

Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

---

**Présentée et soutenue par :**

**Pauline SAINT-MARTIN**

le vendredi 17 janvier 2014

**Titre :**

APPORT DE L'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE DANS LA  
DÉTERMINATION DE L'AGE CHEZ LE SUJET VIVANT

---

**École doctorale et discipline ou spécialité :**

ED BSB : Anthropobiologie

**Unité de recherche :**

Laboratoire d'Anthropobiologie AMIS, UMR 5288 CNRS

**Directeur(s) de Thèse :**

M. le Professeur Norbert TELMON (Professeur des Universités), Toulouse

M. le Docteur Fabrice DEDOUIT (Maître de Conférences des Universités), Toulouse

**Jury :**

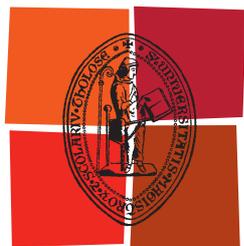
M. le Professeur Gérald QUATREHOMME (Professeur des Universités), Nice, Rapporteur

M. Michel SIGNOLI (Directeur de Recherche), Marseille, Rapporteur

M. le Professeur Daniel ROUGE (Professeur des Universités), Toulouse

M. le Professeur Dominique PERROTIN (Professeur des Universités), Tours

M. le Professeur Pascal ADALIAN (Professeur des Universités), Marseille



Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

---

**Présentée et soutenue par :**

**Pauline SAINT-MARTIN**

le vendredi 17 janvier 2014

**Titre :**

APPORT DE L'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE DANS LA  
DÉTERMINATION DE L'AGE CHEZ LE SUJET VIVANT

---

**École doctorale et discipline ou spécialité :**

ED BSB : Anthropobiologie

**Unité de recherche :**

Laboratoire d'Anthropobiologie AMIS, UMR 5288 CNRS

**Directeur(s) de Thèse :**

M. le Professeur Norbert TELMON (Professeur des Universités), Toulouse

M. le Docteur Fabrice DEDOUIT (Maître de Conférences des Universités), Toulouse

**Jury :**

M. le Professeur Gérald QUATREHOMME (Professeur des Universités), Nice, Rapporteur

M. Michel SIGNOLI (Directeur de Recherche), Marseille, Rapporteur

M. le Professeur Daniel ROUGE (Professeur des Universités), Toulouse

M. le Professeur Dominique PERROTIN (Professeur des Universités), Tours

M. le Professeur Pascal ADALIAN (Professeur des Universités), Marseille

# TABLE DES MATIÈRES

<b>PRÉAMBULE</b>	<b>1</b>
<b>PREMIÈRE PARTIE : INTRODUCTION</b>	<b>4</b>
<b>Chapitre 1 – La détermination de l’âge chez le sujet vivant</b>	<b>5</b>
1.1. Plusieurs définitions de l’âge	5
1.2. Contexte juridique	6
1.2.1. La majorité et la responsabilité pénale des mineurs en Europe	6
1.2.2. La majorité et la responsabilité pénale des mineurs en France	6
1.2.3. Juridictions compétentes en fonction de l’âge	7
1.2.4. Rétention et garde à vue	8
1.2.5. Détention provisoire	9
1.2.6. Mineurs étrangers isolés	9
1.3. Rôle du médecin	10
<b>Chapitre 2 – La détermination de l’âge par l’étude de la maturation osseuse des épiphyses</b>	<b>12</b>
2.1. Les os longs – anatomie	12
2.2. La croissance des os longs – physiopathologie	12
2.3. Application à la détermination de l’âge osseux	14
<b>Chapitre 3 – Les méthodes et indicateurs de référence</b>	<b>17</b>
3.1. Plusieurs types de méthodes	17
3.2. Maturation osseuse du poignet et de la main	17
3.2.1. Principe	17
3.2.2. Méthode de Greulich et Pyle	18
3.2.3. Méthode de Tanner et Whitehouse	20

3.2.4. Méthode de Sempé et logiciel MATUROS®	21
3.2.5. Méthode de FELS (Fels hand-wrist method)	21
3.2.6. Atlas de Thiemman-Nitz	21
3.2.7. Quelle méthode utiliser ?	22
3.3. Extrémité médiale de la clavicule	24
3.3.1. Maturation osseuse de l'extrémité médiale de la clavicule	24
3.3.2. Études de radiographies	25
3.3.3. Études de scanners	26
3.3.4. Synthèse	29
3.4. Crête iliaque	30
3.4.1. Signe de Risser	30
3.4.2. Méthodes dérivées	32
3.5. Coude	33
3.5.1. Méthode de Sauvegrain, Nahum et Bronstein	33
3.5.2. Méthodes dérivées	34
3.5.3. Intérêts pratiques	35
3.6. Autres méthodes	35
3.6.1. Genou	35
3.6.2. Vertèbres cervicales	36
3.6.3. Première côte	36
3.6.4. Autres	37
3.7. Le choix de la méthode appropriée	37
3.8. Les recommandations actuelles	39

## **DEUXIÈME PARTIE : APPORT DE L'IRM DANS LA DÉTERMINATION DE L'AGE** **41**

### **Chapitre 1 – Généralités** **42**

1.1. Le développement des techniques d'imagerie non irradiantes	42
1.2. Échographie	43
1.2.1. Poignet	43
1.2.2. Extrémité médiale de la clavicule	43
1.2.3. Crête iliaque	44

1.2.4. Synthèse	45
1.3. Imagerie par Résonance Magnétique (IRM)	45
1.3.1. Poignet	45
1.3.2. Extrémité médiale de la clavicule	46
1.3.3. Genou	48
1.4. IRM – Principes et fonctionnement	48
1.4.1. Principe général	48
1.4.2. Le phénomène de résonance magnétique nucléaire	49
1.4.3. Relaxation longitudinale (T1)	50
1.4.4. Relaxation transversale (T2)	51
1.4.5. Encodage spatial grâce aux gradients	51
1.4.6. Pondérations	52
1.4.6.1. Pondération T1	52
1.4.6.2. Pondération T2	53
1.4.6.3. Densité Protonique	53
1.4.7. Séquences	53
1.4.7.1. Écho de spin ou séquence spin écho	53
1.4.7.2. Inversion-récupération	54
1.4.7.3. Séquence Short Time of Inversion Recovery	54
1.4.7.4. Sequence Fluid Attenuated Inversion Recovery	54
1.4.7.5. Séquence en écho de gradient ou gradient de diffusion	54
1.4.7.6. Séquence saturation de graisse	54
<b>Chapitre 2 – Étude des épiphyses de l'extrémité distale du tibia et du calcanéum</b>	<b>55</b>
2.1. Âges de fusion de l'épiphyse distale du tibia et du calcanéum – revue de la littérature	55
2.1.1. Fusion de l'épiphyse distale du tibia	55
2.1.2. Fusion de l'épiphyse du calcanéum	56
2.1.3. Atlas de Hoerr et Pyle	56
2.1.4. Limites des études	57
2.1.5. Intérêts de l'étude de l'extrémité distale du tibia et du calcanéum par IRM	58
2.2. Objectifs	59

<b>2.3. Matériel et méthodes</b>	<b>59</b>
2.3.1. Matériel	59
2.3.2. Caractéristiques techniques des IRM	60
2.3.3. Analyse des images	61
2.3.4. Classification par stades	61
2.3.5. Analyse statistique	66
<b>2.4. Résultats</b>	<b>66</b>
2.4.1. Répartition de l'échantillon par âge et par sexe	66
2.4.2. Variabilités inter- et intra-observateurs	67
2.4.3. Répartition des âges pour les stades 1,2 et 3 par sexe et par os	68
2.4.4. Répartition des âges par rapport au seuil des 18 ans pour les stades 1,2 et 3, par sexe et par os	70
2.4.5. Âges transitionnels par sexe et pour chaque épiphyse	71
2.4.6. Probabilités bayésiennes	72
<b>Chapitre 3 – Développement d'une technique automatisée d'estimation de l'âge</b>	<b>73</b>
3.1. Introduction	73
3.2. Objectif	74
3.3. Matériel et méthodes	74
3.3.1. Matériel	74
3.3.2. Traitement des images	75
3.3.3. Variation des niveaux de gris à la jonction métaphyso-épiphysaire	77
3.3.4. Analyse statistique	77
3.3.5. Bootstrapping (Rééchantillonnage)	78
3.4. Résultats	79
3.4.1. Correction des inhomogénéités et sélection d'une région d'intérêt	79
3.4.2. Variations des niveaux de gris au sein de la jonction métaphyso-épiphysaire	79
3.4.3. Analyse en composantes principales	85
3.4.4. Bootstrapping	87

<b>TROISIÈME PARTIE : DISCUSSION GÉNÉRALE</b>	<b>88</b>
<b>Chapitre 1 – Discussion sur l’apport de l’IRM des épiphyses distale du tibia et du calcanéum dans la détermination de l’âge</b>	<b>89</b>
1.1. Limites de l’étude	89
1.1.1. Latéralité	89
1.1.2. Origine ethnique et niveau socio-économique	90
1.2. Comparaison avec les données de la littérature	91
1.3. Le choix du nombre de stades	92
1.3.1. Trois stades	92
1.3.2. Quatre stades	93
1.3.3. Cinq stades	94
1.3.4. Six stades	96
1.3.5. La cicatrice épiphysaire	96
1.3.6. Avantages et inconvénients d’un nombre limité de stades	97
1.4. Intérêt d’un score composite associant plusieurs indicateurs	98
1.5. L’apport des méthodes statistiques : analyse transitionnelle et approche bayésienne	99
1.5.1. Analyse transitionnelle	99
1.5.2. L’approche bayésienne	100
1.6. Conclusion – Les seuils de 13, 16 et 18 ans	101
<b>Chapitre 2 – Discussion sur l’intérêt d’une automatisation de l’estimation de l’âge</b>	<b>103</b>
2.1. Limites de l’étude	103
2.2. La correction de l’inhomogénéité d’intensité	103
2.3. L’apport des méthodes statistiques	105
2.3.1. Analyse en composantes principales	105
2.3.2. Bootstrapping	106
2.4. Intérêt de l’automatisation dans la détermination de l’âge	107
2.4.1. Automatisation et IRM en médecine	107
2.4.2. Avantages de l’automatisation	108
2.5. Conclusion – Le seuil des 18 ans	109

<b>Chapitre 3 – Quel avenir pour la détermination de l'âge chez le sujet vivant ?</b>	<b>110</b>
3.1. Le risque d'erreur	110
3.2. Vers une diminution du nombre de demandes ?	111
3.3. Quelle place pour l'IRM dans la détermination de l'âge	112
<b>CONCLUSION</b>	<b>113</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>115</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>142</b>
Annexe 1	143
Annexe 2	145

## LISTE DES TABLEAUX

### PREMIÈRE PARTIE : INTRODUCTION

<b>Tableau I-1</b> - Âges de majorité pénale et de responsabilité pénale en Europe	<b>7</b>
<b>Tableau I-2</b> - Âges de fusion métaphyso-épiphysaire des principaux centres d'ossification	<b>16</b>
<b>Tableau I-3</b> - Principales études portant sur la comparaison de plusieurs méthodes de maturation osseuse dont au moins une concerne le poignet et la main	<b>23</b>
<b>Tableau I-4</b> - Principales études portant sur la maturation de l'extrémité médiale de la clavicule à partir de l'examen d'os secs	<b>24</b>
<b>Tableau I-5</b> - Principales études portant sur la maturation de l'extrémité médiale de la clavicule à partir de radiographies	<b>26</b>
<b>Tableau I-6</b> - Principales études portant sur la maturation de l'extrémité médiale de la clavicule à partir de scanners	<b>29</b>
<b>Tableau I-7</b> - Résultats des études portant sur l'extrémité médiale de la clavicule à partir de radiographies et scanners (Classification de Schmeling)	<b>30</b>

### DEUXIÈME PARTIE : APPORT DE L'IRM DANS LA DÉTERMINATION DE L'AGE

<b>Tableau II-1</b> – Principales études portant sur la maturation de l'extrémité médiale de la clavicule par échographie	<b>44</b>
<b>Tableau II-2</b> - Principales études portant sur la maturation de l'extrémité médiale de la clavicule par IRM	<b>48</b>
<b>Tableau II-3</b> - Âges de début de fusion et de fusion complète de l'épiphyse distale du tibia d'après les principales études publiées	<b>56</b>

<b>Tableau II-4</b> - Nombre d'individus par âge et par sexe	<b>67</b>
<b>Tableau II-5</b> - Variabilités inter- et intra-observateurs exprimées par le calcul du coefficient Kappa de Cohen	<b>67</b>
<b>Tableau II-6</b> - Épiphyse distale du tibia. Distribution des stades 1, 2 et 3 pour chaque sexe, par rapport au seuil des 18 ans	<b>70</b>
<b>Tableau II-7</b> - Épiphyse du calcaneum. Distribution des stades 1, 2 et 3 pour chaque sexe, par rapport au seuil des 18 ans	<b>70</b>
<b>Tableau II-8</b> - Épiphyse distale du tibia. Age transitionnel pour chaque sexe	<b>71</b>
<b>Tableau II-9</b> - Épiphyse du calcaneum. Age transitionnel pour chaque sexe	<b>71</b>
<b>Tableau II-10</b> - Probabilité bayésienne qu'un homme soit correctement évalué par rapport au seuil des 18 ans à partir d'un score composite associant la stadification des épiphyses distale du tibia et du calcaneum	<b>72</b>
<b>Tableau II-11</b> - Probabilité bayésienne qu'une femme soit correctement évaluée par rapport au seuil des 18 ans à partir d'un score composite associant la stadification des épiphyses distale du tibia et du calcaneum	<b>72</b>
<b>Tableau II-12</b> - Nombre d'individus par âge et par sexe	<b>75</b>
<b>Tableau II-13</b> - Moyennes des valeurs et des pourcentages des hommes de l'échantillon test obtenues par la technique du bootstrapping, suivant la catégorie où ils ont été classés et leur âge réel	<b>87</b>
<b>Tableau II-14</b> - Moyennes des valeurs et des pourcentages des femmes de l'échantillon test obtenues par la technique du bootstrapping, suivant la catégorie où elles ont été classées et leur âge réel	<b>87</b>

## LISTE DES FIGURES

### PREMIÈRE PARTIE : INTRODUCTION

<b>Figure I-1</b> - Ossification endochondrale (coupes longitudinales d'un os long)	<b>14</b>
<b>Figure I-2</b> - Classification en 5 stades de l'extrémité médiale de la clavicule, mise au point par Schmeling	<b>27</b>
<b>Figure I-3</b> - Classification de Schmeling adaptée au scanner	<b>27</b>
<b>Figure I-4</b> - Classification de l'ossification de la crête iliaque d'après Risser	<b>31</b>
<b>Figure I-5</b> - Méthode de Sauvegrain, Nahum et Bronstein	<b>33</b>
<b>Figure I-6</b> - Diagramme représentant les âges auxquels les méthodes de détermination de l'âge utilisant le poignet, le coude, la crête iliaque et la clavicule sont les plus contributives pour chaque sexe	<b>38</b>

### DEUXIÈME PARTIE : APPORT DE L'IRM DANS LA DÉTERMINATION DE L'ÂGE

<b>Figure II-1</b> - IRM de la cheville et du pied, coupe sagittale	<b>62</b>
<b>Figure II-2</b> - Stade 1 de l'épiphyse distale du tibia	<b>63</b>
<b>Figure II-3</b> - Stade 1 de l'épiphyse du calcaneum	<b>63</b>
<b>Figure II-4</b> - Stade 2 de l'épiphyse distale du tibia	<b>64</b>
<b>Figure II-5</b> - Stade 2 de l'épiphyse du calcaneum	<b>64</b>
<b>Figure II-6</b> - Stade 3 de l'épiphyse distale du tibia	<b>65</b>
<b>Figure II-7</b> - Stade 3 de l'épiphyse du calcaneum	<b>65</b>

<b>Figures II-8</b> - Épiphyse distale du tibia. Boîtes à moustache de Tuckey de la répartition des âges pour les stades 1, 2 et 3 chez les hommes et les femmes	<b>68</b>
<b>Figures II-9</b> - Épiphyse du calcaneum. Boîte à moustaches de Tuckey de la répartition des âges pour les stades 1, 2 et 3 chez les hommes et les femmes	<b>69</b>
<b>Figure II-10</b> - Zones d'inhomogénéité d'intensité visibles sur la diaphyse tibiale d'une IRM (femme, 15 ans)	<b>76</b>
<b>Figure II-11</b> - Région d'intérêt sélectionnée pour chaque image de toutes les IRM	<b>77</b>
<b>Figure II-12</b> - Traitement de l'image. Correction de l'inhomogénéité d'intensité de l'IRM d'une femme de 10 ans	<b>79</b>
<b>Figure II-13</b> - Traitement de l'image. Correction de l'inhomogénéité d'intensité de l'IRM d'une femme de 22 ans	<b>79</b>
<b>Figure II-14</b> - Représentation des variations des niveaux de gris au sein de la région d'intérêt (Femme, 10 ans)	<b>81</b>
<b>Figure II-15</b> - Représentation des variations des niveaux de gris au sein de la région d'intérêt (Femme, 22 ans)	<b>82</b>
<b>Figure II-16</b> - Courbes moyennes des niveaux de gris des 80 femmes (F) de l'échantillon, par âge	<b>83</b>
<b>Figure II-17</b> - Courbes moyennes des niveaux de gris des 80 hommes (M) de l'échantillon, par âge	<b>84</b>
<b>Figure II-18</b> - ACP pour les 60 femmes de l'échantillon de référence et les 20 femmes de l'échantillon test	<b>85</b>
<b>Figure II-19</b> - ACP pour les 60 hommes de l'échantillon de référence et les 20 hommes de l'échantillon test	<b>86</b>

### **TROISIÈME PARTIE : DISCUSSION GÉNÉRALE**

<b>Figure III-1</b> - Classification en 3 stades des épiphyses du genou	<b>92</b>
<b>Figure III-2</b> -Classification en 4 stades de l'extrémité médiale de la clavicule	<b>93</b>
<b>Figure III-3</b> - Classification en 5 stades de l'extrémité médiale de la clavicule	<b>94</b>
<b>Figure III-4</b> – Classification en 5 stades des épiphyses du genou	<b>95</b>
<b>Figure III-5</b> - Classification en 6 stades de l'épiphyse distale du radius	<b>96</b>

# PRÉAMBULE

La détermination de l'âge est une problématique importante en anthropologie médico-légale (Beauthier, 2007). En thanatologie, la détermination de l'âge au décès est un élément concourant à l'identification des personnes. Plusieurs méthodes sont utilisées selon l'âge supposé. En médecine légale clinique, le médecin est requis pour déterminer l'âge d'un sujet vivant, dans un contexte de procédure pénale ou lorsque la minorité d'un jeune d'origine étrangère qui se présente sur le territoire français est remise en question (Léonetti, 1995 ; Schmeling, 2004a). Dans ces situations, le médecin tente d'estimer l'âge biologique de la personne pour s'approcher au plus près de son âge réel. Il peut utiliser plusieurs méthodes, qui associées entre elles vont affiner cette estimation difficile, dépendante de l'origine ethnique de l'individu, de son niveau socio-économique (Schmeling, 2000) et de l'existence ou non de pathologies susceptibles d'interférer sur la croissance. Ces méthodes permettent d'évaluer l'âge osseux (Risser, 1958 ; Greulich, 1959 ; Sauvegrain, 1962; Schmeling, 2004b), l'âge dentaire (Demirjian, 1973) et l'âge pubertaire (Tanner, 1962a).

Dans le cadre de ce travail, l'estimation de l'âge au décès ne sera pas traitée, bien que les méthodes employées chez le vivant puissent aussi, dans une certaine mesure, s'appliquer au cadavre, sur une tranche d'âge bien précise. De même, les méthodes visant à évaluer l'âge dentaire ainsi que celles servant de support à la détermination du stade de maturation sexuelle ne seront pas abordées.

Notre travail a porté sur l'estimation de l'âge osseux basée sur l'observation de la fusion des cartilages de conjugaison. Les zones d'union étudiées concernent principalement les os longs, avec quelques exceptions notables, telle l'extrémité médiale de la clavicule. Lors de la puberté, les épiphyses des os longs s'ossifient, suivant le principe de l'ossification enchondrale (Marieb, 1999). Une fusion plus ou moins large est observée entre la métaphyse et l'épiphyse et c'est la quantification de cette fusion visible qui va être comparée à une population de référence, pour obtenir une corrélation entre ce qui est noté chez l'individu évalué et ce qui est connu sur un échantillon pré-établi (Beauthier, 2007). La fourchette d'âge pendant laquelle cette observation est possible est souvent

restreinte à quelques années, car une fois que la fusion métaphyso-épiphysaire est complète, il n'est plus possible de se prononcer sur l'âge.

Les méthodes qui sont utilisées en pratique quotidienne ont été détournées de leur usage originel. Elles ont en effet été mises au point dans le but d'étudier le développement d'enfants et d'adolescents ayant des troubles de la croissance et sont destinées aux pédiatres, endocrinologues et chirurgiens orthopédiques pour détecter une accélération ou un retard d'âge osseux (Risser, 1958 ; Greulich, 1959). Parmi ces méthodes, les plus utilisées sont celles basées sur la maturation osseuse du poignet et de la main à l'aide d'un cliché radiographique, car cette zone anatomique est constituée de multiples indicateurs dont l'évaluation simultanée permet une meilleure estimation (Greulich, 1959 ; Tanner, 1962b ; 1975 ; 2001 ; Sempé, 1979 ; Roche, 1988).

La première partie de ce travail est consacrée à une revue de la littérature des principales méthodes employées en pratique. Il ne s'agit pas d'un recueil exhaustif de toutes les techniques utilisées, mais de la présentation de celles ayant fait l'objet du plus grand nombre d'études ou qui ont été le plus débattues. Ces méthodes sont basées sur l'analyse de clichés radiographiques ou de coupes de scanners.

Dans la seconde partie, nous nous sommes intéressés au développement de l'utilisation de l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) dans le champ de la détermination de l'âge chez le sujet vivant. Depuis plusieurs années, la volonté de réduire l'irradiation des individus évalués a conduit au développement de la recherche à partir de techniques d'imagerie non irradiantes. C'est surtout l'IRM qui est apparue la plus prometteuse dans ce contexte (Dvorak, 2009 ; Hillewig, 2011 ; Dedouit, 2012), l'échographie étant opérateur dépendant et destinée à l'usage quasi-exclusif des radiologues (Bilgili, 2003 ; Schulz, 2008 ; Schmidt, 2011). Nous avons choisi d'étudier une région anatomique peu utilisée dans ce contexte et avons conduit une étude rétrospective sur l'extrémité distale du tibia et sur le calcaneum à partir d'IRM de sujets âgés de 10 à 25 ans. Les âges de fusion sont bien connus pour le tibia, un peu moins pour le calcaneum, et ces deux os remplissaient les critères nécessaires pour développer une méthode éventuellement contributive à notre sujet : facilité d'analyse de la région avec des structures anatomiques immédiatement identifiables visuellement, plusieurs indicateurs présents sur le même examen, âges de fusion inclus dans les tranches d'âges comprenant les seuils d'intérêt

médico-légaux (13, 16 et surtout 18 ans). Nous avons utilisé une approche bayésienne pour mesurer la probabilité de correctement évaluer l'âge d'un individu par rapport au seuil des 18 ans, qui est finalement l'information la plus importante lorsque l'on teste une nouvelle méthode dans la détermination de l'âge.

Puis, nous avons observé que cette méthode, bien qu'elle aboutisse à des résultats intéressants, était dépendante de l'observateur. Pour réduire cette limite, nous avons mis au point une méthode automatisée d'évaluation de la fusion métaphyso-épiphysaire de l'extrémité distale du tibia, basée sur la variation des niveaux de gris des images IRM au sein du cartilage de croissance. Une analyse en composantes principales associée à un ré-échantillonnage a permis d'obtenir des résultats proches de ceux obtenus lors de la première étude. L'automatisation de l'analyse des images IRM, déjà utilisée dans de multiples domaines de la recherche biomédicale, peut donc également s'appliquer à l'estimation de l'âge.

Dans la troisième partie, les limites de ces deux études ont été discutées. Nous nous sommes également intéressés à l'apport de certaines méthodes statistiques, telles que les probabilités bayésiennes (Byers, 2003 ; Langley-Shirley, 2010), l'analyse transitionnelle (Hoppa, 2002), l'analyse en composantes principales (Kouani, 2007) et le rééchantillonnage (Efron, 1979) à cette problématique. En effet, le principe même de l'estimation de l'âge nécessite le calcul de la probabilité qu'un individu ait atteint un « âge seuil » d'intérêt juridique suivant le pays où l'évaluation a lieu. Les méthodes statistiques employées doivent donc être adaptées à ce but. Enfin, nous avons évoqué l'avenir de la détermination de l'âge et la place que pouvait avoir l'IRM en pratique dans ce domaine.

L'étude sur l'extrémité distale du tibia et du calcaneum a fait l'objet d'une publication scientifique (Annexe 1) et celle sur le développement d'une méthode automatisée a été soumise dans une revue anglophone (Annexe 2).

# **PREMIÈRE PARTIE**

## **INTRODUCTION**

## Chapitre 1 – La détermination de l'âge chez le sujet vivant

### 1.1. Plusieurs définitions de l'âge

**L'âge réel**, ou **âge chronologique**, est la durée écoulée entre la naissance d'une personne et une date donnée. C'est la détermination de cet âge qui est recherchée dans les expertises médico-légales requises par les autorités judiciaires.

**L'âge civil**, ou **âge administratif**, est parfois erroné, si l'individu a falsifié ou volé les documents d'identité qu'il présente. Il peut donc être différent de l'âge chronologique ; c'est la raison pour laquelle une expertise médicale est demandée.

**L'âge biologique** est l'état de vieillissement d'une personne, tenant compte de tous les paramètres biologiques et physiologiques. Il n'existe pas de critère simple et objectif qui permettrait d'apprécier globalement le degré de vieillissement biologique d'un individu. Son évaluation est un processus multifactoriel, basée sur l'évaluation quantitative de plusieurs paramètres. Il s'agit de déterminer la maturité (ou maturation) d'un individu en utilisant des méthodes morphologiques et morphométriques. Parmi ces méthodes, l'âge osseux, l'âge dentaire et l'âge pubertaire constituent des sous-ensembles de la détermination de l'âge biologique.

- **L'âge pubertaire** est basé sur l'étude du développement des caractères sexuels. Les critères de maturité sexuels sont la pilosité pubienne, le développement mammaire chez les filles, et le développement des organes génitaux externes chez les garçons (Tanner, 1962a).
- **L'âge dentaire** repose sur la chronologie d'apparition des dents déciduales et définitives. Il est basé sur l'étude de l'éruption et de la minéralisation de la couronne, du développement de la racine et de son apexification.
- **L'âge osseux** correspond au stade de maturation du squelette. Sa détermination est basée sur l'analyse de l'activité des cartilages de conjugaison, visible sur les épiphyses.

## 1.2. Contexte juridique

1.2.1. La majorité et la responsabilité pénales des mineurs en Europe (Service des Affaires Juridiques, 2007 ; Service des Affaires Européennes, 1999)

La connaissance de l'âge réel d'un individu est importante en droit pénal car les règles applicables aux mineurs sont différentes en fonction des âges, les législateurs ayant à cœur d'adapter les conséquences juridiques à l'âge de l'auteur.

L'âge de la **majorité pénale**, c'est-à-dire l'âge à partir duquel un délinquant relève du droit pénal commun, est fixé à dix-huit ans dans presque tous les pays européens, sauf au Danemark (15 ans) et au Portugal (21 ans).

En revanche, l'âge de la **responsabilité pénale**, c'est-à-dire l'âge à partir duquel les mineurs sont considérés comme suffisamment âgés pour être soumis à un droit pénal qui leur est spécifique, varie beaucoup dans les différents pays européens. L'âge de la responsabilité pénale est une notion absolue dans certains pays : le mineur qui n'a pas atteint l'âge de la responsabilité pénale ne peut en aucun cas être considéré comme pénalement responsable. Ces pays sont la Suisse (10 ans), l'Angleterre et le Pays de Galles (10 ans), les Pays Bas (12 ans), l'Espagne (14 ans) et le Portugal (16 ans). Dans les autres pays, la responsabilité pénale du mineur peut être engagée sous certaines conditions.

1.2.2. La majorité et la responsabilité pénale des mineurs en France

En France, il n'y a pas d'âge absolu pour la responsabilité pénale des mineurs. Le mineur capable de discernement est présumé responsable. L'article 122-8 du Code Pénal dispose que les mineurs capables de discernement sont pénalement responsables et que seuls les mineurs de 13 à 18 ans peuvent être puni par des sanctions pénales. La jurisprudence considère en général que, dès 8 à 10 ans, les enfants possèdent la capacité de discernement suffisante pour être pénalement responsable de leurs actes. Les mineurs délinquants de moins de treize ans ne peuvent cependant faire l'objet que de « mesures de protection, d'assistance, de surveillance et d'éducation ».

Les âges de majorité et de responsabilités pénales dans les différents pays européens sont présentés dans le tableau I-1.

**Tableau I-1 - Âges de majorité pénale et de responsabilité pénale en Europe.**

Pays	Age de la majorité pénale	Age de la responsabilité pénale
France	18	Non fixé
Allemagne	18	14
Angleterre/Pays de Galles	18	10
Suisse	18	10
Espagne	18	14
Italie	18	14
Suède	18	15
Autriche	18	14
Belgique	18	18
Pays Bas	18	12
Danemark	15	15
Portugal	21	16

### 1.2.3. Juridictions compétentes en fonction de l'âge (Ministère de la Justice, 2009)

En France, les mineurs ne sont pas jugés devant les juridictions pénales ordinaires (tribunal correctionnel, cour d'assises), mais ils peuvent devoir répondre de leurs actes devant le juge des enfants, les tribunaux pour enfants, les tribunaux correctionnels pour mineurs ou les cours d'assises des mineurs.

Le **juge des enfants** est compétent pour les infractions les moins graves, en fonction de la peine encourue et de la personnalité du mineur.

Le **tribunal pour enfants** juge les infractions les plus graves commises par les mineurs de moins de 16 ans, notamment les crimes et les délits connexes aux crimes. Le tribunal pour enfants juge également les contraventions de 5ème classe et les délits commis par des mineurs de 16 ou 17 ans. Certains délits commis par des mineurs de 16 ou 17 ans ne peuvent pas être jugés par le tribunal pour enfants, car ils sont du ressort exclusif du tribunal correctionnel pour mineurs.

Le **tribunal correctionnel pour mineurs** juge les délits qui ne peuvent pas être jugés par le tribunal pour enfants, à savoir ceux commis par des mineurs âgés de 16 ou 17 ans en état de récidive, et ceux pour lesquels la peine encourue est d'au moins 3 ans d'emprisonnement.

Les crimes commis par des mineurs âgés de 16 à 18 ans au moment des faits sont jugés par la **cour d'assises des mineurs**.

Les peines privatives de liberté prononcées à l'encontre de mineurs de plus de 13 ans ne peuvent être supérieures à la moitié de la peine encourue par un majeur pour la même infraction. Cette atténuation de peine est dénommée « excuse de minorité ». Toutefois, en cas d'extrême gravité, la peine infligée à un mineur âgé de 16 à 18 ans peut être la même que celle infligée à un majeur. Les mineurs effectuent leur peine dans des établissements spécialisés habilités à les recevoir, ou dans des quartiers séparés au sein des maisons d'arrêt.

1.2.4. Rétention et garde à vue (Ordonnance n°45-174 du 2 février 1945, modifiée par la loi n°2011-392 du 14 avril 2011)

Pour les besoins d'une enquête, les mineurs âgés d'au moins 10 ans peuvent être retenus par les services de police ou de gendarmerie, dans des conditions semblables à celles des gardes à vue pour personnes majeures, à quelques différences près.

S'il est **âgé de 10 à 12 ans inclus**, un enfant ne peut être retenu par les services de police et de gendarmerie que s'il existe des indices laissant présumer qu'il a commis ou tenté de commettre un crime ou délit pouvant être puni d'au moins 5 ans d'emprisonnement. Cette rétention a une durée maximale de 24 heures. En plus des droits accordés à toute personne majeure en garde à vue, le mineur de 13 ans bénéficie automatiquement d'un avocat et d'un examen médical. Les parents ou le tuteur sont informés immédiatement de la mesure de retenue.

S'il est **âgé de 13 à 15 ans inclus**, un adolescent peut être placé en garde à vue, pour une durée de 24 ou 48 heures maximales selon l'infraction qu'il est soupçonné d'avoir commise. Il est alors informé qu'il peut avoir un avocat, et bénéficie sans avoir à le demander d'un examen médical.

S'il est **âgé de 16 à 17 ans inclus**, un adolescent peut être placé en garde à vue, pour une durée maximale de 48 heures s'il est soupçonné d'avoir agi seul, et 72 heures s'il est soupçonné d'avoir agi en bande organisée. Le mineur âgé de 16 ou 17 ans ne bénéficie d'aucun avantage particulier par rapport à une personne majeure.

Tout interrogatoire de mineur fait l'objet d'un enregistrement audiovisuel.

#### 1.2.5. Détention provisoire (Ministère de la Justice, 2013)

L'âge est également pris en compte lors de la prise de décision en matière de détention provisoire.

Les mineurs **âgés de 13 ans révolus et de moins de 16 ans** ne peuvent être placés en détention provisoire que (1) s'ils encourent une peine criminelle, (2) s'ils se sont volontairement soustraits aux obligations d'un contrôle judiciaire, qui comportait une obligation de respecter un placement en centre éducatif fermé.

Les mineurs **âgés de 16 ans révolus** ne peuvent être placés en détention provisoire que (1) s'ils encourent une peine criminelle, (2) s'ils encourent une peine correctionnelle d'une durée égale ou supérieure à trois ans, (3) s'ils se sont volontairement soustraits aux obligations d'un contrôle judiciaire, ou aux obligations découlant d'une assignation à résidence avec surveillance électronique.

#### 1.2.6. Mineurs étrangers isolés

Le nombre de jeunes étrangers isolés qui arrivent sur le sol français est en augmentation constante et était estimé à 9000 en 2013. Les départements prennent en charge ces jeunes jusqu'à leur placement définitif par les services de l'Aide Sociale à l'Enfance (ASE).

Les services de l'ASE ont notamment pour mission la prise en charge des mineurs privés temporairement ou définitivement de la protection de leur famille. Les mineurs étrangers isolés entrent dans ce cadre. Après l'accueil provisoire obligatoire, l'ASE prend toutes les mesures nécessaires pour établir l'âge de l'individu. L'admission à l'ASE est possible seulement après que la minorité et l'isolement du jeune sont établis.

La circulaire du 31 mai 2013 relative aux modalités de prise en charge des jeunes isolés étrangers a introduit des mesures afin d'harmoniser au niveau national les pratiques d'accueil de ces jeunes durant la période de mise à l'abri, d'évaluation et d'orientation destinée à s'assurer de leur minorité et de leur isolement. Cette période d'évaluation est fixée à cinq jours. Par cette circulaire, l'Etat met en place un financement aux

départements pour l'accueil des mineurs étrangers isolés. Pour bénéficier de ce financement, les départements doivent respecter un protocole d'évaluation.

Ce protocole comprend des entretiens d'un évaluateur avec le jeune. Si, à l'issue de ces entretiens, l'évaluateur ne parvient pas à établir l'âge du jeune, l'Etat a recours à des examens médicaux. Ainsi, malgré les recommandations contraires d'un rapport de Dominique Baudis transmis le 18 novembre 2011 au Président de la République, les examens médicaux sont encore pratiqués (Ministère de la Justice, Circulaire du 31 mai 2013).

### **1.3. Rôle du médecin**

La détermination de l'âge des enfants et adolescents étrangers peut ainsi se révéler indispensable pour définir les droits et protections dont ils doivent bénéficier en fonction de ce statut, ainsi que les conditions dans lesquelles ils peuvent ou non faire l'objet de rétention ou de garde à vue si un soupçon pèse sur eux. Le problème de l'âge réel peut se poser en urgence lors d'une interpellation ou d'un séjour en zone d'attente des aéroports, lorsqu'un enfant ou adolescent ne peut pas présenter aux autorités de documents d'identité fiables (Comité Consultatif National d'Ethique, 2005).

L'examen médical d'un jeune pour estimation de l'âge est devenu un acte courant de pratique médico-légale (Leonetti, 1995 ; Schmeling, 2004a) et est demandé principalement pour les adolescents sans papier. Un mineur étranger sans document d'état civil ou dont les papiers d'identité sont contestés peut donc être soumis, dès sa rétention en zone d'attente, à une expertise médico-légale aux fins de s'assurer que son âge déclaré ou celui figurant sur ses documents correspond à son âge réel. Cette expertise peut également être menée en vue de déterminer si le jeune doit être scolarisé de manière obligatoire (mineur de 16 ans), ou le temps restant pour préparer la régularisation administrative en France. Le recours à cette procédure n'est ni systématique ni obligatoire.

Plus rarement, le médecin peut être sollicité pour estimer l'âge d'un jeune ayant commis une infraction, pour déterminer les droits dont le jeune peut bénéficier. Ce sont le plus

souvent les parquets qui requièrent cette expertise. Cet examen peut également être ordonné par un juge des enfants.

Le médecin agit donc sur réquisition d'un magistrat ou d'un officier de police judiciaire. Il a le droit d'effectuer les examens complémentaires qu'il juge nécessaire pour répondre avec le plus précision possible aux questions de la mission. Dans ce cas, il peut recueillir l'avis d'un radiologue pour interpréter les examens d'imagerie. Le rapport, remis à l'autorité requérante, est une synthèse des résultats des examens effectués et conclut dans la mesure du possible à un âge réel estimé.

## Chapitre 2 – La détermination de l'âge par l'étude de la maturation osseuse des épiphyses

### 2.1. Les os longs – anatomie

Les os longs comportent une diaphyse (un manchon osseux périostique qui entoure la cavité médullaire), deux épiphyses aux extrémités et des métaphyses (régions situées entre la diaphyse et l'épiphyse). Entre l'épiphyse et la métaphyse se trouve le cartilage de conjugaison. L'épiphyse apparaît à des âges variables et grossit ensuite suivant une chronologie connue pour fusionner avec la métaphyse en fin de croissance (fusion métaphyso-épiphysaire, disparition du cartilage de croissance).

### 2.2. La croissance des os longs – physiopathologie (Marieb, 1999)

Les os longs du squelette se forment par **ossification endochondrale** (Figure I-1), c'est-à-dire par remplacement du cartilage par du tissu osseux. Ce processus débute à partir de modèles en cartilage hyalin déjà formés à la fin du deuxième mois de développement intra-utérin.

La formation d'un os long s'amorce habituellement à un point d'ossification primaire (ou centre d'ossification primaire), à mi-longueur de la tige de cartilage hyalin. Puis, les ostéoblastes secrètent du matériau ostéoïde qui forme une gaine osseuse autour du modèle de cartilage hyalin, sur la face externe de la diaphyse. Le cartilage au centre de la diaphyse se désintègre et se calcifie par hypertrophie des chondrocytes. En dehors du centre, le cartilage demeure sain et croît intensément, causant ainsi l'allongement de tout le modèle de cartilage. La cavité centrale est ensuite envahie par un bourgeon conjonctivo-vasculaire qui va être à l'origine de la formation d'os spongieux. Le point d'ossification primaire s'agrandit et s'étend du côté proximal et du côté distal, vers les épiphyses. Les ostéoclastes dégradent l'os spongieux de la cavité centrale et constituent le canal médullaire : c'est la dernière étape de l'ossification de la diaphyse.

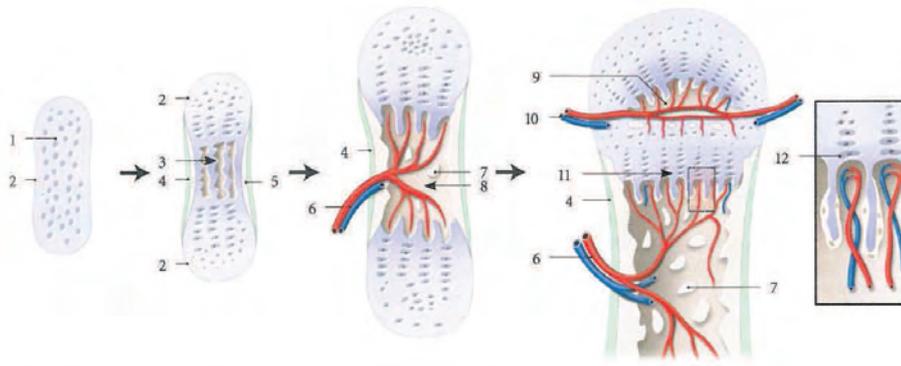
Pendant toute la durée de la vie fœtale, les épiphyses, qui ont une croissance rapide, ne comportent que du cartilage, et le modèle de cartilage hyalin continue de s'allonger par division des cellules cartilagineuses des épiphyses. A la naissance, la plupart des os longs possèdent deux épiphyses cartilagineuses, un canal médullaire croissant ainsi qu'une diaphyse osseuse à l'intérieur de laquelle se trouvent des restes d'os spongieux. Peu avant la naissance ou juste après, des centres d'ossification secondaires apparaissent dans une épiphyse ou dans les deux, et du tissu osseux s'y forme. Le cartilage situé au centre des épiphyses se calcifie et se désintègre, ouvrant ainsi des cavités qui permettent l'entrée d'un bourgeon conjonctivo-vasculaire. Puis les ostéoblastes nouvellement arrivés secrètent une matrice osseuse autour des derniers fragments du cartilage.

