37					
38					
39					
40	<sup>4</sup> Circular with increasing robusticity and convex profile	Begin formation of mediolateral groove due to build-up of superior margin	Continued smooth articular surface	<sup>4</sup> Rim becoming defined with marginal irregularities and ridges	
41					
42					
43					
44					
45					
46					
47					
48					
49					
50	Ovoid, irregular concentrically layered profile		<sup>4</sup> Smooth with occasional pits or depressions, macroporosity locally	Rim well defined and sharply angled	Inferior margins increase in irregularity
51					
52					
53					
54					
55					
56					
57					
58					
59					
60	Secondary flattening of surface topography		Rugose profile with macroporosity often		
61					
62					
63					
64					
65					
66					
67					
68					
69					
70	Irregular geometry with inflated puffy pockets of bone		<sup>4</sup> Gross pitting of articular surface		
71					
72					
73					
74					
75					
76					
77					
78					
79					
80					

<sup>1</sup> Superscript letters denote major landmarks in first rib morphosis.

**Tableau n° A-4 - Evolution morpho-chronologique du tubercule épiphysaire de la première sur une population adulte (d'après Kunos et al., 1999).**

Chronological age	Shape of tubercle and neck	Surface topography	Surface texture	Margins of facet	Periarticular margins
20	<sup>a</sup> Lenticular profile	Superoinferior topography is rounded	Dense, smooth texture	Medial margin becomes angular, raised and distinct	<sup>b</sup> Margins are smooth and rounded
21			Cortical bone with depressions and ridges		
22			Smooth cortical surface		
23					
24	Ovate, swollen appearing outline when compared to shaft	Topography becomes flatter than previous	Pitting may develop on tubercle facet	<sup>d</sup> Superior margin becomes angular	Begins showing elevation due to superior ligamentous attachment of joint capsule
25					
26					
27					
28	Epiphysal bil- lowing associ- ated with peri- articular bone deposition	Beginning of mediolateral concavity	Lipping begins on inferior margin	<sup>e</sup> Inferior margin rounded and indistinct, other margins become increas- ingly worn	Begins showing rugosity
29					
30					
31					
32	<sup>f</sup> Tear-drop shape with pointed medial margin	Macroporosity develops, but not exclusively	<sup>f</sup> Rib surface becomes slightly rugose	<sup>h</sup> Beginnings of irregularities with osteo- phytes	Superior mar- ginal deposition increases with surface rugosity
33					
34					
35					
36	Irregular, circular profile			<sup>i</sup> Margins become swollen and irregular	Osteophytic for- mations become prominent
37					
38					
39					
40				Increased mar- ginal pitting within rim	
41					
42					
43					
44			Pitting increases in severity altering surface texture	Irregular profile	
45					
46					
47					
48					
49					
50					
51					
52					
53					
54					
55					
56					
57					
58					
59					
60					
61					
62					
63					
64					
65					
66					
67					
68					
69					
70					
71					
72					
73					
74					
75					
76					
77					
78					
79					
80					

<sup>a</sup> Superscript letters denote major landmarks in first rib morphostats.

**Tableau n° A-5 - Distribution des probabilités a posteriori à partir d'une population de référence dont la distribution par âge correspond à une espérance de vie à la naissance de 30 ans. SSPIA : organisation transverse, SSPIB : modification de la surface, SSPIC : modification apicale, SSPID : modification de la tubérosité iliaque (d'après Schmitt, 2005).**