L'ossification des épiphyses suit presque exactement les étapes de l'ossification diaphysaire, à ceci près qu'il ne se forme pas de gaine osseuse sur leur face externe et que l'os spongieux reste en place, et qu'il n'apparaît pas de canal médullaire dans les épiphyses. A la fin de cette ossification, on ne trouve du cartilage hyalin qu'à deux endroits : sur les surfaces des épiphyses, où il porte le nom de cartilage articulaire ; et à la jonction de la diaphyse et de l'épiphyse, où il est appelé cartilage de conjugaison.

Au cours de l'enfance et de l'adolescence, les os longs s'allongent sous l'effet de la croissance interstitielle des cartilages épiphysaires, et tous les os s'épaississent sous l'effet de l'activité du périoste selon un processus de croissance par apposition. Le cartilage épiphysaire conserve une même épaisseur car la vitesse de croissance du côté de l'épiphyse est compensée par le remplacement du cartilage par du tissu osseux du côté de la diaphyse. La plupart des os cessent de croître pendant l'adolescence ou au début de l'âge adulte : les chondrocytes des cartilages épiphysaires se divisent de moins en moins souvent et les cartilages s'amincissent au point d'être entièrement remplacés par du tissu osseux. La croissance en longueur se termine avec la fusion de la matière osseuse de la diaphyse avec celle des épiphyses. Cette fusion est appelée soudure des cartilages épiphysaires.

La croissance osseuse qui s'opère tout au long de l'enfance et de l'adolescence est réglée de façon très précise par un ensemble d'hormones. Au cours de l'enfance, le stimulus qui a le plus d'effet sur l'activité des cartilages épiphysaires est l'hormone de croissance secrétée par l'adénohypophyse. A la puberté, une quantité accrue d'hormones sexuelles

mâles et femelles (testostérone et oestrogènes) se trouve libérée. Ces hormones sexuelles provoquent dans un premier temps la poussée de croissance typique de l'adolescence, puis elles entraînent la fusion métaphyso-épiphysaire.



**Figure I-1** - Ossification endochondrale (coupes longitudinales d'un os long). 1. Matrice cartilagineuse, 2. Périchondre, 3. Diaphyse présumptive, 4. Périoste, 5. Manchon osseux sous-périosté, 6. Artère et veine diaphysaires, 7. Îlots calcifiés, 8. Centre d'ossification primaire, 9. Centre d'ossification secondaire, 10. Artère et veine épiphysaires, 11. Cartilage de conjugaison, 12. Chondrocyte dans sa lacune (D'après Kamina, 2006).

### 2.3. Application à la détermination de l'âge osseux

La maturation osseuse est considérée comme un des principaux indicateurs de la croissance d'un organisme. Son estimation se base sur l'observation du processus continu de la minéralisation des pièces osseuses jusqu'à leur aspect définitif (Beauthier, 2007). Cette maturation peut être facilement observée grâce à des techniques d'imagerie de routine.

Les marqueurs de maturation squelettique les plus utilisés sont ceux observables sur des images radiologiques d'os ayant une ossification de type endochondrale, notamment par l'observation des cartilages de croissance des os longs (Acheson, 1954 ; Ferembach, 1979). La précision de ces marqueurs est variable selon les sujets. Suite à l'étude d'une population de squelettes d'individus de sexe masculin, McKern et Stewart ont montré que les meilleurs indicateurs de maturation osseuse d'un individu étaient les épiphyses proximale de l'humérus, distale du radius, de la tête fémorale, de la crête iliaque, et de

l'extrémité médiale de la clavicule (McKern, 1957). L'âge de fusion métaphyso-épiphysaire des principaux centres d'ossification est présenté dans le tableau I-2.

De nombreuses méthodes de détermination de l'âge osseux ont été proposées, chacune étant basée sur l'étude de la maturation d'un ou de plusieurs cartilages de conjugaison. Certaines d'entre elles sont devenues des **méthodes de référence**, regroupant les critères suivants (Schmeling, 2008) :

- l'échantillon doit être de taille suffisante, avec une répartition égalitaire par âge et sexe,
- l'âge chronologique des sujets doit être connu,
- la date de l'analyse, l'origine géographique ainsi que le statut socio-économique des sujets étudiés doivent être précisés,
- des analyses doivent avoir été faites séparément pour chaque sexe, car les phénomènes de maturation osseuse sont plus précoces chez les femmes que chez les hommes, quel que soit l'os étudié,
- les écarts-types doivent être précisés pour chaque résultat.

Ces méthodes ont initialement été développées à des fins diagnostiques et thérapeutiques, et étaient utilisées en chirurgie orthopédique, pour la prise en charge des enfants atteints de scoliose idiopathique ; en orthodontie ; ou en endocrinologie pédiatrique, dans les situations de précocité pubertaire ou de retard de croissance. Leur utilisation à des fins médico-légales s'est faite secondairement. Préalablement à l'analyse des examens d'imagerie dans le cadre d'une expertise d'estimation de l'âge, l'existence d'une pathologie ayant une répercussion sur la croissance doit donc avoir été recherchée.

**Tableau I-2** – *Âges de fusion métaphyso-épiphyssaire des principaux centres d'ossification (d'après Dedouit, 2009 – modifié d'après Scheuer et Black, 2000).*

Centre d'ossification	Sexe Féminin		Sexe Masculin	
	Début	Fin	Début	Fin
Tibia : apparition tubercule antérieur	8	12	9	14
Humérus : fusion épicondyle latéral	11	15	12	17
Radius : fusion épiphyse proximale	11	13	14	17
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 tubercule antérieur	12	14	14	16,5
Os coxal : ossification 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

## Chapitre 3 – Les méthodes et indicateurs de référence

### 3.1. Plusieurs types de méthodes

Les **méthodes qualitatives** sont basées sur l'observation de la modification de morphologie des points d'ossification, en fonction de l'âge et du sexe, par comparaison d'un cliché radiographique avec les clichés d'un atlas de référence (exemple : atlas de Greulich et Pyle pour la main et le poignet, 1959).

Les **méthodes quantitatives** sont basées sur le nombre de points d'ossification apparus, en cours de fusion ou fusionnés complètement. Des radiographies d'un hémis-squelette doivent être pratiquées. Il s'agit donc de méthodes très irradiantes et peu utilisées (exemple : méthode de Lefebvre et Koifman, 1956).

Les **méthodes scorées, ou de cotation**, sont basées sur la totalisation de coefficients affectés à des événements osseux successifs. La valeur globale indique le stade de la maturation osseuse (exemples : méthode de Sauvegrain, Nahum et Bronstein, 1962 ; méthode de Tanner et Whitehouse, 1962).

Les méthodes présentées ici sont celles qui sont les plus souvent utilisées en pratique, et celles qui ont fait l'objet de travaux dans le but de savoir si elles pouvaient être utilisées dans le domaine de la détermination de l'âge à des fins juridiques.

### 3.2. Maturation osseuse du poignet et de la main

#### 3.2.1. Principe

L'ossification de la main est considérée comme un reflet représentatif de la maturation osseuse de la totalité du squelette (Schmidt, 2008a), car la région de la main et du poignet possède un nombre important de centres d'ossification isolables, permettant d'étudier un maximum d'indicateurs avec un minimum d'irradiation. Les conclusions de l'étude de plusieurs os de la main et du poignet sont suffisantes pour avoir une idée générale de l'ossification et s'approcher avec une certaine précision de l'âge biologique. L'analyse simultanée de plusieurs os de la main est facile sur une radiographie conventionnelle et

permet d'affiner la corrélation entre l'âge osseux ainsi déterminé et l'âge chronologique. Plusieurs méthodes ont été développées, celle de Greulich et Pyle étant la plus utilisée.

### 3.2.2. Méthode de Greulich et Pyle

Greulich et Pyle ont constitué un atlas de radiographies standardisées de la main et du poignet gauches (Greulich, 1959). Une cohorte de 1000 individus américains vivant à Cleveland (Ohio, USA) et de niveau socio-économique élevé, a subi des examens radiographiques à des dates régulières entre 1931 et 1942. Une vingtaine d'indicateurs de maturité osseuse de la main et du poignet ont été décrits par sexe et pour chaque âge : extrémités distales du radius et de l'ulna, os du carpe, métacarpiens et phalanges.

L'atlas regroupe donc une série de radiographies pour les deux sexes, chacune étant un standard de l'état de maturation osseuse pour un âge donné, de la naissance à l'âge de 18 ans pour les filles, et de la naissance à l'âge de 19 ans pour les garçons. Il existe une planche de référence par tranche de 6 mois ou 1 an selon les âges. Cet atlas n'intègre pas la notion d'évolution longitudinale, car ce ne sont pas les mêmes enfants qui ont été suivis de la naissance à l'âge adulte. L'atlas a été publié une première fois en 1950, puis en 1959 ; l'édition la plus récente date de 2001.

La méthode de Greulich et Pyle consiste à apprécier le degré de maturation des points d'ossification des os du carpe, des métacarpes, des phalanges, du radius et de l'ulna, sur une radiographie de face, de bonne qualité, à taille réelle, du poignet et de la main gauches, et de le comparer aux radiographies de l'atlas du même sexe, pour trouver celle dont l'aspect s'approche le plus. Le résultat est un âge moyen associé à une marge d'erreur, qui correspond généralement aux radiographies d'avant et d'après celle choisie (Beauthier, 2007). Cette marge d'erreur possible est de 6 mois au mieux, et peut atteindre 12 ou 18 mois.

La méthode de Greulich et Pyle est la méthode la plus utilisée dans l'estimation de l'âge chez le sujet vivant, du fait de sa simplicité, de son temps d'apprentissage très court et de sa très bonne reproductibilité, même par des examinateurs peu expérimentés. Un logiciel informatisé basé sur cet atlas, ADAGOS®, peut être utilisé en pratique. Il donne l'âge osseux le plus probable, l'intervalle d'âge (sous réserve d'un développement normal) et les histogrammes de probabilité des âges.

Le risque d'erreur augmente avec l'âge de l'individu (Ritz-Timme, 2000) et est plus important chez les garçons et les filles âgés de 14 à 18 ans que chez ceux de 10 à 14 ans. Toutefois, le fait d'une part que les enfants étudiés par Greulich et Pyle soient d'origine américaine, et d'autre part qu'ils soient issus d'un milieu aisé, sont des limites pour l'utiliser comme référence dans la pratique, alors que les sujets sur lesquels une expertise médico-légale est effectuée ne sont majoritairement pas issus de populations possédant ces critères.

De nombreuses études ont été faites pour tester la validité de la méthode. Lorsque les caractéristiques des populations étudiées étaient similaires à celle de l'atlas, les auteurs montraient que celui-ci, bien que constitué dans les années 1940, pouvait être utilisé sur des individus contemporains, par exemple d'origine danoise (van Rijn, 2001 ; Lynnerup, 2008), italienne (Tisè, 2011 ; Santoro, 2011), écossaise (Hackman, 2013) ou allemande (Schmidt, 2008a). Les auteurs de ces études recommandaient de toujours mentionner les déviations standards associées au résultat de la comparaison de la radiographie avec l'atlas et de préciser également dans le rapport médico-légal l'origine de la population de référence étudiée par Greulich et Pyle et celle dont l'individu est issu.

D'autres travaux ont montré qu'il était nécessaire de baser l'expertise sur l'utilisation concomitante de méthodes autres que la maturation osseuse, dont l'association permettait d'affiner la détermination de l'âge. En Italie, une étude portant sur 52 immigrants de multiples origines n'a pas montré de différence significative entre l'âge osseux et l'analyse de la maturation dentaire (Santoro, 2009). Plus l'individu était jeune, plus l'utilisation conjointe des deux méthodes permettait une estimation fiable. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que plus le sujet est jeune, plus on dispose d'indicateurs de croissance dont l'évaluation permet une estimation plus précise de l'âge.

Des populations d'origine ethnique et de niveau socio-économique différents de ceux de la population constituant l'atlas ont également été testées. Ontell et al. ont ainsi montré que la méthode de Greulich et Pyle devait être utilisée avec prudence chez les fillettes d'origine hispanique et afro-américaine et chez les garçons adolescents d'origine asiatique et hispanique (Ontell, 1996). Une comparaison des méthodes de Greulich et Pyle et de Demirjian (maturation dentaire) sur une population d'enfants marocains était

en faveur de la première (Garamendi, 2005), dont les résultats étaient plus proches de l'âge réel. Des différences étaient notées entre âges réel et osseux sur des populations d'enfants iraniens, turques ou originaires d'Europe Centrale, l'étude de la maturation osseuse sous-estimant l'âge chronologique. Mais en tenant compte des déviations standard, ces résultats n'étaient pas significatifs (Moradi, 2012 ; Groell, 1999 ; Cantekin, 2012). De vraies différences étaient cependant notées pour les enfants américains contemporains dont la maturation osseuse était plus précoce que ceux des années 1950. Il en résultait une surestimation de l'âge réel par la détermination de l'âge osseux (Loder, 1993 ; Calfee, 2010), au contraire des enfants indiens (Maniar, 1987 ; Patil, 2012). Ces derniers avaient avec un retard de maturation osseuse par rapport à l'âge réel, plus important chez les garçons que chez les filles. Ces résultats étaient en accord avec ceux d'autres études montrant que la fusion des épiphyses distales du radius et de l'ulna était retardée chez les enfants indiens (Banerjee, 1998 ; Nemade, 2010).

### 3.2.3. Méthode de Tanner et Whitehouse

Il s'agit d'une méthode élaborée à partir d'un échantillon d'enfants écossais nés dans les années 1950, issus de familles de niveau socio-économique modeste. Elle repose sur la cotation de l'ossification de plusieurs points épiphysaires à partir de la radiographie du poignet et de la main gauches.

Initialement nommée TW1 (Tanner, 1962b), elle a été modifiée et simplifiée en TW2 (Tanner, 1975), et la dernière version, TW3, date de 2001, avec une population de référence contemporaine (Tanner, 2001). Un score est établi à partir de l'observation de la minéralisation, de la taille et de la modification de forme de pièces osseuses déterminées. Plusieurs possibilités sont proposées : le TW20 prend en compte 20 os ; le RUS (Radius, Ulna, Short bones) Maturity Score prend en compte 13 os ; le Carpals Maturity Score prend en compte les os du carpe. La maturation de chaque os étudié est divisée en 8 ou 9 stades. L'addition des scores donne une valeur totale qui correspond à l'estimation de la maturation osseuse, en fonction du score choisi (TW20, RUS, Carpal), et qui est reportée sur une courbe permettant de déterminer l'âge osseux. Le score RUS paraît être celui qui reflète le mieux l'âge réel (Gilli, 1996).

Cette méthode est peu utilisée en pratique. Elle est complexe et le temps d'apprentissage est long. La limite d'âge supérieur pour les femmes est de 16 ans. Cette méthode ne

présente donc pas d'avantage par rapport à la méthode de Greulich et Pyle dans le contexte de l'estimation de l'âge à des fins médico-légales (Schmidt, 2008b).

#### 3.2.4. Méthode de Sempé et logiciel MATUROS®

Il s'agit d'une méthode de cotation des points d'ossification à partir de l'analyse de 22 indicateurs osseux de la radiographie du poignet et de la main gauches. Elle est basée sur une analyse longitudinale de radiographies d'enfants français et a donné lieu à un atlas (Sempé, 1979): quatre filles et trois garçons ont été régulièrement radiographiés de la naissance à la fin de la croissance. Le logiciel MATUROS® est une interface informatisée basée sur cette méthode (Bouchard, 2001). Lorsque les indicateurs ont été analysés (les 22 indicateurs de la méthode « classique » ou une version simplifiée comportant 10 indicateurs les plus représentatifs), le logiciel calcule un pourcentage de maturation et un équivalent âge osseux correspondant.

#### 3.2.5. Méthode de FELS (Fels hand-wrist method)

Il s'agit d'une méthode utilisant 98 indicateurs de maturité. Deux à trois stades sont décrits et un score est attribué pour chaque indicateur (Roche, 1988). Un logiciel fournit l'âge osseux correspondant. Les radiographies de référence, effectuées entre 1932 et 1977, sont celles d'enfants et adolescents américains. Cette méthode est peu utilisée en pratique.

#### 3.2.6. Atlas de Thiemman-Nitz

L'Atlas de Thiemman-Nitz est utilisé essentiellement en Allemagne (Schmeling, 2006a). Il a été élaboré à partir de 5200 enfants et adolescents âgés de 0 à 20 ans à la fin des années 1970 (Thiemman, 1991) et constitue donc une base de données plus récente que l'atlas de Greulich et Pyle. Une comparaison entre les résultats obtenus avec cette méthode et celle de Greulich et Pyle ne mettait pas en évidence de différence significative (Schmidt, 2007a).

### 3.2.7. Quelle méthode utiliser ?

Parmi les méthodes utilisant la maturation osseuse du poignet et de la main, celles de Greulich et Pyle et de Tanner et Whitehouse sont les plus fiables. Des arguments existent en faveur de chacune. La méthode de Greulich et Pyle est reproductible, rapide, le temps d'apprentissage est court. La variabilité intra-observateur paraît meilleure avec la méthode de Tanner et Whitehouse (Bull, 1999).

La situation idéale serait de comparer la maturation osseuse d'un individu par rapport à une population de référence dont l'origine est la même que celle dont il est issu. Or, en prenant ces deux méthodes, on trouve dans la littérature plus d'études ayant appliqué la méthode de Greulich et Pyle à des populations d'origines différentes - aucune des études ne la rejetant totalement, certaines remarquant tout au plus un écart important pour une tranche d'âge particulière pour un sexe donné (Cunha, 2009). En France, c'est la méthode de Greulich et Pyle qui est utilisée préférentiellement.

Les résultats des principales études sont présentés dans le tableau I-3. Il s'agit de travaux comparant entre elles différentes méthodes d'évaluation de la maturation osseuse du poignet et de la main, ou la méthode de Greulich et Pyle avec l'étude de la maturation dentaire : méthode de Demirjian (Demirjian, 1973) et de Mincer (Mincer, 1993).

**Tableau I-3** – Principales études portant sur la comparaison de plusieurs méthodes de maturation osseuse dont au moins une concerne le poignet et la main.

Auteurs	Année	Echantillon (N)	Age	Origine	Méthodes comparées	Résultats
Van Lenthe	1998	60	12-16 (F) 12-18 (H)	Pays-Bas	TW2 <sup>1</sup> FELS	Discordance entre les deux méthodes pour les deux sexes
Bull	1999	362	2-18	Angleterre	GP <sup>2</sup> TW2	Discordance entre les deux méthodes pour les deux sexes Meilleure reproductibilité pour TW2
Garamendi	2005	114	13-25	Maroc	GP Demirjian <sup>3</sup>	Meilleure corrélation GP/âge réel que Demirjian/âge réel Association des 2 méthodes ++
Schmidt	2007	649	1-18	Allemagne	GP Thiemann-Nitz	Concordance entre les 2 méthodes
Büken	2009	333	11-16	Turquie	GP TW3 GÖK <sup>4</sup>	Meilleure méthode : TW3 chez les femmes GP chez les hommes
Kaplowitz	2011	16	4-14	USA	GP Gilsanz-Ratib <sup>5</sup>	Concordance entre les 2 méthodes
Pechnikova	2011	167	4-31	18 pays	GP Demirjian Mincer <sup>6</sup>	GP meilleure méthode
Santos	2011	230	12-20	Portugal	GP Maturus 4.0 (Sempé)	Meilleure méthode : Maturus 4.0 entre 12 et 15 ans GP entre 16 et 18 ans
Serinelli	2011	Méta-analyse Etudes publiées entre 1956 et 2009			GP FELS TW	Meilleures méthodes TW2 et TW3 Association examen clinique, âge osseux, âge dentaire++
Santoro	2012	535	7-15	Portugal	GP Demirjian	GP meilleure méthode Association des 2 méthodes++
Schmidt	2013	92	12-16	Allemagne	GP Thiemman-Nitz Gilsanz-Ratib TW FELS	Meilleures méthodes : GP et Thiemann-Nitz TW (RUS2 et RUS3) mauvais chez les femmes

<sup>1</sup> TW : Tanner-Whitehouse

<sup>2</sup> GP : Greulich et Pyle

<sup>3</sup> Demirjian : méthode d'estimation de l'âge dentaire (Demirjian, 1973)

<sup>4</sup> GÖK : atlas de radiographies de la main et du poignet, du coude, de l'épaule, du bassin utilisé exclusivement en Turquie (Gök, 1985)

<sup>5</sup> Gilsanz-Ratib : atlas digital de radiographies de la main et du poignet (Gilsanz, 2005)

<sup>6</sup> Mincer : méthode d'estimation de l'âge dentaire (Mincer, 1993)

### 3.3. Extrémité médiale de la clavicule

#### 3.3.1. Maturation osseuse de l'extrémité médiale de la clavicule

La clavicule est le premier os du squelette à s'ossifier durant la vie fœtale, et l'extrémité médiale, ou sternale, est la dernière épiphyse du squelette à fusionner, au cours de la troisième décennie de la vie – 25 ans d'après un manuel d'anatomie (Gray, 1901). Préalablement à l'étude de la clavicule par des techniques d'imagerie, de nombreux travaux portant sur l'examen direct d'os secs étaient disponibles, mettant en évidence cette maturation osseuse tardive (Stevenson, 1924 ; Todd, 1928 ; McKern, 1957 ; Webb, 1985 ; Black, 1996 ; Veschi, 2002 ; Singh, 2011). Les résultats de ces études sont présentés dans le tableau I-4. Il est difficile de les comparer entre eux car les classifications utilisées sont différentes d'une étude à l'autre. Certains auteurs décrivent la fusion de l'épiphyse comme étant absente, en cours ou complète (Todd, 1924 ; McKern, 1957 ; Veschi, 2002), d'autres prennent en compte l'activité vasculaire visible sur la métaphyse (Black, 1996). Une étude est basée sur le pourcentage de fusion de la surface du cartilage de conjugaison (Singh, 2011).

**Tableau I-4** - Principales études portant sur la maturation de l'extrémité médiale de la clavicule à partir de l'examen d'os secs

Auteurs	Année	Echantillon			Age	Origine	Début union	Union complète	Union complète (chez 100 % des individus)
		Total	H	F					
Stevenson	1924	50	NR <sup>1</sup>	NR <sup>1</sup>	21-27	USA	21	23	> 27
Todd et D'Enrico	1928	166	130	36	19-27	USA	19	25	> 27
McKern et Stewart	1957	374	374	-	17-31	USA	18	23	31
Webb et Suchey	1985	859	605	254	11-40	USA	16	21	34
Black	1996	143	82	61	11-30	Angleterre/ Portugal	19	> 25	> 29
Veschi	2002	131	60	71	14-25	Italie	17	19	25
Singh	2011	360	254	106	17-94	Inde	18	22	32

<sup>1</sup>NR : non renseigné

C'est en raison de cette fusion tardive que l'extrémité médiale de la clavicule s'est avérée une zone intéressante dans la recherche d'indicateurs de maturation osseuse permettant de s'approcher de l'âge des 18 ans.

### 3.3.2. Études de radiographies

L'extrémité médiale de la clavicule a été étudiée sur des clichés radiographiques chez des populations d'origines différentes, montrant un âge de fusion complète chez 100 % des individus d'un échantillon compris entre 25 et 26 ans (Flecker, 1932 ; Galstaun, 1937 ; Jit, 1976). Ces études étaient effectuées avant l'apparition de la problématique juridique de l'estimation de l'âge, et certains indicateurs n'ont pas été mesurés, par exemple l'âge de début de fusion métaphyso-épiphysaire (Flecker, 1932 ; Galstaun, 1937).

C'est en 2004 qu'a été menée la première étude dont l'objectif était de déterminer si la clavicule pouvait être utilisée dans la détermination de l'âge à des fins juridiques. Schmeling et al. ont étudié 699 radiographies d'individus allemands âgés de 16 à 30 ans, et proposé une classification en 5 stades qui a été très largement reprise par la suite dans d'autres études similaires (Schmeling, 2004b) :

- stade 1 : le centre d'ossification n'est pas ossifié,
- stade 2 : le centre d'ossification est ossifié, le cartilage épiphysaire n'est pas ossifié,
- stade 3 : le cartilage épiphysaire est ossifié en partie,
- stade 4 : le cartilage épiphysaire est complètement ossifié. Il persiste une cicatrice épiphysaire,
- stade 5 : le cartilage épiphysaire est complètement ossifié, il n'y a plus de cicatrice épiphysaire visible.

Dans cette étude, le stade 3 (début de la fusion métaphyso-épiphysaire) était noté pour la première fois à l'âge de 16 ans. Le stade 4 (fusion complète) apparaissait chez les femmes à partir de l'âge de 20 ans et chez les hommes à partir de l'âge de 21 ans. Le stade 5 était présent à partir de 26 ans, sans différence significative entre les deux sexes.

Plusieurs études ont testé la validité de cette classification (Garamendi, 2010 ; Cameriere, 2012a), dont l'utilisation nécessite un bon entraînement et une certaine expérience de l'examineur (Cameriere, 2012a). En effet, l'analyse de 274 radiographies de sujets italiens âgés de 12 à 25 ans par cinq observateurs (deux anthropologues médico-légaux, deux odontologues médico-légaux, un médecin légiste ; les trois derniers observateurs ayant une bonne expérience de cette méthode) révélait des variabilités inter et intra-observateurs médiocres. Cette étude suggérait que la méthode de Schmeling n'était ni

simple, ni facile à reproduire. Par ailleurs, une bonne connaissance des variantes anatomiques était nécessaire afin de différencier les formes normales et atypiques de l'extrémité claviculaire. Enfin, l'analyse dépendait de la qualité des radiographies. Les auteurs concluaient que cette méthode devait être utilisée avec prudence.

Le tableau I-5 présente les résultats de ces études.

**Tableau I-5** - Principales études portant sur la maturation de l'extrémité médiale de la clavicule à partir de radiographies

Auteurs	Année	Echantillon			Age	Origine	Début union	Union complète	Union complète (chez 100 % des individus)
		Total	H	F					
Flecker	1932	437	206	231	11-26	Australiens	NR <sup>1</sup>	22	26
Galstaun	1937	654	446	209	12-25	Inde (Bengale)	NR <sup>1</sup>	19	25
Jit	1976	684	391	293	11-30	Inde (Pundjab)	18	22	25
Schmeling	2004	699	243	456	16-30	Allemands	16	20	> 30
Garamendi	2011	123	61	62	5-75	Espagnols	17	19,7	33
Cameriere	2012a	274	159	115	12-25	Italiens	20	20	22-25 <sup>2</sup>

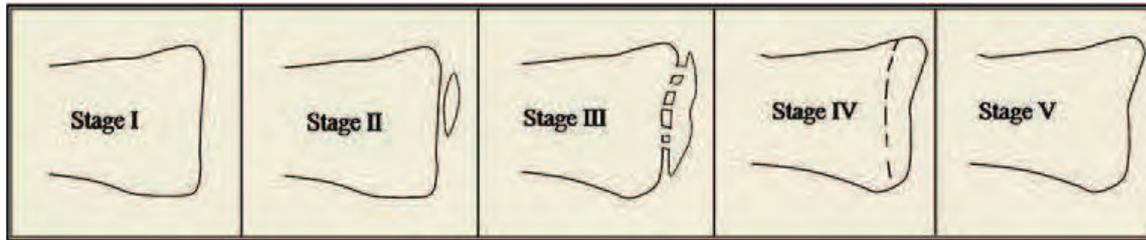
<sup>1</sup>NR : non renseigné

<sup>2</sup>étude faite avec 5 observateurs

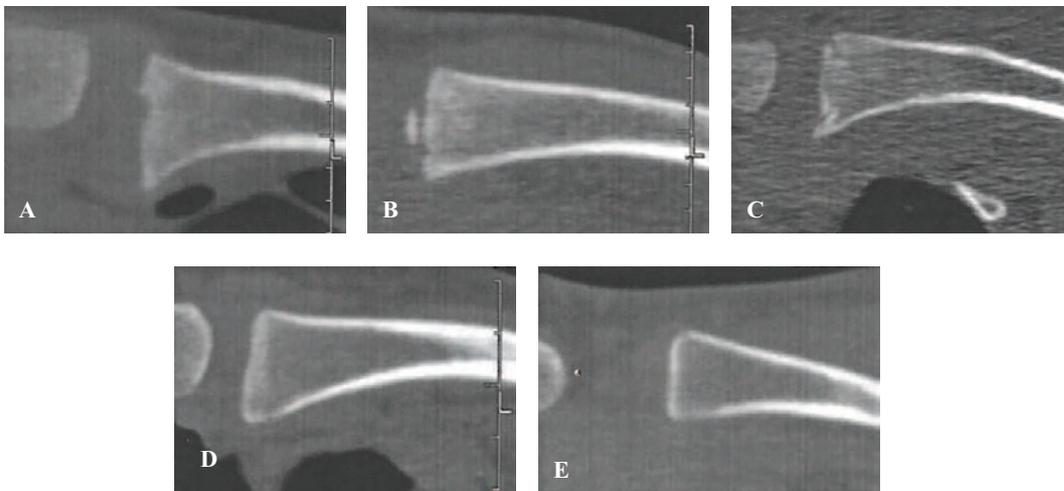
### 3.3.3. Études de scanners

La première étude portant sur des scanners de l'extrémité médiale de la clavicule date de 1998 (Kreitner, 1998). La limite principale était l'absence de distinction entre les hommes et les femmes, ce qui ne permettait pas d'en faire une étude de référence pour l'estimation de l'âge.

D'autres auteurs ont utilisé la classification que Schmeling a proposée en 2004 pour les radiographies (Figure I-2) (Schmeling, 2004b) sur des scanners de la clavicule (Figure I-3).



**Figure I-2** – Classification en 5 stades de l'extrémité médiale de la clavicule, mise au point par Schmeling. *Stade I* : le centre d'ossification n'est pas visible (pas ossifié). *Stade II* : le centre d'ossification est visible (ossifié), absence de fusion entre l'épiphyse et la métaphyse. *Stade III* : fusion en cours. *Stade IV* : fusion complète entre la métaphyse et l'épiphyse, une cicatrice épiphysaire est toujours visible. *Stade V* : fusion complète entre la métaphyse et l'épiphyse, absence de cicatrice épiphysaire (d'après Hillewig, 2011).



**Figure I-3** - Classification de Schmeling adaptée au scanner. *A* : Stade 1 - le centre d'ossification n'est pas visible. *B* : Stade 2 - le centre d'ossification est visible ; l'épiphyse n'est pas ossifiée. *C* : Stade 3 - fusion partielle de l'épiphyse. *D* : Stade 4 - fusion complète de l'épiphyse ; une cicatrice épiphysaire est visible. *E* : Stade 5 - fusion complète de l'épiphyse ; absence de cicatrice épiphysaire (modifié d'après Basset, 2011).

Schulz et al. ont étudié 556 scanners de clavicule de sujets allemands âgés entre 15 et 30 ans en utilisant cette classification (Schulz, 2005). Ils trouvaient un âge de fusion complète sensiblement différent de celui établi jusque-là par l'étude d'os secs et de radiographies : le stade 5 (fusion complète, sans ligne épiphysaire) était atteint 5 ans plus tôt qu'une précédente étude basée sur les radiographies (Schmeling, 2004b). Pour expliquer cette différence de plusieurs années, l'épaisseur de coupe de scanner était avancée comme étant la limite principale de l'analyse. Du fait de coupes épaisses (7 mm pour 546 des 556 scanners examinés), la cicatrice épiphysaire cessait d'être visible en raison d'un artefact de volume partiel, alors que les radiographies avaient une meilleure résolution spatiale, permettant de mieux visualiser cette ligne épiphysaire. Pour réduire

cet artefact, les auteurs proposaient d'analyser des scanners dont l'épaisseur de coupe serait de 1 à 2 mm au maximum.

En appliquant cette recommandation, les études qui ont suivi ont mis en évidence des résultats plus proches de ceux établis jusque là (Kellinghaus, 2010a ; Basset, 2011 ; Schulze, 2006). L'échantillon de Kellinghaus et al. était constitué d'Allemands âgés de 10 à 35 ans. La fusion partielle (stade 3) débutait à 17 ans chez les hommes et 16 ans chez les femmes. Le stade 4 était atteint par les deux sexes à l'âge de 21 ans et le stade 5 à l'âge de 26 ans. Les résultats de cette étude étaient donc plus en accord avec les résultats basés sur les radiographies, confirmant ainsi que l'épaisseur de coupe jouait un rôle dans la visualisation de la cicatrice épiphysaire et donc dans la détermination du stade 5. Avec une épaisseur de coupe importante, les stades d'ossification apparaissent à des âges plus précoces (Mühler, 2006).

Les mêmes auteurs (Kellinghaus, 2010b) ont voulu affiner la méthode de Schmeling en sub-divisant les stades 2 et 3 en trois sous-catégories (phases précoce, intermédiaire, tardive). Ils ont ensuite analysé une seconde fois les 185 scanners classés en stades 2 et 3 de leur étude précédente (Kellinghaus, 2010a). Le stade 3a (fusion épiphyso-métaphysaire inférieure ou égale à un tiers de l'épiphyse) apparaissait à 17,5 ans pour les hommes et 16,8 ans pour les femmes et le stade 3b (fusion épiphyso-métaphysaire entre un et deux tiers de l'épiphyse) apparaissait à 18,3 ans pour les hommes et 17,8 ans pour les femmes. Le stade 3c (fusion épiphyso-métaphysaire couvrant plus de deux tiers de l'épiphyse) apparaissait à 19 ans pour les deux sexes. Les résultats permettaient de se rapprocher du seuil des 18 ans : les auteurs concluaient qu'il était possible de dire qu'un individu avait plus de 18 ans si un stade 3c était observé.

Les résultats de ces études sont présentés dans le tableau I-6. La limite supérieure d'âge de l'échantillon ne permettait cependant pas toujours d'observer l'âge auquel 100 % des individus avaient une fusion complète de l'épiphyse.

**Tableau I-6** - Principales études portant sur la maturation de l'extrémité médiale de la clavicule à partir de scanners.

Auteurs	Année	Échantillon			Age	Origine	Début union	Union complète	Union complète (chez 100 % des individus)
		Total	H	F					
Kreitner	1998	380	229	151	0-29	Allemands	16	22	27
Schulz	2005	556	417	139	15-30	Allemands	16	21	29
Schulze	2006	100	50	50	16-25	Allemands	16	19	> 25
Kellinghaus	2010	502	288	214	10-35	Allemands	16	21	27
Bassed	2011	674	455	219	15-25	Australiens	16	18	24

### 3.3.4. Synthèse

Les résultats des différentes études évoquées sont présentés dans le tableau I-7. Une comparaison ne peut pas être faite car les techniques d'examen sont différentes et il n'est pas possible de faire d'analogie entre ce qui est observé sur une radiographie et une coupe de scanner. Seule la comparaison entre études portant sur la même méthode d'imagerie ou d'examen est possible (Schulz, 2008a).

La fusion complète de l'épiphyse semble plus précoce dans les études radiographiques que dans celles sur os secs (Iskan, 1989). Une explication possible est qu'un aspect de fusion complète se voit plus tôt sur la radiographie car l'examen direct permet de distinguer des zones, même petites, de fusion en cours, qui ne sont pas visibles sur une radiographie (Jit, 1976). Une autre explication est que ces zones de fusion en cours seraient en fait de petites infractuosités donnant à tort à l'observateur l'impression qu'il persiste une zone de non fusion (Meijerman, 2007). Par ailleurs, une épiphyse non fusionnée peut être perdue lors du prélèvement d'un os sec, orientant par erreur vers un stade de fusion complète, et l'analyse d'une radiographie thoracique peut être rendue difficile en raison de la superposition d'autres structures osseuses altérant la visibilité de la clavicule (Bassed, 2011). Actuellement, le scanner est considéré comme le meilleur examen pour l'analyse de la clavicule dans la détermination de l'âge à des fins juridiques.

**Tableau I-7 - Résultats des études portant sur l'extrémité médiale de la clavicule à partir de radiographies et de scanners (Classification de Schmeling).**

Auteurs	Année	Méthode	Echantillon (n)	Age de l'échantillon	Stade 2 (ans)	Stade 3 (ans)	Stade 4 (ans)	Stade 5 (ans)
Schmeling	2004	Radio	499	16-30	-	16-26	20-30	26-30
Garamendi	2010	Radio	123	5-75	-	17-45	19-32	20-75
Kreitner	1998	TDM	380	0-29	11-22	16-26	22-29	-
Schulz	2005	TDM	629	15-30	15-23	16-28	21-30	21-30
Kellinghaus	2010	TDM	502	0-29	13-20	16-26	21-35	26-35
Schulze	2006	TDM	100	16-25	16-24	16-25	19-25	-
Bassed	2011	TDM	674	15-25	14-20	16-23	18-26	21-26

L'extrémité médiale de la clavicule n'est donc pas un bon indicateur pour le seuil des 18 ans, mais est intéressante pour le seuil des 21 ans. Le fait que la plupart des études concernant la clavicule aient été conduites par des auteurs allemands s'explique par les particularités juridiques de ce pays. En Allemagne, la majorité pénale est fixée à 18 ans. Mais entre 18 et 21 ans, un auteur de faits peu graves peut être jugé comme un mineur, si le juge a décidé, eu égard à l'appréciation globale de la personnalité de l'auteur de l'infraction, de le considérer comme un mineur. Cette disposition est appliquée dans environ deux tiers des cas. Le seuil des 21 ans est donc important dans le droit allemand, alors qu'il ne l'est pas en France (Schmeling, 2003a). Cependant, l'étude de l'extrémité médiale de la clavicule a un intérêt pour les médecins français, car si le scanner est compatible avec un âge d'au moins 21 ans (stade 4 de Schmeling), et à plus forte raison 26 (Stade 5), cela signifie que l'individu a plus de 18 ans.

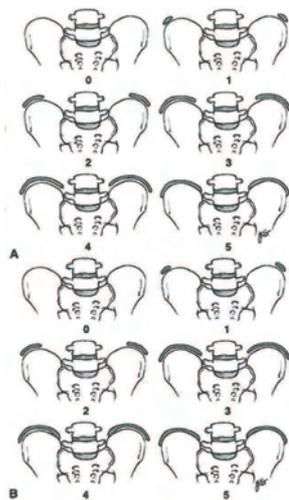
### 3.4. Crête iliaque

#### 3.4.1. Signe de Risser

Le signe de Risser évalue la fin de la croissance d'un individu. Il correspond au stade d'ossification de la crête iliaque et son intérêt réside dans la concomitance entre la fin de cette ossification et celle de la croissance rachidienne. Il a surtout été utilisé par les chirurgiens orthopédistes pour évaluer le risque potentiel d'évolution d'une scoliose idiopathique et choisir le meilleur moment pour poser une indication chirurgicale. Sur une radiographie, il n'est pas possible d'évaluer la croissance rachidienne. Il fallait donc

trouver un signe physiologique équivalent à la fin de cette croissance, facilement repérable sur un examen de routine.

En 1958, Joseph C. Risser a décrit l'aspect de l'apophyse iliaque qui couvre les parties antérieure et latérale de la crête iliaque sur une radiographie de bassin de face (Risser, 1958). Au fur et à mesure de la croissance, l'apophyse recouvre la crête iliaque (« capping ») puis le développement se fait dans le plan postérieur vers l'épine iliaque postéro-supérieure, jusqu'à rejoindre l'ilion au niveau de sa jonction avec le sacrum : l'ossification est alors complète. Il y a ensuite une fusion entre l'apophyse et la crête iliaque. Risser a examiné des enfants et des adolescents californiens de 1936 à 1946. Il a constaté qu'en moyenne, cette ossification correspondait à un âge chronologique de 14 ans chez les filles, avec un intervalle de confiance compris entre 10 et 18 ans, et 16 ans chez les garçons, avec un intervalle de confiance compris entre 13 et 20 ans. Il a montré que l'achèvement de cette ossification avait une excellente corrélation avec celui de la croissance des vertèbres. Le pic de croissance a lieu avant l'apparition de l'apophyse iliaque. Une fois que celle-ci est visible, la croissance ralentit. L'ossification de la crête iliaque fait l'objet de deux classifications différentes, une utilisée en France et l'autre aux États-Unis, chacune composée de 6 stades (Figure I-4).



**Figure I-4** - Classification de l'ossification de la crête iliaque d'après Risser. **I-4(A) 0-5** : Classification américaine. Stade 0 : pas d'ossification ; Stade 1 : ossification d'un quart de l'apophyse ; Stade 2 : ossification de la moitié de l'apophyse ; Stade 3 : ossification des trois quarts de l'apophyse ; Stade 4 : l'apophyse est ossifiée ; Stade 5 : fusion de l'apophyse ossifiée à l'aile iliaque. **I-4(B) 0-5** : Classification française. Stade 0 : pas d'ossification ; Stade 1 : ossification d'un tiers de l'apophyse ; Stade 2 : ossification des deux tiers de l'apophyse ; Stade 3 : l'apophyse est ossifiée ; Stade 4 : début de la fusion en région postérieure ; Stade 5 : fusion complète de l'apophyse à l'aile iliaque (modifié d'après Bitan, 2005).

Ces deux systèmes ne sont pas équivalents, la classification française ayant tendance à sous-évaluer le stade d'ossification par rapport au système américain (Bitan, 2005). Ces deux méthodes ont un intérêt pour le seuil des 14 ans et la classification française permet également d'apporter des informations par rapport au seuil des 16 ans, âge minimum des individus classés en stade 5 (Wittschieber, 2013a).

La méthode de Risser a été peu évaluée. Les études portant sur la variabilité inter-observateur ont des résultats discordants, très bons (Goldberg, 1998), bons mais dépendants de l'expérience de l'examineur (Reem, 2009) ou médiocres (Shuren, 1992). Des travaux ont montré que la méthode de Greulich et Pyle donnaient de meilleurs résultats dans la détermination de l'âge osseux (Wang, 2009). Kotwicki a proposé de compléter l'évaluation par l'analyse d'une radiographie du bassin de profil, permettant de visualiser une ossification débutante dans la partie postérieure de l'apophyse, ce qui n'est pas possible sur la radiographie du bassin de face (Kotwicki, 2009).

#### 3.4.2. Méthodes dérivées

Le signe de Risser a été décrit dans le but d'être utilisé pour diagnostiquer des troubles de la croissance. Afin de voir si l'étude de la crête iliaque avait un intérêt dans le contexte médico-légal de la détermination de l'âge, la classification habituellement utilisée dans ce type d'étude (Kreitner, 1998 ; Kellinghaus, 2010b) a donc été appliquée sur des radiographies du bassin. Cette variante de la méthode de Risser a confirmé que l'analyse de la fusion de l'apophyse de la crête iliaque pouvait avoir un intérêt dans la détermination de l'âge pour les seuils de 14 et 16 ans (Wittschieber, 2013b).

Récemment, Wittschieber et al. ont utilisé une méthode de segmentation mise au point par Cameriere (Cameriere, 2006 ; 2007 ; 2008a ; 2008b, 2009) pour calculer le ratio de l'apophyse iliaque sur la surface de l'aile iliaque (Wittschieber, 2013c). Leurs résultats montraient une corrélation médiocre avec l'âge chronologique de l'individu.

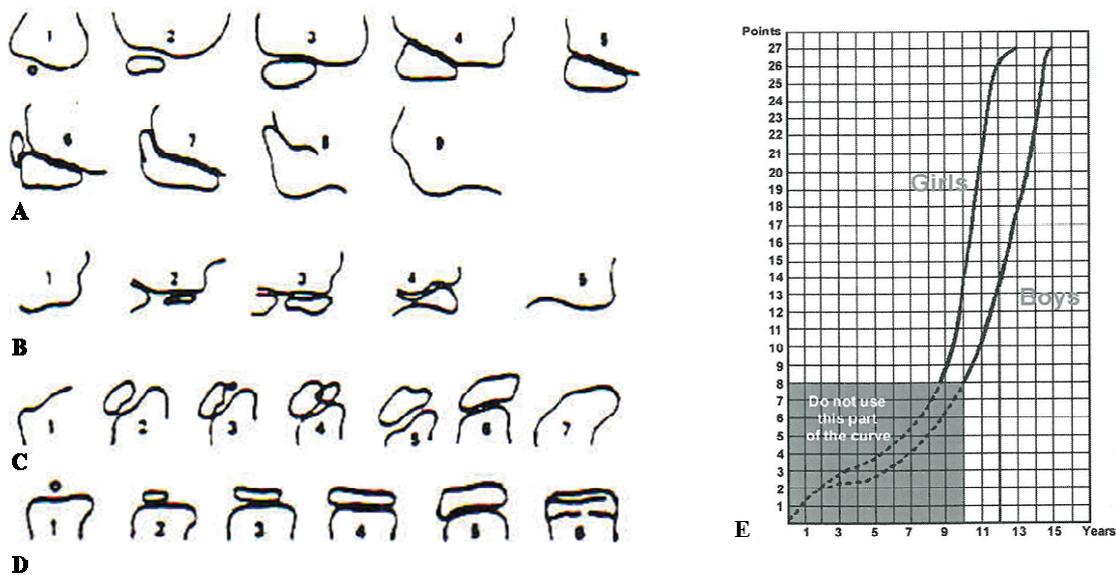
L'inconvénient principal de l'étude de l'ossification de la crête iliaque, en dehors de son absence d'intérêt pratique dans la détermination du seuil des 18 ans, est l'irradiation gonadique liée à la radiographie du bassin. Dans le contexte de la détermination de l'âge à des fins juridiques, en l'absence de bénéfice thérapeutique et étant donné l'âge des individus évalués, cette méthode n'est pas utilisée pour cette raison.

### 3.5. Coude

#### 3.5.1. Méthode de Sauvegrain, Nahum et Bronstein

La méthode de Sauvegrain et Nahum est basée sur l'étude de la maturation osseuse de quatre régions du coude, à partir de radiographies en incidence de face et de profil (Sauvegrain, 1962).

Un score est attribué à chaque région étudiée : le condyle et l'épicondyle (score de 1 à 9 points), la trochlée (score de 1 à 5 points), l'olécrâne (score de 1 à 7 points) et la tête radiale (score de 1 à 6 points). L'addition des quatre cotations permet d'obtenir un score total dont le maximum est de 27 points. Ce résultat est reporté sur une courbe avec lecture directe de l'âge osseux selon le sexe (Figure I-5).



**Figure I-5** - Méthode de Sauvegrain, Nahum et Bronstein. A : Condyle et épicondyle. B : Trochlée. C : Olécrâne. D : Tête radiale. E : Courbe de référence (modifié d'après Sauvegrain, 1962).

Cette méthode ne peut être utilisée que lors de la phase ascendante de croissance, avant le stade 1 de Risser, lors de changements morphologiques importants des noyaux d'ossifications du coude. Pendant les trois premières années de la puberté, entre 10 et 13 ans chez les filles et entre 12 et 15 ans chez les garçons, l'estimation de l'âge est possible à six mois près. Cette méthode constitue donc un complément potentiel de l'étude de la

main et du poignet, l'atlas de Greulich et Pyle ne comportant pas de cliché de référence pour les âges de 14,5 ans chez les garçons, et de 11,5 et 12,5 ans chez les filles (Greulich, 1959).

Chaumoître et al. ont testé la méthode de Sauvegrain en étudiant la différence entre l'âge chronologique et l'âge osseux à partir de 106 radiographies d'individus âgés de 9 à 15 ans. L'analyse de ces clichés par quatre lecteurs différents ne révélait pas de différence significative. Les résultats montraient une surestimation de l'âge osseux de 6 mois en moyenne par rapport à l'âge chronologique, et un écart-type relativement important (+/- 11 mois) (Chaumoître, 2006).

### 3.5.2. Méthodes dérivées

Dimeglio et al. ont testé la méthode de Sauvegrain sur 120 radiographies et ont comparé les résultats avec ceux obtenus grâce à la méthode de Greulich et Pyle pour les mêmes individus, mettant en évidence une excellente variabilité inter-observateur et une bonne corrélation entre les deux méthodes (Dimeglio, 2005). Ils ont cependant proposé d'affiner la classification initiale en introduisant des cotations supplémentaires pour l'olécrâne (score intermédiaire à 6,5 points), la trochlée (3,5) et la tête radiale (5,5), permettant d'améliorer la reproductibilité de la méthode, particulièrement pour les filles entre 12 et 13 ans.

Les mêmes auteurs ont également proposé, à l'inverse, de simplifier la méthode de Sauvegrain, en utilisant l'olécrâne comme seul indicateur (Dimeglio, 2005). Ils divisaient l'évolution morphologique de l'olécrâne en cinq stades :

- Deux centres d'ossification visibles : âge de 11 ans chez les filles et 13 ans chez les garçons,
- Forme de demi-lune : 11,5 ans chez les filles et 13,5 ans chez les garçons,
- Forme rectangulaire : 12 ans chez les filles et 14 ans chez les garçons,
- Début de fusion : 12,5 ans chez les filles, 14,5 ans chez les garçons,
- Fusion complète : 13 ans chez les filles et 15 ans chez les garçons.

Charles et al. ont testé cette méthode simplifiée sur 200 radiographies. Les résultats montraient une bonne concordance avec la méthode de Sauvegrain classique (Charles, 2007). Les auteurs concluaient que cette méthode simplifiée était efficace, avec un temps

d'apprentissage court, et s'avérait particulièrement précise entre 11 et 13 ans chez les filles et entre 13 et 15 ans chez les garçons.

### 3.5.3. Intérêts pratiques

La méthode de Sauvegrain est surtout utilisée en chirurgie orthopédique pédiatrique dans les cas de scoliose idiopathique, pour identifier la phase ascendante de la puberté et évaluer le meilleur moment pour poser une indication chirurgicale (Canavese, 2008). Etant donné la fourchette d'âge à laquelle cette méthode est contributive, plusieurs années avant l'âge de 18 ans, elle n'est le plus souvent pas utilisée dans la détermination de l'âge à des fins juridiques. Cette méthode peut cependant être utilisée en complément de celle de Greulich et Pyle si les seuils d'intérêt sont 13 ou 16 ans.

## **3.6. Autres méthodes**

### 3.6.1. Genou

Trois épiphyses peuvent être analysées de manière concomitante : l'extrémité distale du fémur et les extrémités proximales du tibia et de la fibula. La maturation osseuse de ces épiphyses a été le sujet d'études anthropologiques sur os secs ou sur radiographies (Flecker, 1932 ; Stevenson, 1934 ; McKern, 1957 ; O'Connor, 2008 ; Schaefer, 2005 ; Pyle, 1955).

Pyle et Hoerr ont constitué un atlas à partir de radiographies de genou droit de garçons et de filles âgés d'un mois à 19 ans (Pyle, 1955), originaires d'Amérique du Nord, les clichés ayant été recueillis entre 1927 et 1945. Cet atlas a la même utilité (comparaison avec un cliché à évaluer, temps d'apprentissage court, irradiation limitée) et présente les mêmes limites (échantillon sans point commun avec les individus faisant l'objet d'une détermination d'âge, étude non longitudinale) que celui de Greulich et Pyle (Greulich, 1959). Il peut être utilisé sur une population moderne de niveau socio-économique similaire (Hackman, 2013b).

Plus récemment, Cameriere et al. ont appliqué une classification en trois stades (stade 1 : pas de fusion/stade 2 : fusion totale, ligne épiphysaire visible/stade 3 : fusion totale, absence de ligne épiphysaire) de manière concomitante sur les trois épiphyses de 215 radiographies du genou d'un échantillon de jeunes italiens. Un score total correspondait à

la somme des stades obtenus pour chaque épiphyse. Les résultats étaient intéressants par rapport au seuil des 18 ans, particulièrement le stade 3 pour les garçons et le stade 4 pour les filles (Cameriere, 2012b).

Malgré ces résultats, le genou n'est actuellement pas utilisé en pratique dans la détermination de l'âge à des fins juridiques.

### 3.6.2. Vertèbres cervicales

La maturation osseuse des vertèbres cervicales a été étudiée en chirurgie dentaire pour déterminer le choix d'un traitement orthodontique, car il existe une bonne corrélation avec la croissance de la mandibule (Uysal, 2006), ainsi qu'avec la maturation du poignet et de la main (Hassel, 1995 ; Garcia-Fernandez, 1998).

Trois méthodes d'évaluation de la maturation existent (Hassel, 1995 ; Baccetti, 2002 ; Seedat, 2005). La maturation des vertèbres cervicales peut également être étudiée comme un des indicateurs à analyser dans la détermination de l'âge d'un individu au moment de son décès (Albert, 2013).

Il n'y a pas eu d'étude sur l'apport éventuel de cette méthode dans la détermination de l'âge à des fins juridiques et elle n'est pas utilisée en pratique.

### 3.6.3. Première côte

L'ossification du cartilage costal de la première côte a été décrite par Michelson en 1934 (Michelson, 1934). La relation entre la maturation osseuse de la première côte et l'âge chronologique a fait l'objet d'une étude par Garamendi et al. à partir de radiographies, montrant que tous les individus ayant une ossification complète étaient âgés d'au moins 21 ans, et que l'absence de fusion était en faveur d'un âge inférieur à 20 ans (Garamendi, 2011). Les auteurs suggéraient d'utiliser cette méthode en appoint de l'étude de l'extrémité médiale de la clavicule pour le seuil de 21 ans, d'autant plus que ces deux indicateurs sont visibles sur un même cliché radiographique.

L'analyse à partir de coupes de scanners donnait également de bons résultats, corrélés à l'âge réel (Moskovitch, 2010). Des réserves doivent cependant être faites concernant l'application potentielle de cette méthode dans la détermination de l'âge à des fins

juridiques, car l'ossification de la première côte semble être dépendante de l'activité physique de l'individu (Barchilon, 1996).

#### 3.6.4. Autres

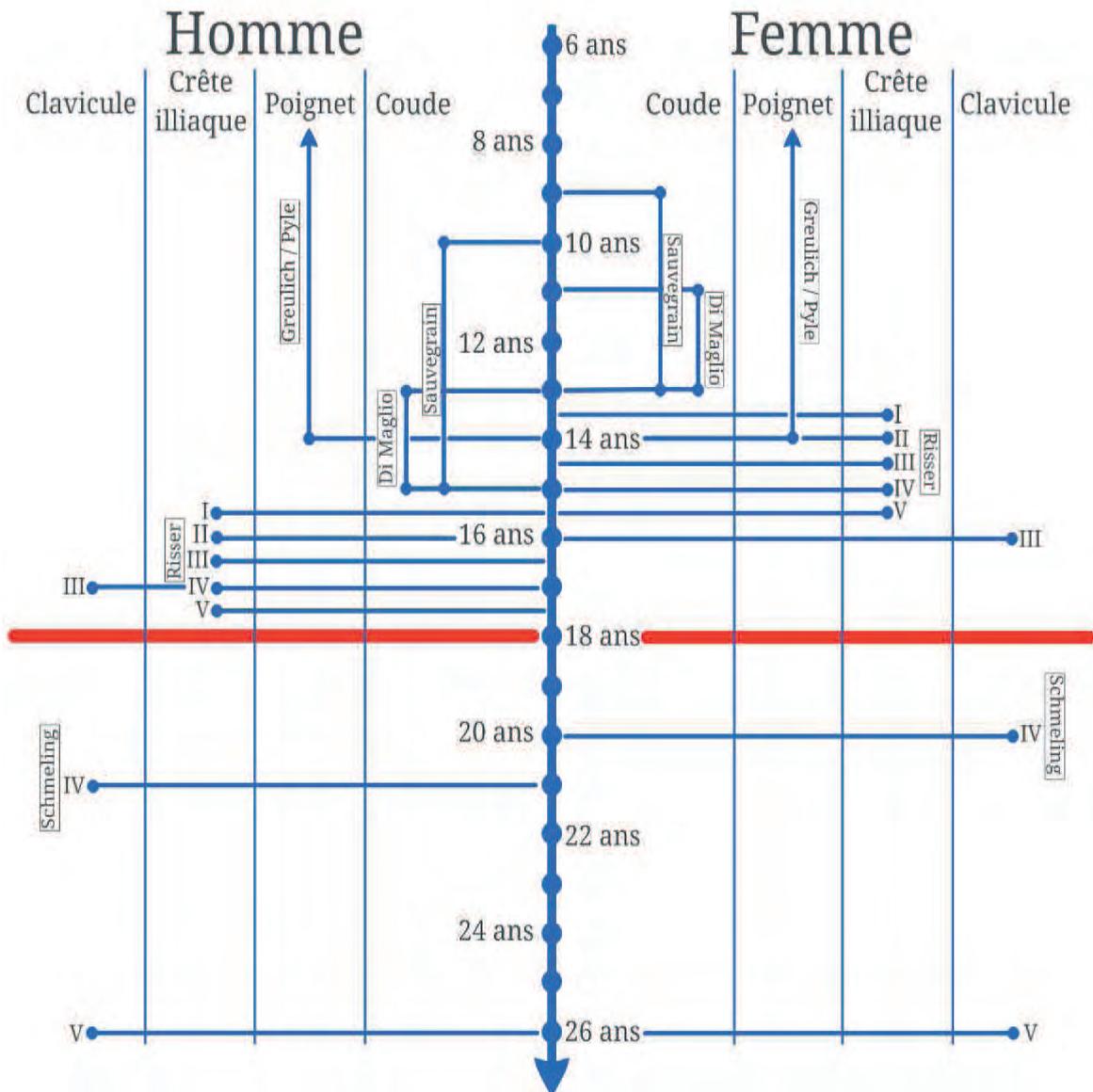
Des travaux ont porté sur l'analyse radiographique l'épiphyse proximale du 5<sup>ème</sup> métatarsien (Davies, 2013), l'extrémité supérieure de l'humérus (Zydek, 2011), les vertèbres thoraciques et lombaires (Albert, 2010). Les résultats étaient encourageants mais la reproductibilité de ces méthodes n'a pas été évaluée et ces techniques ne sont pas utilisées.

### **3.7. Le choix de la méthode appropriée**

La figure I-6 est un diagramme sur lequel sont indiquées, pour chaque sexe, les méthodes les plus contributives en fonction de l'âge, à partir des données de la littérature exposées précédemment. Le poignet, la crête iliaque, le coude et la clavicule ont été choisis, car ces quatre zones anatomiques ont été les plus étudiés et correspondent aux méthodes les plus fréquemment utilisées en pratique.

Les méthodes de Greulich et Pyle et de Sauvegrain sont adaptées pour le seuil de 13 ans, celle de Risser pour le seuil des 16 ans, celle de Schmeling pour le seuil des 21 ans. L'association de plusieurs méthodes permet d'affiner le diagnostic pour ces seuils.

Cette figure permet de visualiser l'absence de méthode contributive pour le seuil des 18 ans pour les deux sexes.



**Figure I-6** – Diagramme représentant les âges auxquels les méthodes d'estimation de l'âge utilisant le poignet, le coude, la crête iliaque et la clavicule sont les plus contributives pour chaque sexe. Par souci de simplification, les déviations standards n'ont pas été représentées. La méthode de Greulich et Pyle est développée dans la partie 3.2.2 ; celles de Sauvegrain et DiMaglio dans les parties 3.5.1 et 3.5.2 ; la méthode ou test de Risser dans la partie 3.4.1 ; l'analyse de l'extrémité médiale de la clavicule par scanner a été ici dénommée « méthode de Schmeling » et est développée dans la partie 3.3.4.

### 3.8. Les recommandations actuelles

En 1999, lors d'un congrès en Allemagne, un groupe international d'experts médecins légistes, radiologues, anthropologues et dentistes a souhaité élaborer des recommandations pour guider les médecins sollicités dans leur démarche médico-légale. Le but était de standardiser la procédure, face à l'hétérogénéité des pratiques et des méthodes employées. Ce groupe multidisciplinaire d'experts (AGFAD : Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin - Study Group on Forensic Age Diagnostics) a été constitué à Berlin en 2000 et a formulé des recommandations sur le contenu d'une expertise médicale aux fins d'estimation de l'âge (Schmeling, 2001).

Ainsi, la détermination de l'âge à des fins juridiques doit comprendre :

- un **examen clinique** de l'individu, en recueillant des mesures anthropométriques (poids, taille), l'origine ethnique, le stade de puberté en utilisant la classification de Tanner (Tanner, 1962) et en recherchant des pathologies susceptibles d'interférer avec la croissance (troubles hormonaux par exemple). Préalablement à l'examen, l'individu doit être informé de l'objet de la mission et des modalités de son accomplissement. Son consentement doit être recueilli. S'il ne s'exprime pas dans la langue du pays où l'expertise est effectuée, la présence d'un interprète est nécessaire.
- une **radiographie de la main et du poignet gauches**, la méthode utilisée étant laissée à l'appréciation de l'examineur (Cunha, 2009)
- un **examen dentaire**, complété d'un **panoramique dentaire**. L'éruption et la minéralisation des dents sont les critères principaux pris en compte. L'éruption des troisièmes molaires est visible à l'examen direct de la cavité buccale et survient généralement lorsque la 17<sup>ème</sup> année est révolue. La minéralisation est évaluée sur le panoramique dentaire ; il est recommandé d'utiliser la méthode de Demirjian (Demirjian, 1973),
- dans le cas où la maturation osseuse du poignet et de la main seraient complètes, **une radiographie ou un scanner des clavicules** permet de déterminer si l'individu est âgé de plus ou moins de 21 ans.

Les résultats doivent être comparés à ceux disponibles dans des études portant sur un échantillon d'individus de la même origine que le patient à évaluer, lorsque cela est possible (Schmeling, 2008). Un expert ayant des compétences médico-légales doit superviser la réalisation de ces examens et faire la synthèse des résultats. Le résultat de chacun des tests utilisé doit être donné séparément, sous la forme d'une estimation avec moyenne et écart-type (Schmeling, 2001 ; 2004b ; 2006c ; 2007 ; Raul, 2010). Ces recommandations sont disponibles sur le site de l'AGFAD à l'adresse suivante : [http://agfad.uni-muenster.de/english/empfehlungen/empfehlung\\_strafverfahren\\_eng.pdf](http://agfad.uni-muenster.de/english/empfehlungen/empfehlung_strafverfahren_eng.pdf).

## **DEUXIÈME PARTIE**

# **APPORT DE L'IRM DANS LA DÉTERMINATION DE L'AGE**

## Chapitre 1 – Généralités

### 1.1. Le développement des techniques d'imagerie non irradiantes

Dans le contexte d'une détermination d'âge à des fins juridiques, le médecin doit veiller à ce que l'exposition aux rayonnements ionisants causée par la pratique d'examens radiologiques soit la plus faible possible, et ce d'autant plus que ceux-ci ne présentent pas un avantage médical direct pour la personne qui les subit (Circulaire Euratom 97-43). Les individus concernés sont souvent des adolescents, qui sont plus sensibles au risque cancérigène des radiations que les adultes.

Radiographie et scanner exposent les individus à des radiations ionisantes. Une radiographie de main/poignet expose l'individu à une irradiation inférieure à 0,1 microsievert ( $\mu\text{Sv}$ ), un panoramique dentaire à une irradiation de 26  $\mu\text{Sv}$ , une radiographie des clavicules à une irradiation d'environ 200  $\mu\text{Sv}$  et un scanner des clavicules à une irradiation comprise entre 600 et 800  $\mu\text{Sv}$ , suivant qu'il s'agit d'un scanner spiralé (600) ou conventionnel (800) (Jurik, 1996 ; Ramsthaler, 2009 ; Hillewig, 2011). A titre de comparaison, un vol intercontinental de 10 heures expose à une irradiation de 50  $\mu\text{Sv}$ . La décision d'effectuer un scanner des clavicules dans un contexte dénué de bénéfice thérapeutique doit donc être prise uniquement pour les individus pour lesquels il y a de forts arguments suggérant qu'ils sont âgés de plus de 18 ans (Ramsthaler, 2009).

Afin de supprimer l'irradiation des sujets évalués, des études récentes se sont intéressées à l'apport de l'échographie et de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) dans la détermination de l'âge à des fins juridiques. La nécessité de comparer les résultats à des données déjà existantes permet d'expliquer que les régions anatomiques étudiées aient été celles des méthodes de référence les plus utilisées. C'est la raison pour laquelle le poignet et la main gauches, ainsi que l'extrémité médiale de la clavicule, ont fait l'objet de travaux à partir de ces deux techniques d'imagerie. Par ailleurs, la crête iliaque a été étudiée par échographie et le genou par IRM.

## 1.2. Échographie

### 1.2.1. Poignet

Le **poignet** a été étudié par échographie à plusieurs reprises (Bilgili, 2003 ; Castriota-Scanderbeg, 1998 ; Mentzel, 2005 ; Khan, 2009 ; Schmidt, 2013).

L'étude de Bilgili et al. montrait une bonne corrélation entre les résultats obtenus à l'échographie du poignet et ceux obtenus à partir de l'atlas de Greulich et Pyle dans les premières années de vie, mais l'échantillon ne concernait que des enfants âgés de moins de 6 ans (Bilgili, 2003).

Les autres études se sont intéressées à l'aspect échographique des extrémités distales du radius et l'ulna, sans prendre en compte les os du carpe. Mentzel et al. montraient une aussi bonne corrélation entre les résultats de l'échographie et l'âge réel de l'individu qu'entre les résultats de la méthode de Greulich et Pyle pour le même individu et l'âge réel (Mentzel, 2005).

Les conclusions de Khan et al. et de Castriota-Scanderbeg et al. étaient plus nuancées, en raison d'une grande variabilité des résultats obtenus avec l'échographie, par rapport aux méthodes de Greulich et Pyle et de Tanner-Whitehouse (Castriota-Canderbeg, 1998 ; Khan, 2009).

Schmidt et al. ont conduit une étude dont l'objectif était spécifiquement de déterminer si l'analyse de l'extrémité distale du radius par échographie pouvait remplacer la méthode de Greulich et Pyle dans un contexte juridique. Leur conclusion était que cette méthode était intéressante pour le seuil des 14 ans, mais pas pour celui des 18 ans (Schmidt, 2013).

### 1.2.2. Extrémité médiale de la clavicule

L'apport de l'échographie de **l'extrémité médiale de la clavicule** a fait l'objet de deux études, dont les résultats sont présentés dans le tableau II-1.

Les auteurs de la première étude, en 2008, ont proposé une classification en 4 stades, selon les mêmes principes que celle utilisée pour l'analyse de la clavicule par radiographies et scanners (Schulz, 2008b). L'échantillon comprenait 84 individus âgés de

11 à 30 ans. Une fusion partielle était visible à partir de 16 ans et une fusion complète à partir de 22 ans. 100 % des individus avaient fusionné à 30 ans.

La même méthodologie a été appliquée sur 77 hommes âgés de 18 à 24 ans (Quirnbach, 2009). Les résultats différaient de la précédente étude : certains sujets âgés de plus de 21 ans étaient classés en stade 1, et d'autres ayant moins de 21 ans étaient classés en stade 4. Une explication possible était que l'échographie permettait de visualiser seulement une partie de la surface épiphysaire de la clavicule, ce qui pouvait conduire à des faux positifs et à des faux négatifs. De plus, l'échographie produisait des artefacts pouvant mimer une absence de fusion (Gonsior, 2013).

L'échographie de l'extrémité médiale de la clavicule ne peut donc pas être utilisée comme méthode dans la détermination de l'âge, en raison du nombre important d'erreurs possibles.

**Tableau II-1** - Principales études portant sur la maturation de l'extrémité médiale de la clavicule par échographie.

Auteurs	Année	Échantillon			Age	Origine	Début union	Union complète	Union complète (chez 100 % des individus)
		Tota l	H	F					
Schulz	2008	84	45	39	11-30	Allemands	16	22	24
Quirnbach	2005	77	77	-	18-24	Allemands	20	20	23

### 1.2.3. Crête iliaque

Trois études portant sur la fusion de la **crête iliaque** par échographie sont disponibles (Wagner, 1995 ; Thaler, 2008 ; Schmidt, 2011). Les résultats montraient qu'il existait une bonne corrélation entre échographie et radiographie pour le même individu (Wagner, 1995 ; Thaler, 2008) et confirmaient que cette méthode pouvait avoir un intérêt par rapport aux seuils de 14 et 16 ans (Schmidt, 2011). Des difficultés étaient rencontrées pour distinguer les stades 3 et 4 de Risser, surtout chez les adolescents obèses (Wagner, 1995).

#### 1.2.4. Synthèse

Les avantages de l'échographie sont la facilité d'accès à cette technique d'imagerie dans tous les centres hospitaliers, l'innocuité et la rapidité de l'examen. Les variabilités inter- et intra-observateurs sont bonnes (Castriota-Scanderbeg, 1996). Les inconvénients de l'échographie sont liés au temps d'apprentissage, à l'expérience de l'examineur dans la pratique de cette technique d'imagerie et au fait que les images visualisées dépendent des positions de la sonde et du patient. De plus, la qualité de l'examen est limitée par la corpulence de l'individu. Enfin, en raison des risques d'erreurs décrits dans les études des différentes zones anatomiques, liées à l'impossibilité fréquente de visualiser la totalité de la surface épiphysaire de l'indicateur choisi, l'échographie ne peut être retenue comme une technique d'imagerie de référence dans l'estimation de l'âge à des fins juridiques.

### **1.3. Imagerie par Résonance Magnétique (IRM)**

#### 1.3.1. Poignet

La plupart des études du poignet par IRM se sont inscrites dans un contexte particulier, pour la détermination de l'âge réel de joueurs de football. En 2003, la Fédération Internationale de Football Association (FIFA), qui avait remarqué une discordance entre l'âge civil et l'apparence physique de certains jeunes joueurs dans les compétitions et ne souhaitait pas que les joueurs soient exposés à l'irradiation causée par un cliché radiographique de la main, a mis en place un protocole simultanément à Zurich (Suisse), Kuala Lumpur (Malaisie), Buenos Aires (Argentine) et Alger (Algérie) pour tester 500 joueurs de football âgés de 14 à 19 ans dont l'âge civil était avéré par un certificat de naissance « fiable » (Dvorak, 2009).

Les IRM des poignets ont été faites selon les mêmes modalités (coupes coronales, pondération en T1) et interprétées selon une même classification à 6 stades. Le but était d'établir des standards afin de tester ultérieurement les joueurs dont la date de naissance était incertaine et qui déclaraient être plus jeunes qu'ils ne l'étaient réellement pour jouer dans la catégorie d'âge inférieure à la leur. A partir de cette population de référence, il a pu être établi que la fusion complète du radius et de l'ulna ne survenait avant 17 ans que dans 1 % des cas. Ce résultat était particulièrement intéressant pour la Coupe du Monde U-17, dont les participants doivent être âgés de moins de 17 ans. Par ailleurs, la maturation osseuse était plus rapide chez les garçons argentins et malaisiens que chez les garçons algériens et suisses (Dvorak, 2007a).

Une IRM de poignet a ensuite été faite sur ses joueurs sélectionnés au hasard, au cours des Coupes du Monde U-17 de 2003, 2005 et 2007. Près de 35 % des individus choisis avaient une fusion complète du poignet (Dvorak, 2007b). En 2009, lorsque la FIFA a annoncé un renforcement de ces contrôles, certains entraîneurs ont changé jusqu'à 15 joueurs de leur équipe (Dvorak, 2009).

Le protocole initial a été élargi en Malaisie, où des garçons âgés de 15 à 19 ans ont eu une IRM et une radiographie de poignet, les deux examens étant comparés. La radiographie surestimait la maturation osseuse par rapport aux images d'IRM, sur lesquelles il était possible de visualiser des zones non fusionnées, alors que la radiographie montrait une union complète (George, 2012).

Une étude plus récente a utilisé un IRM compact ouvert sur 93 Japonais âgés de 4 à 16 ans (Terada, 2013). Les images étaient analysées par segmentation avec la méthode de Tanner et Whitehouse TW2 (Tanner, 1975). Il y avait une bonne corrélation entre l'âge osseux et l'âge réel. Les variabilités inter- et intra-observateurs étaient excellentes. L'inconvénient de cette méthodologie était l'utilisation d'un référentiel constitué à partir de radiographies, pour analyser des images d'IRM.

### 1.3.2. Extrémité médiale de la clavicule

La classification de Schmeling (Schmeling, 2004b) a également été utilisée pour l'analyse de l'extrémité médiale de la clavicule par IRM.

Dans un premier temps, des clavicules prélevées lors d'autopsies médico-légales ont été étudiées (Schmidt, 2007b). Il ressortait de ce travail portant sur 54 individus âgés entre 6 et 40 ans que la fusion partielle était visualisée à 16 ans et la fusion totale à 23 ans. Le temps d'acquisition des images qui était selon le protocole d'une heure et demie ou de trois heures, était cependant trop long pour une application sur les vivants.

Ce temps d'acquisition a ensuite été réduit à quatre minutes, permettant l'examen d'individus vivants et la comparaison des résultats de l'IRM et de radiographies de clavicules pour les mêmes sujets (Hillewig, 2011). Cette nouvelle approche a montré que la classification de Schmeling, déjà utilisée pour la lecture de radiographies et de scanners, était applicable à l'IRM. Les deux examinateurs trouvaient plus facile de

déterminer le stade de maturation osseuse sur les images d'IRM que sur les radiographies et la variabilité inter-observateur était meilleure avec l'IRM qu'avec la radiographie. L'écho de gradient VIBE semblait être la séquence permettant de classer l'épiphyse avec le plus de facilité, par rapport aux autres séquences testées (T1 écho de gradient FLASH-3D, T2 Fast Spin Echo, et T1 Fast Spin Echo). Enfin, la cicatrice épiphysaire (stade 4) n'a jamais pu être identifiée par les deux examinateurs.

Cette constatation a conduit les mêmes auteurs à analyser un échantillon de 220 individus en comparant les résultats de l'IRM (séquence T1 écho de gradient VIBE, temps d'acquisition 6 minutes) à partir de deux classifications, celle de Schmeling, et celle de Kreitner, à 4 stades, le dernier stade étant celui de la fusion complète, sans tenir compte de la présence ou pas d'une cicatrice épiphysaire (Kreitner, 1998). Ces différents stades ont été comparés avec l'âge évalué par la méthode de Greulich et Pyle sur une radiographie de main/poignet pour les mêmes individus (Hellewig, 2013). Des probabilités Bayésiennes ont été faites, ce qui permettait d'évaluer la probabilité conditionnelle d'évaluer correctement l'âge d'un individu par rapport au seuil des 18 ans. Les résultats montraient que la classification de Kreitner, qui ne tient pas compte de la cicatrice épiphysaire, était mieux adaptée à la lecture des IRM que celle de Schmeling. Les probabilités conditionnelles permettaient de déterminer qu'un individu dont la clavicule était classée au stade 4 avait 0,8 % de chances d'avoir moins de 18 ans s'il s'agissait d'une femme et 0,2 % s'il s'agissait d'un homme. Par ailleurs, les examinateurs n'arrivaient parfois pas toujours à faire la distinction entre les stades 1 (absence de centre d'ossification, absence d'épiphyse) et 4 (fusion complète); il était alors conseillé d'effectuer une radiographie de main/poignet pour rectifier cette erreur potentielle.

Tangmose et al. ont montré que l'analyse de l'extrémité médiale de la clavicule était aussi fiable sur des coupes de scanner que sur des images IRM post-mortem, mais recommandaient la poursuite de l'utilisation du scanner, en l'absence d'études de référence pour l'IRM (Tangmose, 2013).

En dépit d'excellents résultats, l'IRM de la clavicule ne pouvait donc pas être utilisée comme seul examen dans le cadre de la détermination de l'âge, et une lecture de la radiographie main/poignet selon la méthode de Greulich et Pyle devait nécessairement être effectuée simultanément pour affiner les résultats.

Les principaux résultats de ces études sont présentés dans le tableau II-2.

**Tableau II-2** - Principales études portant sur la maturation de l'extrémité médiale de la clavicule par IRM.

Auteurs	Année	Échantillon			Age	Origine	Début union	Union complète	Union complète (chez 100 % des individus)
		Total	H	F					
Schmidt	2007b	54	40	14	6-40	Allemands	16,9	23,8	35
Hillewig	2011	121	?	?	11-30	Belges	11	18	27
Hillewig	2013	220	110	110	16-26	Belges	16	20	25

### 1.3.3. Genou

Deux études par IRM ont été publiées. L'une porte sur la maturation de l'épiphyse proximale du tibia chez 41 jeunes garçons âgés de 15 à 19 ans. La fusion métaphyso-épiphysaire était achevée à la fin de la 16<sup>ème</sup> année (Jopp, 2010). Cette étude était cependant limitée par l'absence d'individus de sexe féminin, la petite taille de l'échantillon et les limites d'âges rapprochées.

La seconde étude portait sur 290 individus des deux sexes, âgés de 10 à 30 ans, pour lesquels des coupes coronales ont été lues selon une classification en 5 stades, basés sur l'épaisseur visible du cartilage de l'épiphyse distale du fémur et de l'épiphyse proximale du tibia (Dedouit, 2012). Les variabilités inter- et intra-observateurs étaient excellentes. Les résultats étaient intéressants pour le seuil des 16 ans, car tous les individus de sexe masculin classés au stade 4 et de sexe féminin classés au stade 5 avaient plus de 16 ans.

## **1.4. IRM : principes et fonctionnement (Kastler, 2006)**

### 1.4.1. Principe général

L'IRM est une technique radiologique non invasive et sans effets secondaires connus, basée sur le phénomène de résonance magnétique nucléaire (RMN). Il s'agit d'observer la RMN des protons de l'eau contenus dans l'organisme, c'est-à-dire la réponse des noyaux soumis à un champ magnétique extérieur et à une excitation électromagnétique. L'intensité recueillie pour un élément de volume (voxel) dépend de la concentration de l'eau à l'endroit considéré permettant ainsi d'obtenir une image tridimensionnelle de la répartition de l'eau dans le corps d'un patient. Selon la méthode utilisée, le contraste

entre deux voxels peut être augmenté si les temps de relaxation des spins nucléaires (décrivant le retour à l'équilibre des noyaux après l'excitation) diffèrent dans les deux zones. Il est donc possible d'observer des altérations des tissus grâce aux différences de densité et de relaxation de l'eau.

#### 1.4.2. Le phénomène de résonance magnétique nucléaire

La RMN exploite le fait que les noyaux de certains atomes possèdent un moment magnétique de spin. C'est le cas de l'atome d'hydrogène que l'on retrouve en grande quantité dans les molécules qui composent les tissus biologiques comme l'eau et les molécules organiques.

En IRM, on place les atomes que l'on veut étudier dans un champ magnétique constant. On peut alors imaginer les spins des noyaux atomiques comme des toupies tournant sur elles-mêmes autour de leur axe et effectuant un mouvement rapide de précession autour de l'axe du champ magnétique (mouvement appelé précession de Larmor). Cette fréquence de précession est exactement proportionnelle à l'intensité du champ magnétique (qui est de quelques teslas pour les appareils d'IRM actuels). On applique alors à ces atomes une onde électromagnétique à une fréquence bien particulière dite fréquence de résonance ou fréquence de Larmor. En effet, pour que le champ oscillant de l'onde électromagnétique puisse avoir un effet notable sur les spins, il faut que sa fréquence soit ajustée au mouvement de précession de ces spins (phénomène de résonance). La fréquence de Larmor étant différente pour des isotopes atomiques différents, un choix judicieux de cette fréquence permet de cibler quels atomes on va détecter. En IRM, on utilise principalement les atomes d'hydrogène dont la fréquence de résonance est autour de 42 MHz/T, 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 et 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 on note l'aimantation

longitudinale résultant de l'addition de tous ces moments magnétiques,  $M$ . En fait, seule une très faible proportion (environ 0,001 %) des moments magnétiques nucléaires s'aligne dans la direction  $z$ , car la très grande majorité ne possède pas une orientation stable en raison de l'agitation thermique. Néanmoins, cette petite proportion de spins qui s'aligne est suffisante pour être détectée. C'est pourquoi on néglige les moments magnétiques des 99,999 % restant qui statistiquement se compensent les uns les autres.

Lorsqu'on applique l'onde magnétique radiofréquence oscillante à la fréquence de Larmor, on va entraîner les moments magnétiques qui s'écartent progressivement de l'axe  $z$  pour aller se placer perpendiculairement à leur axe de départ, tandis que 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 ; donc plus l'aimantation longitudinale (dans la direction  $z$ ) diminuera.