Score				Probabilités a posteriori					Estimation
SSPIA	SSPIB	SSPIC	SSPID	20-29 ans	30-39 ans	40-49 ans	50-59 ans	>60 ans	
1	1	1	1	0,88	0,09	0,02	0,01	0,00	20-29
1	1	1	2	0,47	0,32	0,13	0,08	0,00	20-49
1	1	2	1	0,83	0,09	0,05	0,04	0,00	20-29
1	1	2	2	0,29	0,21	0,20	0,30	0,00	<60
1	2	1	1	0,42	0,38	0,13	0,06	0,02	20-39
1	2	1	2	0,07	0,39	0,25	0,22	0,08	30-59
1	2	2	1	0,26	0,24	0,21	0,22	0,07	<60
1	2	2	2	0,02	0,13	0,21	0,42	0,22	>40
2	1	1	2	0,23	0,39	0,22	0,16	0,00	20-49
2	1	2	1	0,60	0,16	0,12	0,11	0,00	20-49
2	1	2	2	0,11	0,19	0,27	0,43	0,00	30-59
2	1	1	1	0,73	0,19	0,06	0,02	0,00	20-39
2	2	1	1	0,19	0,41	0,21	0,11	0,08	20-49
2	2	1	2	0,02	0,26	0,24	0,23	0,26	>30
2	2	2	1	0,08	0,18	0,22	0,27	0,26	>30
2	2	2	2	0,00	0,06	0,15	0,31	0,47	>40
1	3	1	1	0,24	0,10	0,32	0,15	0,19	<60
1	3	1	2	0,02	0,05	0,27	0,23	0,44	>40
1	3	2	1	0,07	0,03	0,23	0,25	0,42	>40
1	3	2	2	0,00	0,01	0,12	0,24	0,62	>50
2	3	1	1	0,05	0,06	0,26	0,14	0,49	>40
2	3	1	2	0,00	0,02	0,14	0,13	0,72	>50
2	3	2	1	0,01	0,01	0,12	0,15	0,71	>50
2	3	2	2	0,00	0,00	0,05	0,11	0,84	>60
1	4	1	1	0,00	0,20	0,09	0,28	0,43	>40
1	4	1	2	0,00	0,06	0,05	0,27	0,63	>50
1	4	2	1	0,00	0,04	0,04	0,30	0,62	>50
1	4	2	2	0,00	0,01	0,02	0,24	0,74	>50
2	4	1	1	0,00	0,07	0,05	0,16	0,72	>50
2	4	2	1	0,00	0,01	0,02	0,14	0,83	>60
2	4	1	2	0,00	0,02	0,02	0,12	0,84	>60
2	4	2	2	0,00	0,00	0,01	0,10	0,90	>60

**Tableau n° A-6 -** Distribution des probabilités a posteriori à partir d'une population de référence dont la distribution par âge est homogène. SSPIA : organisation transverse, SSPIB : modification de la surface, SSPIC : modification apicale, SSPID : modification de la tubérosité iliaque (d'après Schmitt, 2005).

Score				Probabilités a posteriori					Estimation
SSPIA	SSPIB	SSPIC	SSPID	20-29 ans	30-39 ans	40-49 ans	50-59 ans	>60 ans	
1	1	1	1	0,89	0,08	0,03	0,00	0,00	20-29
1	1	1	2	0,63	0,22	0,15	0,00	0,00	20-39
1	1	2	1	0,81	0,11	0,09	0,00	0,00	20-29
1	1	2	2	0,45	0,23	0,32	0,00	0,00	20-49
1	2	1	1	0,40	0,32	0,19	0,09	0,00	20-49
1	2	1	2	0,11	0,32	0,33	0,23	0,01	<60
1	2	2	1	0,23	0,25	0,31	0,19	0,02	<60
1	2	2	2	0,04	0,18	0,38	0,34	0,05	30-59
2	1	1	2	0,40	0,37	0,23	0,00	0,00	20-49
2	1	2	1	0,63	0,21	0,16	0,00	0,00	20-39
2	1	2	2	0,25	0,32	0,43	0,00	0,00	20-49
2	1	1	1	0,75	0,18	0,07	0,00	0,00	20-39
2	2	1	1	0,20	0,42	0,23	0,13	0,01	20-49
2	2	1	2	0,04	0,34	0,32	0,27	0,03	30-59
2	2	2	1	0,10	0,29	0,33	0,23	0,05	30-59
2	2	2	2	0,02	0,17	0,34	0,36	0,11	30-59
1	3	1	1	0,07	0,16	0,33	0,31	0,13	30-59
1	3	1	2	0,01	0,08	0,29	0,40	0,22	>40
1	3	2	1	0,02	0,06	0,27	0,31	0,34	>40
1	3	2	2	0,00	0,03	0,19	0,33	0,46	>40
2	3	1	1	0,03	0,15	0,28	0,30	0,25	>40
2	3	1	2	0,00	0,07	0,21	0,35	0,36	>40
2	3	2	1	0,01	0,05	0,18	0,25	0,52	>40
2	3	2	2	0,00	0,02	0,11	0,24	0,63	>50
1	4	1	1	0,00	0,26	0,14	0,38	0,23	>30
1	4	1	2	0,00	0,12	0,11	0,44	0,33	>40
1	4	2	1	0,00	0,09	0,09	0,32	0,50	>50
1	4	2	2	0,00	0,03	0,06	0,31	0,60	>50
2	4	1	1	0,00	0,21	0,10	0,32	0,37	>40
2	4	2	1	0,00	0,05	0,05	0,22	0,67	>50
2	4	1	2	0,00	0,09	0,07	0,34	0,50	>50
2	4	2	2	0,00	0,02	0,03	0,20	0,75	>50