Lorsqu'on interrompt le champ oscillant, les moments magnétiques qui se seront 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 RMN et en IRM au moyen d'une antenne réceptrice.

#### 1.4.3. Relaxation longitudinale (T1)

Au fur et à mesure que les moments magnétiques retrouvent la direction qu'ils avaient initialement, le signal oscillant qu'ils émettent va en diminuant, jusqu'à disparaître quand tous les moments magnétiques sont de nouveau alignés longitudinalement.

Le temps que mettent les moments magnétiques nucléaires à retrouver leur alignement longitudinal est baptisé temps de relaxation longitudinal et est noté T1. Ce phénomène de relaxation (de retour à l'équilibre) suit une dynamique exponentielle. Il faudrait 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 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 (liquide céphalo-rachidien par exemple), la repousse est aussi lente. En revanche, 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 d'une seconde pour un champ de 3 teslas.

#### 1.4.4. Relaxation transversale (T2)

Alors qu'en théorie les moments magnétiques devraient tous tourner de façon cohérente autour de l'axe longitudinal, 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 transversale noté 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 au champ longitudinal (B), où ils ont été amenés par l'onde excitatrice oscillante.

#### 1.4.5. Encodage spatial grâce aux gradients

La localisation spatiale des atomes est obtenue en ajoutant un gradient directionnel sur le champ magnétique de base 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.

### 1.4.6. 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'hydrogènes 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 marquées si le temps d'écho est long.

#### *1.4.6.1. Pondération T1*

Les paramètres de la pondération : temps d'écho : TE = 10 à 20 ms ; temps de répétition : TR = 400 à 600 ms.

En utilisant un temps de répétition court et un temps d'écho court (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. Ces séquences sont également utilisées après injection de produit de contraste, pour caractériser une anomalie.

#### 1.4.6.2. 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 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.

#### 1.4.6.3. 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 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 faible densité protonique, comme les ménisques, sont en hyposignal par rapport aux liquides libres témoins d'une pathologie articulaire sous-jacente.

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).

### 1.4.7. Séquences

#### 1.4.7.1. Écho de spin ou séquence spin écho

- Séquence SE classique

La séquence IRM la plus classique est la séquence écho de spin. Cette séquence permet les pondérations T1, T2 et de densité protonique.

- Séquence TSE/FSE rapide (TSE : Turbo Spin Echo ; FSE : 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.

#### 1.4.7.2. *Inversion-récupération*

Pour une valeur donnée d'un paramètre appelé temps d'inversion, la séquence d'inversion-récupération permet de supprimer le signal de l'eau (séquence FLAIR), de la graisse (STIR) ou du silicone. Dans cette séquence, les images obtenues sont très bien pondérées en T1 (bonne différenciation substance blanche/substance grise) et d'excellente qualité.

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

Cette séquence permet une suppression du signal de la graisse. Le STIR est particulièrement adapté à l'étude de l'appareil locomoteur, pour mettre en évidence une infiltration métastatique ou un œdème médullaire par exemple.

#### 1.4.7.4. *Séquence Fluid Attenuated Inversion Recovery (FLAIR ou FLAIR 2)*

Il s'agit d'une séquence en inversion-récupération pondérée en T2 sur laquelle on a supprimé le signal de l'eau libre, qui apparaît alors en hyposignal, en adaptant le temps d'inversion. C'est une séquence bien adaptée à l'imagerie cérébrale, les lésions de la substance blanche apparaissant hyperintenses et particulièrement bien mises en évidence.

#### 1.4.7.5. *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 se faire, les mesures de la diffusion sont effectuées sur un plus ou moins grand nombre de directions 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.

#### 1.4.7.6. *Séquence saturation des graisses*

Cette séquence également appelée Fat Sat est une technique permettant de supprimer le signal de la graisse. 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.

## Chapitre 2 – Étude des épiphyses de l'extrémité distale du tibia et du calcaneum

### 2.1. Âges de fusion de l'épiphyse distale du tibia et de celle du calcaneum – revue de la littérature

#### 2.1.1. Fusion de l'épiphyse distale du tibia

De nombreuses données sont disponibles sur l'âge de fusion de l'extrémité distale du **tibia**. Les résultats des principales études sont résumés dans le tableau II-3.

Les **os secs** ont été examinés à l'œil nu (McKern, 1957 ; Cardoso, 2008) ou par l'intermédiaire de radiographies (Ogden, 1983). La fusion débutait entre 12 et 14 ans chez les femmes et entre 14 et 18 ans chez les hommes (Cardoso, 2008 ; Ogden, 1983). La fusion était complète entre 14 et 17 ans chez les femmes et entre 18 et 20 chez les hommes (Stevenson, 1924 ; McKern, 1957 ; Cardoso, 2008 ; Ogden, 1983).

Certains auteurs ont analysé des **radiographies** d'individus vivants et ont observé que la fusion débutait entre 11 (Crowder, 2005) et 13 (Flecker, 1932) ans pour les femmes et entre 12 (Crowder, 2005) et 15 (Flecker, 1932) ans pour les hommes, et que la fusion complète survenait dans une fourchette d'âge comprise entre 14 et 18 ans chez les femmes et entre 17 et 19 ans chez les hommes (Crowder, 2005 ; Flecker, 1932 ; Banerjee, 1998 ; Bokariya, 2010 ; Patond, 2012 ; Davies, 1927).

Dans d'autres manuels d'anthropologie (Bass, 2005 ; Scheuer, 2000), la fusion était terminée entre 14 et 17 ans chez les femmes et entre 15 et 20 ans chez les hommes.

L'étude de sujets d'origine indienne a montré une fusion plus précoce d'un à deux ans par rapport à des individus originaires de pays occidentaux (Banerjee, 1998 ; Bokariya, 2010 ; Patond, 2012).

**Tableau II-3** – Âges de début de fusion et de fusion complète de l'épiphyse distale du tibia d'après les principales études publiées.

Revue de la littérature			Epiphyse distale du tibia			
			Age le plus précoce de début de fusion		Age de fusion complète	
Auteurs	Technique	Année	Femmes	Hommes	Femmes	Hommes
McKern	Os secs	1957	-	19	-	20
Scheuer	Os secs	2000	12	14	14-16	15-18
Bass	Os secs	2005	11-13	14-16	17	20
Cardoso	Os secs	2008	13	14	17	19
Davies	Radiographies	1927	-	-	17-18	
Flecker	Radiographies	1932	13	15	14-16	17-19
Hoerr	Radiographies	1962	10-11	13-14	14,4	16,4
Ogden	Radiographies	1983	12-14	15-18	14	18
Banerjee	Radiographies	1998	-	-	16-17	17-18
Crowder	Radiographies	2005	11	12	16	19

### 2.1.2. Fusion de l'épiphyse du calcaneum

Il y a peu de données sur l'ossification de l'épiphyse **calcanéale**. Une explication possible est que la fusion est plus difficile à observer sur une radiographie que celle de l'extrémité d'un os long. La fusion débute dans la région du tubercule latéral et la dernière zone à fusionner est la partie supérieure (Scheuer, 2005).

Flecker a observé le début de la fusion à partir de l'âge de 12 ans chez les filles et 15 ans chez les garçons, et une fusion complète à 14 ans chez les filles et 16 ans chez les garçons (Flecker, 1932). Ferembach a décrit l'âge de fusion de l'épiphyse calcanéale entre 16 et 19 ans quelque soit le sexe (Ferembach, 1979). Scheuer et al. estimaient que la fusion débute entre 12 et 15 ans et qu'elle est complète à l'âge de 15-16 ans chez les filles et 18-20 ans chez les garçons (Scheuer, 2005).

### 2.1.3. Atlas de Hoerr et Pyle

En 1962, Hoerr et Pyle ont constitué un atlas du développement du pied et de la cheville à partir de l'analyse 4500 radiographies de jeunes Américains, avec les mêmes méthodologie et population que les atlas de la main/poignet de Greulich et Pyle (Greulich, 1959) et du genou de Pyle et Hoerr (Pyle, 1955). Ils ont constaté que les âges

de fusion complète pour l'ensemble des os du pied et de la cheville étaient de 15,2 ans chez les femmes et de 18 ans chez les hommes (Hoerr, 1962). La fusion complète du calcaneum était observée entre 17,5 et 18 ans pour les hommes et entre 15 et 15,2 ans chez les femmes, celle de l'extrémité distale du tibia l'était entre 16 et 17,5 ans chez les hommes et entre 13,2 et 15 ans chez les femmes.

Hackman et al. ont testé 403 radiographies d'individus écossais contemporains en utilisant cet atlas (Hackman, 2013c). Les résultats montraient une forte corrélation entre l'âge osseux et l'âge chronologique, l'âge osseux évalué à partir de l'atlas ayant tendance à sous-estimer l'âge réel de l'individu pour les deux sexes.

#### 2.1.4. Limites des études

La comparaison entre les différentes études se heurte à plusieurs difficultés :

- Les classifications utilisées par les auteurs pour étudier la fusion métaphyso-épiphysaire sont rarement les mêmes.
- Il n'est pas certain que les résultats de travaux datant de la première moitié du XXème siècle (Stevenson, 1924 ; Davies, 1927 ; Flecker, 1932) soient reproductibles sur un échantillon contemporain.
- Certains auteurs n'ont pas distingué hommes et femmes dans leur échantillon (Stevenson, 1924 ; Davies, 1927).
- Certains auteurs n'ont étudié qu'un seul sexe : l'échantillon de McKern et Stewart était constitué de squelettes de soldats américains morts pendant la guerre de Corée du Nord (McKern, 1957), celui de plusieurs études indiennes ne comprenait que des femmes (Bokariya, 2010 ; Patond, 2012).
- La limite supérieure des échantillons de Crowder (pour les femmes) et de McKern et Stewart était 17 ans (Crowder, 2005 ; McKern, 1957), avec un risque d'erreur de la détermination de l'âge de fusion complète par troncature, tandis qu'une limite inférieure d'âge à 14 ans augmentait le risque de ne pas observer une fusion partielle débutant chez des individus plus jeunes (Banerjee, 1998).
- Par ailleurs, l'interprétation du terme « fusion complète » n'est pas le même pour tous les auteurs. Certains donnent l'âge moyen de fusion complète des individus de leur échantillon, d'autres l'âge auquel 50 % ou 100 % des sujets ont fusionné (Cardoso, 2008).

- Il n'est pas possible de comparer les résultats obtenus après observation d'os secs et ceux obtenus par analyse de radiographies. De manière similaire à ce qui était observé dans les études sur l'extrémité médiale de la clavicule, la fusion complète de l'épiphyse distale du tibia semble plus précoce dans les études radiographiques que dans celles sur os secs. A l'inverse, la persistance d'une cicatrice épiphysaire visible sur la radiographie pourrait être interprétée comme étant un signe de fusion non complète, erreur qui ne surviendrait pas lors de l'examen direct de l'os.

Les fourchettes d'âges annoncées par les auteurs ne peuvent donc pas être comparées entre elles. Il n'est pas possible, à l'issue de cette revue de la littérature, de déterminer un âge moyen de fusion complète des épiphyses distale du tibia et du calcaneum pour chaque sexe.

#### 2.1.5. Intérêt de l'étude de l'extrémité distale du tibia et du calcaneum par IRM

A partir des résultats présentés dans le tableau II-3, l'intérêt de l'étude du tibia et du calcaneum dans la détermination de l'âge à des fins juridiques est manifeste pour les seuils des 13 et 16 ans. S'il semble que la fusion métaphyso-épiphysaire soit complète au maximum à 17 ans chez les femmes, il est possible que l'étude du tibia ait également un intérêt pour le seuil des 18 ans chez les hommes. Suivant les sources bibliographiques, l'âge de 18 ans est inclus dans la fourchette d'âge de fusion métaphyso-épiphysaire du calcaneum. L'étude de ces épiphyses a donc sa place dans l'observation de la maturation osseuse.

Jusqu'à maintenant, les techniques utilisées pour étudier la fusion métaphyso-épiphysaire des os du pied et de la cheville étaient l'examen direct d'os secs et l'analyse de radiographies. Une revue de la littérature n'a pas permis de retrouver d'études à partir de scanner, d'échographie ou d'IRM. Outre l'absence d'irradiation, l'IRM a l'avantage d'être une technique pour laquelle l'interprétation des images obtenues est relativement accessible pour un médecin non-radiologue de formation, ce qui n'est pas le cas de l'échographie. Les travaux déjà effectués sur le poignet, la clavicule et le genou ont montré qu'il s'agissait d'une technique d'imagerie permettant d'obtenir des résultats précis, à partir de classifications déjà utilisées pour d'autres techniques d'imagerie, dans la détermination de l'âge à des fins juridiques.

Bien que moins explorée que le crâne, le rachis ou le genou, la cheville est une zone anatomique faisant fréquemment l'objet d'un examen IRM, ce qui permettait d'envisager de constituer un échantillon dont la taille serait suffisante pour permettre une analyse statistique contributive.

## **2.2. Objectifs**

Les objectifs de cette étude étaient :

- 1) de développer une stadification adaptée à l'IRM du degré de fusion métaphyso-épiphysaire commune à l'extrémité distale du tibia et au calcaneum et d'en tester la répétabilité, la reproductibilité, et la facilité d'apprentissage,
- 2) de déterminer si l'étude conjointe de la maturation osseuse de ces deux os visible sur des images d'IRM était adaptée à l'estimation de l'âge à des fins juridiques, c'est-à-dire si la maturation osseuse des zones choisies était corrélée à l'âge réel des individus étudiés.

## **2.3. Matériel et méthodes**

### 2.3.1. Matériel

Nous avons analysé rétrospectivement des examens IRM de cheville/pied de patients âgés de 8 à 25 ans, en interrogeant les bases de données des Services de Radiologie de deux Centres Hospitaliers Universitaires (CHU) français, à Toulouse et à Tours. Ces patients ont bénéficié d'une exploration entre le 1<sup>er</sup> janvier 2007 et le 15 juillet 2012 et leur examen était enregistré dans le système d'archivage sous forme d'un PACS - Picture Archiving and Communication System (McKesson Medical Imaging Group, Richmond, BC, Canada) - commun aux deux CHU.

Les critères suivants ont été entrés dans le PACS pour cibler les individus à inclure : « cheville », « pied » et « membre inférieur » pour la zone anatomique ; « IRM » pour le type d'examen ; « 8-25 ans » pour l'âge.

Ont été exclus les individus qui avaient une pathologie visible du tibia et/ou du calcaneum (tumeur, traumatisme, infection, matériel d'ostéosynthèse), ceux dont l'examen présentait un flou cinétique en rapport avec un probable mouvement de

l'individu pendant l'acquisition (artefact de mouvement), ainsi que ceux pour lesquels l'IRM ne montrait pas l'extrémité distale du tibia et le calcaneum sur les mêmes images. L'origine ethnique et le niveau socio-économique sont des informations qui n'apparaissent pas dans le PACS et qui n'ont donc pas pu être notées.

La latéralité de l'examen (droit ou gauche) n'a pas non plus été prise en compte.

Les données suivantes ont été notées pour les individus inclus : le sexe, la date de naissance et la date de l'examen. Lorsque plusieurs IRM étaient disponibles pour le même individu sur la période de l'étude, seul le premier examen a été sélectionné.

La fourchette d'âge a été choisie sur la base d'une revue de la littérature sur la détermination de l'âge osseux chez le vivant, et sur la fusion des épiphyses distale du tibia et du calcaneum. Dans certaines études, les limites de la fourchette d'âge de l'échantillon avaient été choisies de manière inadaptée, ne permettant pas de conclure sur l'âge de début de fusion (limite inférieure), ou sur l'âge auquel 100 % des individus avaient une fusion complète (limite supérieure). Le choix d'une limite inférieure suffisamment basse (8 ans), âge auquel il est probable que la fusion n'ait pas commencé, et d'une limite supérieure suffisamment haute (25 ans), âge auquel il est probable que la fusion soit achevée, permettait d'éviter par la suite ces difficultés d'interprétation des résultats.

### 2.3.2. Caractéristiques techniques des IRM

Toutes les acquisitions ont été effectuées avec une IRM de champ 1,5 tesla (Intera, Philips Medical Systems, Amsterdam, Pays Bas) avec une antenne tête en émission-réception.

Dans un premier temps, tous les examens d'IRM répondant aux critères d'inclusion ont été sélectionnés. Les différentes pondérations et incidences de tous les examens ont été notées et celles communes au plus grand nombre d'examen ont été choisies.

Les paramètres d'acquisition étaient donc les suivants :

- images pondérées en T1 en écho de spin,
- coupes sagittales,
- temps de répétition (TR) compris entre 350 et 500 ms,
- temps d'écho (TE) compris entre 10 et 25 ms,
- épaisseur de coupe comprise entre 2 et 4 mm,
- temps d'acquisition : 4 min.

Les coupes coronales ont également été sélectionnées lorsqu'elles étaient disponibles pour les individus inclus.

### 2.3.3. Analyse des images

Les images obtenues ont été anonymisées en effaçant le nom du patient, son sexe et son âge et ont été évaluées séparément par deux observateurs indépendants, formés à l'analyse de la maturation osseuse sur les images d'IRM par un médecin légiste radiologue.

Les deux observateurs ont analysé l'extrémité distale du tibia et le calcaneum sur les coupes sagittales, afin de déterminer la variabilité inter-observateur, ainsi que l'extrémité distale du tibia sur les coupes coronales, lorsque celles-ci étaient disponibles, afin de s'assurer que l'incidence choisie n'avait pas d'influence sur les résultats.

Toutes les coupes sagittales ont été interprétées à nouveau par le premier observateur après un intervalle de deux semaines, afin de mesurer la variabilité intra-observateur.

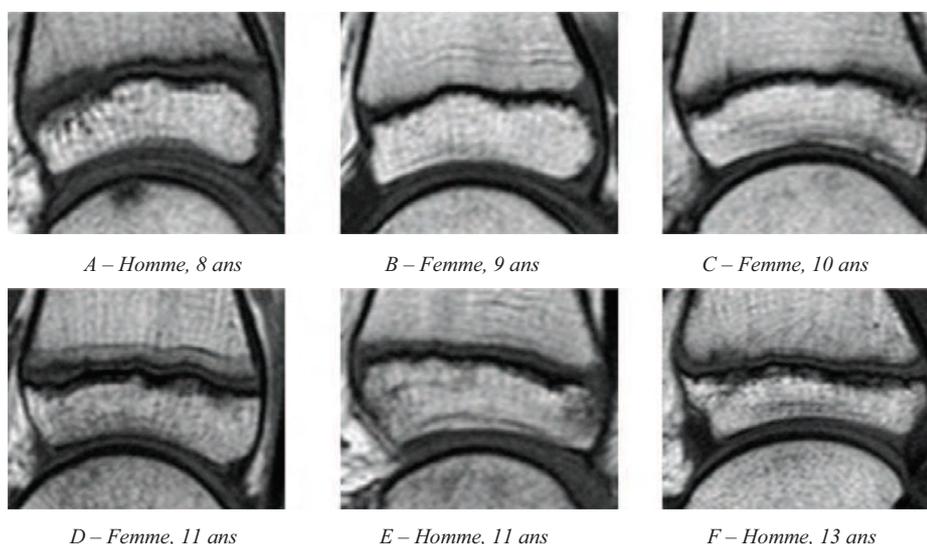
### 2.3.4 Classification par stades

Pour rappel, les structures anatomiques étudiées sont présentées sur la figure II-1.

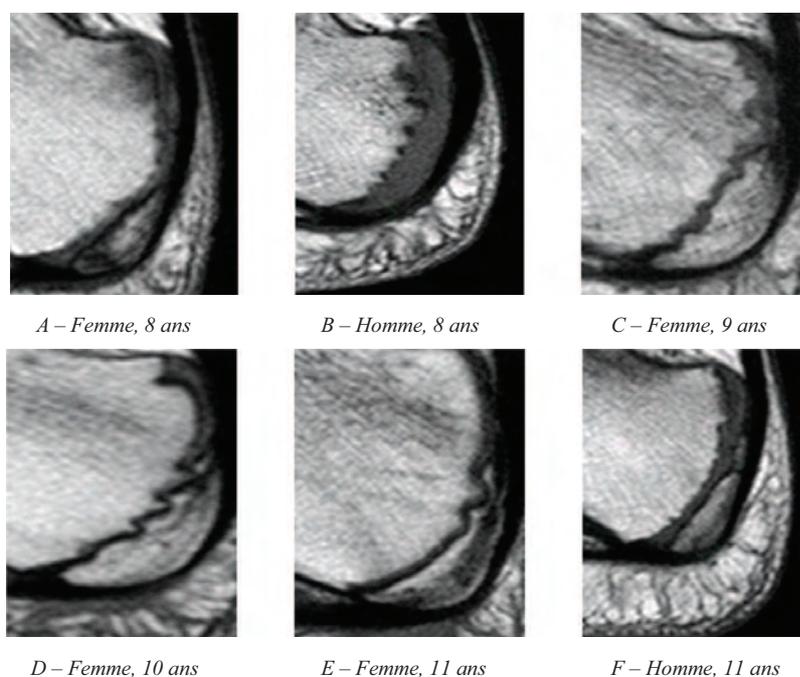


**Stade 1 : absence de fusion (Figures II-2 et II-3)**

Il y a un espace entre la métaphyse et l'épiphyse, avec une absence totale d'union sur toutes les images d'une série. Sur la partie supérieure de cet espace, il peut y avoir une bande (horizontale pour le tibia), parfois d'aspect lamellaire, dont le signal est d'intensité cartilagineuse.



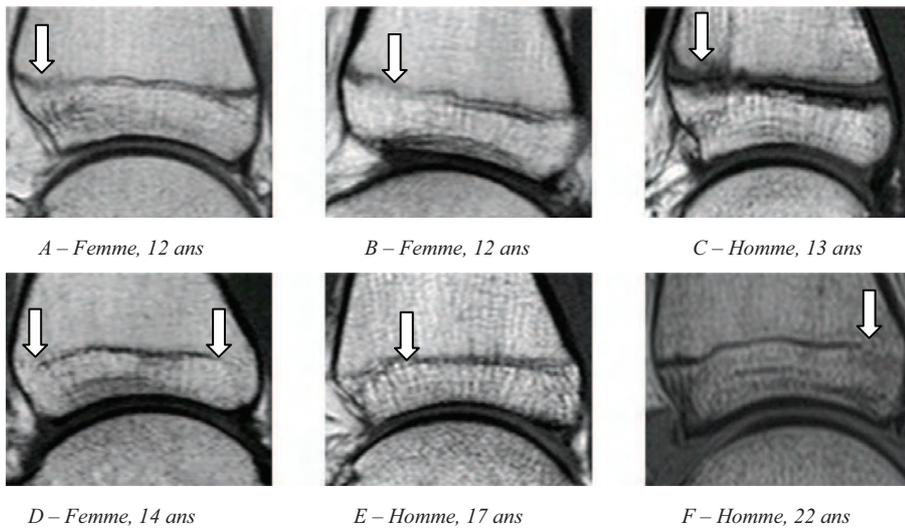
**Figure II-2** – Stade 1 de l'épiphyse distale du tibia. Aucune zone de fusion n'est visible, l'espace entre la métaphyse et l'épiphyse apparaissant à l'écran comme une bande noire. Un aspect lamellaire est visible sur les figures II-2 A, D, E et F, sous forme d'une bande gris foncé.



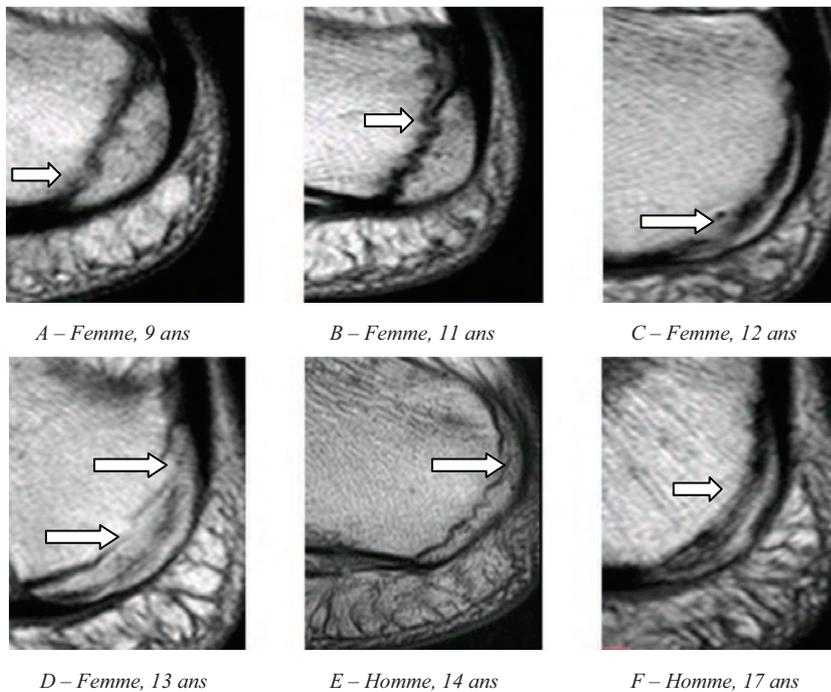
**Figure II-3** – Stade 1 de l'épiphyse du calcaneum. Un aspect lamellaire est visible sur les figures II-3A, C, E, F.

**Stade 2 : fusion partielle (Figures II-4 et II-5)**

L'espace entre la métaphyse et l'épiphyse n'est pas continu. Sur au moins une image de la série, il y a une zone de fusion visible sous la forme d'un aspect flou d'union entre la métaphyse et l'épiphyse. Ce stade regroupe tous les stades de fusion partielle : l'union peut être au stade débutant, observée sur une seule image de la série et localisée à une zone minimale, ou plus étendue, atteignant la quasi-totalité de la surface épiphysaire. Une ou des zones de non-fusion persistent, l'épiphyse et la métaphyse étant totalement séparées sur au moins une image de la série.



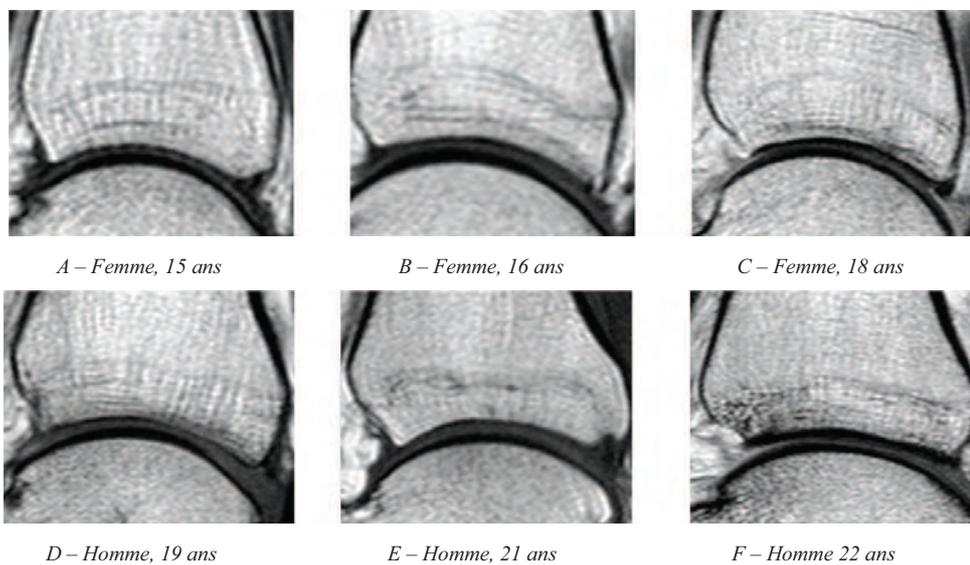
**Figure II-4** – Stade 2 de l'épiphyse distale du tibia. Zones plus ou moins étendues de fusion (flèches blanches).



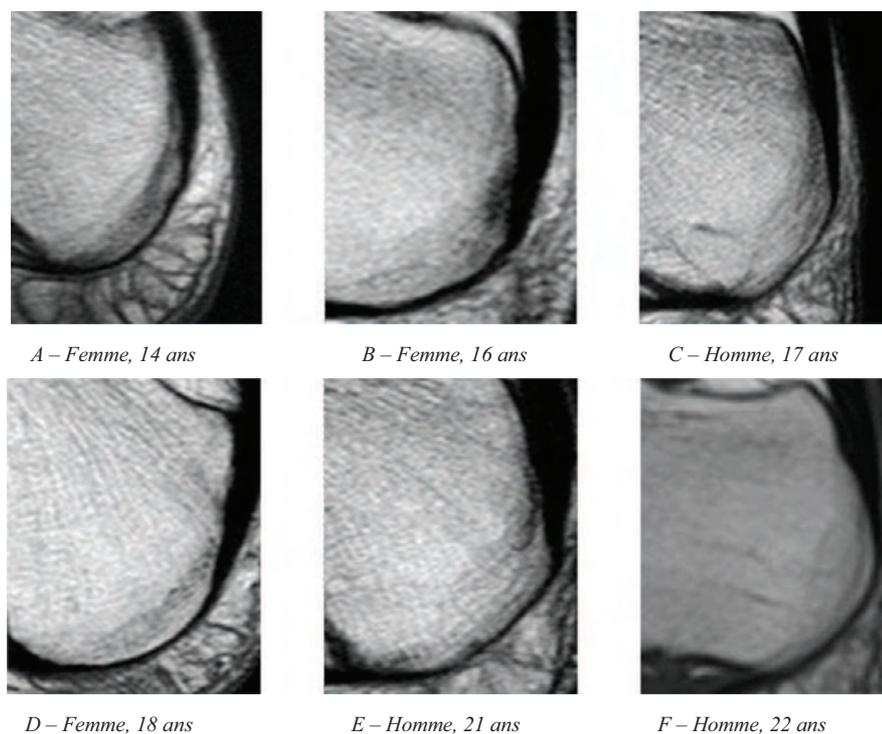
**Figure II-5** – Stade 2 de l'épiphyse du calcaneum. Zones plus ou moins étendues de fusion (flèches blanches).

**Stade 3 : fusion complète (Figures II-6 et II-7)**

L'épiphyse et la métaphyse sont unies sur toutes les images de la série. Une fine ligne horizontale est parfois visible, correspondant à une cicatrice épiphysaire.



**Figure II-6** – Stade 3 de l'épiphyse distale du tibia.



**Figure II-7** – Stade 3 de l'épiphyse du calcaneum.

### 2.3.5. Analyse statistique

L'analyse statistique a été effectuée à l'aide du logiciel R 2.15 (R Development Core Team, 2008).

Une première analyse a été effectuée afin de calculer les variabilités inter- et intra-observateurs, ainsi que la corrélation entre les résultats de l'interprétation des coupes sagittales et celle des coupes coronales, en utilisant le test non paramétrique Kappa de Cohen (Cohen, 1960 ; Ferrante, 2009).

Une deuxième analyse a été utilisée pour décrire pour chaque sexe et chaque épiphyse, les moyennes, les âges minimum et maximum et les déviations standards (DS) pour les stades 1, 2 et 3.

Une analyse transitionnelle a ensuite été faite pour déterminer l'âge moyen de passage du stade 1 au stade 2, et du stade 2 au stade 3, pour chaque os et par sexe. Il s'agit d'une méthode paramétrique pour modéliser le passage d'un individu d'un stade de développement donné ( $n$ ) au stade de développement plus important ( $n+1$ ) dans une séquence croissante de stades ou de grades (Hoppa, 2002).

Enfin, des probabilités Bayésiennes (Hartigan, 1983 ; Tersigni-Tarrant, 2012) ont été calculées pour déterminer la probabilité conditionnelle qu'un individu soit correctement classé dans une des deux catégories suivantes : âgé de moins de 18 ans/âgé de 18 ans ou plus, à partir d'un score composite associant le stade déterminé pour le tibia et celui du calcaneum.

## **2.4. Résultats**

### 2.4.1. Répartition de l'échantillon par âge et par sexe

180 IRM de patients âgés de 8 à 25 ans ont été incluses. L'échantillon était composé de 80 individus de sexe masculin (hommes) et de 100 de sexe féminin (femmes). La répartition des individus par âge et par sexe est présentée dans le tableau II-4. L'âge moyen de l'échantillon était de 17,01 ans et l'âge médian était de 18 ans.

**Tableau II-4.** *Nombre d'individus par âge et par sexe*

Age (ans)	Hommes	Femmes
8	2	3
9	1	7
10	2	9
11	3	6
12	4	8
13	4	3
14	3	4
15	3	5
16	4	8
17	6	3
18	3	9
19	8	5
20	8	5
21	7	9
22	9	3
23	4	8
24	5	2
25	4	3
<b>Total</b>	<b>80</b>	<b>100</b>

#### 2.4.2. Variabilités inter- et intra-observateurs

Les variabilités inter-observateur ( $K=0,84$  pour l'extrémité distale du tibia ;  $K=0,90$  pour le calcaneum) et intra-observateur ( $K=0,97$  pour le tibia et le calcaneum) étaient excellentes. Les résultats sont présentés dans le tableau II-5.

**Tableau II-5 - Variabilités inter- et intra-observateurs exprimées par le calcul du coefficient Kappa de Cohen.**

Epiphyse	Variabilité inter-observateur		Variabilité intra-observateur	
		IC 95 %*		IC 95 %*
Tibia distal	<b>0,84</b>	0,77-0,91	<b>0,97</b>	0,92-0,99
Calcaneum	<b>0,90</b>	0,83-0,95	<b>0,97</b>	0,93-1

\*IC 95 % : intervalle de confiance à 95 %

Les coupes coronales étaient disponibles pour 42 des 180 individus inclus. Le test Kappa de Cohen entre les deux incidences était de 0,86, avec un intervalle de confiance à 95 % de 0,60-0,92.

### 2.4.3. Répartition des âges pour les stades 1, 2 et 3, par sexe et par os

#### - Épiphyse distale du tibia.

Les résultats sont présentés par sexe sous forme de boîtes à moustache de Tuckey dans la figure II-8.

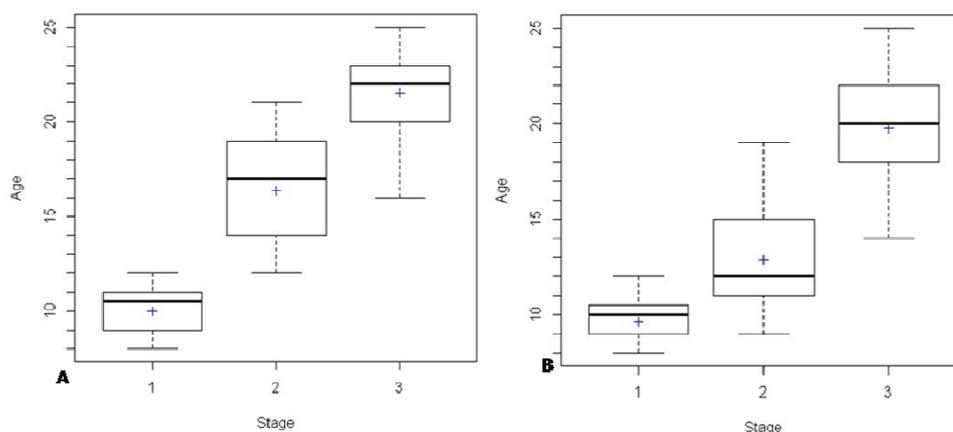
- Chez les hommes (Figure II-8A), l'âge moyen était :
  - 10,2 ans pour le stade 1
  - 16,5 ans pour le stade 2
  - 21,6 ans pour le stade 3

L'âge le plus élevé pour le stade 1 était de **12** ans. Le stade 2 apparaissait au plus tôt à **12** ans, et au plus tard à **21** ans. La fusion complète (stade 3) était observée au plus tôt à **16** ans.

- Chez les femmes (Figure II-8B), l'âge moyen était :
  - 9,7 ans pour le stade 1
  - 13 ans pour le stade 2
  - 20 ans pour le stade 3

L'âge le plus élevé pour le stade 1 était de **12** ans. Le stade 2 apparaissait au plus tôt à **9** ans, et au plus tard à **19** ans. La fusion complète (stade 3) était observée au plus tôt à **14** ans.

Pour les deux sexes, l'âge minimum du stade 1 (8 ans) et l'âge maximum du stade 3 (25 ans) correspondaient aux âges minimum et maximum de l'échantillon.



**Figures II-8 – Épiphyse distale du tibia.** Boîtes à moustache de Tuckey de la répartition des âges pour les stades 1, 2 et 3 chez les hommes (A) et les femmes (B). Les bordures supérieure et inférieure 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 %).

### - Calcaneum

Les résultats sont présentés par sexe sous forme de boîtes à moustache de Tuckey dans la figure II-9.

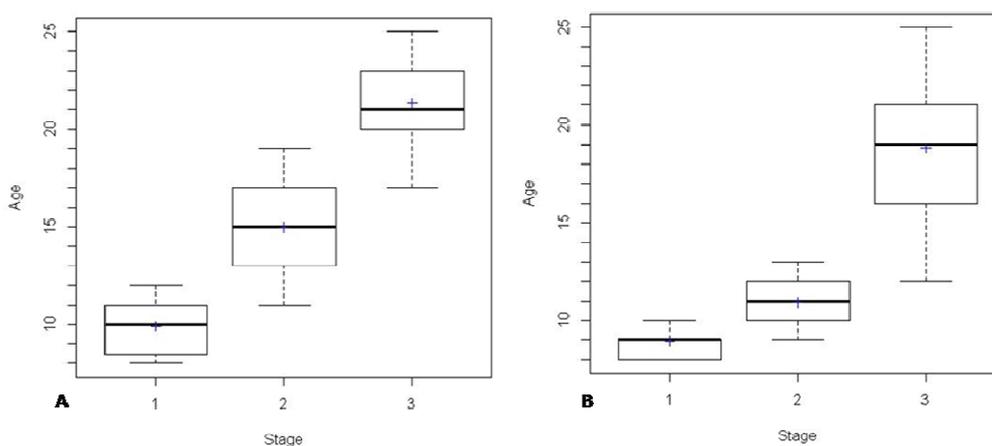
- Chez les hommes (figure II-9A), l'âge moyen était :
  - 9,9 ans pour le stade 1
  - 15 ans pour le stade 2
  - 21,3 ans pour le stade 3

L'âge le plus élevé pour le stade 1 était de **12** ans. Le stade 2 apparaissait au plus tôt à **11** ans, et au plus tard à **19** ans. La fusion complète (stade 3) était observée au plus tôt à **17** ans.

- Chez les femmes (figure II-9B), l'âge moyen était :
  - 8,9 ans pour le stade 1
  - 10,9 ans pour le stade 2
  - 18,8 ans pour le stade 3

L'âge le plus élevé pour le stade 1 était de **10** ans. Le stade 2 apparaissait au plus tôt à **9** ans, et au plus tard à **13** ans. La fusion complète (stade 3) était observée au plus tôt à **12** ans.

Pour les deux sexes, l'âge minimum du stade 1 (8 ans) et l'âge maximum du stade 3 (25 ans) correspondaient aux âges minimum et maximum de l'échantillon.



**Figures II-9 –Épiphyse du calcaneum.** Boîtes à moustache de Tuckey de la répartition des âges pour les stades 1, 2 et 3 chez les hommes (A) et les femmes (B). Les bordures supérieure et inférieure 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 %).

#### 2.4.4. Répartition des âges par rapport au seuil des 18 ans pour les stades 1, 2 et 3, par sexe et par os

##### - Épiphyse distale du tibia

Le tableau II-6 représente la répartition des stades 1, 2 et 3 par rapport au seuil des 18 ans pour l'épiphyse distale du tibia.

Pour les deux sexes, tous les individus classés au stade 1 étaient âgés de moins de 18 ans.

Toutes les femmes, sauf une, classées au stade 1 et 2 étaient âgées de moins de 18 ans.

Tous les hommes, sauf un, classés au stade 3 étaient âgés de 18 ans ou plus.

**Tableau II-6** – *Épiphyse distale du tibia. Distribution des stades 1, 2 et 3 pour chaque sexe, par rapport au seuil des 18 ans.*

Stades	Hommes (N)		Femmes (N)	
	< 18 ans	≥ 18 ans	< 18 ans	≥ 18 ans
1	10	0	19	0
2	21	11	25	1
3	1	37	21	43

##### - Calcaneum

Le tableau II-7 représente la répartition des stades 1, 2 et 3 par rapport au seuil des 18 ans pour le calcaneum.

Pour les deux sexes, tous les individus classés au stade 1 étaient âgés de moins de 18 ans.

Toutes les femmes classées au stade 1 et 2 étaient âgées de moins de 18 ans.

**Tableau II-7** – *Épiphyse du calcaneum. Distribution des stades 1, 2 et 3 pour chaque sexe, par rapport au seuil des 18 ans.*

Stades	Hommes (N)		Femmes (N)	
	< 18 ans	≥ 18 ans	< 18 ans	≥ 18 ans
1	8	0	10	0
2	21	4	22	0
3	3	44	24	44

2.4.5. Âges transitionnels par sexe et pour chaque épiphyse**- Épiphyse distale du tibia**

Le tableau II-8 représente les âges moyens de transition du stade 1 au stade 2, et du stade 2 au stade 3 pour l'épiphyse distale du tibia.

Pour les hommes, l'âge de transition moyen du stade 1 au stade 2 était de **11,8** ans  $\pm$  7,2 mois, et du stade 2 au stade 3 était de **19,2** ans  $\pm$  4,8 mois.

Pour les femmes, l'âge de transition moyen du stade 1 au stade 2 était de **10,6** ans  $\pm$  4,8 mois, et du stade 2 au stade 3 était de **15,4** ans  $\pm$  4,8 mois.

**Tableau II-8** – *Épiphyse distale du tibia. Age transitionnel pour chaque sexe.*

Stades	Hommes		Femmes	
	Age transitionnel moyen (ans)	DS* (ans)	Age transitionnel moyen (ans)	DS* (ans)
1 → 2	11.8	0.6	10.6	0.4
2 → 3	19.2	0.4	15.4	0.4

\*DS : déviation standard

**- Calcaneum**

Le tableau II-9 représente les âges moyens de transition du stade 1 au stade 2, et du stade 2 au stade 3 pour le calcaneum.

Pour les hommes, l'âge de transition moyen du stade 1 au stade 2 était de **11,3** ans  $\pm$  4,8 mois, et du stade 2 au stade 3 était de **17,8** ans  $\pm$  3,6 mois.

Pour les femmes, l'âge de transition moyen du stade 1 au stade 2 était de **9,4** ans  $\pm$  3,6 mois, et du stade 2 au stade 3 était de **12,6** ans  $\pm$  3,6 mois.

**Tableau II-9** – *Épiphyse du calcaneum. Age transitionnel pour chaque sexe.*

Stades	Hommes		Femmes	
	Age transitionnel moyen (ans)	DS* (ans)	Age transitionnel moyen (ans)	DS* (ans)
1 → 2	11.3	0.4	9.4	0.3
2 → 3	17.8	0.3	12.6	0.3

\*DS : déviation standard

### 2.4.6. Probabilités bayésiennes

Les probabilités conditionnelles de correctement classer un individu comme étant âgé de moins de 18 ans, ou de 18 ans et plus, ont été calculées à partir d'un score composite associant pour chaque individu de l'échantillon la classification établie sur l'épiphyse distale du tibia et sur celle du calcaneum. L'hypothèse était que la prise en compte de la stadification simultanée de deux indicateurs pour le même individu permettrait d'affiner l'estimation de l'âge.

90,6 % des hommes âgés de moins de 18 ans et 91,7 % des hommes âgés de 18 ans et plus étaient correctement évalués.

78,6 % des femmes âgées de moins de 18 ans et 97,7 % des femmes âgées de 18 ans et plus étaient correctement évaluées.

Les résultats sont présentés par sexe dans les tableaux II-10 et II-11.

**Tableau II-10** – Probabilité bayésienne qu'un homme soit correctement évalué par rapport au seuil des 18 ans à partir d'un score composite associant la stadification des épiphyses distale du tibia et du calcaneum.

Hommes		Probabilité conditionnelle				Total (n=80)
		< 18 ans		≥18 ans		
		n	%	n	%	
Age réel	< 18 ans	29	90.6	3	9.4	32
	≥18 ans	4	8.3	44	91.7	48

**Tableau II-11** – Probabilité bayésienne qu'une femme soit correctement évaluée par rapport au seuil des 18 ans à partir d'un score composite associant la stadification des épiphyses distale du tibia et du calcaneum.

Femmes		Probabilité conditionnelle				Total (n=100)
		< 18 ans		≥18 ans		
		n	%	n	%	
Age réel	< 18 ans	44	78.6	12	21.4	56
	≥18 ans	1	2.3	43	97.7	44

## **Chapitre 3 – Développement d'une technique automatisée d'estimation de l'âge**

### **3.1. Introduction**

La revue de la littérature sur la détermination de l'âge à des fins juridiques met en évidence des méthodologies similaires pour toutes les études : le choix d'une épiphyse et de la méthode de référence s'y rapportant, la sélection d'un échantillon représentatif d'une population donnée, le plus souvent rétrospectif à partir d'une base de données radiologiques, la comparaison des images par un ou deux (voire plus) observateurs avec celles de la méthode choisie, puis une analyse statistique visant à calculer si la différence entre la population de l'étude et celle de référence est significative.

Suite au travail sur les IRM d'extrémité distale du tibia et du calcaneum, nous avons pu faire le constat suivant : ces études sont toutes dépendantes de l'analyse d'un ou plusieurs observateurs, dont il est rarement précisé le niveau d'expérience et le temps d'apprentissage qui a été nécessaire pour la méthode testée. Bien que les variabilités inter- et intra-observateurs soient la plupart du temps bonnes, voire excellentes, dans les travaux évoqués dans la première partie de notre travail, il s'agit d'observateurs qui ont été spécialement préparés à travailler dans le cadre d'un projet donné et qui ont passé le temps nécessaire à comprendre la classification utilisée par les auteurs. Cela ne correspond pas à la pratique quotidienne du médecin confronté à la détermination de l'âge d'un individu, car même si certains ont une bonne expérience des méthodes les plus fréquemment utilisées, d'autres n'ont pas reçu d'entraînement spécifique et peuvent travailler au sein d'une institution moins fréquemment confrontée à cette problématique que peuvent l'être certains centres dont l'activité est plus importante.

Dans ce contexte, la question de savoir s'il est possible de réduire l'intervention de l'observateur dans l'évaluation du degré de maturation osseuse et de proposer une méthode automatisée de la détermination de l'âge nous a paru être le prolongement des travaux déjà entrepris dans ce domaine.

La première partie de l'étude, exposée au chapitre 2, a permis de constater que la région anatomique de la cheville, bien que peu exploitée dans la détermination de l'âge, présentait un intérêt dans ce champ d'étude. L'épiphyse distale du tibia a donc été choisie. Une méthode automatisée de l'analyse de la fusion métaphyso-épiphysaire a été mise en place, en se basant sur la variation des niveaux de gris au sein du cartilage de conjugaison. Auparavant, les images d'IRM ont fait l'objet d'une standardisation pour corriger les inhomogénéités d'intensité. En effet, cet artefact était susceptible d'entraîner des variations des niveaux de gris au sein d'un même tissu (ici, l'os), faussant les résultats. Enfin, nous avons vérifié l'efficacité de cette méthode, le critère principal étant sa capacité à classer correctement un individu par rapport au seuil des 18 ans, c'est-à-dire « âgé de moins de 18 ans » ou « âgé de 18 ans ou plus ».

### **3.2. Objectif**

L'objectif de cette étude était de développer une méthode originale permettant l'automatisation de l'analyse de l'épiphyse distale du tibia d'un individu, permettant le classement de celui-ci dans la catégorie d'âge correspondant à son âge réel (inférieur à 18 ans/égal ou supérieur à 18 ans).

### **3.3. Matériel et méthodes**

#### 3.3.1. Matériel

L'étude a porté sur l'analyse de l'épiphyse distale du tibia à partir d'IRM de cheville de patients âgés de 8 à 25 ans, sélectionnées dans le chapitre 2. Il s'agissait d'IRM recueillies aux CHU de Toulouse et de Tours, à partir de la base de données des PACS des deux Services de Radiologie. Les paramètres d'acquisition étaient : images pondérées en T1 en écho de spin, coupes sagittales, TR compris entre 350 et 500 ms, TE compris entre 10 et 25 ms, épaisseur de coupe comprise entre 2 et 4 mm, temps d'acquisition 4 minutes.

Afin d'avoir un nombre égal d'examen pour les deux sexes, 160 IRM (80 hommes, 80 femmes) ont été choisis sur les 180 (80 hommes, 100 femmes) incluses initialement. Les 80 femmes incluses dans cette étude ont été choisies de manière arbitraire parmi les 100

sélectionnées dans le cadre de la première étude. La répartition par âge et par sexe de l'échantillon est présentée dans le tableau II-12.

**Tableau II-12** – *Nombre d'individus par âge et par sexe.*

Age (ans)	Hommes	Femmes
8	2	2
9	1	7
10	2	7
11	3	6
12	4	6
13	4	3
14	3	2
15	3	4
16	4	4
17	6	3
18	3	5
19	8	5
20	8	5
21	7	7
22	9	3
23	4	6
24	5	2
25	4	3
<b>Total</b>	<b>80</b>	<b>80</b>

Les 160 IRM ont été séparées de manière aléatoire en deux groupes: l'échantillon de référence (120 individus : 60 hommes et 60 femmes) et l'échantillon test (40 individus : 20 hommes et 20 femmes). Le but était de vérifier si la répartition des individus de l'échantillon de référence entre deux catégories (âge inférieur à 18 ans/âge égal ou supérieur à 18 ans) était valide, en utilisant les individus de l'échantillon test.

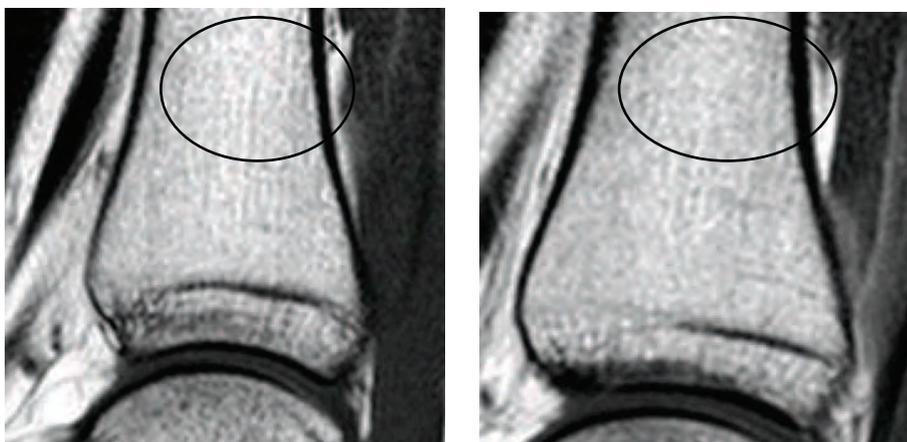
### 3.3.2. Traitement des images

La méthode automatisée étant basée sur les variations des niveaux de gris au sein de la zone de fusion métaphyso-épiphyse, un prérequis indispensable était de corriger les inhomogénéités dues aux imperfections de l'imageur (correction du champ de biais, « bias field correction » en anglais). Ces inhomogénéités d'intensité sont des variations de l'intensité observées pour un même tissu.

Cet artefact est dû principalement :

- à l'hétérogénéité du champ statique et du champ d'excitation. Les champs magnétiques produits ne peuvent en effet pas être exactement uniformes, provoquant des plages d'ombre dans l'image.
- à la qualité de l'antenne de réception, et plus particulièrement aux variations spatiales de son intensité.

Ces variations au sein d'un même tissu sont visibles à l'œil nu d'une image à l'autre sur une même série (Figure II-10) et peuvent induire des erreurs dans le traitement automatique des images.



**Figure II-10** – Femme, 15 ans. Sur ces deux images successives de la même IRM, des zones d'inhomogénéité d'intensité sont visibles pour un même tissu, sur la diaphyse tibiale (ellipse).

Chaque image des 160 IRM a été corrigée de la même manière, en utilisant un algorithme de normalisation de l'intensité, N4ITK (Tustison, 2010). Il est dérivé de N3 (nonparametric nonuniform intensity normalization), un algorithme spécialement conçu pour l'imagerie médicale (Sled, 1998) et disponible gratuitement dans le logiciel 3DSlicer<sup>®</sup> (Fedorov, 2012).

Ensuite, une zone d'intérêt a été choisie de la même manière pour chaque image (Figure II-11), en utilisant le logiciel 3DSlicer<sup>®</sup>. Cette zone était constituée de deux zones superposées ; le carré inférieur avait pour limite supérieure le milieu de la jonction métaphyso-épiphysaire, et pour limite inférieure la partie supérieure de l'articulation talocrurale. Le carré supérieur était de dimensions égales au carré inférieur. Cette sélection a été faite sur toutes les images.



**Figure II-11** –Zone d'intérêt sélectionnée pour chaque image de toutes les IRM.

### 3.3.3. Variation des niveaux de gris à la jonction métaphyso-épiphysaire

Les variations des niveaux de gris étaient visualisées en représentant la position de chaque voxel dans un graphique à trois dimensions, en utilisant un plugin du logiciel ImageJ Surfaceplot. Chaque image d'IRM a été séparée en 100 bandes horizontales. Une moyenne des niveaux de gris a été calculée pour chaque bande. Ensuite, une moyenne de toutes les bandes au même niveau de la même série d'images a été calculée. Pour mieux comprendre, on peut imaginer que chaque image d'une IRM soit séparée en 100 bandes horizontales que l'on numéroterait de 0 à 99. Une moyenne des niveaux de gris a été calculée pour la bande numéro 0, et ainsi de suite pour la bande 1, 2, 3... et chaque bande jusqu'à la bande numéro 99. Puis, une moyenne des niveaux de gris de toutes les bandes n°0 des images d'une même IRM a été calculée, et ainsi de suite pour les bandes 1, 2, 3... jusqu'à la bande numéro 99. Cela a permis d'obtenir 100 valeurs de moyennes de niveau de gris pour chaque individu, reportées sur une courbe dont l'abscisse représentait la hauteur de la région d'intérêt.

Les images ayant été standardisées au préalable, les niveaux de gris étaient relativement homogènes au niveau de l'épiphyse et de la métaphyse du tibia, mais variaient d'un individu à l'autre en fonction de l'avancée de la fusion métaphyso-épiphysaire.

### 3.3.4. Analyse statistique

L'analyse statistique a été effectuée à l'aide du logiciel R 2.15 (R Development Core Team, 2008) et FactoMineR (Exploratory Multivariate Data Analysis with R). Les niveaux de gris ont été utilisés comme variables quantitatives pour réaliser une analyse en composantes principales (ACP) sur l'échantillon de référence.

L'ACP propose, à partir d'un tableau rectangulaire de données comportant les valeurs de  $p$  variables quantitatives pour  $n$  unités (appelés aussi individus), des représentations géométriques de ces unités et de ces variables. Ces données peuvent être issues d'une procédure d'échantillonnage ou bien de l'observation d'une population toute entière. Les représentations des unités permettent de voir s'il existe une structure, non connue a priori, sur cet ensemble d'unités. De façon analogue, les représentations des variables permettent d'étudier les structures de liaisons linéaires sur l'ensemble des variables considérées. Ainsi, on cherchera si l'on peut distinguer des groupes dans l'ensemble des unités en regardant quelles sont les unités qui se ressemblent ou celles qui se distinguent des autres. Pour les variables, on cherchera quelles sont celles qui sont très corrélées entre elles, ou celles qui au contraire ne sont pas corrélées aux autres.

Ainsi, la variable qualitative « âge inférieur à 18 ans » ou « âge égal ou supérieur à 18 ans » a été choisie, permettant de visualiser l'âge réel des individus de l'échantillon de référence. Chaque individu des groupes tests a ensuite été inséré dans l'échantillon de référence, et leur âge réel a été vérifié. Le but était que la méthode basée sur les niveaux de gris ait été suffisamment discriminatoire par rapport au seuil des 18 ans pour avoir créé au sein de l'échantillon de référence deux groupes distincts et que les individus de l'échantillon test soient ensuite répartis dans le bon groupe, celui correspondant à leur âge réel.

### 3.3.5. Bootstrapping (Ré-échantillonnage)

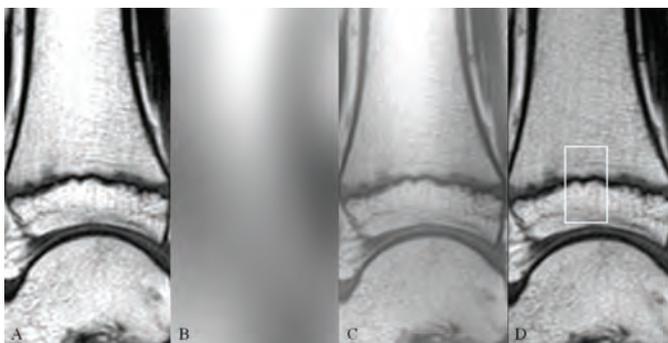
La sélection des individus composant les échantillons de référence (toujours 120 individus, 60 hommes et 60 femmes) et test (toujours 40 individus, 20 hommes et 20 femmes), et l'ACP ont été répétées de manière aléatoire 100 fois, pour obtenir une distribution statistique.

Une moyenne des évaluations correctes par rapport au seuil des 18 ans a été extraite de l'ensemble de ces données.

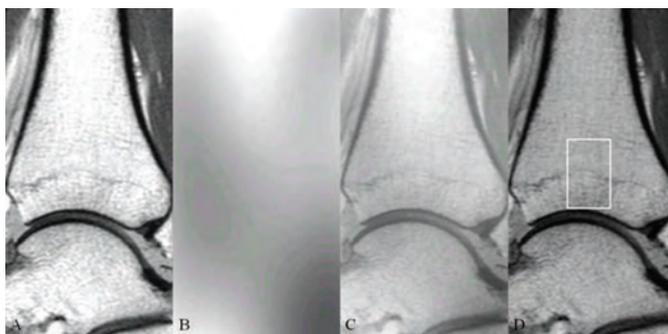
### 3.4. Résultats

#### 3.4.1. Correction des inhomogénéités et sélection d'une région d'intérêt

Les figures II-12 et II-13 illustrent le traitement des images par le filtre N4ITK. La zone d'intérêt a ensuite été sélectionnée sur ces images corrigées.



**Figure II-12** – (A-D) Traitement de l'image. Correction de l'inhomogénéité d'intensité de l'IRM d'une femme de 10 ans. A : Image originale. B : Image du filtre représentant les artefacts. Plus l'image est blanche, plus les artefacts sont importants. C : Superposition des images A et B. D : Image obtenue après correction. Sélection d'une zone d'intérêt (rectangle blanc).



**Figure II-13** – (A-D) Traitement de l'image. Correction de l'inhomogénéité d'intensité de l'IRM d'une femme de 22 ans. A : Image originale. B : Image du filtre représentant les artefacts. Plus l'image est blanche, plus les artefacts sont importants. C : Superposition des images A et B. D : Image obtenue après correction. Sélection d'une zone d'intérêt (rectangle blanc).

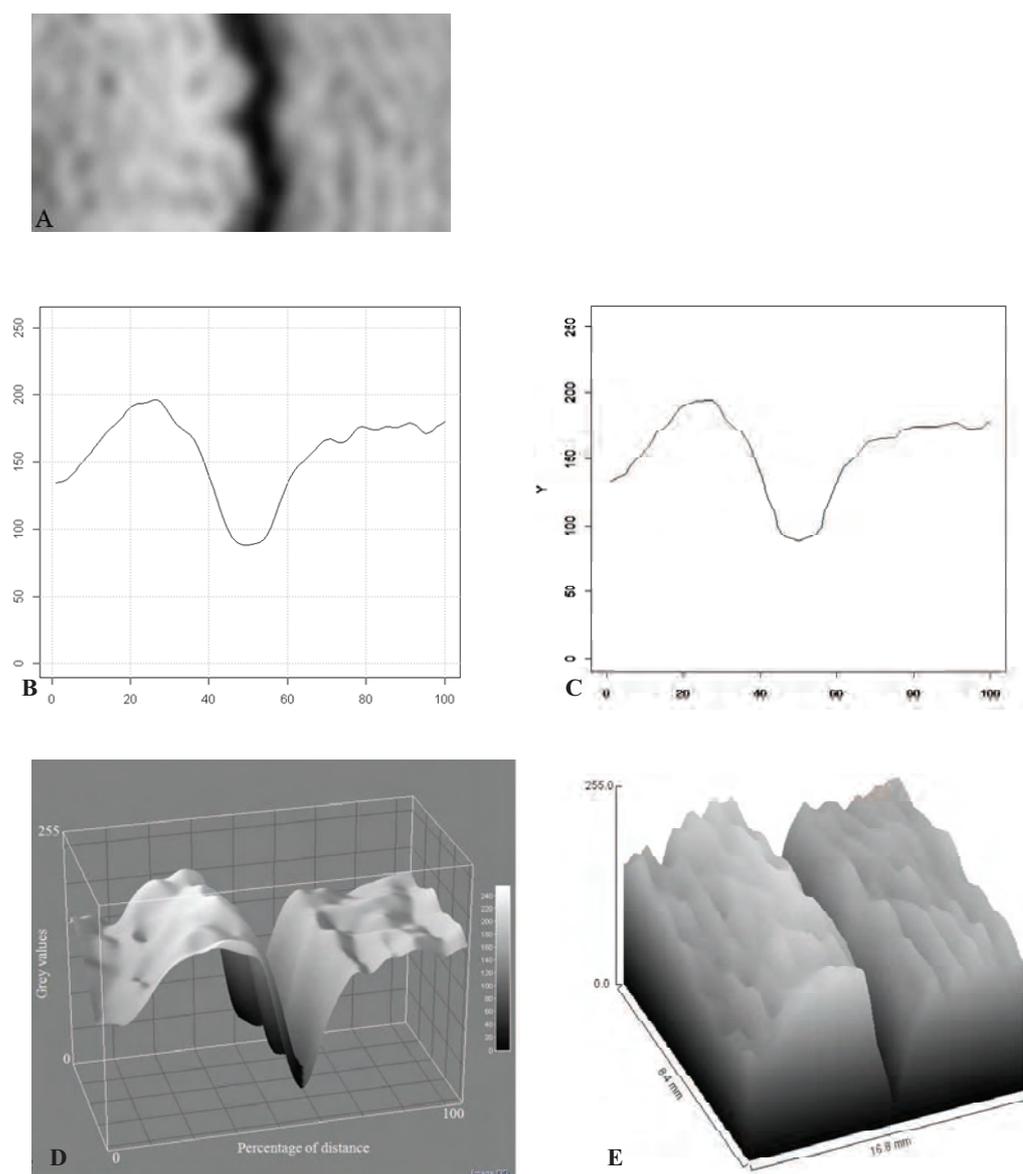
#### 3.4.2. Variations des niveaux de gris au sein de la jonction métaphyso-épiphysaire

La figure II-14 montre la zone d'intérêt, la courbe de niveau de gris pour une image, la surface 3D correspondant à cette courbe, et la courbe de niveaux de gris moyens pour toutes les images de l'IRM, chez un individu de sexe féminin âgée de 10 ans, dont la fusion n'avait pas débuté. Le cartilage de conjugaison est clairement identifiable, se traduisant sur la courbe par une diminution du niveau de gris autour de la valeur 50, c'est-à-dire à la moitié de la hauteur de la zone d'intérêt.

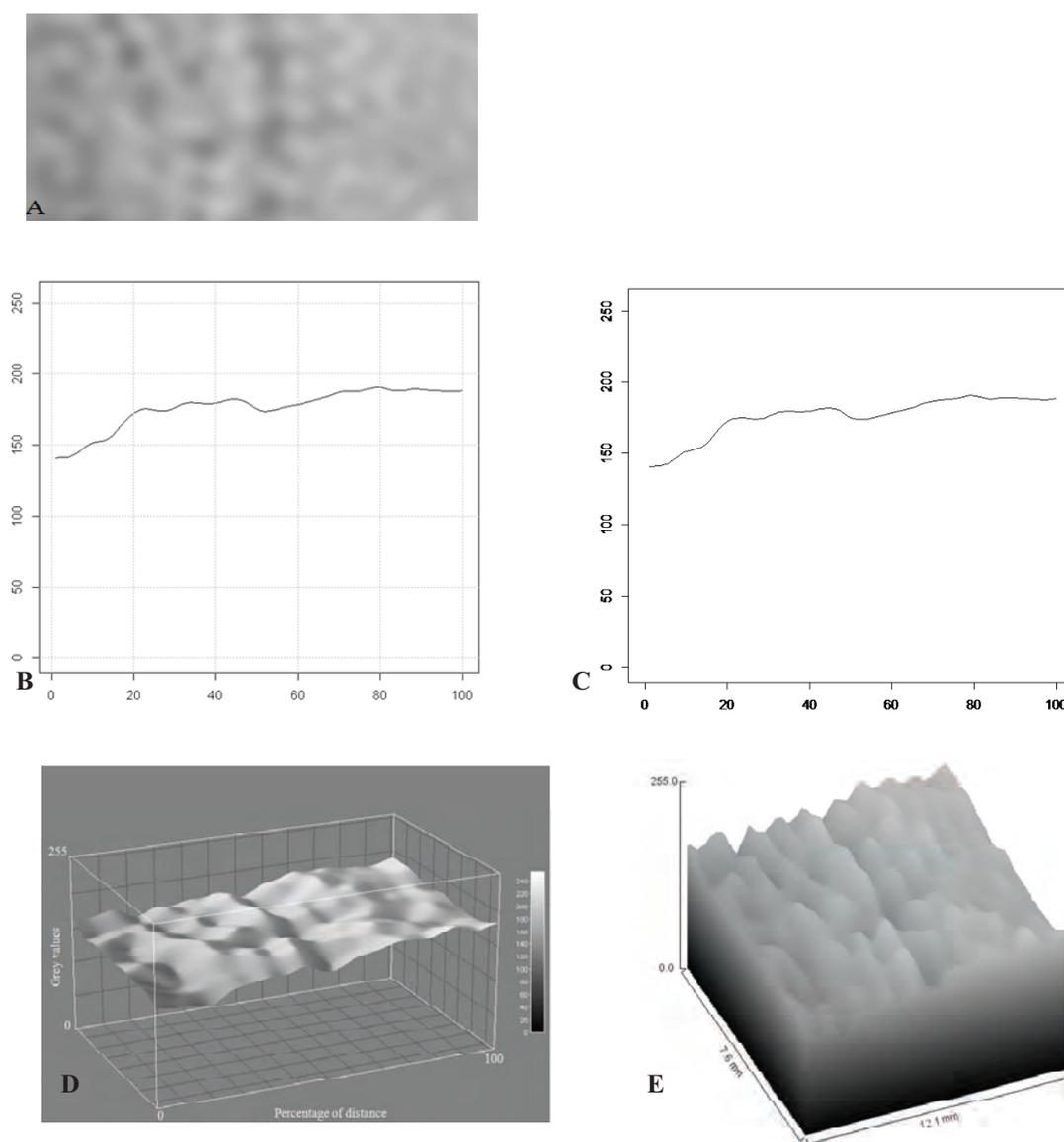
La figure II-15 correspond à une femme de 22 ans dont la fusion était complète. L'absence de cartilage de conjugaison se traduit par une relative homogénéité de la courbe, sans variation notable des niveaux de gris entre les valeurs 0 et 100.

On constate que les courbes des moyennes de niveaux de gris pour toutes les images d'une IRM (Figures II-14C et II-15C) sont quasiment identiques aux courbes des moyennes de niveaux de gris pour une seule image de l'IRM (Figures II-14B et II-15B).

Les courbes moyennes des 160 individus sont présentées par sexe et par âge dans les figures II-16 (femmes) et II-17 (hommes).



**Figure II-14** – (A-E) Représentation des variations des niveaux de gris au sein de la région d'intérêt. Femme, 10 ans. Absence de fusion métaphyso-épiphysaire. A : Zone d'intérêt. La gauche de l'image correspond à la limite inférieure de la zone d'intérêt, la droite de l'image correspond à sa limite supérieure. B : Courbe des variations de niveaux de gris d'une image. L'abscisse représente la hauteur de la zone d'intérêt : la valeur 0 correspond à la partie inférieure de la zone d'intérêt, la valeur 100 à la partie supérieure, et la valeur 50 au milieu de la jonction métaphyso-épiphysaire. C : Courbe des variations de niveaux de gris pour toutes les images de l'IRM. D-E : Surface plot : représentation en 3 dimensions des variations de niveaux de gris.



**Figure II-15** – (A-E) Représentation des variations des niveaux de gris au sein de la région d'intérêt. Femme, 22 ans. A : zone d'intérêt. La gauche de l'image correspond à la limite inférieure de la zone croquée, la droite de l'image correspond à la limite supérieure. B : Courbe des variations de niveaux de gris d'une image. L'abscisse représente la hauteur de la zone d'intérêt : la valeur 0 correspond à la partie inférieure de la zone d'intérêt, la valeur 100 à la partie supérieure, et la valeur 50 au milieu de la jonction métaphyso-épiphysaire. C : Courbe des variations de niveaux de gris pour toutes les images de l'IRM. D-E : Surface plot : représentation en 3 dimensions des variations de niveaux de gris.

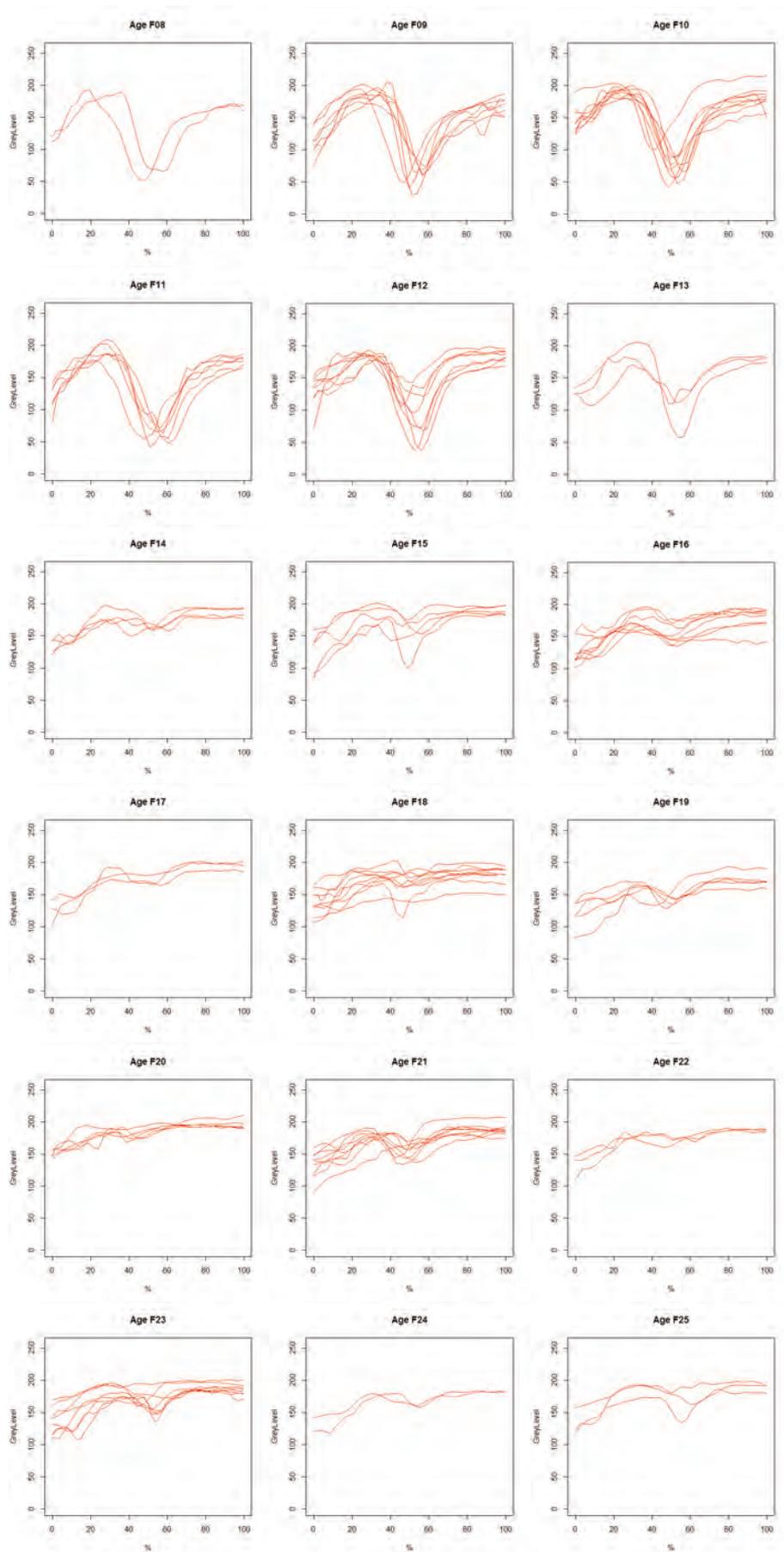


Figure II-16– Courbes moyennes des niveaux de gris des 80 femmes (F) de l'échantillon, par âge.

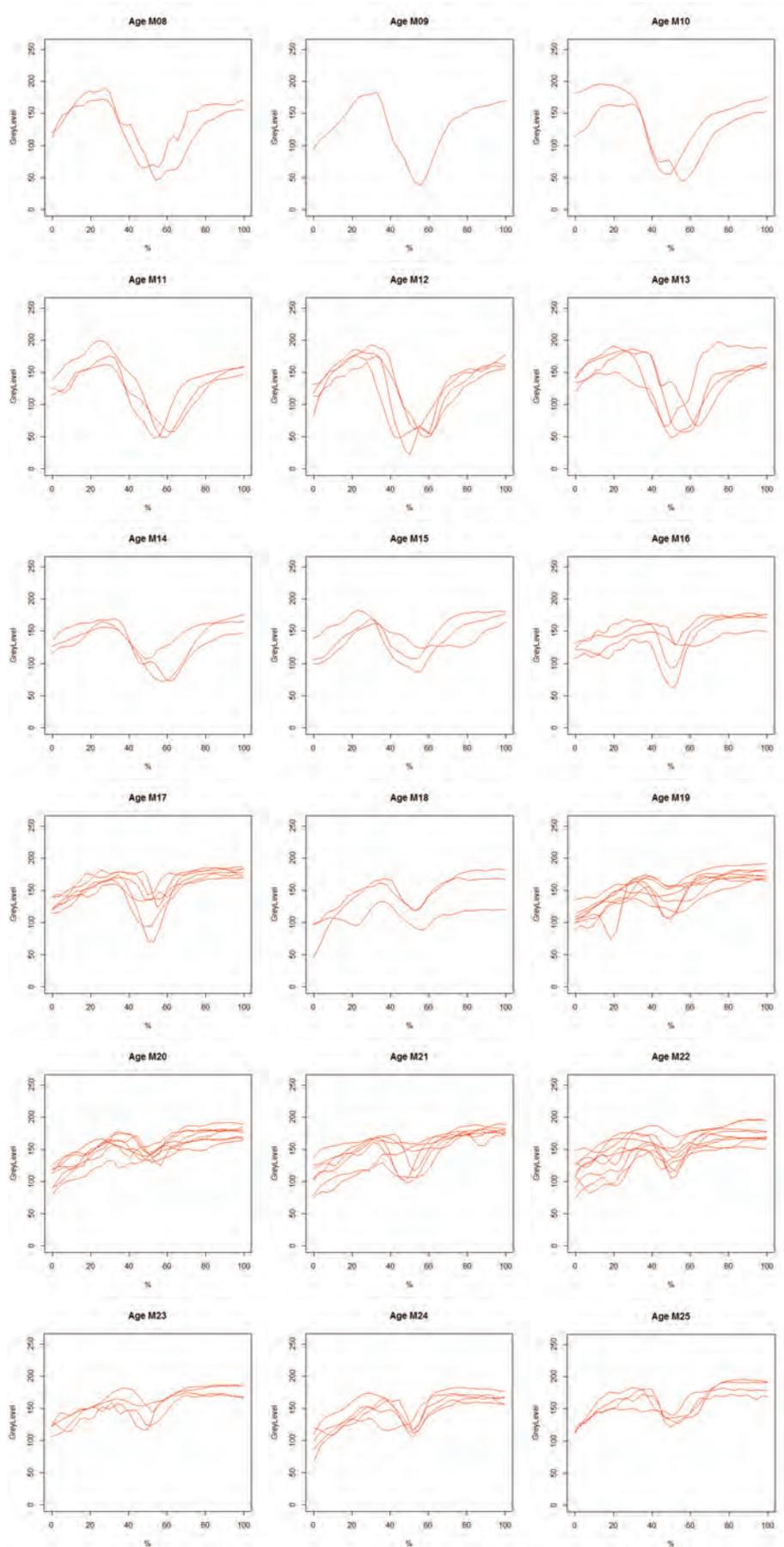
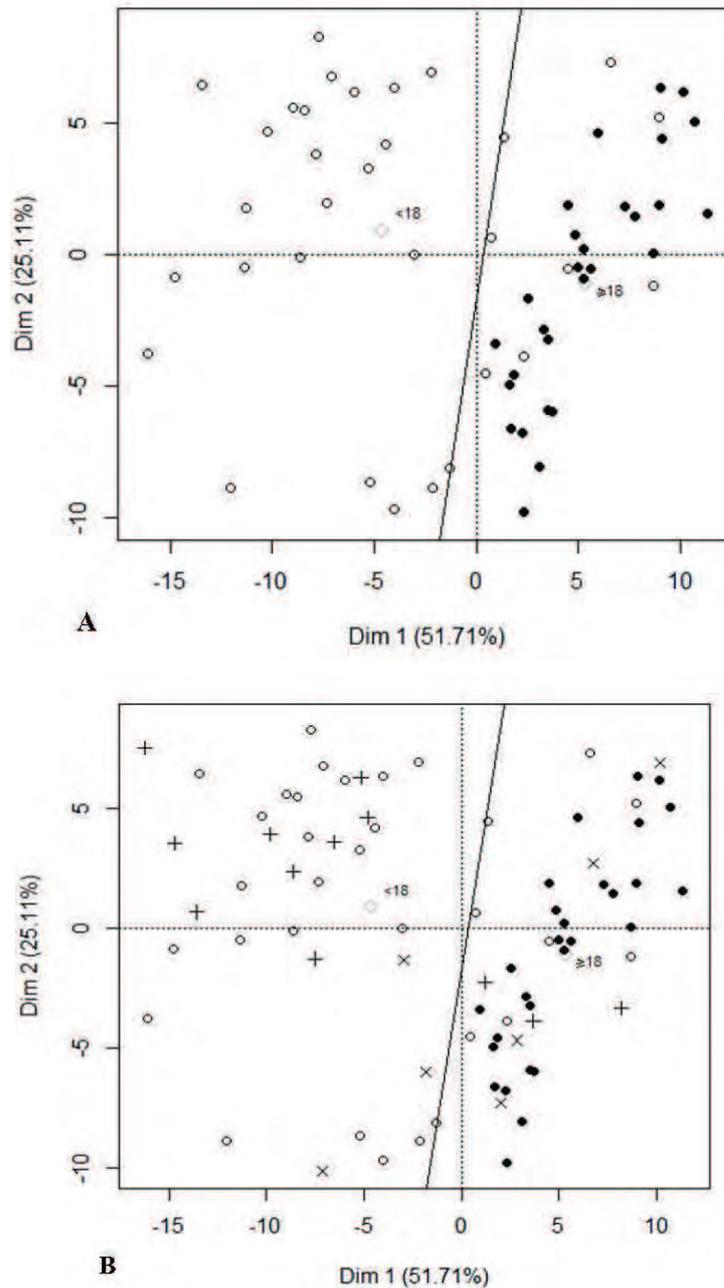


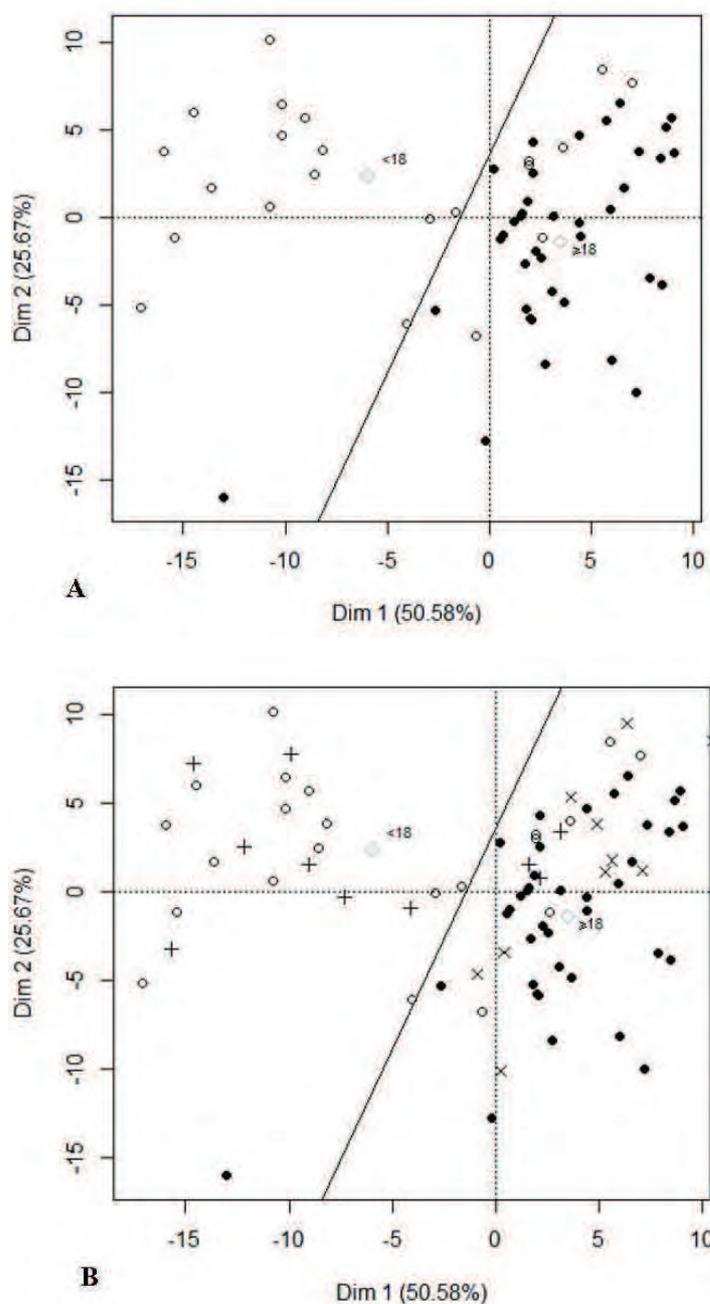
Figure II-17 – Courbes moyennes des niveaux de gris des 80 hommes (M) de l'échantillon, par âge.

### 3.4.3. Analyse en composantes principales (ACP)

Les figures II-18 et 19 présentent les résultats correspondant à une ACP effectuée pour chaque sexe.



**Figure II-18-** (A) - ACP pour les 60 femmes de l'échantillon de référence. L'abscisse et l'ordonnée indiquent le pourcentage de variabilité totale de la population. L'ACP représente ici 76,82 % de la variabilité de la population. o : femmes de l'échantillon de référence âgées de moins de 18 ans. • : femmes de l'échantillon de référence âgées de 18 ans et plus.  $\diamond$  : barycentre. La droite qui sépare les deux catégories est équidistante des deux barycentres. (B) - Les 20 femmes de l'échantillon test ont ensuite été insérées sur l'ACP. + : femmes de l'échantillon test âgées de moins de 18 ans. X : femmes de l'échantillon test âgées de 18 ans ou plus.



**Figure II-19 – (A)** - ACP pour les 60 hommes de l'échantillon de référence. L'abscisse et l'ordonnée indiquent le pourcentage de variabilité totale de la population. L'ACP représente ici 76,25 % de la variabilité de la population. o : hommes de l'échantillon de référence âgés de moins de 18 ans. • : hommes de l'échantillon de référence âgés de 18 ans et plus. ◊ : barycentre. La droite qui sépare les deux catégories est équidistante des deux barycentres.**II-19 - (B)** - Les 20 hommes de l'échantillon test ont ensuite été insérés sur l'ACP. + : hommes de l'échantillon test âgés de moins de 18 ans. X : hommes de l'échantillon test âgés de 18 ans ou plus.

### 3.4.4. Bootstrapping

L'ACP a été effectuée 100 fois de manière aléatoire. Les tableaux II-13 et II-14 représentent une moyenne des valeurs et des pourcentages d'individus tests correctement placés dans la catégorie « âge inférieur à 18 ans » ou « âge égal ou supérieur à 18 ans ».

- 65,67 % des hommes de moins de 18 ans et 97,41 % des hommes de 18 ans ou plus,
- 70,89 % des femmes de moins de 18 ans et 93,91 % des femmes de 18 ans ou plus,

étaient classés dans la bonne catégorie, sur la base de l'ACP de la population de référence.

**Tableau II-13** – Moyennes des valeurs et des pourcentages des hommes de l'échantillon test obtenues par la technique du bootstrapping, suivant la catégorie où ils ont été classés et leur âge réel.

Age réel	Catégorie				Total <i>n</i> =20
	< 18 ans		≥ 18 ans		
	n	%	n	%	
< 18 ans	5,51 [5,15-5,86]	<b>65,67</b> [61,38-69,85]	2,88 [2,60-3,15]	34,32 [31-37,54]	8,39
≥ 18 ans	0,3 [0,19-0,4]	2,58 [1,63-3,44]	11,31 [10,95-11,61]	<b>97,41</b> [94,3-100]	11,61

**Tableau II-14** – Moyennes des valeurs et des pourcentages des femmes de l'échantillon test obtenues par la technique du bootstrapping, suivant la catégorie où elles ont été classées et leur âge réel.

Age réel	Catégorie				Total <i>n</i> =20
	< 18 ans		≥ 18 ans		
	n	%	n	%	
< 18 ans	7,89 [7,51-8,27]	<b>70,89</b> [67,48-74,30]	3,24 [2,93-3,55]	29,11 [26,33-31,90]	11,13
≥ 18 ans	0,54 [0,39-0,69]	6,09 [4,40-7,78]	8,33 [7,92-8,74]	<b>93,91</b> [89,29-98,53]	8,87

## **TROISIÈME PARTIE**

### **DISCUSSION GÉNÉRALE**

## **Chapitre 1 – Discussion sur l’apport de l’IRM des épiphyses distale du tibia et du calcaneum dans la détermination de l’âge**

### **1.1. Limites de l’étude**

#### 1.1.1. Latéralité

Dans notre étude, nous n’avons pas tenu compte de la latéralité des IRM sélectionnées, indifféremment des chevilles droites ou gauches. Pour leur atlas, Greulich et Pyle ont utilisé la main gauche par convention anthropologique. Lorsqu’un traumatisme de la main survient, il touche plus souvent le côté dominant. La grande majorité de la population étant droitère, le choix de radiographies de la main gauche diminuait donc le risque de devoir exclure des patients ayant une fracture. Dans la plupart des études où les côtés droit et gauche d’une même région anatomique ont été évalués, il n’existait pas de différence significative dans les résultats obtenus, suggérant que l’analyse d’un seul côté, droit ou gauche indifféremment, était suffisant (Schulz, 2005 ; 2008 ; Kreitner, 1998 ; Schmeling, 2004b, Cameriere, 2012, Kellinghaus, 2010a ; 2010b ; Hillewig, 2011 ; Wittschieber, 2013b ; Châmoitre, 2006 ; Quirnbach, 2009 ; Schmidt, 2007b ; Meijerman, 2007 ; Hackman, 2012). Lorsque les évaluations d’un même os différaient chez un même individu, les auteurs prenaient en compte soit le côté pour lequel la maturation était la plus avancée (Cameriere, 2012 ; Kellinghaus, 2010b), estimant que cela permettait de mieux s’approcher de l’âge réel, soit le côté pour lequel le stade était le moins élevé, pour ne pas « défavoriser » l’individu (Schmidt, 2007b).

Bassed et al. ont cependant souligné qu’il peut exister un développement asymétrique, aboutissant à une différence significative dans la détermination de l’âge allant jusqu’à trois ans dans une étude faite sur l’extrémité médiale de la clavicule. Les auteurs de cette étude recommandaient donc de baser l’évaluation sur les deux côtés de l’os étudié, lorsque cela est possible (Bassed, 2012).

Sur la base de l’ensemble de ces données, il est donc possible de supposer que l’absence de sélection d’un côté particulier pour les IRM de cheville n’a pas eu d’influence sur les résultats obtenus dans notre étude.

### 1.1.2. Origine ethnique et niveau socio-économique

La limite principale de notre étude était l'absence d'information concernant l'origine ethnique et le niveau socio-économique des individus inclus. Les méthodes de référence dans le domaine de la détermination de l'âge sont établies sur des échantillons de jeunes individus sains, dont on connaît l'âge, grandissant dans un environnement non carencé, avec un statut socio-économique correct voire très bon (Pyle, 1955 ; Greulich, 1959 ; Hoerr, 1962). Il ne s'agit donc pas des populations dont sont issus les individus évalués quotidiennement dans l'activité médico-légale. Or, il est légitime de penser que la maturation osseuse pourrait être influencée par l'origine ethnique ou le niveau de vie de l'individu. Cette question a fait l'objet de multiples études visant à appliquer les méthodes de référence sur des jeunes ayant des origines diverses et vivants dans des zones géographiques et des conditions environnementales éloignées de la population de référence. Il s'avère qu'en fait, ce n'est pas l'origine ethnique qui joue un rôle sur la vitesse de la maturation osseuse, mais le **niveau socio-économique** de l'individu à évaluer (Schmeling, 2000 ; Schmeling, 2003b), ainsi que le niveau de modernisation de la population dont il est issu (Schmeling, 2006b). Un mauvais niveau socio-économique ralentit la maturation osseuse (Meijerman, 2007). Si des méthodes obtenues à partir d'enfants ayant un bon niveau socio-économique sont appliquées sur des individus venant de milieux défavorisés, il y a un risque de sous-estimation de leur âge réel. Cette sous-estimation, si elle est source d'erreur dans l'appréciation de l'âge, ne pose pas de problème éthique à proprement parler, car l'erreur se produit au bénéfice de l'individu, qui sera évalué comme mineur alors qu'il est majeur et ne sera par exemple pas expulsé du territoire. Une erreur « dans l'autre sens » en revanche, se fait au détriment de l'individu, qui bien que mineur, sera considéré comme majeur et ne pourra pas rester en France, ses droits fondamentaux en tant que mineur n'étant pas respectés.

Les individus inclus dans notre étude ont été sélectionnés à partir d'une base de données de deux services de radiologie de CHU français. Le fonctionnement de cette base de données, le PACS, ne permet pas d'accéder aux informations médicales et administratives de l'individu dont l'examen radiologique est consulté. De plus, l'origine ethnique et le niveau socio-économique ne font pas partie des informations recueillies dans le dossier médical des patients admis dans les hôpitaux français. Tout au plus peut on supposer que le statut socio-économique des personnes incluses n'a probablement pas joué de rôle majeur dans les résultats obtenus. En effet, les études montrant un retard de

maturation osseuse concernent des populations très défavorisées, indiennes par exemple, très éloignées des conditions de vie françaises, même les plus précaires.

## 1.2. Comparaison avec les données de la littérature

Nous avons vu qu'il n'était pas possible de comparer des résultats d'études basées sur des techniques d'imagerie différentes (Isca, 1989). Dans notre échantillon, pour l'extrémité distale du tibia, l'âge le plus précoce de début de fusion (limite inférieure du stade 2) était de 9 ans chez les filles et de 12 ans chez les garçons. L'âge moyen de la fusion complète était de 20 ans chez les femmes et de 22 ans chez les hommes. Ces données suggèrent un début de fusion plus précoce et une fusion complète plus tardive que dans la littérature (Tableau II-3). En fait, l'IRM est une technique permettant d'analyser une structure à partir de coupes fines. La détection d'un début de fusion est possible même sur une zone minime, et sur une seule coupe d'une série. De même, la fusion complète peut être affirmée avec certitude sur la totalité de la surface épiphysaire, et sur toutes les images d'une série. Cela permet d'expliquer que la distinction entre l'absence de fusion, la fusion partielle et la fusion complète soit plus précise que lorsque l'analyse est faite à partir d'un seul cliché radiographique, qui, pour simplifier, correspond à la superposition de toutes les images visibles à l'IRM.

Nos résultats montrent que la maturation osseuse est plus précoce chez les femmes que chez les hommes. Cela se vérifie aussi bien pour le début de la fusion, que pour les âges transitionnels, et la fin de la fusion, à la fois pour l'extrémité distale du tibia et le calcaneum. Cette différence est bien connue dans la littérature sur la fusion métaphyso-épiphysaire, les femmes ayant une avance sur les hommes allant de plusieurs mois à un ou deux ans, quelle que soit la structure anatomique testée (Scheuer, 2000). C'est la raison pour laquelle l'analyse doit porter sur chaque sexe séparément et que les méthodes de référence présentent des standards pour les deux sexes, en tenant compte de la « précocité » du sexe féminin. Cela explique également qu'il soit d'autant plus difficile de trouver une articulation contributive pour le seuil des 18 ans chez les femmes, celles-ci ayant achevé leur croissance depuis plusieurs années lorsqu'elles atteignent la majorité.

Nous avons par ailleurs constaté que les âges transitionnels étaient plus tardifs pour l'extrémité distale du tibia que pour le calcaneum, pour les deux sexes. Il n'est pas

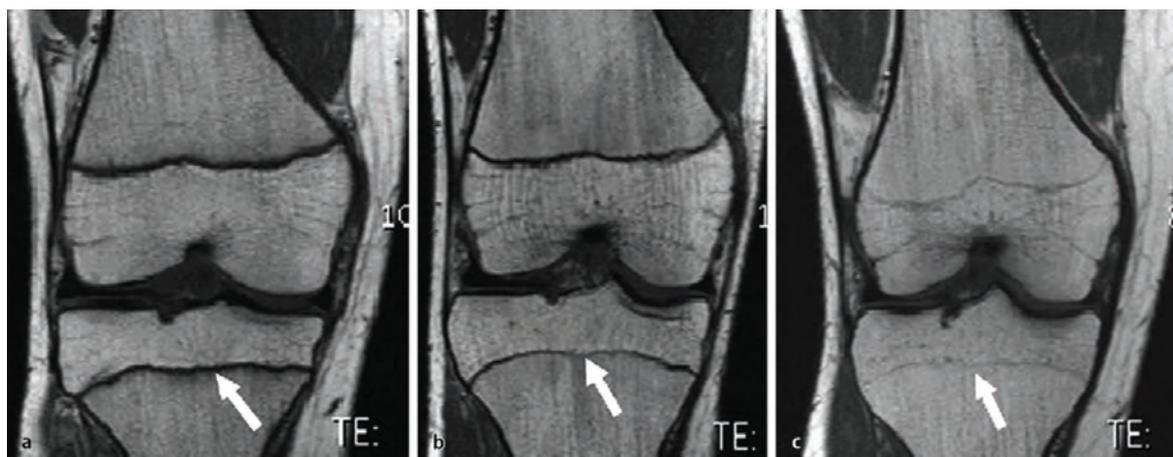
possible de comparer ces résultats avec d'autres données, car il s'agit à notre connaissance de la seule étude ayant comparé simultanément la maturation du tibia et celle du calcaneum.

### 1.3. Le choix du nombre de stades

Il n'y a pas de consensus sur le nombre de stades devant constituer la classification de la maturation osseuse d'une épiphyse donnée. Suivant les auteurs, des systèmes à 3, 4, 5 ou 6 stades ont été développés. Le premier stade est généralement l'absence de fusion et le dernier l'union complète, témoin d'une maturation achevée. Entre les deux, l'avancée de la fusion en cours peut être plus ou moins détaillée par la surface de zones fusionnées par rapport à la surface totale de la jonction épiphyso-métaphysaire. Dans l'évaluation de l'extrémité distale de la clavicule, le premier stade est celui de l'absence complète du centre d'ossification, ce qui peut être source de confusion avec une fusion complète. La présence d'une cicatrice épiphysaire peut également être prise en compte.

#### 1.3.1 Trois stades (Figure III-1)

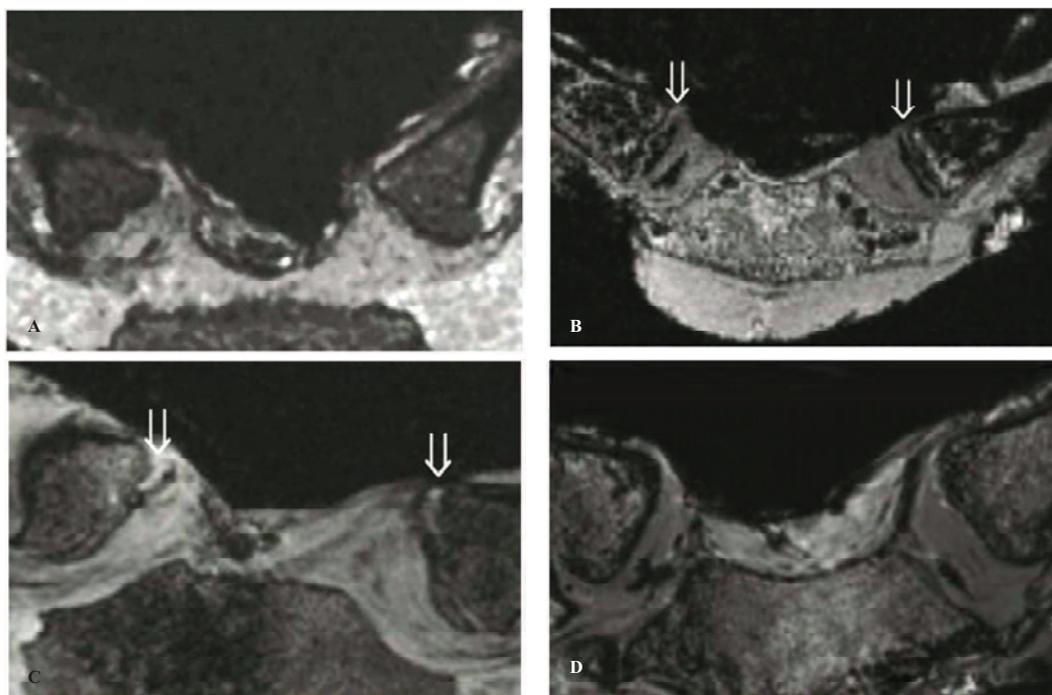
Le premier stade est l'absence de fusion, le deuxième la fusion en cours quelque soit son avancée, le troisième est la fusion complète. Il s'agit du système le plus simple, peu utilisé dans les études existantes (Jopp, 2010).



**Figure III-1** – Classification en 3 stades des épiphyses du genou. Images pondérées en T1, séquence TSE, coupes coronales. A : Stade 1 – absence de fusion. B : Stade 2 – fusion partielle. C : stade 3 : fusion complète (d'après Jopp, 2010).

### 1.3.2. Quatre stades (Figure III-2)

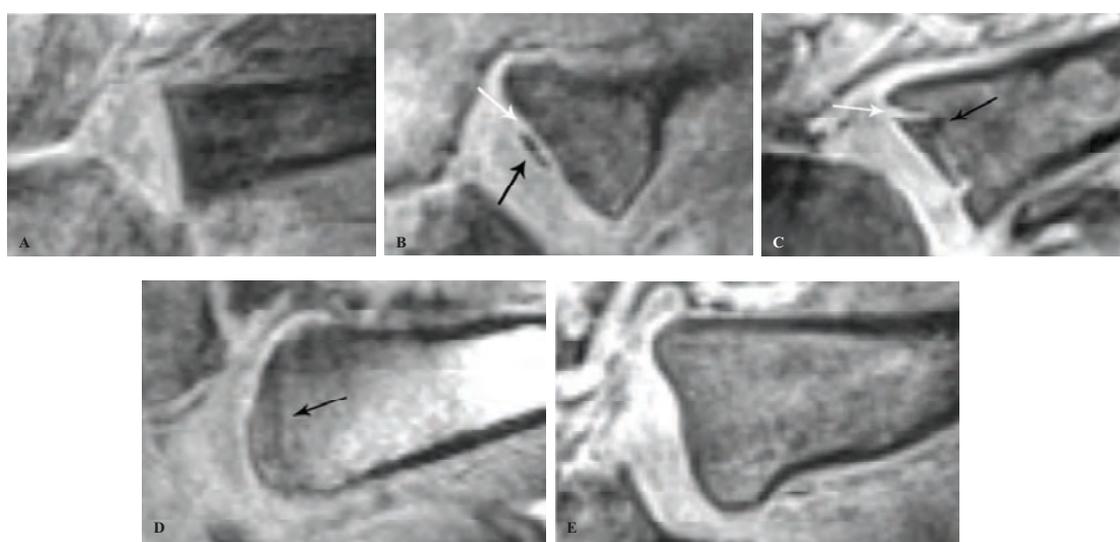
Schmidt et al. ont ajouté un quatrième stade pour l'étude de l'extrémité médiale de la clavicule : l'absence de centre d'ossification (stade 1) (Schmidt, 2007b).



**Figure III-2** – Classification en 4 stades de l'extrémité médiale de la clavicule. Images pondérées en T1, séquence d'écho de gradient. A : Stade 1 – le centre d'ossification n'est pas ossifié (femme, 7,7 ans). B : Stade 2 – le centre d'ossification est ossifié, absence de fusion épiphysaire (flèche) (femme, 14,9 ans). C : Stade 3 – fusion en cours (femme, 22,3 ans) ; la flèche montre la fusion partielle entre l'épiphyse et la métaphyse. D : Stade 4 – fusion complète (homme, 36,3 ans) (modifié d'après Schmidt, 2007b).

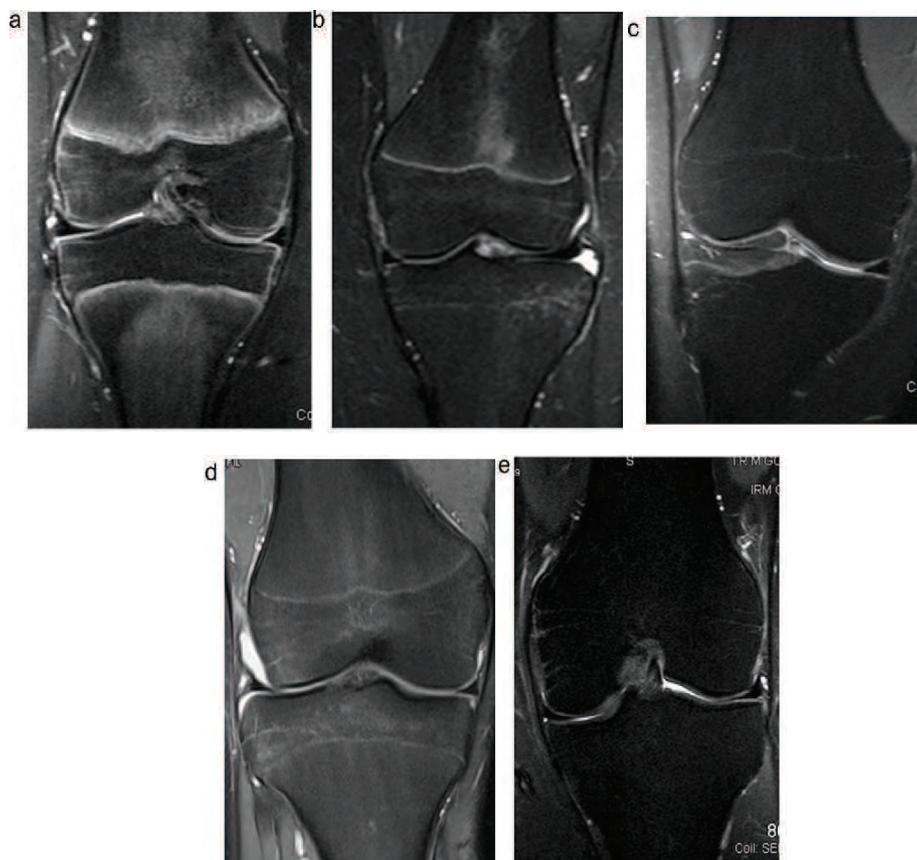
### 1.3.3 Cinq stades (Figures III-3 et 4)

Il s'agit de la classification classique de Schmeling (2004b) développée initialement pour les radiographies de l'extrémité médiale de la clavicule, appliquées ensuite au scanner et à l'IRM. Par rapport à la précédente, un cinquième stade concerne la présence d'une cicatrice épiphysaire visible une fois que la fusion est complète, amenée à disparaître (Hillewig, 2011, 2013).



**Figure III-3** – Classification en 5 stades de l'extrémité médiale de la clavicule. Images pondérées en T1, séquence d'écho de gradient VIBE. A : Stade 1 - le centre d'ossification n'est pas visible (pas ossifié). B : Stade 2 - le centre d'ossification est visible (ossifié), absence de fusion entre l'épiphyse et la métaphyse. C : Stade 3 - fusion en cours. D : Stade 4 - fusion complète entre la métaphyse et l'épiphyse, une cicatrice épiphysaire est toujours visible. E : Stade 5 - fusion complète entre la métaphyse et l'épiphyse, absence de cicatrice épiphysaire (modifié d'après Hillewig, 2013).

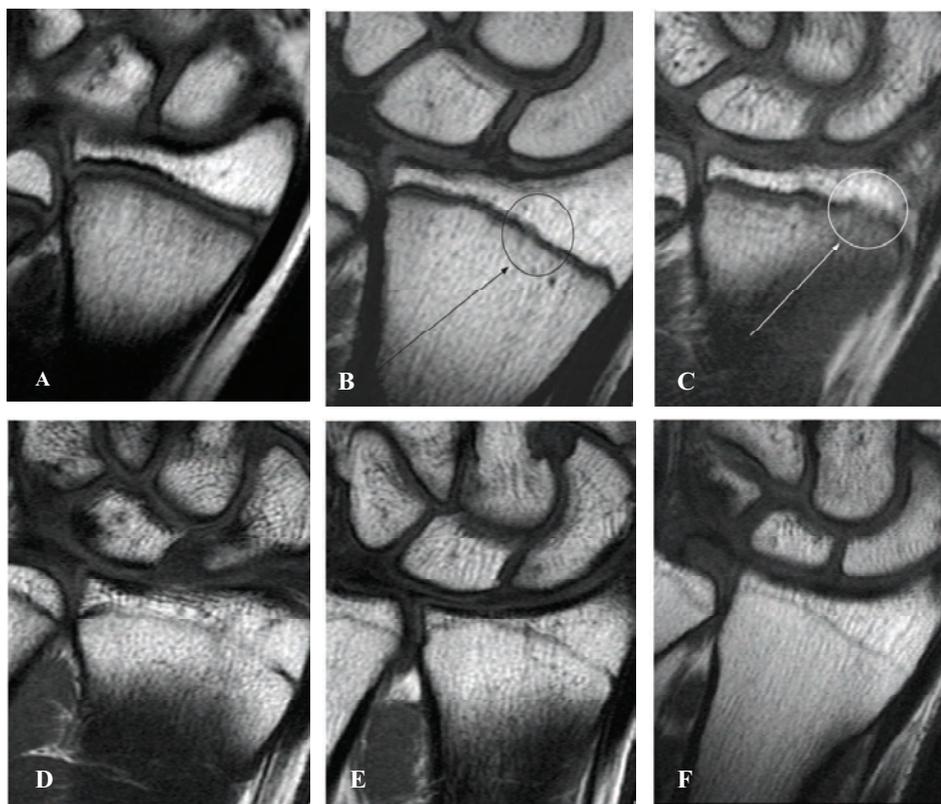
Dedouit et al. ont mis au point une stadification originale pour étudier le genou (Dedouit, 2012), dépendant de l'épaisseur de la jonction épiphyso-métaphysaire et de son aspect lamellaire.



**Figure III-4** – Classification en 5 stades des épiphyses du genou. Images pondérées en densité de proton en fast spin-écho avec saturation de graisse. Coupes coronales. a : Stade 1 - cartilage se présentant sous la forme d'une bande lamellaire complète de plus de 1,5 mm d'épaisseur. b : Stade 2 – cartilage se présentant sous la forme d'une bande complète sans aspect lamellaire de plus de 1,5 mm d'épaisseur. c : Stade 3 - cartilage se présentant sous la forme d'une ligne en hypersignal de moins de 1,5 mm d'épaisseur. d : Stade 4 - cartilage se présentant sous la forme d'une ligne en hypersignal, discontinue, non lamellaire, de moins de 1,5 mm d'épaisseur. e : Stade 5 – absence d'hypersignal physisaire à la jonction métaphyso-épiphysaire (modifié d'après Dedouit, 2009).

### 1.3.4. Six stades (Figure III-5)

C'est le nombre choisi pour les études sur le poignet de Dvorak et al et George et al. (Dvorak, 2007a, 2007b, 2009 ; George, 2012). Les stades 2 à 5 étaient définis par l'étendue de la surface en cours de fusion.



**Figure III-5** - Classification en 6 stades de l'épiphyse distale du radius. Séquences pondérées en T1, écho de spin. Coupes coronales. A : Stade 1 – absence totale de fusion de l'épiphyse distale du radius. B : Stade 2 – début de fusion localisée (cercle noir). C : Stade 3 – la zone de fusion (cercle blanc) s'étend sur moins de 50 % de la surface totale du cartilage de conjugaison. D : Stade 4 – la zone de fusion s'étend sur plus de 50 % de la surface totale du cartilage de conjugaison. E : Stade 5 – il persiste une zone non fusionnée résiduelle dont la taille est inférieure à 5 mm. F : Stade 6 – fusion complète (modifié d'après Dvorak, 2007a).

### 1.3.5. La cicatrice épiphysaire

La cicatrice épiphysaire a été prise en compte dans certaines classifications de la maturation osseuse et sa présence peut définir un stade. C'est le cas de la classification de Schmeling (Schmeling, 2004b) de l'extrémité médiale de la clavicule, qui a été appliquée successivement sur les radiographies, les scanners et les IRM : le stade 4 correspond à une fusion complète de

l'épiphyse, avec persistance d'une cicatrice épiphysaire ; au stade 5, cette cicatrice n'est plus visible. Les auteurs suggéraient donc que la cicatrice épiphysaire était un signe de fusion récente et disparaissait après un certain temps ; sa disparition constituerait le stade final de la maturation osseuse et sa présence permettrait d'affiner l'estimation de l'âge osseux.

D'autres auteurs ont au contraire suggéré que cette cicatrice pouvait rester visible pendant plusieurs dizaines d'années: c'est le cas de Cope qui notait une persistance de la ligne épiphysaire de l'extrémité distale du fémur et de l'extrémité proximale du tibia jusqu'à 60 voire 70 ans (Cope, 1920), de Weiss et al. qui ont étudié la maturation du premier métatarsien et n'ont pas remarqué de corrélation entre la persistance d'une ligne épiphysaire et l'âge chronologique (Weiss, 2012), de Baumann et al. qui ont observé des cicatrices épiphysaires chez des individus de plus de 30 ans, tandis que certains de 16 ou 18 ans n'en avaient plus, dans une étude sur la maturation des épiphyses distales du radius et de l'ulna (Baumann, 2009). Concernant l'extrémité distale du tibia, Hoerr et Pyle laissaient penser dans leur atlas de radiographies de la cheville et du pied (Hoerr, 1962) que la ligne épiphysaire pouvait persister toute la vie, et une étude récente allait également dans ce sens, montrant qu'une cicatrice épiphysaire était présente sur plus de 92 % de 1216 radiographies de tibias d'individus âgés de 20 à 50 ans (Davies, 2013).

Nous avons constaté la présence d'une ligne épiphysaire sur de nombreuses IRM d'hommes et de femmes dont la maturation osseuse était achevée. Etant donné les données contradictoires de la littérature, il nous a semblé qu'il ne s'agissait pas d'un élément assez fiable pour définir le caractère récent de la fusion épiphysio-métaphysaire et constituer un stade à part entière.

#### 1.3.6. Avantages et inconvénient d'un nombre limité de stades

Le fait d'avoir plusieurs stades pour qualifier la fusion partielle peut se traduire par un affinement des catégories d'âges correspondant à chaque stade, même s'il est alors probable que ces catégories d'âges se chevauchent et soient peu contributives. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un travail sur l'IRM, Kellinghaus et al. ont publié une étude à partir de scanners de l'extrémité médiale de la clavicule qui est la seule à notre connaissance où les auteurs affirmaient avoir trouvé un stade permettant de faire la distinction entre mineurs et majeurs (Kellinghaus, 2010a). Ils ont affiné la classification à 5 stades de Schmeling (Schmeling, 2004b) pour aboutir à 9 stades, les stades 2 et 3 étant sub-divisés de a à c. Les individus

classés au stade 3c, correspondant à la fusion d'au moins deux tiers de l'épiphyse, avaient tous au moins 18 ans. Il est surprenant que ces résultats, qui sont uniques dans la littérature sur la détermination d'âge, n'aient pas été confirmés par d'autres études reprenant la même classification.

Nous avons choisi de développer une classification à 3 stades car il nous a semblé qu'il s'agissait du système le plus simple et nécessitant le temps d'apprentissage le moins long. La multiplication du nombre de stades composant la fusion partielle nécessite que des mesures soient prises afin de quantifier l'avancée de la fusion par rapport à la taille de l'épiphyse, ce qui est long et peut être source d'erreurs. La distinction entre l'absence de fusion, la présence de zones de fusion en cours, et la fusion complète, est en revanche visuellement facile à faire sur une acquisition IRM, et ce, même pour un praticien non radiologue ayant peu d'expérience dans l'analyse de cette méthode d'imagerie. Ces conditions sont celles qui se rapprochent le plus de la pratique médico-légale. Les médecins requis pour déterminer l'âge d'un individu sont des cliniciens qui ne travaillent pas toujours avec un radiologue pour analyser les clichés, même si cela est recommandé.

#### **1.4. Intérêt d'un score composite associant plusieurs indicateurs**

Nous avons choisi deux os en partant du principe développé par les méthodes scorées, c'est-à-dire que l'association de plusieurs indicateurs permettrait d'affiner l'estimation de l'âge osseux, surtout dans la fourchette d'âge la plus « intéressante », autour des 18 ans. La méthode de Sauvegrain (paragraphe 3.5.1) étudie quatre structures anatomiques du coude (Sauvegrain, 1962) et celle de Tanner et Whitehouse (paragraphe 3.2.3), une vingtaine d'os du poignet et du carpe (Tanner, 1962a, 1975, 2001). Lorsqu'elle est comparée à celle de Greulich et Pyle, la méthode de Tanner et Whitehouse donne d'aussi bons, voire de meilleurs résultats (Tableau 1-3), mais son temps d'apprentissage est long, ce qui en fait une méthode moins utilisée en pratique.

Une étude basée sur des radiographies de pied avait montré que la prise en compte simultanée de la maturation de plusieurs os permettait une estimation de l'âge réel plus précise qu'en analysant un seul os (Whitaker, 2002). Plusieurs os du pied étaient choisis, et à chacun était attribué un score pour la maturation du centre d'ossification primaire, celle du centre d'ossification secondaire, et le degré de fusion entre les deux centres. Ces trois scores

permettaient de déterminer un score de maturité pour chaque os, et une fourchette d'âge correspondant. Au final, l'association des 16 résultats correspondant à chaque os testé permettait de déterminer la fourchette de l'âge osseux. Davies et al. ont testé cette méthode complexe et ont constaté qu'elle n'était applicable ni aux individus de sexe masculin, ni aux filles de moins de 12 ou de plus de 16 ans (Davies, 2013). Il s'agissait donc d'une méthode imparfaite, peu reproductible.

## **1.5. L'apport des méthodes statistiques : analyse transitionnelle et approche bayésienne**

### 1.5.1. Analyse transitionnelle

L'analyse transitionnelle a initialement été utilisée en anthropologie médico-légale pour estimer l'âge au moment du décès à partir de squelettes ou de fragments osseux, en utilisant les indicateurs habituels (symphyse pubienne, articulation sacro-iliaque) (Hoppa, 2002 ; Milner, 2012). Cette méthodologie s'est développée car il était souvent difficile de déterminer l'âge des individus matures autrement que par un intervalle non fermé (par exemple, « plus de 60 ans »), et que la combinaison des intervalles d'âges obtenus pour chaque indicateur ne donnait pas toujours un meilleur résultat que chaque indicateur pris individuellement (Hoppa, 2002 ; Milner, 2012). Les âges transitionnels ont été utilisés dans la méthode de Suchey-Brooks (Berg, 2008 ; Kimmerle, 2008 ; Konisberg, 2008 ; Godde, 2012), dans l'étude de la première côte (DiGangi, 2009), de l'usure et de la transparence dentaires (Prince, 2008a, 2008b), et de l'extrémité médiale de la clavicule (Langley-Shirley, 2010).

Si on considère un indicateur du développement dont la trajectoire est séparée en une séquence de  $s$  stades distincts, qui ne se chevauchent pas, et dont les modifications morphologiques se produisent toujours dans le même sens (en d'autres termes, un individu au stade  $i$  peut évoluer uniquement vers le stade  $i+1$ , jamais au stade  $i-1$ , et jamais directement au stade  $i+2$ ), l'analyse transitionnelle va permettre de calculer l'âge de transition entre le stade  $i$  et le stade  $i+1$ , entre le stade  $i+1$  et le stade  $i+2$ , ...

Le calcul des âges transitionnels est particulièrement adapté aux études sur la maturation osseuse basée sur une classification de la fusion métaphyso-épiphysaire. On recherche ici un stade contributif pour un seuil d'âge fixé préalablement (le plus souvent 18, mais aussi 13, 16 ou 21 ans). L'âge moyen des individus pour un stade donné est peu informatif, car il ne permet pas d'exclure que la fourchette d'âge de ce stade soit très large, et que les différentes

fourchettes d'âges se recoupent d'un stade à l'autre. Pour les hommes, l'âge moyen de transition entre les stades 2 et 3 était de 19,2 ans pour le tibia et de 17,8 ans pour le calcaneum. Ce résultat suggérait que le calcul d'un score composite associant ces deux indicateurs avait des chances d'obtenir un résultat intéressant par rapport au seuil des 18 ans, âge auquel le calcaneum aurait fusionné complètement, alors que l'extrémité distale du tibia serait en cours de fusion. Pour les femmes, l'âge moyen de transition entre les stades 2 et 3 était de 15,4 ans pour le tibia et de 12,6 ans pour le calcaneum. A 18 ans, les individus étaient donc passés du stade de la fusion partielle à la fusion complète depuis plusieurs années. L'évaluation serait donc bonne pour les femmes âgées de 18 ans ou plus, mais médiocre pour les mineures.

### 1.5.2. L'approche bayésienne

L'approche bayésienne est de plus en plus employée en anthropologie (Lucy, 1996 ; Thevissen, 2009 ; Braga, 2005 ; DiGangi, 2009 ; Kimmerle, 2008 ; Langley-Shirley, 2010 ; Coqueugniot, 2010 ; Hillewig, 2013). Elle permet de calculer la probabilité d'un événement à partir des probabilités d'autres événements déjà évalués. En anthropologie, ces événements peuvent par exemple être la prévalence d'une pathologie, ou l'incidence d'indicateurs osseux de ces pathologies (Byers, 2003).

L'approche bayésienne peut être présentée comme une généralisation de l'approche classique : les paramètres ne sont plus des valeurs fixes inconnues mais des variables aléatoires dont il faut spécifier la distribution. 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 (ou conditionnelle) qui est obtenue par la combinaison des informations a priori et qui n'est autre que la distribution conditionnelle aux valeurs prises par les données. Cette distribution est calculée par la formule du théorème de Bayes :

$$\Pr(a|c_j) = \frac{\Pr(c_j|a)f(a)}{\int_0^{\infty} \Pr(c_j|x)f(x)dx}$$

où  $\Pr(a|c_j)$  est la probabilité que l'individu ait l'âge  $a$  s'il possède l'indicateur  $c_j$  (c'est-à-dire

la probabilité de l'âge en fonction de l'indicateur),  $Pr(c_j|a)$  est la probabilité que l'individu qui possède l'indicateur  $c_j$  ait l'âge  $a$  (c'est-à-dire la probabilité de l'indicateur en fonction de l'âge), et  $f(a)$  est la densité de probabilité.

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. 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 : d'abord le choix de la distribution de la population de référence, puis la séparation de la population 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).

### **1.6. Conclusion - Les seuils des 13, 16 et 18 ans**

Ainsi, les résultats de notre étude ont montré que :

- pour l'épiphyse distale du tibia :
  - o un homme classé en stade 3 est âgé de plus de 16 ans
  - o une femme classée en stade 3 est âgée de plus de 13 ans.
- pour le calcaneum :
  - o un homme classé en stade 3 est âgé de plus de 16 ans.

Ces deux structures anatomiques, évaluées séparément, ne permettent pas d'obtenir des résultats probants par rapport au seuil des 18 ans.

La stadification simultanée des deux structures permettait :

- Dans 97,7 % des cas de correctement évaluer les femmes majeures,
- Dans 91,7 % des cas de correctement évaluer les hommes majeurs,
- Dans 90,6 % des cas de correctement évaluer les hommes mineurs,

ce qui permet de conclure que l'IRM de l'extrémité distale du tibia et du calcaneum, si elle ne peut être utilisée comme seul examen dans la détermination de l'âge, est un examen de recours contributif en association à d'autres techniques d'estimation (osseuse, dentaire, sexuelle).

## **Chapitre 2 – Discussion sur l'intérêt d'une automatisation de l'estimation de l'âge**

### **2.1. Limites de l'étude**

La limite principale de l'étude était la taille de l'échantillon, particulièrement le groupe des individus test (n=40). Il s'agit probablement de la raison pour laquelle les résultats étaient médiocres pour les hommes âgés de moins de 18 ans et les femmes âgées de 18 ans et plus. De même, l'échantillon de référence était trop peu important pour constituer une base de données suffisante.

Cependant, étant donné l'effectif réduit, les résultats sont encourageants. L'objectif était de développer une méthode nouvelle ne faisant pas intervenir un observateur dans l'évaluation de l'avancée de la maturation du cartilage de croissance. Les résultats montrent que cette méthode fonctionne et qu'elle est adaptée au contexte. Il sera nécessaire de la tester sur d'autres échantillons pour vérifier sa reproductibilité.

Tout comme lors de la première étude, l'origine ethnique et le niveau socio-économique des individus constituant l'échantillon n'étaient pas connus. Cette limite a été discutée dans le paragraphe 1.1.2.

Nous avons testé le seuil d'âge des 18 ans qui est le plus important dans la détermination de l'âge en France. La validité de la méthode par rapport aux seuils des 13 et 16 ans n'a pas été évaluée. D'autres études comportant un échantillon plus important devront être menées pour vérifier l'intérêt de la méthode automatisée pour ces seuils d'âges juridiquement importants.

### **2.2. La correction de l'inhomogénéité d'intensité**

La méthode d'automatisation que nous souhaitons développer était basée sur les variations des niveaux de gris au sein du cartilage de conjugaison, témoin de l'avancée de la fusion métaphyso-épiphysaire. Il était donc indispensable que l'os entourant le cartilage de conjugaison (diaphyse, métaphyse, épiphysse) soit représenté par une intensité uniforme au

sein de la zone d'intérêt choisie ultérieurement, afin de ne pas fausser la variation des niveaux de gris à l'intérieur de cette zone.

Des artefacts connus affectent la qualité des images IRM (Bellon, 1986) (bruit, volume partiel, mouvements du patient, défaut de linéarité des gradients, inhomogénéités liées aux propriétés biologiques des tissus). L'inhomogénéité d'intensité était l'artefact le plus visible lors de l'analyse des IRM sélectionnées dans le cadre de la première étude. Il s'agit d'un terme désignant les variations d'intensité lisses, basse-fréquences et sans signification anatomique. Elles n'affectent pas la lecture directe de l'image à proprement parler, mais rendent difficile toute mesure quantitative (Manjon, 2007). L'inhomogénéité d'intensité n'a pas de cause unique et clairement définie, elle est issue de la combinaison des effets dus à l'ensemble des éléments intervenant dans une acquisition IRM (imageur, séquence, objet) et est généralement modélisée par un biais multiplicatif affectant l'intensité de l'image.

Ce type d'artefact et les corrections possibles sont bien connus et ont été très étudiés dans la littérature (Belaroussi, 2006 ; Vovk, 2007 ; Hou, 2006). Les méthodes de correction de l'inhomogénéité ont surtout été utilisées pour l'IRM cérébrale, par exemple pour faciliter la segmentation des images (Zhuge, 2009).

Il existe deux types de méthodes de correction :

- Les **méthodes de pré-traitement**, qui s'intéressent aux sources physiques de l'inhomogénéité, mais sont peu utilisées en pratique,
- Les **méthodes de post-traitement**. Plusieurs méthodes ont été développées, parmi lesquelles on peut citer N3 (Sled, 1998), HUM (Brinkmann, 1998), EQ (Cohen, 2000), BFC (Shattuck, 2001), SPM (Ashburner, 1998). Le grand nombre de ces méthodes peut s'expliquer par le fait qu'elles sont basées sur une modélisation des effets de l'inhomogénéité, mais l'approche est aveugle car les causes exactes ne sont pas identifiées. De toutes ces techniques, la méthode N3 semblait la plus efficace, réduisant quasiment totalement les inhomogénéités par rapport aux autres méthodes (Belaroussi, 2006 ; Boyes, 2008). Nous avons choisi une méthode dérivée de la méthode N3 et améliorant ses performances, nommée N4ITK (Tustison, 2010)

## 2.3. L'apport des méthodes statistiques

### 2.3.1. L'analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode d'analyse de données. Elle est utilisée pour étudier les variations entre les individus sur plusieurs axes, obtenues dans un espace multivarié (Mokrane, 2013).

L'objectif de l'analyse en composantes principales (ACP) est purement descriptif : il s'agit d'explorer un ensemble d'observations rassemblées sous la forme d'un tableau de données indiquant pour chaque unité statistique les valeurs observées d'un certain nombre de variables quantitatives. L'unité statistique peut être primaire (par exemple un individu) ou secondaire (un regroupement d'unités statistiques primaires). L'ACP cherche à synthétiser l'information contenue dans un tableau croisant les unités statistiques et les variables quantitatives. Produire un résumé d'information au sens de l'ACP revient à établir une similarité entre les individus (s'ils constituent l'unité statistique), chercher des groupes d'individus homogènes, mettre en évidence une typologie d'individus. Concernant les variables, il s'agit de révéler des bilans de liaisons entre elles, moyennant des variables synthétiques et une typologie de variables. L'ACP cherche d'une façon générale à établir des liaisons entre ces deux typologies (Kouani, 2007).

L'ACP est l'une des méthodes d'analyse de données multivariées les plus utilisées. Dès lors que l'on dispose d'un tableau de données quantitatives (continues ou discrètes) dans lequel  $n$  observations (des individus, des produits,...) sont décrites par  $p$  variables (des descripteurs, attributs, mesures, ...), si  $p$  est assez élevé, il est impossible d'appréhender la structure des données et la proximité entre les observations en se contentant d'analyser des statistiques descriptives univariées ou même une matrice de corrélation.

Il existe plusieurs applications pour l'ACP, parmi lesquelles :

- l'étude et la visualisation des corrélations entre les variables, afin d'éventuellement limiter le nombre de variables à mesurer par la suite,
- l'obtention de facteurs non corrélés qui sont des combinaisons linéaires des variables de départ, afin d'utiliser ces facteurs dans des méthodes de modélisation telles que la

régression linéaire, la régression logistique ou l'analyse discriminante,

- la visualisation des observations dans un espace à deux ou trois dimensions, afin d'identifier des groupes homogènes d'observations, ou au contraire des observations atypiques.

L'ACP peut être considérée comme une méthode de projection qui permet de projeter les observations depuis l'espace à  $p$  dimensions des  $p$  variables vers un espace à  $k$  dimensions ( $k < p$ ) tel qu'un maximum d'information soit conservée (l'information est ici mesurée au travers de la variance totale du nuage de points) sur les premières dimensions. Si l'information associée aux 2 ou 3 premiers axes représente un pourcentage suffisant de la variabilité totale du nuage de points, on pourra représenter les observations sur un graphique à 2 ou 3 dimensions, facilitant ainsi l'interprétation.

L'un des avantages de l'ACP est qu'elle fournit à la fois une visualisation optimale des variables et des données, et des biplots mélangeant les deux (Figures II-17 à II-20).

### 2.3.2. Le bootstrapping

Le terme de bootstrap, ou en français, rééchantillonnage, désigne un ensemble de méthodes qui consistent à faire de l'inférence statistique sur de « nouveaux » échantillons tirés à partir d'un échantillon initial. Disposant d'un échantillon destiné à donner une certaine information sur une population, on tire au sort parmi la sous-population réduite à cet échantillon, un nouvel échantillon de même taille  $n$ . Et on répète cette opération  $X$  fois, où  $X$  est grand. On analyse ensuite les nouvelles observations ainsi obtenues pour affiner l'inférence faite sur les observations initiales (Efron, 1979 ; Fox, 2002 ; Huber, 2006).

En d'autres termes, le rééchantillonnage permet d'obtenir des statistiques sans formuler d'hypothèse quant à la distribution. A partir d'un échantillon, on obtient un autre échantillon qui permet de recalculer les statistiques. En répétant cette étape un grand nombre de fois, on pourra obtenir une distribution empirique de la statistique étudiée. Ainsi, on obtient l'écart-type et un intervalle de confiance associé à n'importe quelle statistique en utilisant du rééchantillonnage sans aucune hypothèse de distribution.

Dans notre étude, nous avons réparti notre échantillon en individus de référence et en individus tests de manière aléatoire. Le rééchantillonnage a permis de reproduire cette répartition  $N$  fois, afin d'être certain que les résultats extraits de l'analyse en composantes principales n'étaient pas liés à certaines caractéristiques de la répartition initiale. Nous avons choisi  $N=100$  de manière arbitraire.

## **2.4. Intérêt de l'automatisation dans la détermination de l'âge**

### 2.4.1. Automatisation et IRM en médecine

Des méthodes d'automatisation ont été utilisées dans de nombreux domaines de recherche biomédicale, principalement dans la segmentation des structures cérébrales (Lee, 1998). Plusieurs travaux se sont intéressés à la segmentation automatique de l'hippocampe, du fait de l'implication précoce de cette structure cérébrale dans la maladie d'Alzheimer (Kelement, 1999 ; Shen, 2002 ; Carmichael, 2005 ; Babalola, 2009 ; Brewer, 2009 ; Chupin, 2009, 2011 ; Cherbuin, 2009 ; Apostolova, 2006), dans le syndrome de stress post-traumatique (Jatzko, 2006) et dans la dépression chronique (Tae, 2008). L'extraction du volume de l'hippocampe à partir d'une IRM cérébrale permettait la détection du diagnostic et la classification des patients atteints de ces pathologies (Morey, 2009). Cette extraction peut se faire par segmentation manuelle, méthode la plus fiable, mais longue, demandant une formation approfondie et marquée par des variabilités inter- et intra-observateurs importantes. La segmentation automatique permet de répondre à ces problèmes, sous réserve que soient introduites des informations « a priori » de nature anatomique et probabiliste (Chupin, 2011). Dans le contexte de la recherche sur la maladie d'Alzheimer, des méthodes d'automatisation portant sur l'épaisseur corticale ou la morphométrie au niveau du voxel ont également été proposées (Cuingnet, 2011).

Les recherches se sont également portées plus généralement sur les structures sous-corticales (Khan, 2008 ; Powell, 2008), sur les modifications de volume des structures diencephaliques chez les agresseurs sexuels (Schiltz, 2007), l'atrophie cérébelleuse chez les patients atteints d'épilepsie temporale (McDonald, 2008), la substance grise chez les schizophrènes (Ivleva, 2012 ; Danivas, 2013) et même la segmentation de la totalité de l'encéphale (Fischl, 2002).

Des modèles de segmentation ont également été proposés pour étudier les structures cardiaques, pour faciliter les études de volumétrie (estimation du volume des cavités

ventriculaires, mesure de la masse cardiaque, de la fraction d'éjection et du débit cardiaque) (Lötjönen, 1999 ; Constantinidès, 2010), pour mesurer le volume prostatique total dans la détection de l'hyperplasie prostatique bénigne (Habes, 2013) ou segmenter la prostate pour diagnostiquer un cancer (Ozer, 2010). D'autres sujets de recherche sont développés actuellement, en particulier la segmentation des masses tumorales (Wu, 2013).

#### 2.4.2. Avantages de l'automatisation

Les études ayant fait l'objet d'une revue de la littérature dans la première partie de ce travail ont testé un certain nombre de critères ou de biais susceptibles de modifier la détermination de l'âge : latéralité, origine ethnique et/ou niveau socioéconomique de l'échantillon, technique d'imagerie. Le rôle joué par la subjectivité de l'interprétation de l'image en fonction de l'expérience professionnelle de l'observateur a été peu étudié. Cameriere et al. ont conduit avec cinq observateurs de formations différentes (anthropologues, odontologues, clinicien) révélant des variabilités inter-observateurs médiocres sur l'analyse de radiographies de l'extrémité médiale de la clavicule (Cameriere, 2012a). Les autres études portant sur la méthode de Greulich et Pyle par exemple, ont de très bonnes variabilités inter- et intra-observateurs. Sans remettre en cause la fiabilité de ces méthodes, on peut imaginer que les observateurs participant à une étude donnée vont prendre un soin particulier à utiliser la méthode choisie pour cette étude.

Comme la fusion métaphyso-épiphysaire est le centre d'intérêt de toutes les études dans ce domaine, l'automatisation devait porter sur cette zone et prendre en compte les différents stades de cette union. L'IRM étant la technique d'imagerie choisie, ces stades se présentaient visuellement comme des variations des niveaux de gris au sein de la région d'intérêt, tandis que les niveaux de gris étaient homogènes de part et d'autre du cartilage de conjugaison, grâce à la correction préalable des inhomogénéités d'intensité. Ce raisonnement est similaire à celui ayant abouti à l'élaboration des classifications pour l'étude de radiographies, scanners ou IRM. Ces classifications sont basées sur l'observation de l'avancée de la fusion métaphyso-épiphysaire (absente, en cours, terminée). Les zones d'union se traduisent sur les images d'IRM par des zones floues de « pontage » entre la métaphyse et l'épiphyse. Dans certains cas, il est très facile de convertir une image en un stade. Parfois, il est difficile de distinguer une fusion complète d'une fusion partielle en raison de l'existence d'une ligne épiphysaire donnant l'impression de très petites zones non fusionnées au sein du cartilage de conjugaison. Dans d'autres cas, c'est entre absence et tout début de fusion qu'il est malaisé de

conclure, devant la présence d'une très petite zone visible sur une partie latérale du cartilage de conjugaison sur une seule image de la série. L'avantage principal de l'utilisation d'une méthode automatisée est donc de réduire le temps d'apprentissage et l'influence de l'expérience professionnelle dans l'interprétation de l'image.

## **2.5. Conclusion – Le seuil des 18 ans**

Ainsi, les résultats de notre étude ont montré que dans notre échantillon :

- 97,4 % des hommes âgés de 18 ans ou plus,
- 93,91 % des femmes âgées de 18 ans ou plus,

étaient classés dans la bonne catégorie par rapport au seuil des 18 ans par une méthode automatisée basée sur les variations de niveaux de gris au sein de la jonction métaphyso-épiphysaire de l'extrémité distale du tibia.

Ces résultats sont insuffisants pour recommander l'utilisation de cette méthode en l'état. Cependant, ils sont prometteurs et des études portant sur d'autres indicateurs (le poignet), avec un échantillon plus important, permettraient d'en tester la validité et la contribution possible dans la détermination de l'âge chez le sujet vivant.

## **Chapitre 3 – Quel avenir pour la détermination de l'âge chez le sujet vivant ?**

### **3.1. Le risque d'erreur**

La difficulté de l'estimation de l'âge chez le sujet vivant réside dans le fait que le médecin est requis pour déterminer un âge réel. Les méthodes dont il dispose lui permettent d'évaluer les âges dentaire et osseux pour s'approcher au plus près de l'âge biologique du sujet. Le résultat énoncé doit tenir compte de la variabilité inter-individuelle et de la différence possible de maturation entre la population de référence de la méthode qu'il utilise et celle dont est issu le sujet étudié. L'incertitude est même la plus grande entre 15 et 21 ans, âges pour lesquels les examens sont le plus fréquemment demandés. L'estimation doit donc toujours consister en une fourchette d'âge tenant compte de ces variations possibles.

Il est faux de dire que les méthodes dont on dispose sont imparfaites. Si elles le sont, c'est dans le domaine bien particulier de l'estimation de l'âge à des fins juridiques. Or, comme nous l'avons vu, ces méthodes n'ont initialement pas été élaborées dans ce but, en dehors de celle de Schmeling portant sur l'extrémité médiale de la clavicule. La méthode de Greulich et Pyle est reconnue comme étant particulièrement fiable dans l'étude de la maturation osseuse des enfants et adolescents ayant des troubles de la croissance, surtout comme outil de suivi longitudinal de ces patients. De même, le signe de Risser, couplé au stade pubertaire, est un indicateur important pour les chirurgiens orthopédiques qui veulent poser une indication chirurgicale chez les patients atteints de scoliose idiopathique. Ce ne sont donc pas les méthodes qui sont imparfaites mais l'usage qui en a été fait dans ce domaine particulier. Il est logique que ces méthodes donnent des résultats médiocres pour établir la majorité pénale des individus, alors même qu'à 18 ans, la maturation osseuse est le plus souvent achevée depuis plusieurs années, surtout chez les femmes.

La difficulté à procéder à une estimation correcte de l'âge réel d'un individu réside également dans la différence entre l'origine des personnes qui sont le sujet de cette estimation et celle des populations à partir desquelles ont été élaborées les méthodes que l'on utilise. Ainsi, notre échantillon, constitué de patients ayant reçu des soins dans deux CHU français, ne correspond pas aux individus dont les médecins sont amenés à évaluer l'âge. Selon un document d'avril

2013 de la Direction de la Protection Judiciaire de la Jeunesse (DPJJ, 2013), les jeunes se présentant en France comme mineurs étrangers isolés sont originaires d'Asie (Afghanistan, subcontinent indien, Chine), d'Afrique (République du Congo, Angola, Guinée, Tchad, Mali, Nigeria), du Maghreb, du Proche et Moyen-Orient (Palestine, Irak) et d'Europe (Russie, pays balkaniques). Il est légitime de penser que le niveau socio-économique de ces individus est inférieur à celui des enfants américains ayant constitué l'échantillon de Greulich, Pyle et Hoerr dans les années 1940 pour établir leurs atlas de poignet, genou et cheville.

Ce problème a deux solutions. On peut encourager la réalisation d'atlas de référence pour chaque nationalité concernée, comme cela a été fait en Turquie (Gök, 1985). Mais dans ce cas, il faut disposer d'une date de naissance fiable pour chaque individu inclus dans l'échantillon de référence et être certain que leur âge réel corresponde à leur âge civil. Une autre solution serait de trouver une méthode indépendante de la population, c'est-à-dire un indicateur sur lequel le niveau socio-économique n'aurait pas d'influence. Une telle méthode n'a pas été découverte, et si elle existe, il est probable qu'elle ne concerne pas l'âge osseux ou l'âge dentaire, dont l'estimation se heurte également à des difficultés liées aux différences de niveau socio-économique entre individus évalués et population de référence (Olze, 2004 ; 2007 ; Thevissen, 2010).

### **3.2. Vers une diminution du nombre de demandes ?**

Dans son rapport d'expertise, le médecin fait une synthèse des résultats obtenus avec les différentes méthodes utilisées et donne une estimation de l'âge sous forme d'une fourchette. Souvent, l'âge de la majorité, ou l'âge présentant un intérêt dans une procédure donnée, est inclus dans cette fourchette d'âge. L'examen médical n'est donc pas contributif pour les autorités judiciaires, car à la demande d'un âge précis, le médecin répond par une fourchette d'âge probable.

La circulaire du 31 mai 2013 relative aux modalités de prise en charge des jeunes isolés étrangers n'a pas proscrit les examens médicaux dans le cadre de l'estimation de l'âge des jeunes isolés étrangers. Mais ces examens sont recommandés uniquement en cas d'échec des entretiens préalables destinés à évaluer entre autre la maturité psychologique, sociale et intellectuelle du jeune. Ce recours limité est l'aboutissement d'une réflexion entreprise depuis plusieurs années avec l'avis du Comité Consultatif d'Ethique en 2005 (CCNE, 2005), et

indique que les autorités ont compris la nécessité de prendre en compte de multiples facteurs dans l'estimation de l'âge d'un sujet vivant sans se restreindre à l'âge biologique, même si une grande partie de l'évaluation proposée est basée sur des éléments déclaratifs.

Il n'est pas certain que cette restriction apparente se traduise en pratique par une diminution du nombre de demandes d'expertises médicales. Cet élément ne pourra être évalué qu'à l'issue d'une période d'observation de l'impact de ces nouvelles mesures sur l'activité des services hospitaliers ayant l'habitude de procéder à ces expertises.

### **3.3. Quelle place pour l'IRM dans la détermination d'âge ?**

Quelle que soit la répercussion pratique des mesures présentées dans la circulaire du 31 mai 2013, il est légitime de poursuivre l'amélioration des méthodes existantes et la recherche de méthodes plus performantes.

L'IRM est la technique d'imagerie la plus étudiée actuellement dans la détermination de l'âge, principalement en raison de son caractère non irradiant. L'IRM est ainsi une réponse satisfaisante aux questionnements éthiques du rapport bénéfice/risque de l'utilisation d'examens complémentaires chez les individus évalués. Son utilisation dans ce but présente bien sûr des difficultés d'accessibilité et de coût. Mais ces mêmes obstacles étaient également opposés à la réalisation de scanners des corps avant autopsie, une pratique aujourd'hui devenue commune dans tous les Instituts Médico-Légaux français.

L'IRM est un examen adapté à l'observation de la maturation osseuse des épiphyses, en raison de la forte teneur en eau des cartilages de conjugaison (Laor, 2009). L'interprétation des images est facile, sous réserve qu'une classification simple de la fusion métaphyso-épiphysaire ait été choisie. Le développement de méthodes automatisées de lecture des images est possible et est susceptible de représenter une nouvelle thématique de recherche dans ce domaine.

Il reste à multiplier les travaux afin de pouvoir comparer les études IRM entre elles, et constituer des échantillons de référence spécifiques à cette technique d'imagerie, dont il sera possible de comparer les résultats avec ceux des individus à tester.



adaptées au contexte pour analyser les résultats, avec pour objectif principal d'extraire des informations utiles à la détermination de l'âge à des fins juridiques. Nous avons obtenu de bons résultats concernant la capacité à correctement classer les individus par rapport au seuil des 18 ans. Ces résultats montrent qu'il existe des risques d'erreurs non négligeables pour les deux sexes, mais cela est le cas de toutes les méthodes de détermination de l'âge osseux qui sont utilisées actuellement. Il n'existe en effet pas de méthode suffisamment précise pour être employée seule et les recommandations actuelles sont d'associer les estimations des âges osseux, dentaire et pubertaire.

Nous avons ensuite développé une méthode automatisée pour réduire l'influence de l'observateur dans l'interprétation de l'image IRM. Ce biais avait peu été étudié dans la littérature. L'automatisation est un domaine de recherche important en IRM, appliqué surtout à la segmentation de l'encéphale pour étudier des structures difficiles à segmenter manuellement par un observateur. La méthode mise au point pour l'extrémité distale du tibia reposait sur les variations des niveaux de gris au sein du cartilage de conjugaison, après une standardisation préalable des images. Les résultats étaient encourageants, même si la limite principale de l'étude était l'effectif réduit de l'échantillon, d'autant plus que les individus avaient été répartis aléatoirement en individus de référence et individus tests. Ce travail a permis de montrer qu'il était possible de mettre au point une technique automatisée dans la détermination de l'âge, spécifiquement orientée vers les seuils d'âges présentant un intérêt médico-légal.

Ces travaux devront être poursuivis par la réalisation d'études aux effectifs plus larges, pour tester la validité de la méthode automatisée. De manière générale, la multiplication des travaux basés sur l'IRM permettra de constituer des données de référence, permettant une comparaison avec les images obtenues sur un individu à évaluer. Il n'est pas possible d'attendre de ces recherches que soit un jour trouvée la méthode idéale, mais plutôt que le risque d'erreur soit diminué et que les probabilités d'âge soient meilleures.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

Acheson RM (1954) A method of assessing skeletal maturity from radiographs. A report from the Oxford Child Health Survey. *J Anat* 88: 498-508.

Albert M, Mulhern D, Torpey MA, Boone E (2010) Age estimation using thoracic and first two lumbar vertebral ring epiphyseal union. *J Forensic Sci* 55: 287-294.

Albert MA, Maier CA (2013) Epiphyseal union of the cervical vertebral centra: its relationship to skeletal age and maturation of thoracic vertebral centra. *J Forensic Sci* 58: 1568-1574.

Apostolova LG, Dinov ID, Dutton RA, Hayashi KM, Toga AW, Cummings JL, Thompson PM (2006) 3D comparison of hippocampal atrophy in amnesic mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Brain* 129: 2867-2873.

Ashburner J, Friston K (1998) MRI sensitivity correction and tissue classification. *Neuroimage* 7: S107.

Babalola KO, Patenaude B, Aljabar P, Schnabel J, Kennedy D, Crum W, Smith S, Cootes T, Jenkinson M, Rueckert D (2009) An evaluation of four automatic methods of segmenting the subcortical structures in the brain. *Neuroimage* 47: 1435-1447.

Baccetti T, Franchi L, McNamara JA Jr (2002) An improved version of the cervical vertebral maturation (CVM) method for the assessment of mandibular growth. *Angle Orthod* 72: 316-323.

Banerjee KK, Agrawal BB (1998) Estimation of age from epiphyseal union at wrist and ankle joints in the capital city of India. *Forensic Sci Int* 98: 31-39.

Barchilon V, Hershkovitz I, Rotschild BM, Wish-Baratz S, Latimer B, Jellema LM, Hallel T, Arensburg B (1996) Factors affecting the rate and pattern of the first costal cartilage ossification. *Am J Forensic Med Pathol* 17: 239-247.

Bass W (2005) *Human osteology – A laboratory and field manual of the human skeleton*. Archaeological Society, Columbia, MO.

Bassed RB, Drummer OH, Briggs C, Valenzuela A (2011) Age estimation and the medial clavicular epiphysis : analysis of the age of majority in an Australian population using computed tomography. *Forensic Sci Med Pathol* 7: 148-154.

Bassed RB, Briggs C, Drummer OH (2012) The incidence of asymmetrical left/right skeletal and dental development in an Australian population and the effect of this on forensic age estimation. *Int J Legal Med* 126: 251-257.

Baumann U, Schulz R, Reisinger W, Heinecke A, Schmeling A, Schmidt S (2009) Reference study on the time frame for ossification of the distal radius and ulnar epiphyses on the hand radiograph. *Forensic Sci Int* 191: 15-18.

Beauthier JP (2007) *Traité de Médecine Légale*. Bruxelles : De Boeck.

Belaroussi B, Milles J, Carme S, Zhu YM, Benoit-Cattin H (2006) Intensity non-uniformity correction in MRI : Existing methods and their validation. *Med Imaging Anal* 10: 234-246.

Bellon EM, Haacke EM, Coleman PE, Sacco DC, Steiger DA, Gangarosa RE (1986) MR Artifacts : A review. *Am J Roentgenol* 147: 1271-1281.

Berg G (2008) Pubic bone age estimation in adult women. *J Forensic Sci* 53: 569-577.

Bilgili Y, Hizel S, Kara SA, Sanli C, Erdal HH, Altinok D (2003) Accuracy of skeletal age assessment in children from birth to 6 years of age with the ultrasonographic version of the Greulich-Pyle Atlas. *J Ultrasound Med* 22: 683-690.

Bitan FD, Veliskakis KP, Campbell BC (2005) Differences in the Risser grading systems in the United States and France. *Clin Orthop Relat Res* 436: 190-195.

Black S, Scheuer L (1996) Age changes in the clavicle : from the early neonatal period to skeletal maturity. *Int J Osteoarch* 6: 425-434.

Bokariya P, Chowdhary DS, Tirpude BH, Sonatakke B, Wankhede V, Tarnekar A (2010) Age determination in girls of Jodhpur region by epiphyseal union of bones at ankle joint. *J Indian Acad Forensic Med* 32: 42-44.

Bouchard M, Sempé M (2001) *Maturos 4.0 CD : un outil d'évaluation de la maturation squelettique*. *Biométrie Humaine et Anthropologie (Paris)* 19: 9-12.

Boyes RG, Gunter JL, Frost C, Janke AL, Yeatman T, Hill DLG, Bernstein MA, Thompson PM, Weiner MW, Schuff N, Alexander GE, Killiany RJ, DeCarli C, Jack CR, Fox NC (2008) Intensity non-uniformity correction using N3 on 3-T scanners with multichannel phased array coils. *Neuroimage* 39: 1752-1762.

Braga J, Heuze 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.

Brewer JB, Magda S, Airriess C, Smith ME (2009) Fully-automated quantification of regional brain volumes for improved detection of focal atrophy in Alzheimer disease. *AJNR Am J Neuroradiol* 30: 578-580.

Brinkmann B, Manduca A, Robb R (1998) Optimized homomorphic unsharp masking for MR grayscale inhomogeneity correction. *IEEE Trans Med Imaging* 17: 161-171.

Büken B, Erzençin OU, Büken E, Safak AA, Yazici B, Erkol Z (2009) Comparison of the three age estimation methods: which is more reliable for Turkish children? *Forensic Sci Int* 183: 103.e1-e7.

Bull RK, Edwards PD, Kemp PM, Fry S, Hughes IA (1999) Bone age assessment: a large scale comparison of the Greulich and Pyle, and Tanner and Whitehouse (TW2) methods. *Arch Dis Child* 81: 172-173.

Byers SN, Roberts CA (2003) Bayes' Theorem in paleopathological diagnosis. *Am J Phys Anthropol* 121: 1-9.

Calfee RP, Sutter M, Steffen JA, Goldfarb CA (2010) Skeletal and chronological ages in American adolescents : current findings in skeletal maturation. *J Child Orthop* 4: 467-470.

Cameriere R, Ferrante L, Mirtella D, Cingolani M (2006) Carpals and epiphyses of radius and ulna as age indicators. *Int J Legal Med* 120: 143-146.

Cameriere R, Ferrante L, Belcastro MG, Bonfiglioli B, Rastelli E, Cingolani M (2010) Age estimation by pulp/tooth ratio in canines by mesial and vestibular peri-apical X-rays. *J Forensic Sci* 52: 1151-1155.

Cameriere R, Ferrante L (2008a) Age estimation in children by measurement of carpals and epiphyses of radius and ulna and open apices in teeth: a pilot study. *Forensic Sci Int* 174: 59-62.

Cameriere R, Ferrante L, Ermenc B, Mirtella D, Strus K (2008b) Age estimation using carpals: study of a Slovenian sample to test Cameriere's method. *Forensic Sci Int* 174: 178-181.

Cameriere R, Cunha E, Sassaroli E, Nuzzolese E, Ferrante L (2009) Age estimation by pulp/tooth area ratio in canines: study of a Portuguese sample to test Cameriere's method. *Forensic Sci Int* 193: 128.e1-128.e6.

Cameriere R, De Luca S, De Angelis D, Merelli V, Giuliadori A, Cingolani M, Cattaneo C, Ferrante L (2012a) Reliability of Schmelting's stages of ossification of medial clavicular epiphyses and its validity to assess 18 years of age in living subjects. *Int J Legal Med* 126: 923-932.

Cameriere R, Cingolani M, Giuliadori A, De Luca S, Ferrante L (2012b) Radiographic analysis of epiphyseal fusion at knee joint to assess likelihood of having attained 18 years of age. *Int J Legal Med* 126: 889-899.

Canavese F, Charles YP, Dimeglio A (2008) Skeletal age assessment from elbow radiographs. Review of the literature. *Chir Organi Mov* 92: 1-6.

Cantekin K, Celikoglu M, Miloglu O, Dane A, Erdem A (2012) Bone age assessment: the applicability of the Greulich-Pyle method in Eastern Turkish children. *J Forensic Sci* 57: 679-682.

Cardoso HF (2008) Epiphyseal union at the innominate and lower limb in a modern Portuguese skeletal sample, and age estimation in adolescent and young adult male and female skeletons. *Am J Phys Anthropol* 135: 161-170.

Carmichael OT, Aizenstein HA, Davis SW, Becker JT, Thompson PM, Civid Meltzer CC, Lui Y (2005) Atlas-based hippocampus segmentation in Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *Neuroimage* 27: 979-990.

Castriota-Sanderbeg A, De Micheli V, Scarale MG, Bonetti MG, Cammisa M (1996) Precision of sonographic measurement of articular cartilage: inter- and intraobserver analysis. *Skeletal Radiol* 25: 545-549.

Castriota-Sanderbeg A, Sacco MC, Emberti-Gialloreti L, Fraracci L (1998) Skeletal age assessment in children and young adults: comparison between a newly developed sonographic method and conventional methods. *Skeletal Radiol* 27: 271-277.

Charles YP, Dimeglio A, Canavese F, Daures JP (2007) Skeletal age assessment from the olecranon for idiopathic scoliosis at Risser grade 0. *J Bone Joint Surg* 89: 2737-2744.

Chaumoître K, Colavolpe N, Sayegh-Martin Y, Pernoud N, Dutour O, Panuel M (2006) Fiabilité de la détermination de l'âge osseux par la méthode de Sauvegrain et Nahum. *J Radiol* 87: 1679-1682.

Cherbuin N, Anstey KJ, Réglade-Melsin C, Sachdev PS (2009) In vivo hippocampal measurement and memory: comparison of manual tracing and automated segmentation in a large community-based sample. *PLoS ONE* 4: e5265.

Chupin M, Gérardin E, Cuingnet R, Boutet C, Lemieux L, Lehericy S, Benali H, Garnero L, Colliot O, and the Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (2009) Fully automatic

hippocampus segmentation and classification in Alzheimer's disease and mild cognitive impairment applied from data on ADNI. *Hippocampus* 19: 579-587.

Chupin M, Gérardin E, Cuingnet R, Bardinet E, Dormont D, Colliot O, Garnero L (2011) Segmentation ciblée d'images IRM et maladie d'Alzheimer. *IRBM* 32: 19-26.

Cohen J (1960) A coefficient of agreement for normal scales. *Educ Psychol Meas* 20: 37-46.

Cohen M, DuBois R, Zeineh M (2000) Rapid and effective correction of RF inhomogeneity of high field magnetic resonance imaging. *Hum Brain Mapp* 10: 204-211.

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 (en ligne). Disponible sur :<<http://www.afmjf.fr/Methodes-de-determination-de-l-age.html>> (consulté le 25/05/2013).

Constantinides C, Roullot E, Lefort M, Frouin F (2012) Fully automated segmentation of the left ventricle applied to cine MR images: description and results on a database of 45 subjects. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2012: 3207-3210.

Coqueugnot H, Weaver TD, Houet F (2010) A probabilistic approach to age estimation from infracranial sequences of maturation. *Am J Phys Anthropol* 142: 655-664.

Cope Z (1920) Fusion-lines of bones. *J Anat* 55: 36-37.

Crowder C, Austin D (2005) Age ranges of epiphyseal fusion in the distal tibia and fibula of contemporary males and females. *J Forensic Sci* 50: 1001-1007.

Cuingnet R, Gerardin E, Tessieras J, Auzias G, Lehericy S, Habert MO, Chupin M, Benali H, Colliot O, The Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (2011) Automatic classification of patients with Alzheimer's disease from structural MRI : A comparison of ten methods using the ADNI database. *Neuroimage* 56: 766-781.

Cunha E, Baccino E, Martrille L, Ramsthaler F, Prieto J, Schuliar Y, Lynnerup N, Cattaneo C (2009) The problem of aging human remains and living individuals: A review. *Forensic Sci Int* 193: 1-13.

Danivas V, Kalmady SV, Venkatasubramanian G, Gangadhar BN (2013) Thalamic shape abnormalities in antipsychotic naïve schizophrenia. *Indian J Psychol Med* 35: 34-38.

Davies CM, Hackman L, Black S (2013) The utility of the proximal epiphysis of the fifth metatarsal in age estimation. *J Forensic Sci* 58: 436-442.

Davies C, Hackman L, Black S (2014) The persistence of epiphyseal scars in the adult tibia. *Int J Legal Med* 128: 335-343.

Davies C, Hackman L, Black S (2013) A test of the Whitaker scoring system for estimating age from the bones of the foot. *Int J Legal Med* 127: 481-489.

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.

Dedouit F. Imagerie en coupe et anthropobiologie : applications médico-légales pour la détermination de l'âge. (en ligne) Thèse anthropobiologie. Toulouse : Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2009, 249 p. Disponible sur : <[http://thesesups.ups-tlse.fr/523/1/Dedouit\\_Fabrice.pdf](http://thesesups.ups-tlse.fr/523/1/Dedouit_Fabrice.pdf)> (consulté le 12/11/2012).

Dedouit F, Auriol J, Rousseau H, Rougé D, Crubézy E, Telmon N (2012) Age assessment by magnetic resonance imaging of the knee: A preliminary study. *Forensic Sci Int* 217: 232.e1-232.e7.

Demirjian A, Goldstein H, Tanner JM (1973) A new system of dental age assessment. *Hum Biol* 45: 221-227.

DiGangi E, Bethard J, Kimmerle E, Konisberg L (2009) A new method for estimating age-at-death from the first rib. *Am J Phys Anthropol* 138: 164-176.

Dimeglio A, Charles YP, Daures JP, De Rosa V, Kaboré B (2005) Accuracy of the Sauvegrain method in determining skeletal age during puberty. *J Bone Joint Surg* 87A: 1689-1696.

Direction de la Protection Judiciaire de la Jeunesse (2013). Les mineurs isolés étrangers. La situation en France. Données générales. Perspectives. (en ligne) Disponible sur : < <http://infomie.net/spip.php?rubrique269> > (consulté le 20/07/2013).

Dvorak J, George J, Junge A, Hodler J (2007a) 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 (2007b) Application of MRI of the wrist for age determination in international U-17 soccer competition. *Br J Sports Med* 41: 497-500.

Dvorak J (2009) Detecting over-age players using wrist MRI: science partnering with sport to ensure fair play. *Br J Sports Med* 43: 884-885.

Efron B (1979) Bootstrap methods: another look at the Jackknife. *Ann Stat* 7: 1-26.

Fedorov A, Beichel R, Kalpathy-Cramer J, Finet J, Fillion-Robin JC, Pujol S, Bauer C, Jennings D, Fennessy F, Sonka M, Buatti J, Aylward S, Miller JV, Pieper S, Kikinis R (2012) 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Mag Reson Imaging* 30: 1323-1341.

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.

Ferrante L, Cameriere R (2009) Statistical methods to assess the reliability of measurements in the procedures for forensic age estimation. *Int J Legal Med* 123: 277-283.

Fischl B, Salat DH, Busa E, Albert M, Dieterich M, Haselgrove C, van der Kouwe A, Killiany R, Kennedy D, Klaveness S, Montillo A, Makris N, Rosen B, Dale AM (2002) Whole brain segmentation: automated labeling of neuroanatomical structures in the human brain. *Neuron* 33: 341-355.

Flecker H (1932) Roentgenographic observations of the times of appearance of epiphyses and their fusions with the diaphyses. *J Anat* 67: 118-164.

Fox J (2002) Bootstrapping regression models. Appendix to An R and S-PLUS Companion to Applied Regression. (en ligne) Disponible sur : < <http://cran.r-project.org/doc/contrib/Fox-Companion/appendix-bootstrapping.pdf> > (consulté le 16/07/2013).

Garcia-Fernandez P, Torre H, Flores M, Rea J (1998) The cervical vertebrae as maturational indicators. *J Clin Orthod* 32: 221-225.

Galstaun G (1937) A study of ossification as observed in Indian subjects. *Indian J Med Res* 25: 267-324.

Garamendi PM, Landa MI, Ballesteros J, Solano MA (2005) Reliability of the methods applied to assess age minority in living subjects around 18 years old. A survey on a Moroccan origin population. *Forensic Sci Int* 154: 3-12.

Garamendi PM, Landa MI, Botella MC, Aleman I (2011) Forensic age estimation on digital X-ray images : medial epiphyses of the clavicle and first rib ossification in relation to chronological age. *J Forensic Sci* 56: S3-S12.

George J, Nagendran J, Azmi K (2012) Comparison study of growth plate fusion using MRI versus plain radiographs as used in age determination for exclusion of overaged football players. *Br J Sports Med* 46: 273-278.

Gilli G (1996) The assessment of skeletal maturation. *Horm Res* 45 Suppl 2: 49-52.

Gilsanz V, Ratib O (2005) Hand bone age: a digital atlas of skeletal maturity. Springer, Berlin.

Gök S, Erölcer N, Özen C (1985) Age determination in forensic medicine. TC, Adalet Bakanligi Adli Tip Kurumu Yayinlari, Istanbul.

Goldberg MS, Poitras B, Mayo NE, Labelle H, Bourassa R, Cloutier R (1988) Observer variation in assessing spinal curvature and skeletal development in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* 13: 1371-1377.

Gonsior M, Ramstahler F, Gehl A, Verhoff MA (2013) Morphology as a cause for different classification of the ossification stage of the medial clavicular epiphysis by ultrasound, computed tomography, and macroscopy. *Int J Legal Med* 127: 1013-1021.

Godde K, Hens SM (2012) Age-at-death estimation in an Italian historical sample: a test of the Suchey-Brooks and transition analysis method. *Am J Phys Anthropol* 149: 259-265.

Gray's Anatomy (1901) *Anatomy descriptive and surgical*. 15th Ed, Longmans.

Greulich WW, Pyle SI (1959) *Radiographic atlas of skeletal development of the hand and wrist*. Stanford University Press, California.

Groell R, Lindbichler F, Riepl T, Gherra L, Roposch A, Fötter R (1999) The reliability of bone age determination in central European children using the Greulich and Pyle method. *Br J Radiol* 72: 461-464.

Habes M, Schiller T, Rosenberg C, Burchardt M, Hoffmann W (2013) Automated prostate segmentation in whole-body MRI scans for epidemiological studies. *Phys Med Biol* 58: 5899-5915.

Hackman L, Black S (2012) Does mirror imaging a radiograph affect reliability of age assessment using the Greulich and Pyle atlas? *J Forensic Sci* 57: 1276-1280.

Hackman L, Black S (2013a) The reliability of the Greulich and Pyle Atlas when applied to a modern Scottish population. *J Forensic Sci* 58: 114-119.

Hackman L, Black S (2013b) Age estimation from radiographic images of the knee. *J Forensic Sci* 58: 732-737.

Hackman L, Davies CM, Black S (2013c) Age estimation using foot radiographs from a modern Scottish population. *J Forensic Sci* 58: S146-S150.

Hartigan JA (1983) *Bayes theory*. Springer, New York.

Hassel B, Farman AG (1995) Skeletal maturation evaluation using cervical vertebrae. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 107: 58-66.

Hillewig E, De Tobel J, Cuche O, Vandemaele P, Piette M, Verstraete K (2011) Magnetic resonance imaging of the medial extremity of the clavicle in forensic bone age determination: a new four-minute approach. *Eur Radiol* 21: 757-767.

Hillewig E, Degroote J, Van der Paelt T, Visscher A, Vandemaele P, Lutin B, D'Hooghe L, Vandriessche V, Piette M, Verstraete K (2013) Magnetic resonance imaging of the sternal extremity of the clavicle in forensic age estimation : towards more sound age estimates. *Int J Legal Med* 127: 677-689.

Hoerr NL, Pyle SI, Francis CC (1962) *Radiographic atlas of skeletal development of the foot and ankle – a standard of reference*. Thomas, Springfield, IL.

Hoppa RD, Vaupel JW (2002) *Paleodemography. Age distributions from skeletal samples*. Cambridge University Press, Cambridge.

Hou Z (2006) A review on MR image intensity inhomogeneity correction. *Int J Biomed Imag* 2006: 1-11.

Huber C (2006) Une méthode de rééchantillonnage: le bootstrap (en ligne) Disponible sur : < [http://www.biomedicale.univ-paris5.fr/survie/enseign/cours\\_bootstrap\\_sansi.pdf](http://www.biomedicale.univ-paris5.fr/survie/enseign/cours_bootstrap_sansi.pdf) > (consulté le 16/07/2013).

Image J. Version 1.41 for windows. <https://rsb.info.nih.gov/ij/>.

Iscan MY (1989) *Age markers in the human skeleton*. Thomas, Springfield, IL.

Ivleva EI, Bidesi AS, Thomas BP, Meda SA, Francis A, Moates AF, Witte B, Keshavan MS, Tamminga CA (2012) Brain gray matter phenotypes across the psychosis dimension. *Psychiatry Res* 204: 13-24.

Jatzko A, Rothenhöfer S, Schmitt A, Gaser C, Demiralpca T, Weber-Fahr W, Wessa M, Magnotta V, Braus DF (2006) Hippocampal volume in chronic posttraumatic stress disorder (PTSD):MRI study using two different evaluation methods. *J Affect Disord* 94: 121-126.

Jit I, Kulkarni M (1976) Times appearance and fusion of epiphysis at the medial end of the clavicle. *Indian J Med Res* 64: 773-782.

Jopp E, Schröder I, Maas R, Adam G, Püschel K (2010) Proximale tibiaepiphyse im magnetresonanztomogramm. Neue Möglichkeit zur Altersbestimmung bei Lebenden? *Rechtsmedizin* 20: 464-468.

Jurik AG, Jensen LC, Hansen J (1996) Radiation dose by spiral CT and conventional tomography of the sternoclavicular joints and the manubrium sterni. *Skeletal Radiol* 25: 467-470.

Kamina P (2006) *Anatomie Clinique. Tome 1-Anatomie générale, membres.* Eds Maloine.

Kaplowitz P, Srinivasan S, He J, McCarter R, Hayeri MR, Sze R (2011) Comparison of bone age readings by pediatric endocrinologists and pediatric radiologists using two bone age atlases. *Pediatr Radiol* 41: 690-693.

Kastler B, Vetter D, Patay Z, Germain P (2006) *Comprendre l'IRM. Manuel d'auto-apprentissage.* Paris: Masson.

Kelemen A, Szekely G, Gerig G (1999) Elastic model-based segmentation of 3-D neuroradiological data sets. *IEEE Trans Med Imaging* 18: 828-839.

Kellinghaus M, Schulz R, Vieth V, Schmidt S, Schmeling A (2010a) Forensic age estimation in living subjects based on the ossification status of the medial clavicular epiphysis as revealed by thin-slice multidetector computed tomography. *Int J Legal Med* 124: 149-154.

Kellinghaus M, Schulz R, Vieth V, Schmidt S, Pfeiffer H, Schmeling A (2010b) Enhanced possibilities to make statements on the ossification status of the medial clavicular epiphysis using an amplified staging scheme in evaluating thin-slice CT scans. *Int J Legal Med* 124: 321-325.

Khan AR, Wang L, Beg MF (2008) FreeSurfer-initiated fully-automated subcortical brain segmentation in MRI using large deformation diffeomorphic metric mapping. *NeuroImage* 41: 735-746.

Khan KM, Miller BS, Hoggard E, Somani A, Sarafoglou K (2009) Application of ultrasound for bone age estimation in clinical practice. *J Pediatr* 154: 243-247.

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: 558-568.

Konisberg L, Herrmann N, Wescott D, Kimmerle E (2008) Estimation and evidence in forensic anthropology: age-at-death. *J Forensic Sci* 53: 541-557.

Kotwicky T (2008) Improved accuracy in Risser sign grading with lateral spinal radiography. *Eur Spine J* 17: 1676-1685.

Kouani A, El Jamali S, Talbi M (2007) Analyse en composantes principales. Une methode factorielle pour traiter les données didactiques. (en ligne) Disponible sur: < <http://www.radisma.info/docannexe.php?id=522> > (consulté le 16/07/2013).

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.

Langley-Shirley N, Jantz R (2010) A Bayesian approach to age estimation in modern Americans from the clavicle. *J Forensic Sci* 55: 571-583.

Laor T, Jaramillo D (2009) MR Imaging insights into skeletal maturation: what is normal? *Radiology* 250: 28-38.

Lee C, Huh S, Ketter TA, Unser M (1998) Unsupervised connectivity-based thresholding segmentation of midsagittal brain MR images. *Comput Biol Med* 28: 309-338.

Leonetti G, Piercecchi MD, Vareilles F, Cianfarani F (1995) La détermination de l'âge chez le vivant. Intérêt et méthodes. *J Med Leg Droit Med* 38: 345-357.

Loder RT, Estle DT, Morrison K, Eggleston D, Fish DN, Greenfield ML, Guire KE (1993) Applicability of Greulich and Pyle skeletal age standards to black and white children of today. *Am J Dis Child* 147: 1329-1333.

Lötjönen J, Reissman PJ, Magnin IE, Katila T (1999) Model extraction from magnetic resonance volume data using the deformable pyramid. *Med Image Anal* 3: 387-406.

Levebvre J, Koifman A (1956) Etude de l'apparition des points osseux secondaires et détermination de l'âge osseux. *Arch Fr Pediatr* 13: 1101-1105.

Lucy D, Aykroyd RG, Pollard AM, Solheim T (1996) A Bayesian approach to adult human age estimation from dental observations by Johanson's age changes. *J Forensic Sci* 41: 189-194.

Lynnerup N, Belard E, Buch-Olsen K, Sejrsen B, Damgaard-Pedersen K (2008) Intra- and interobserver error of the Greulich-Pyle method as used on a Danish forensic sample. *Forensic Sci Int* 179: 242.e1-242.e6.

Maniar B (1987) Skeletal maturity in Indian children. *Ind J Pediatr* 54: 295-302.

Manjon JV, Lull JJ, Carbonell-Caballero J, Garcia-Marti G, Marti-Bonmati L, Robles M (2007) A nonparametric MRI inhomogeneity correction method. *Med Image Anal* 11: 336-345.

Marieb EN (1999) Anatomie et physiologie humaines. De Boeck Université:Canada.

McDonald CR, Hagler DJ, Ahmadi ME, Tecoma E, Iragui V, Dale AM, Halgren E (2008) Subcortical and cerebellar atrophy in mesial temporal lobe epilepsy revealed by automatic segmentation. *Epilepsy Res* 79: 130-138.

McKern TW, Stewart TD (1957) Skeletal age changes in young American males analyzed from the standpoint of age determination. Technical Report EP-45. Environmental Protection Research Division, HQ=Quartermaster Research and Development Command, United States Army, Natick, MA.

Meijerman L, Maat GJR, Schulz R, Schmeling A (2007) Variables affecting the probability of complete fusion of the medial clavicular epiphysis. *Int J Leg Med* 121: 463-468.

Mentzel HJ, Vilser C, Eulenstein M, Schwartz T, Vogt S, Böttcher J, Yaniv I, Tsoref L, Kauf E, Kaiser WA (2005) Assessment of skeletal age at the wrist in children with a new ultrasound device. *Pediatr Radiol* 35: 429-433.

Michelson N (1934) The calcification of the first costal cartilage among Whites and Negroes. *Hum Biol* 6: 543-557.

Milner GR, Boldsen JL (2012) Transition analysis: a validation study with known-age modern American skeletons. *Am J Phys Anthropol* 148: 90-110.

Mincer HH, Harris EF, Berryman HE (1993) The A.B.F.O. study of third molar development and its use as an estimator of chronological age. *J Forensic Sci* 38: 379-390.

Ministère de la Justice. Juridictions pour mineurs (en ligne). Disponible sur: <http://www.justice.gouv.fr/justice-penale-11330/la-competence-des-juridictions-11331/juridictions-pour-mineurs-16560.html> (consulté le 02/07/2013).

Ministère de la Justice. Mineurs détenus. (en ligne) Disponible sur: <http://www.justice.gouv.fr/prison-et-reinsertion-10036/les-personnes-prises-en-charge-10038/les-mineurs-detenus-12008.html> (consulté le 02/07/2013).

Ministère de la Justice. Circulaire relative aux modalités de prise en charge des jeunes isolés étrangers : dispositif national de mise à l'abri, d'évaluation et d'orientation. (en ligne) Bulletin Officiel du Ministère de la Justice, N°2013-06 du 28 juin 2013. Disponible sur :

< [http://www.textes.justice.gouv.fr/art\\_pix/JUSF1314192C.pdf](http://www.textes.justice.gouv.fr/art_pix/JUSF1314192C.pdf) > (consulté le 02/07/2013).

Mokrane F, Dedouit F, Gellée S, Sans N, Rousseau H, Rougé D, Telmon N (2013) Sexual dimorphism of the fetal ilium: A 3D geometric morphometric approach with multislice computed tomography. *J Forensic Sci* 58: 851-858.

Mora S, Boechat MI, Pietka E, Huang HK, Gilsanz V (2001) Skeletal age determination in children of European and African descent : applicability of the Greulich and Pyle standards. *Pediatr Res* 50: 624-628.

Moradi M, Sirous M, Morovatti P (2012) The reliability of skeletal age determination in an Iranian sample using Greulich and Pyle method. *Forensic Sci Int* 223: 372.e1-372.e4.

Morey RA, Petty CM, Xu Y, Hayes JP, Ryan Wagner H, Lewis DV, LaBar KS, Styner M, McCarthy G (2009) A comparison of automated segmentation and manual tracing for quantifying hippocampal and amygdala volumes. *NeuroImage* 45: 855-866.

Moskovitch G, Dedouit F, Braga J, Rougé D, Rousseau H, Telmon N (2010) Multislice computed tomography of the first rib: a useful technique for bone age assessment. *J Forensic Sci* 55: 865-870.

Mühler M, Schulz R, Schmidt S, Schmeling A, Reisinger W (2006) The influence of slice thickness on assessment of clavicle ossification in forensic age diagnostics. *Int J Leg Med* 120: 15-17.

Nemade KS, Kamdi NY, Parchand MP (2010) Ages of epiphyseal union around wrist joint – a radiological study. *J Anat Soc India* 59: 205-210.

O'Connor JE, Bogue C, Spence LD, Last J (2008) A method to establish the relationship between chronological age and stage of union from radiographic assessment of epiphyseal fusion at the knee: an Irish population study. *J Anat* 212: 198-209.

Ogden JA, McCarthy SM (1983) Radiology of postnatal skeletal development. VIII. Distal tibia and fibula. *Skeletal Radiol* 10: 209-220.

Olze A, Schmeling A, Taniguchi M, Maeda H, van Niekerk P, Wernecke K, Geserick G (2004) Forensic age estimation in living subjects: the ethnic factor in wisdom tooth mineralization. *Int J Legal Med* 118: 170-173.

Olze A, van Niekerk P, Ishikawa T, Zhu BL, Schulz R, Maeda H, Schmeling A (2007) Comparative study on the effect of ethnicity on wisdom tooth eruption. *Int J Legal Med* 121: 445-448.

Ontell FK, Ivanovic M, Ablin DS, Barlow R (1996) Bone age in children of diverse ethnicity. *AJR Am J Roentgenol* 167: 1395-1398.

Ordonnance n°45-174 du 2 février 1945 relative à l'enfance délinquante, modifié par la loi n°2011-392 du 14 avril 2011.

Ozer S, Langer DL, Haider MA, van der Kwast TH, Evans AJ, Yang Y, Wernick MN, Yetik IS (2010) Supervised and unsupervised methods for prostate cancer segmentation with multispectral MRI. *Med Phys* 37: 1873-1883.

Patil ST, Parchand MP, Meshram MM, Kamdi NY (2012) Applicability of Greulich and Pyle skeletal age standards to Indian children. *Forensic Sci Int* 216: 200.e1-200.e4.

Patond SK, Tirpude BH, Murkey PN, Nagrale N, Surwade V (2012) Age determination from epiphyseal union of bones at ankle joint in girls of Central India. *J Forensic Med Sci Law* 21: 1-5.

Pechnikova M, Gibelli D, De Angelis D, De Santis F, Cattaneo C (2011) The "blind age assessment": applicability of Greulich and Pyle, Demirjian and Mincer aging methods to a population of unknown ethnic origin. *Radiol Med* 116: 1105-1114.

Powell S, Magnotta VA, Johnson H, Jammalamadaka VK, Pierson R, Andreasen NC (2008) Registration and machine learning-based automated segmentation of subcortical and cerebellar brain structures. *NeuroImage* 39: 238-247.

Prince D, Kimmerle E, Konisberg L (2008a) A Bayesian approach to estimate skeletal age-at-death utilizing dental wear. *J Forensic Sci* 53: 588-593.

Prince D, Konisberg L (2008b) New formulae for estimating age-at-death in the Balkans utilizing Lamendin's dental technique and Bayesian analysis. *J Forensic Sci* 53: 578-587.

Pyle SI, Hoerr NL (1955) Radiographic atlas of skeletal development of the knee. A Standard of Reference. Thomas Springfield IL.

Quirnbach F, Ramsthaler F, Verhoff MA (2009) Evaluation of the ossification of the medial clavicular epiphysis with a digital ultrasonic system to determine the age threshold of 21 years. *Int J Legal Med* 123: 241-245.

Raul JS (2010) Détermination de l'âge. In : *Traité de médecine légale et de droit de la santé à l'usage des professionnels de la santé et de la justice*. Vuibert.

Ramsthaler F, Proschek P, Betz W, Verhoff MA (2009) How reliable are the risk estimates for X-ray examinations in forensic age estimations? A safety update. *Int J Legal Med* 123: 199-204.

R Development Core Team (2008) R : a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN: 3-9000051-07-0 <http://www.R-project.org>.

Reem J, Carney J, Stanley M, Cassidy J (2009) Risser sign inter-rater and intra-rater agreement : is the Risser sign reliable ? *Skeletal Radiol* 38: 371-375.

Risser JC (1958) The iliac apophysis: an invaluable sign in the management of scoliosis. *Clin Orthop* 11: 111-119.

Ritz-Timme S, Cattaneo C, Collins MJ, Waite ER, Schütz HW, Kaatsch HJ, Borrman HIM (2000) Age estimation: The state of the art in relation to the specific demands of forensic practice. *Int J Legal Med* 113: 129-136.

Roche AF, Chumlea WC, Thissen D (1988) Assessing the skeletal maturity of the hand-wrist: Fels method. Thomas, Springfield.

Santoro V, De Donno A, Marrone M, Campobasso CP, Introna F (2009) Forensic age estimation of living individuals: a retrospective analysis. *Forensic Sci Int* 193: 129.e1-129.e4.

Santoro V, Roca R, De Donno A, Fiandaca C, Pinto G, Tafuri S, Introna F (2012) Applicability of Greulich and Pyle and Demirijian aging methods to a sample of Italian population. *Forensic Sci Int* 221: 153.e1-153.e5.

Santos C, Ferreira M, Alves FC, Cunha E (2011) Comparative study of Greulich and Pyle Atlas and Maturus 4.0 program for age estimation in a Portuguese sample. *Forensic Sci Int* 212: 276.e1-e7.

Sauvegrain J, Nahum H, Bronstein H (1962) Etude de la maturation osseuse du coude. *Ann Radiol* 5: 542-550.

Scheuer L, Black SM (2000) *Developmental juvenile osteology*. Elsevier/Academic, Amsterdam.

Schiltz K, Witzel J, Northoff G, Zierhut K, Gubka U, Fellmann H, Kauffmann J, Tempelmann C, Wiebking C, Bogerts B (2007) Brain pathology in pedophilic offenders: evidence of volume reduction in the right amygdala and related diencephalic structures. *Arch Gen Psychiatry* 64: 737-746.

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, Olze A, Reisinger W, Geserick G (2001) Age estimation of living people undergoing criminal proceedings. *Lancet* 358: 89-90.

Schmeling A, Olze A, Reisinger W, Rösing FW, Geserick G (2003a) Forensic age diagnostics of living individuals in criminal proceedings. *HOMO* 54: 162-169.

Schmeling A, Olze A, Reisinger W, König M, Geserick G (2003b) Statistical analysis and verification of forensic age estimation of living persons in the Institute of Legal Medicine of the Berlin University Hospital Charité. *Leg Med* 5: S367-S371.

Schmeling A, Olze A, Reisinger W, Geserick G (2004a) Forensic age diagnostics of living people undergoing criminal proceedings. *Forensic Sci Int* 144: 243-245.

Schmeling A, Schulz R, Reisinger W, Mühler M, Wernecke KD, Geserick G (2004b) Studies on the time frame for ossification of the medial clavicular epiphyseal cartilage in conventional radiography. *Int J Leg Med* 118: 5-8.

Schmeling A, Olze A, Reisinger W, Geserick G (2005) Forensic age estimation and ethnicity. *Legal Med* 7: 134-137.

Schmeling A, Baumann U, Schmidt S, Wernecke KD, Reisinger W (2006a) Reference data for the Thiemann-Nitz method of assessing skeletal age for the purpose of forensic age estimation. *Int J Legal Med* 120: 1-4.

Schmeling A, Schulz R, Danner B, Rösing FW (2006b) The impact of economic progress and modernization in medicine on the ossification of hand and wrist. *Int J Legal Med* 120: 121-126.

Schmeling A, Reisinger W, Geserick G, Olze A (2006c) Age estimation of unaccompanied minors. Part I. General considerations. *Forensic Sci Int* 159S: S61-S64.

Schmeling A, Geserick G, Reisinger W, Olze A (2007) Age estimation. *Forensic Sci Int* 165: 178-181.

Schmeling A, Grundmann C, Fuhrmann A, Kaatsch HJ, Knell B, Ramsthaler F, Reisinger W, Riepert T, Ritz-Timme S, Rösing FW, Rötzscher K, Geserick G (2008) Criteria for age estimation in living individuals. *Int J Legal Med* 122: 457-460.

Schmidt S, Koch B, Schulz R, Reisinger W, Schmeling A (2007a) Comparative analysis of the applicability of the skeletal age determination of Greulich-Pyle and Thiemann-Nitz for forensic age estimation in living subjects. *Int J Legal Med* 121: 293-296.

Schmidt S, Mühler M, Schmeling A, Reisinger W, Schulz R (2007b) Magnetic resonance imaging of the clavicular ossification. *Int J Legal Med* 121: 321-324.

Schmidt S, Koch B, Schulz R, Reisinger W, Schmeling A (2008a) Studies in use of the Greulich-Pyle skeletal age method to assess criminal liability. *Leg Med* 10: 190-195.

Schmidt S, Nitz I, Schulz R, Schmeling A (2008b) Applicability of the skeletal age determination method of Tanner and Whitehouse for forensic age diagnostics. *Int J Legal Med* 122: 309-314.

Schmidt S, Schmeling A, Zwiesigk P, Pfeiffer H, Schulz R (2011) Sonographic evaluation of apophyseal ossification of the iliac crest in forensic age diagnostics in living individuals. *Int J Legal Med* 125: 271-276.

Schmidt S, Schiborr M, Pfeiffer H, Schmeling A, Schulz R (2013) Age dependence of epiphyseal ossification of the distal radius in ultrasound diagnostics. *Int J Legal Med* 127: 831-838.

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 (2008a) Radiographic staging of ossification of the medial clavicular epiphysis. *Int J Legal Med* 122: 55-58.

Schulz R, Zwiesigk P, Schiborr M, Schmidt S, Schmeling A (2008b) Ultrasound studies on the time course of clavicular ossification. *Int J Legal Med* 122: 163-167.

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.

Seedat AK, Forsberg CD (2005) An evaluation of the third cervical vertebra (C3) as a growth indicator in Black subjects. *SADJ* 60: 158-160.

Sempé M, Pavia C (1979) Atlas de la maturation squelettique du poignet, de la main et du coude. Edition S.I.M.E.P, Lyon-Villeurbanne. Masson, Paris.

Serinelli S, Panetta V, Pasqualetti P, Marchetti D (2011) Accuracy of three age determination X-ray methods on the left hand-wrist : a systematic review and meta-analysis. *Leg Med* 13: 120-133.

Service des Affaires Européennes (1999). La responsabilité pénale des mineurs. Note de Synthèse. (en ligne) Disponible sur : <<http://www.senat.fr/lc/lc52/lc52.html>> (consulté le 03/07/2013).

Service des Etudes Juridiques (2007). La majorité pénale. Etude de législation comparée n°173. (en ligne). Disponible sur : <<http://www.senat.fr/lc/lc173/lc1730.html>> (consulté le 03/07/2013).

Shattuck D, Sandor-Leahy S, Schaper K, Rottenberg D, Leahy R (2001) Magnetic resonance image tissue classification using a partial volume model. *Neuroimage* 13: 856-876.

Shen D, Moffat S, Resnick SM, Davatzikos C (2002) Measuring size and shape of the hippocampus in MR images using a deformable shape model. *Neuroimage* 15: 422-434.

Shuren N, Kasser JR, Emans JB, Rand F (1992). Reevaluation of the use of the Risser sign in idiopathic scoliosis. *Spine* 17: 359-361.

Singh J, Chavali KH (2011) Age estimation from clavicular epiphyseal union sequencing in a Northwest Indian population of the Chandigarh region. *J Forensic Leg Med* 18: 82-87.

Sled JG, Zijdenbos AP, Evans AC (1998) A nonparametric method for automatic correction of intensity nonuniformity in MRI data. *IEEE Trans Med Imaging* 17: 87-97.

Stevenson PH (1924) Age order of epiphyseal union in man. *Am J Phys Anthropol* 7: 53-93.

Tae W, Kim S, Lee K, Nam EC, Kim K (2008) Validation of hippocampal volumes measured using a manual method and two automated methods (FreeSurfer and IBASPM) in chronic major depressive disorder. *Neuroradiology* 50: 569-581.

Tangmose S, Jensen KE, Lynnerup N (2013) Comparative study on developmental stages of the clavicle by post-mortem MRI and CT imaging. *J Forensic Radiol and Imag* 1: 102-106.

Tanner JM (1962a) *Growth at adolescence*, Blackwell Scientific Publications, Oxford.

Tanner JM, Whitehouse RH, Marshall WA, Healy MJR (1962b) A new system for estimating skeletal maturity from the hand and wrist, with standards derived from a study of 2600 healthy british children. Paris: Centre International de l'enfance.

Tanner JM (1975) *Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW2 method)*. London; New York: Academic Press.

Tanner LM, Healy JR, Goldstein H, Cameron N (2001) *Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW3 method)*. Saunders.

Terada Y, Kono S, Tamada D, Uchiumi T, Kose K, Miyagi R, Yamabe E, Yoshioka H (2013) Skeletal age assessment in children using an open compact MRI system. *Magn Reson Med* 69: 1697-1702.

Tersigni-Tarrant MT, Shirley NR (2012) *Forensic anthropology: an introduction*. CRC

Thaler M, Kaufmann G, Steingruber I, Mayr E, Liebensteiner M, Bach C (2008) Radiographic versus ultrasound evaluation of the Risser Grade in adolescent idiopathic scoliosis: a prospective study of 46 patients. *Eur Spine J* 17: 1251-1255.

Thevissen PW, Fieuws S, Willems G (2009) Human dental age estimation using third molar developmental stages : does a Bayesian approach outperform regression models to discriminate between juveniles and adults? *Int J Legal Med* 124: 35-42.

Thevissen PW, Alqerban A, Asaumi J, Kahveci F, Kaur J, Kim YK, Pittayapat P, Van Vlierberghe M, Zhang Y, Fieuws S, Willems G (2010) Human dental age estimation using third molar developmental stages: accuracy of age predictions not using country specific information. *Forensic Sci Int* 201: 106-111.

Thiemann HH, Nitz I (1991) *Röntgenatlas der normalen Hand im Kindersalter*. Thieme, Leipzig.

Tisè M, Mazzarini L, Fabrizzi G, Ferrante L, Giorgetti R, Tagliabracchi A (2011) Applicability of Greulich and Pyle method for age assessment in forensic practice on an Italian sample. *Int J Legal Med* 125: 411-416.

Todd TW, D'Errico J (1928) The clavicular epiphyses. *Am J Anat* 41: 25-50.

Tustison NJ, Avants BB, Cook PA, Zheng Y, Egan A, Yushkevich PA, Gee JC (2010) N4ITK: Improved N3 bias correction. *IEEE Trans Med Imaging* 29: 1310-1320.

Uysal T, Ramoglu SI, Basciftci FA, Sari Z (2006) Chronological age and skeletal maturation of the cervical vertebrae and hand-wrist: is there a relationship? *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 130: 622-628.

Van Lenthe FJ, Kemper HCG, Van Mechelen W (1998) Skeletal maturation in adolescence: a comparison between the Tanner-Whitehouse II and the Fels method. *Eur J Pediatr* 157: 798-801.

Van Rijn RR, Lequin MH, Robben SG, Hop WC, Van Kuijk (2001) Is the Greulich and Pyle atlas still valid for Dutch Caucasian children today? *Pediatr Radiol* 31: 748-752.

Veschi S, Facchini F (2002) Recherches sur la collection d'enfants et d'adolescents d'âge et de sexe connus de Bologne (Italie) : diagnose de l'âge sur la base du degré de maturation osseuse. *Bull Mem Soc Anthropol Paris* 14: 263-294.

Vovk U, Pernus F, Likar B (2007) A review of methods for correction of intensity inhomogeneity in MRI. *IEEE Trans Med Imag* 2007: 405-421.

Wagner UA, Diedrich V, Schmitt O (1995) Determination of skeletal maturity by ultrasound: a preliminary report. *Skeletal Radiol* 24: 417-420.

Wang WW, Xia CW, Zhu F, Zhu FF, Wang B, Wang SF, Yeung BH, Lee SK, Cheng JC, Qiu Y (2009) Correlation of Risser sign, radiographs of hand and wrist with the histological grade of iliac crest apophysis in girls with adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)* 34: 1849-1854.

Webb PO, Suchey JM (1985) Epiphyseal union of anterior iliac crest and medial clavicle in a modern multiracial sample of American males and females. *Am J Phys Anthropol* 68: 457-466.

Weiss E, DeSilva J, Zipfel B (2012) Brief communication: radiographic study of metatarsal one basal epiphyseal fusion: a note of caution on age determination. *Am J Phys Anthropol* 147: 489-492.

Whitaker JM, Rousseau L, Williams T, Rowan RA, Hartwig WC (2012) Scoring system for estimating age in the foot skeleton. *Am J Phys Anthropol* 118: 385-392.

Wittschieber D, Schmeling A, Schmidt S, Heindel W, Pfeiffer H, Vieth V (2013a) The Risser sign for forensic age estimation in living individuals: a study of 643 pelvic radiographs. *Forensic Sci Med Pathol* 9: 36-43.

Wittschieber D, Vieth V, Domnick C, Pfeiffer H, Schmeling A (2013b) The iliac crest in forensic age diagnostics: evaluation of the apophyseal ossification in conventional radiography. *Int J Legal Med* 127: 473-479.

Wittschieber D, Vieth V, Wierer T, Pfeiffer H, Schmeling A (2013c) Cameriere's approach modified for pelvic radiographs: a novel method to assess apophyseal iliac crest ossification for the purpose of forensic age diagnostics. *Int J Legal Med* 127: 825-829.

Wu S, Weinstein SP, Conant EF, Schnall MD, Kontos D (2013) Automated chest wall line detection for whole brain segmentation in sagittal breast MR images. *Med Phys* 40:042301. Doi: 10.1118/1.4793255.

Zhuge Y, Udupa JK (2009) Intensity standardization simplifies brain MR images segmentation. *Comput Vis Image Underst* 113: 1095-1103.

Zydek L, Barzdo M, Meissner E, Berent J (2011) Assessment of bone age based on morphometric study of the upper end of the humerus. *J Forensic Sci* 56: 1416-1423.

## **ANNEXES**

## **Annexe 1**

**Age estimation by magnetic resonance imaging of the distal tibial epiphysis and the calcaneum.**

P. SAINT-MARTIN, C. REROLLE, F. DEDOIT, L. BOUILLEAU, H. ROUSSEAU, D.  
ROUGE, N. TELMON

International Journal of Legal Medicine 2013;127(5): 1023-1030.

## Age estimation by magnetic resonance imaging of the distal tibial epiphysis and the calcaneum

Pauline Saint-Martin · Camille Rérolle ·  
 Fabrice Dedouit · Loïc Bouilleau · Hervé Rousseau ·  
 Daniel Rougé · Norbert Telmon

Received: 19 November 2012 / Accepted: 26 February 2013 / Published online: 13 March 2013  
 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

**Abstract** Age estimation of living individuals is of critical importance in forensic practice, especially because of the increased migration in developed countries. Recently, the contribution of magnetic resonance imaging (MRI) to age evaluation has been studied, as it seems to be an efficient technique to analyze growth plate maturation and epiphyseal fusion. We developed an MRI staging system for the distal tibial epiphysis and the calcaneal epiphysis and evaluated its reliability on 180 MRI scans of the ankle and foot in a sample of individuals aged from 8 to 25 years old. For both bones, the degree of union between the metaphysis and epiphysis was classified in three stages. Intra- and inter-observer variabilities were good, showing the validity and reproducibility of the method. Our results were consistent with data in the literature indicating that both epiphyses mature earlier in females than in males. Bayesian predictive probabilities were used to assess

the validity of our method in estimating the age of an individual in relation to the 18-year threshold. MRI of the ankle and foot can be used in association with other methods to estimate age in living individuals.

**Keywords** Forensic anthropology · Age estimation · Ankle · Calcaneum · Transition analysis · Bayesian predictive probabilities

### Introduction

In recent years, the constant increase of migration flows has required developed countries to control population movements. In France, the number of illegal immigrants is estimated at between 200,000 and 400,000 individuals, and 56,000 individuals requested asylum in 2011. In consequence, medicolegal physicians are frequently called upon by the authorities to estimate the age of living person requesting asylum and claiming to be younger than 18 years old, the age at which they are liable to be returned to their country of origin. Forensic age estimation is also used to determine whether a suspected offender is subject to juvenile or adult criminal law. The relevant age thresholds for judicial and administrative proceedings lie between 14 and 21 years old in most countries [1]. In a forensic perspective, information on the developmental stage of epiphyseal union can be used to estimate age between 10 and 20 years. According to the guidelines published by the International Study Group on Forensic Age Diagnostics, age estimation in living individuals should consist of a physical examination, a radiograph of the left hand, and a dental examination [2]. When necessary, radiography or computed tomography of the clavicles may be performed [3–7]. Forensic age estimation is a subject of ongoing research and multiple publications [8–11]. Recently, non-invasive imaging

P. Saint-Martin · C. Rérolle · F. Dedouit · D. Rougé · N. Telmon  
 Laboratoire d'Anthropologie Moléculaire et Imagerie de Synthèse, AMIS UMR 5288 CNRS, 37 allées Jules Guesde,  
 31073 Toulouse Cedex, France

P. Saint-Martin (✉) · C. Rérolle  
 Insitut Médico-Légal, Hôpital Trousseau, CHRU Tours,  
 37044 Tours Cedex 9, France  
 e-mail: p.saint-martin@chu-tours.fr

F. Dedouit · D. Rougé · N. Telmon  
 Service de Médecine Légale, Centre Hospitalier Universitaire  
 Rangueil, Avenue du Professeur Jean Poulhès,  
 31403 Toulouse Cedex 4, France

L. Bouilleau  
 CHRU de Tours, Pôle d'Imagerie Médicale, 37044 Tours Cedex 9,  
 France

H. Rousseau  
 Service de Radiologie, Centre Hospitalier Universitaire Rangueil,  
 Avenue du Professeur Jean Poulhès,  
 31043 Toulouse Cedex 4, France

## **Annexe 2**

**Evaluation of an automatic method for forensic age estimation by magnetic resonance imaging of the distal tibial epiphysis – A preliminary study.**

P. SAINT-MARTIN, C. REROLLE, F. DEDOUIT, H. ROUSSEAU, D. ROUGE, N.

TELMON

Soumis à International Journal of Legal Medicine, 26 août 2013 (révisions demandées le 26 novembre 2013)

## Manuscript

[Click here to download Manuscript: Manuscript.doc](#)

[Click here to view linked References](#)

Evaluation of an automatic method for forensic age estimation by magnetic resonance imaging of the distal tibial epiphysis - A preliminary study

Pauline Saint-Martin<sup>a,b,\*</sup>, Camille Rérolle<sup>a,b</sup>, Fabrice Dedouit<sup>a,c</sup>, Hervé Rousseau<sup>d</sup>, Daniel Rouge<sup>a,c</sup>, Norbert Telmon<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire d'Anthropobiologie Moléculaire et Imagerie de Synthèse, AMIS UMR 5288 CNRS, 37 allées Jules Guesde, 31073 Toulouse Cedex, France

<sup>b</sup>CHRU de Tours, Institut Médico-Légal, Tours, France

<sup>c</sup>Service de Médecine Légale, Centre Hospitalier Universitaire Ranguel, Avenue du Professeur Jean Poulhès, 31403 Toulouse Cedex 4, France

<sup>d</sup>Service de Radiologie, Centre Hospitalier Universitaire Ranguel, Avenue du Professeur Jean Poulhès, 31043 Toulouse Cedex 4, France

\* Corresponding author at :

Institut Médico-Légal, Hôpital Trousseau, CHRU Tours, 37044 Tours Cedex 9, France

Tel : +33 2 47 47 75 55

Fax : +33 2 47 47 75 77

E-mail address : [p.saint-martin@chu-tours.fr](mailto:p.saint-martin@chu-tours.fr) (P. Saint-Martin)

**Abstract**

The contribution of Magnetic Resonance Imaging to forensic age estimation of living individuals is a subject of ongoing research. Several studies have focused on the wrist, clavicle, knee, and foot, and show interesting results regarding the 18-year threshold. Authors have developed various staging systems for epiphyseal growth plate maturation. However, the procedure is observer-dependent, and requires experience and a certain time-learning process. To reduce these pitfalls, we have developed an automatic method based on the analysis of variations of grey levels within the epiphyseal-metaphyseal junction. This method was tested on 160 MRI scans of the distal tibial epiphysis in a sample of individuals aged from 8 to 25 years old, after intensity non-uniformity correction of all images. Results showed that in our sample, 97.4% of males aged 18 years or more, and 89% of females younger than 18 years would be correctly classified using this method. To our knowledge, automatic methods for MRI analysis have not been used in the field of age estimation yet. Further studies should be performed to assess the validity of this procedure.

**Key words** Forensic Anthropology, Age estimation, Magnetic Resonance Imaging, Distal tibia, Inhomogeneity correction, Principal Component Analysis, Bootstrap

## **Apport de l'Imagerie par Résonance Magnétique dans la détermination de l'âge chez le sujet vivant.**

### **Résumé**

La détermination de l'âge est une problématique importante en anthropologie médico-légale. Chez le sujet vivant, elle peut être demandée dans certaines démarches juridiques ou administratives. L'objectif de ce travail était d'étudier l'apport de l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) dans la détermination de l'âge chez l'individu vivant. Dans la première partie, les principales méthodes d'estimation de l'âge osseux sont rappelées. Puis, nous avons étudié des IRM de cheville et de pied à partir d'une classification en trois stades de la fusion métaphyso-épiphysaire de l'extrémité distale du tibia et du calcaneum. Enfin, nous avons développé une méthode automatisée de lecture des images d'IRM de l'extrémité distale du tibia. Cette méthode était basée sur les variations de niveaux de gris au sein de la jonction métaphyso-épiphysaire, après une standardisation des images pour corriger les inhomogénéités d'intensité. Les résultats de notre étude suggèrent que le développement de méthodes automatisées de lecture des images IRM peut représenter une nouvelle thématique de recherche dans le domaine de la détermination de l'âge chez le sujet vivant.

### **Contribution of Magnetic Resonance Imaging to forensic age estimation of living individuals**

#### **Abstract**

Age estimation of living individuals has become an integral part of forensic practice. It is proceeded for people involved in criminal or asylum proceedings. The aim of this work was to study the contribution of Magnetic Resonance Imaging (MRI) in determining age of living subjects. In the first part of our work, the main age estimation methods are exposed. Then, we developed a MRI staging system for epiphyseal fusion of growth plate maturation of the distal tibial epiphysis and the calcaneum, and evaluated its reliability. Lastly, we proposed an automatic method based on the analysis of variations of grey levels within the epiphyseal-metaphyseal junction, after homogenisation of MR scans to correct artifactual intensity variation. Our results suggest that automated classification of MR scans could represent a new area of research in the field of age estimation in living individuals.

**Pauline SAINT-MARTIN**

**APPORT DE L'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE DANS LA DÉTERMINATION DE L'ÂGE CHEZ LE SUJET VIVANT**

**Directeurs de thèse :** Monsieur le Professeur Norbert TELMON  
Monsieur le Docteur Fabrice DEDOUIT

**Soutenance le 17 janvier 2014, Faculté de Médecine Rangueil, Toulouse**

**RÉSUMÉ**

La détermination de l'âge est une problématique importante en anthropologie médico-légale. Chez le sujet vivant, elle peut être demandée dans certaines démarches juridiques ou administratives. L'objectif de ce travail était d'étudier l'apport de l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) dans la détermination de l'âge chez l'individu vivant. Dans la première partie, les principales méthodes d'estimation de l'âge osseux sont rappelées. Puis, nous avons étudié des IRM de cheville et de pied à partir d'une classification en trois stades de la fusion métaphyso-épiphysaire de l'extrémité distale du tibia et du calcaneum. Enfin, nous avons développé une méthode automatisée de lecture des images d'IRM de l'extrémité distale du tibia. Cette méthode était basée sur les variations de niveaux de gris au sein de la jonction métaphyso-épiphysaire, après une standardisation des images pour corriger les inhomogénéités d'intensité. Les résultats de notre étude suggèrent que le développement de méthodes automatisées de lecture des images IRM peut représenter une nouvelle thématique de recherche dans le domaine de la détermination de l'âge chez le sujet vivant.

**MOTS CLÉS**

Anthropologie médico-légale, Détermination de l'âge, Imagerie par résonance magnétique, Fusion métaphyso-épiphysaire, Cheville

ED BSB : Anthropobiologie

Laboratoire d'Anthropobiologie AMIS, UMR 5288 CNRS, 37 allées Jules Guesde, 31 073  
Toulouse cedex 3